



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES
CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO
(GCR)”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

ALFONSO ESTRADA EDUARDO FRANCISCO

TUTOR:

ING. NESTOR ALBERTO ORRALA VERA, MS.c

LA LIBERTAD, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios, por guiar mi camino y darme fortaleza en cada desafío. A mis padres y a mi familia, por su amor incondicional y su fe inquebrantable en mí; este logro es tan suyo como mío.

A esa persona especial que estuvo a mi lado en cada paso: gracias por escucharme, motivarme y no dejarme caer. Tu presencia hizo que este camino fuera mucho más bonito. Te aprecio infinitamente.

Alfonso Estrada Eduardo F.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a los profesionales que contribuyeron con su experiencia.

De manera especial, agradezco al Ing. Néstor Orrala Vera, al Ing. Jonny Villao Borbor y al Ing. Richard Ramírez Palma, quienes con su conocimiento, paciencia y guía constante me acompañaron en cada etapa de este proceso hasta alcanzar con éxito esta meta.

A mis compañeros y amigos de la universidad, gracias por las risas, el trabajo en equipo y por hacer de este viaje una etapa inolvidable. Y a esos grandes amigos que la vida y mis pasatiempos me regalaron en otros países: gracias por estar presentes a pesar de la distancia. Su apoyo y palabras de aliento desde lejos significaron el mundo para mí.

Alfonso Estrada Eduardo F.

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Trabajo de Integración Curricular denominado “DISEÑOS DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)” elaborado por el Sr. ALFONSO ESTRADA EDUARDO FRANCISCO, egresado de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR



Ing. Néstor Orrala Vera, MSc.
DOCENTE TUTOR
C.I. 0925722290

La Libertad, a los 20 del mes de Julio del año 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Alfonso Estrada Eduardo Francisco

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)**” previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 20 del mes de Julio del año 2026

EL AUTOR



Alfonso Estrada Eduardo Francisco

CI. 2450318502

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alfonso Estrada Eduardo Francisco**

Autorizo a la Universidad Península de Santa Elena la publicación en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación denominado **“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 20 del mes de Julio del año 2026

EL AUTOR



Alfonso Estrada Eduardo Francisco
C.I. 2450318502

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado “DISEÑOS DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)”, elaborado por el estudiante ALFONSO ESTRADA EDUARDO FRANCISCO, egresado de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio, luego de haber cumplido con los requerimientos de valoración, el presente trabajo de titulación, se encuentra con un 6% de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el siguiente certificado.

Adjunto del reporte de análisis.

Atentamente,



Ing. Néstor Alberto Orrala Vera, MSc.
DOCENTE TUTOR
C.I. 0925722290

La Libertad, a los 20 del mes de Julio del año 2026



TESIS ALFONSO ESTRADA EDUARDO sin tablas compilatio

ID : 1262663b8780982c8d784a839482a3dec0ceab3e



6%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS ALFONSO ESTRADA EDUARDO sin tablas
compilatio.txt
Tamaño del archivo original : 168,56 kB
Número de palabras : 23.355

Depositante :
Fecha de depósito : 20 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 20 de julio de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, denominado **"DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)"**, del estudiante: **ALFONSO ESTRADA EDUARDO FRANCISCO**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo al interesado hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 16 de Julio del 2026


Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
N° DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, PhD.
DIRECTORA DE CARRERA



Ing. Jonny Villao Borbor, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Néstor Orrala Vera, MSc.
DOCENTE TUTOR



Ing. Richard Ramírez Palma, MSc.
DOCENTE GUÍA DE LA UIC

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	iv
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	v
AUTORIZACIÓN	vi
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	vii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA.....	ix
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	x
TABLA DE CONTENIDO.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABLAS	xix
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.2. ANTEDECENTES	6
1.2.1. Internacional	6
1.2.2. Nacional.....	9
1.3. HIPÓTESIS	12
1.3.1. Hipótesis General	12

1.3.2.	Hipótesis Específicas	13
1.4.	OBJETIVOS	13
1.4.1.	Objetivo General.....	13
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	14
1.5.	ALCANCE	14
1.6.	VARIABLES	16
1.6.1.	Variables Dependientes:	16
1.6.2.	Variable Independiente	16
CAPÍTULO II:		17
MARCO TEÓRICO		17
2.1.	CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	17
2.1.1.	Definición	17
2.1.2.	Características	18
2.1.3.	Clasificación de Agregados Pétreos.....	19
2.1.4.	Propiedades de los Agregados Empleados en una Mezcla Asfáltica	22
2.1.5.	Propiedades Físicas y Mecánicas de los Agregados Pétreos que Conforman una Mezcla Asfáltica	26
2.2.	CEMENTO ASFÁLTICO	31
2.2.1.	Definición	31
2.2.2.	Técnicas de Producción de Asfalto	33
2.2.3.	Propiedades Físicas y Químicas del Asfalto	34
2.2.4.	Tipos de Asfalto	36

2.2.5.	Aditivos	38
2.3.	CAUCHO	39
2.3.1.	Antecedentes	39
2.3.2.	Definición	40
2.3.3.	Caucho de neumáticos	41
2.3.4.	Tipos de Caucho Empleados en la Fabricación de Neumáticos	41
2.3.5.	Composición de los neumáticos	42
2.3.6.	Propiedades de los Neumáticos	44
2.3.7.	Características físicas y especificaciones técnicas del Grano de Caucho Reciclado (GCR)	46
2.4.	MÉTODO DE DISEÑO	47
2.4.1.	Diseño Hveem	47
2.4.2.	Diseño Superpave	48
2.4.3.	Diseño Marshall	48
2.5.	PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	49
2.5.1.	Estabilidad	49
2.5.2.	Durabilidad	51
2.5.3.	Impermeabilidad	52
2.5.4.	Trabajabilidad	53
2.5.5.	Flexibilidad	55
2.5.6.	Resistencia a la fatiga	55
2.5.7.	Resistencia al Deslizamiento	56

2.6. AFECTACIONES CAUSADAS AL AMBIENTE POR NEUMÁTICOS DESECHADOS	57
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	65
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (ADICIONANDO CAUCHO TRITURADO DE NEUMÁTICO RECICLADO).....	65
3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	65
3.1.1 Tipo	65
3.1.2 Nivel	65
3.2 ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	66
3.2.1 Enfoque	66
3.2.2 Diseño.....	66
3.3 POBLACIÓN	66
3.4 MUESTRA.....	67
3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	67
3.6 METODOLOGÍA DEL O.E.1.: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE INCORPORACIÓN DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS POR EL MÉTODO MARSHALL. .	71
3.6.1 Ensayos Físicos y Mecánicos de los Agregados Pétreos que Conforman una Mezcla Asfáltica	72
3.6.1.1 Análisis granulométrico de los Agregados Pétreos según la norma ASTM D 3515.....	72

3.6.1.2	Determinación de Gravedad Especifica y Absorción del Agregado Grueso (Norma ASTM C 127).....	73
3.6.1.3	Determinación de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino (Norma ASTM C 128)	74
3.7	METODOLOGÍA DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA MODIFICADA MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MARSHALL CON INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO.....	76
3.7.1	Diseño de mezcla asfáltica convencional utilizando el método Marshall.....	76
3.7.2	Características y Propiedades volumétricas en una Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)	77
3.8	METODOLOGÍA DEL O.E.3.: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MEZCLA MODIFICADA MEDIANTE LOS PARÁMETROS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DEL MÉTODO MARSHALL CON INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO.....	86
3.8.1	Especificaciones del método de diseño Marshall.....	86
3.8.2	Procedimiento de preparación de los agregados	87
3.8.3	Preparación de las briquetas para el Método Marshall	88
3.9	METODOLOGÍA DEL O.E.4.: ANALIZAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DERIVADOS DE LA INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA MATRIZ LEOPOLD.	93
3.9.1	Matriz de impacto ambiental (Matriz Leopold).....	93
CAPÍTULO IV		98

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANOS DE CAUCHO MEDIANTE EL PROCESO DE VÍA SECA ...	98
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEZCLA CONVENCIONAL Y LA MEZCLA MODIFICADA.....	102
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL (ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA).....	109
4.3.1 Descripción general del proceso estadístico	109
4.3.2 Formulación de hipótesis	113
4.3.3 Análisis de la estabilidad Marshall.....	114
4.3.4 Análisis de los vacíos de aire (Va)	116
4.3.5 Análisis de la gravedad específica Bulk	117
4.3.6 Análisis de los vacíos en el agregado mineral (VMA).....	118
4.3.7 Análisis de los vacíos llenos de asfalto (VFA).....	118
4.3.8 Análisis del flujo Marshall.....	119
CAPÍTULO V	124
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
5.1 CONCLUSIONES	124
5.2 RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ANEXOS	140
Anexo I	141
Anexo II.....	149

Anexo III	156
Anexo IV.....	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parte de la banda de neumáticos	44
Figura 2. Proceso de adición del Granulo de Caucho Reciclado (GCR) por vía húmeda	61
Figura 3. Proceso de adición del Granulo de Caucho Reciclado (GCR) por vía seca	62
Figura 4. Proceso productivo del reciclaje de caucho por molienda mecánica...	63
Figura 5. Esquema de una planta criogénica de procesamiento de desechos de caucho	64
Figura 6. Sección típica de una mezcla asfáltica.....	72
Figura 7. Parámetros de diseño volumétricos	84
Figura 8. Representación gráfica de la granulometría del caucho reciclado	99
Figura 9. Valores de la estabilidad con los diferentes porcentajes de caucho agregado a la mezcla asfáltica.	103
Figura 10. Valores de Vacíos de Aire en la mezcla modificada con los distintos porcentajes de caucho reciclado	104
Figura 11. Valores de la gravedad específica bulk con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla.....	105
Figura 12. Valores de VMA con diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica	106
Figura 13. Valores de VFA con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica.....	107
Figura 14. Valores del flujo con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica	108
Figura 15. Diagrama de flujo acerca del proceso de análisis ANOVA	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición de los agregados para una mezcla asfáltica</i>	29
Tabla 2. <i>Ensayos al Cemento Asfáltico</i>	32
Tabla 3 <i>Especificaciones técnicas del GCR</i>	46
Tabla 4. <i>Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento</i>	50
Tabla 5. <i>Causas y efectos de baja durabilidad</i>	52
Tabla 6. <i>Causas y efectos de mezclas permeables</i>	53
Tabla 7. <i>Causas y efectos de mezclas con mala trabajabilidad</i>	54
Tabla 8. <i>Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga</i>	56
Tabla 9. <i>Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento</i>	57
Tabla 10. <i>Cantidad de material para el ensayo Rice</i>	80
Tabla 11. <i>Criterios Marshall para VMA</i>	83
Tabla 12. <i>Criterio de diseño de la mezcla por el Método Marshall</i>	87
Tabla 13. <i>Dosificación de la mezcla asfáltica convencional</i>	88
Tabla 14. <i>Factor de corrección por altura de briqueta</i>	89
Tabla 15. <i>Comprobación del porcentaje óptimo de asfalto</i>	92
Tabla 16 <i>Valoración de impactos partiendo de la Magnitud e Importancia.</i>	93
Tabla 17 <i>Matriz Leopold para Mezcla asfáltica con adición parcial de caucho reciclado</i>	95
Tabla 18. <i>Granulometría del caucho reciclado</i>	99
Tabla 19. <i>Dosificación de mezcla asfáltica modificada con GCR</i>	101
Tabla 20. <i>Parámetros utilizados y finalidad</i>	110

Tabla 21. <i>ANOVA de la estabilidad Marshall según el porcentaje de GCR ...</i>	114
Tabla 22. <i>Comparaciones múltiples de Tukey para la estabilidad Marshall ...</i>	115
Tabla 23. <i>ANOVA de los vacíos de aire según el porcentaje de GCR.....</i>	116
Tabla 24. <i>ANOVA de la gravedad específica Bulk según el porcentaje de GCR</i>	117
Tabla 25. <i>ANOVA del VMA según el porcentaje de GCR</i>	118
Tabla 26. <i>ANOVA del VFA según el porcentaje de GCR</i>	119
Tabla 27. <i>ANOVA del flujo Marshall según el porcentaje de GCR</i>	120
Tabla 28. <i>Comparaciones múltiples de Tukey para el flujo Marshall.....</i>	121

“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)”

Autor: Alfonso Estrada Eduardo Francisco

Tutor: Ing. Nestor Alberto Orrala Vera, MS.c

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles mediante la incorporación parcial de caucho reciclado, con el fin de evaluar su influencia en las propiedades mecánicas y su contribución a la sostenibilidad ambiental. El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, empleando el método Marshall para determinar la estabilidad, flujo, densidad y vacíos de las mezclas. Se elaboraron briquetas con porcentajes de caucho reciclado de 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 % y 3 %, utilizando el proceso de vía seca y comparándolas con una mezcla patrón convencional. Los resultados demostraron que las dosificaciones de 1 % y 1.5 % de caucho cumplen con los parámetros normativos, proporcionando una adecuada estabilidad (2631,94 lb), un flujo de 11 (0,01”), y vacíos del 4,15 %, mejorando la flexibilidad y resistencia a la deformación. Se concluye que el caucho reciclado optimiza el comportamiento mecánico de la mezcla y favorece la gestión sostenible de los neumáticos fuera de uso, representando una alternativa técnica y ambientalmente viable para pavimentos flexibles.

Palabras clave: mezcla asfáltica, caucho reciclado, sostenibilidad, método Marshall, pavimentos flexibles.

“ASPHALT MIXTURE DESIGN FOR FLEXIBLE PAVEMENTS WITH PARTIAL ADDITION OF RECYCLED RUBBER GRAINS (GCR)”

Author: Alfonso Estrada Eduardo Francisco

Tutor: Ing. Nestor Alberto Orrala Vera, M.Sc.

ABSTRACT

This research aimed to design an asphalt mixture for flexible pavements by partially incorporating recycled rubber, in order to assess its influence on mechanical properties and its contribution to environmental sustainability. The study was developed at the Soil, Concrete, and Asphalt Laboratory of the Santa Elena Peninsula State University, using the Marshall method to determine the stability, flow, density, and voids of the mixtures. Specimens were made with recycled rubber percentages of 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, and 3%, using the dry process and comparing them with a conventional standard mixture. The results showed that the 1% and 1.5% rubber dosages met the standard specifications, providing adequate stability (2631.94 lb), a flow of 11 (0.01 in), and voids of 4.15%, improving flexibility and resistance to deformation. It is concluded that recycled rubber optimizes the mechanical behavior of the mixture and favors the sustainable management of end-of-life tires, representing a technically and environmentally viable alternative for flexible pavements.

Keywords: asphalt mixture, recycled rubber, sustainability, Marshall method, flexible pavements.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Una actividad que se considera representativa en la Ingeniería Civil es la construcción de pavimentos, puesto que tiene un impacto significativo en el desarrollo social y económico de los países. A pesar de ello, el desarrollo de las obras demanda la utilización de grandes volúmenes de recursos no renovables, como por ejemplo agregados pétreos y asfalto, generando de esta forma preocupación para la sostenibilidad ambiental de este sector. Es así como se presenta la necesidad de indagar acerca de alternativas que optimicen los materiales convencionales, reduzcan el impacto ecológico y a la misma vez puedan mantener y mejorar la estructura de las vías.

Actualmente, la gestión inadecuada de los neumáticos fuera de uso es una problemática que cada día se incrementa y afecta a la naturaleza. A nivel mundial, millones de llantas son desechadas anualmente, y gran parte de ellas termina acumulándose en botaderos o espacios abiertos, provocando consecuencias ambientales graves, como la contaminación del suelo, aire y agua. Por su parte, en Ecuador, esta situación se empeora porque no hay infraestructura adecuada para destinar el reciclaje y también por el incremento de la demanda vehicular que existe, lo que va generando aún más residuos.

Incorporar el caucho triturado en pavimentos flexibles es una alternativa para la disposición final de los neumáticos y además contribuye al mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas. Hay estudios internacionales que demuestran que la utilización del grano de caucho reciclado (GCR) aumenta la elasticidad, durabilidad y resistencia al ahuellamiento, reduciendo el agrietamiento por fatiga y prolongando la vida útil del pavimento. No obstante, la implementación de esta técnica necesita de un análisis detallado de las condiciones locales, materiales disponibles y procedimientos constructivos, con el fin de garantizar su eficacia y viabilidad económica.

En efecto, la presente investigación se orienta al diseño de una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles mediante la adición parcial de caucho reciclado, con el propósito de evaluar su influencia en las propiedades mecánicas y en la sostenibilidad ambiental del proceso constructivo. El estudio se desarrolla en la provincia de Santa Elena, cantón La Libertad, y lo que se busca es generar información técnica que contribuya al desarrollo de prácticas constructivas sostenibles dentro del ámbito vial ecuatoriano.

En este trabajo se presentan fundamentos teóricos, ensayos de laboratorio y análisis comparativos, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de caucho que proporcione una mezcla equilibrada en términos de resistencia, estabilidad y durabilidad. De la misma manera, pretende promover una cultura de aprovechamiento de residuos en la ingeniería civil, alineada con los principios de economía circular y desarrollo sostenible. Con ello, se espera que los resultados obtenidos sean una referencia para futuras investigaciones y una base para la posible implementación de este tipo de mezclas en proyectos viales a nivel nacional.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La carpeta asfáltica, que constituye la capa superior del pavimento flexible, está formada por una mezcla de agregados pétreos y asfalto, diseñada para ofrecer una superficie duradera y resistente al tránsito vehicular. A nivel mundial, menos del 10% de los neumáticos fuera de uso se reutilizan en aplicaciones geotécnicas, como rellenos o estabilización de suelos. En cambio, cerca del 40% de estos neumáticos se reciclan como combustible derivado, aprovechando su alto poder calorífico (Flores et al., 2022).

En Ecuador, 2'400.000 neumáticos se desechan anualmente, y gran parte de estos no son depositados correctamente, ya que terminan en carreteras, terrenos baldíos o cuerpos de agua, alterando, negativamente, los aspectos medio ambientales y paisajísticos de dichos espacios y de sus comunidades aledañas. Esta problemática se ve reflejada en las cifras del Anuario de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, donde se reporta que durante el año 2018 se ha importado alrededor de 3797 miles de llantas, de las cuales el 61% correspondió al transporte liviano, 26% a motocicletas, 12% a buses y camiones, mientras que el restante es utilizado para construcción industrial, actividades agrícolas y otros. (Peñaloza y Cisneros, 2021). Actualmente, para eliminar estos desechos se recurre a diversos métodos de degradación, los cuales incluyen técnicas tales como: la termólisis, la tritución mecánica o criogénica y la incineración (Orellana y Solano, 2019).

Ubidia (2019) determina que para el año 2020, con un crecimiento vehicular estimado del 6% anual, se proyecta que habrá alrededor de 200,000 vehículos en circulación. Considerando que la vida útil promedio de una llanta es de cinco años, en 2018 se estima aproximadamente 635,000 llantas en desuso, cifra que alcanzará cerca de 760,000 en 2020. De estas, solo el 30% serán reutilizadas o reencauchadas, mientras que el 70% restante será destinado a botaderos municipales.

Por otro lado, los neumáticos reciclados en la India representan aproximadamente entre el 6% y el 7% del total a nivel mundial. Con un crecimiento anual del 12% en la industria de neumáticos del país, también aumentan los residuos generados. Aunque la India ha estado reutilizando neumáticos desechados durante las últimas

cuatro décadas, se estima que el 60% de estos aún se eliminan en vertederos ilegales (Kumar et al., 2020).

La considerable necesidad planteada implica la recopilación de estudios adicionales para verificar con precisión los beneficios del caucho como material de construcción y su capacidad para optimizar procesos en el campo de la ingeniería (Soto, 2023).

El reciclaje de pavimentos es fundamental por su capacidad para evitar la generación de residuos (Abarca et al., 2019), optimizar el uso de materiales de construcción, disminuir las emisiones contaminantes y ofrecer ventajas económicas. Según Xiao et al., (2018) esta tecnología promueve un desarrollo más sostenible en el sector de la construcción.

En la actualidad, la sostenibilidad ambiental ha cobrado gran relevancia en el diseño de infraestructuras viales, con una creciente demanda de soluciones que minimicen el impacto ambiental y reduzcan la generación de residuos (Xiao et al., 2018). En este contexto, el uso de materiales reciclados en pavimentos asfálticos ha despertado interés, aunque aún es necesario avanzar en la aplicación de técnicas de reutilización y reciclaje de residuos (Villegas et al., 2018), así como en el desarrollo de metodologías efectivas que aseguren la calidad y durabilidad del pavimento reciclado (Perea, 2024).

En Ecuador, la baja calidad de las mezclas asfálticas impacta negativamente en la construcción de pavimentos, los cuales requieren especificaciones más estrictas para soportar la carga esperada. Emplear caucho reciclado en estas mezclas es una posible solución para optimizar la calidad de los pavimentos. Sin embargo, este enfoque tiene que superar varios retos operativos y técnicos. Es fundamental que el diseño de mezclas asfálticas con adición parcial de caucho reciclado considere aspectos clave, como la compatibilidad del caucho con el asfalto, los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, y su efecto en el desempeño a largo plazo del pavimento.

El proyecto en análisis se localiza en la provincia de Santa Elena, cantón La Libertad, lo que hace crucial la utilización del polvo de caucho como base para

desarrollar un nuevo diseño de pavimento flexible. Pese a los beneficios potenciales, el estudio y la implementación de estas mezclas han mostrado un crecimiento limitado y carecen de información detallada, lo que resalta la necesidad de investigar más a fondo los desafíos asociados con el diseño de mezclas asfálticas que incorporen caucho reciclado en pavimentos flexibles. Por ello, este estudio busca explorar en profundidad estas cuestiones y proponer ideas para futuras investigaciones. El objetivo principal es analizar el diseño de mezclas asfálticas que incluyan caucho reciclado, abordando tanto los beneficios ambientales como los técnicos, y asegurando a la vez la calidad y durabilidad necesarios para pavimentos flexibles.

El análisis del contexto nacional e internacional deja en claro que incluir granos de caucho reciclado en mezclas asfálticas es una opción con la capacidad suficiente para optimizar el rendimiento de los pavimentos y, al mismo tiempo, ayudar a aprovechar neumáticos fuera de uso. Sin embargo, los resultados reportados por investigaciones previas muestran diferencias en cuanto a los porcentajes óptimos de incorporación, debido a que estos dependen de factores como las características del cemento asfáltico, la granulometría de los agregados, el tamaño de las partículas de caucho, el método de incorporación y las condiciones propias de cada región.

En el contexto ecuatoriano, y particularmente para los materiales disponibles en la provincia de Santa Elena, aún existe información experimental limitada que permita establecer cuál es el porcentaje de incorporación de granos de caucho reciclado que garantice un adecuado comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla asfáltica conforme a los criterios establecidos por el método Marshall. Esta brecha de conocimiento dificulta la adopción de este tipo de mezclas en proyectos viales, debido a la ausencia de criterios técnicos adaptados a las condiciones locales.

En consecuencia, la investigación plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es el efecto de la incorporación parcial de granos de caucho reciclado sobre las propiedades mecánicas y volumétricas de una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles, evaluada mediante el método Marshall, utilizando materiales disponibles en la provincia de Santa Elena?

1.2. ANTEDECENTES

A nivel mundial, la tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas ha sido objeto de extensos estudios. Los centros de investigación se han enfocado en reducir los problemas presentes en las estructuras asfálticas mediante la incorporación de diferentes modificadores en las mezclas, con el fin de mejorar sus propiedades químicas, mecánicas y reológicas. Entre estos modificadores, los polímeros destacan por su capacidad para mejorar las características de las mezclas. En algunos países, el deterioro y la reducción de la vida útil del pavimento flexible, provocado por factores internos y externos, es un problema recurrente, ya que afecta sus propiedades mecánicas y físicas. La adición de polímeros busca optimizar el desempeño de las mezclas convencionales cuando se enfrentan a condiciones de carga y de medio ambiente (Reyes, et al., 2014).

A lo largo del tiempo, las carreteras se han convertido en un factor clave para el desarrollo de los países en diversas regiones del mundo, ya que su construcción impulsa el crecimiento poblacional y mejora la comunicación terrestre entre las comunidades. Debido a su uso constante durante toda su vida útil, se requiere una mayor exigencia en la aplicación de normas. Para cumplir con estos estándares, es fundamental el desarrollo de aditivos, como las emulsiones asfálticas, que mejoren la resistencia del asfalto y aumenten su durabilidad frente a las cargas de tráfico que soporta (Wulf, 2008).

1.2.1. Internacional

En su investigación titulada *Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico*, Vega (2016) tuvo como objetivo determinar la viabilidad del uso de neumáticos reciclados como componentes en pavimentos asfálticos. Para diseñar las mezclas se empleó el Método Marshall. Para la mezcla asfalto-caucho por el proceso seco se añadió el 1, 2 y 3% de polvo de caucho con 15 muestras para cada porcentaje de caucho añadido a la mezcla. Para evaluar las mezclas asfálticas fabricadas se efectuaron las pruebas de gravedad específica máxima teórica, densidad de la mezcla asfáltica (método RICE), densidad Bulk (peso unitario),

porcentaje de vacíos de los agregados compactados. De los resultados obtenidos se puede observar que existe una mejor estabilidad en la mezcla modificada con el 7% de cemento asfáltico que la normal y un mayor flujo con 6, 5 y 7% con lo cual mejora la durabilidad y las deformaciones por las cargas producidas por el tráfico. El autor concluyó que la incorporación de polvo de caucho proveniente de llantas recicladas en las mezclas asfálticas reduce significativamente la contaminación ambiental, ya que mitiga los problemas asociados con su largo tiempo de degradación o sus métodos de desecho. La fabricación de pavimentos ecológicos no solo ofrece una relación favorable en términos de costo-beneficio, sino que también contribuye de manera importante al cuidado del medio ambiente al reutilizar las llantas usadas.

En su trabajo de investigación titulado: *Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos*, Rodríguez (2016), se propusieron incorporar el caucho a la mezcla usando dos métodos, vía seca y vía húmeda. La vía seca consiste en la mezcla directa del caucho con los agregados, antes de incorporar el ligante al mezclador. En general se agregan entre un 1% y 3% con respecto a la masa del agregado. Según el autor concluyó que, además de los beneficios ecológicos derivados de la adición de caucho al asfalto, existen importantes mejoras en el desempeño de mezcla asfáltica. Entre ellas, se destaca que el caucho aumenta el volumen del asfalto, lo que permite recubrir los agregados con películas más gruesas sin que se produzca exudación. Sin embargo, existen limitaciones dentro del artículo como las escasas fuentes de polvo de caucho, además de que se requiere de altas temperaturas de mezclado y compactación, como aumenta la viscosidad del asfalto dificulta la trabajabilidad y es probable que se emitan olores y emisiones durante la producción y colocación.

En su investigación titulada: *Uso del caucho en el diseño del pavimento flexible en la avenida Los Algarrobos, tramo avenida Las Amapolas- avenida Gustavo Mohme, Veintiséis de Octubre, Piura – 2018*, Cerda y Pintado (2018) se propusieron como objetivo principal diseñar un pavimento flexible con la adición de caucho. La metodología utilizada incluyó la incorporación de caucho en proporciones de 8%, 12%, 16% y 20% al cemento asfáltico con una penetración de

60/70. El pavimento fue diseñado para una vida útil de 10 años, y los valores de CBR obtenidos para las tres calicatas fueron 25.50%, 16% y 4.50%. Los porcentajes de vacíos fueron 4.4% para el pavimento flexible convencional y de 4% para el pavimento con caucho. Se concluyó que el porcentaje óptimo de caucho es del 12%, mientras que el CBR alcanzado fue del 16% en calicatas con buena condición. Los espesores de diseño resultantes fueron de 1.97” para la carpeta, 11.81” para la base y 11.81” para la subbase granular.

En su investigación titulada: *Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles* Carrizales (2020), el objetivo principal fue modificar las mezclas asfálticas utilizando llantas recicladas. La metodología incluyó la preparación de muestras convencionales y mezclas con adiciones de caucho reciclado en proporciones del 3%, 5%, 7% y 9%, utilizando cemento asfáltico 120/150. Los resultados indicaron que el mejor comportamiento se logró con una adición del 3% de caucho reciclado. Sin embargo, las mezclas asfálticas modificadas no mostraron mejoras significativas en el comportamiento físico-mecánico y no cumplieron con los valores mínimos establecidos por el MTC. El autor concluyó que la incorporación de caucho reciclado requiere un adecuado control del diseño de mezcla, ya que porcentajes inadecuados pueden afectar negativamente el comportamiento del pavimento. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación porque demuestra que la incorporación de caucho no garantiza por sí sola una mejora del desempeño, sino que es indispensable determinar experimentalmente la dosificación óptima para cada combinación de materiales y condiciones de diseño.

Investigaciones internacionales respaldan los beneficios de la incorporación del grano de caucho reciclado (GCR) en el diseño de mezclas asfálticas. Díaz y Castro (2017), en su tesis titulada: *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*, se centraron en revisar la tecnología de incorporación del GCR en las mezclas asfálticas. Su estudio definió los factores que afectan el comportamiento de la mezcla y evaluó los beneficios del caucho en el diseño de pavimentos. Concluyeron que la granulometría, la adición de aditivos, la

temperatura de reacción del asfalto y el GCR son factores determinantes en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica. Además, la implementación del GCR ayuda a reducir problemas de ahuellamiento y mejora la durabilidad de la mezcla en comparación con las mezclas convencionales, disminuyendo el coste de mantenimiento y prolongando la vida útil de los pavimentos.

1.2.2. Nacional

En Ecuador, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) realizó en 2014 pruebas preliminares utilizando tanto la vía seca como la vía húmeda, acompañadas de ensayos reológicos para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho. En 2015, se implementó un tramo de prueba con caucho añadido por la vía húmeda en dos carriles, entre las abscisas 31+135 y 31+410 del tramo Pifo-Papallacta. Además, el polvo de caucho se empleó no solo en las pruebas de mezclas asfálticas, sino también en la preparación de material para sellos asfálticos, utilizados en el sellado de fisuras. No obstante, los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño, en general, no fueron satisfactorios (Gordillo et al., 2015).

Sarabia Lescano (2023), en la Universidad Técnica de Ambato, desarrolló la investigación titulada *“Análisis comparativo de la mezcla asfáltica modificada con la adición de polímeros termoplásticos, caucho de llanta reciclado y pavimento asfáltico tradicional para el mantenimiento vial en fallas piel de cocodrilo”*. El estudio tuvo como finalidad comparar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional y dos mezclas modificadas, una con polímero termoplástico y otra con grano de caucho reciclado (GCR), empleando el método Marshall (ASTM D1559) para el diseño de la mezcla. Inicialmente se determinó un contenido óptimo de cemento asfáltico mediante briquetas convencionales elaboradas con 5.5, 6.0, 6.5, y 7.0% de asfalto, obteniéndose como valor óptimo el 6,5%. Posteriormente se fabricaron mezclas modificadas incorporando 2, 3, 4 y 5% de caucho reciclado, en reemplazo parcial del agregado de 3/8”, además de mezclas con polímero termoplástico en proporciones de 5, 10, 15 y 20%. Para cada dosificación se elaboran tres briquetas, alcanzando un total de 36 especímenes para el desarrollo experimental. Como parte de la caracterización de los materiales se

realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos, desgaste Los Ángeles, porcentaje de caras fracturadas, equivalente de arena y propiedades del cemento asfáltico. En las mezclas asfálticas se evaluaron la estabilidad Marshall, flujo, densidad Bulk, gravedad específica teórica máxima (RICE), porcentaje de vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA), parámetros que permitieron comparar el desempeño de las mezclas convencionales y modificadas

Los resultados evidenciaron que la incorporación de caucho reciclado mejoró el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica respecto al pavimento convencional, incrementando su capacidad de deformación y su durabilidad esperada. El análisis permitió establecer que el contenido óptimo de caucho fue de aproximadamente 5,7%, ya que con esta proporción se obtuvo el mejor equilibrio entre estabilidad, flujo y parámetros volumétricos exigidos por el diseño Marshall. Los autores concluyeron que porcentajes superiores o diferentes al óptimo modifican el equilibrio entre el ligante y los agregados, afectando las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla, por lo que dejan de satisfacer simultáneamente los criterios establecidos por la normativa para el diseño de mezclas asfálticas. Asimismo, señalaron que el empleo de caucho reciclado representa una alternativa técnica y ambientalmente favorable, al contribuir con el aprovechamiento de neumáticos fuera de uso y disminuir el consumo de recursos naturales.

Cabrera Reyes y Galarza Prado (2024), en la Universidad de Cuenca, desarrollaron la investigación titulada *Análisis de desempeño del uso de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para mejorar la resistencia a la fatiga*, con el propósito de evaluar el comportamiento físico, mecánico y ambiental de una mezcla asfáltica en caliente modificada con grano de caucho reciclado (GCR) incorporado por vía húmeda, comparándola con una mezcla convencional. Para el diseño de la mezcla utilizaron el método Marshall, siguiendo las especificaciones ASTM, INEN y NEVI-12, manteniendo un contenido fijo de 6,7% de cemento asfáltico y evaluando porcentajes de 0%, 10%, 15% y 20% de GCR. Se elaboraron 48 briquetas, distribuidas en cuatro dosificaciones (12 por cada porcentaje de caucho);

de ellas, 12 se destinaron al ensayo Marshall, 12 a ensayos de carga y descarga cíclica y 24 al ensayo de tracción indirecta (IDT) para analizar el comportamiento frente a la fatiga. Además, previamente se efectuó la caracterización de los materiales mediante ensayos de granulometría, abrasión Los Ángeles, gravedad específica y absorción de agregados, así como la caracterización del cemento asfáltico AC-20 y del grano de caucho reciclado.

Los principales parámetros evaluados comprendieron la estabilidad y el flujo Marshall, además del coeficiente de recuperación elástica, deformación permanente, esfuerzo de daño, energía recuperada, coeficiente de Poisson, módulo elástico y resistencia a la tracción indirecta; con el objetivo de determinar la resistencia a la fatiga de las mezclas modificadas. Los resultados demostraron que la incorporación de 15% de caucho reciclado proporcionó el mejor desempeño mecánico, debido a que presentó una mayor capacidad de recuperación elástica, menor deformación permanente y un comportamiento más favorable frente a cargas repetidas, manteniendo simultáneamente valores aceptables de estabilidad y flujo conforme a los criterios de diseño Marshall. En contraste, la mezcla con 20% de GCR mostró una disminución importante de la estabilidad y de la resistencia a la tracción indirecta, llegando incluso a no satisfacer el valor mínimo de estabilidad exigido por la normativa para pavimentos de tráfico pesado, situación atribuida al exceso de caucho incorporado, el cual redujo la rigidez y la capacidad portante de la mezcla. Por esta razón, los autores seleccionaron el 15% de GCR como la dosificación óptima para realizar posteriormente el análisis de ciclo de vida mediante la metodología TRACI 2.1, concluyendo que esta mezcla no solo mejora el desempeño frente a la fatiga respecto a la mezcla convencional, sino que también reduce los impactos ambientales asociados al aprovechamiento de neumáticos fuera de uso.

Como limitaciones, los autores señalaron que la investigación se desarrolló bajo condiciones de laboratorio y que en el contexto ecuatoriano aún existe una limitada disponibilidad de equipos especializados para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas frente a fenómenos como la fatiga, la susceptibilidad térmica y la durabilidad a largo plazo. Asimismo, indicaron la

ausencia de una normativa nacional específica que regule el diseño, evaluación y control de calidad de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado, lo que dificulta su implementación generalizada en proyectos viales del país.

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian que la incorporación de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas constituye una alternativa viable para mejorar determinadas propiedades mecánicas y contribuir al aprovechamiento de neumáticos fuera de uso. No obstante, los porcentajes óptimos de incorporación reportados presentan una marcada variabilidad, con valores que oscilan entre el 3% y el 15%, dependiendo del tipo de mezcla, la vía de incorporación del caucho, las características de los materiales pétreos, el contenido de ligante asfáltico y las condiciones de diseño empleadas. Asimismo, mientras algunas investigaciones reportan mejoras en parámetros como la estabilidad, la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, otras evidencian pérdidas de desempeño cuando se incorporan porcentajes elevados de caucho. En el contexto ecuatoriano, aunque existen estudios recientes sobre mezclas modificadas con grano de caucho reciclado, todavía son limitadas las investigaciones enfocadas en determinar una dosificación óptima para materiales y condiciones locales, mediante la evaluación integral de las propiedades físicas y mecánicas exigidas por el método Marshall. Esta brecha de conocimiento justifica el desarrollo de la presente investigación, orientada a establecer el porcentaje de incorporación de grano de caucho reciclado que permita mejorar el desempeño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles, garantizando el cumplimiento de los requisitos técnicos y promoviendo una alternativa ambientalmente sostenible

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General

La incorporación parcial de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles mejorará el desempeño físico y mecánico de la mezcla, evidenciado mediante el incremento de la estabilidad y el cumplimiento de los parámetros de flujo, densidad, vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA), conforme a los criterios del método

Marshall, contribuyendo además al aprovechamiento sostenible de neumáticos fuera de uso.

1.3.2. Hipótesis Específicas

- H. E1.: Entre los porcentajes de incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) evaluados, existirá una dosificación que cumpla de manera conjunta con los parámetros establecidos por el método Marshall, permitiendo determinar un porcentaje óptimo de incorporación para la mezcla asfáltica modificada.
- H. E2.: La incorporación parcial de Grano de Caucho Reciclado (GCR) modificará las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, evidenciándose variaciones en los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA) y gravedad específica Bulk en función del porcentaje de GCR incorporado.
- H. E3.: El porcentaje de incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) influirá en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica, generando variaciones en los parámetros de estabilidad y flujo Marshall, manteniéndose las dosificaciones adecuadas dentro de los criterios establecidos para el diseño.
- H. E4.: La incorporación parcial de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en mezclas asfálticas contribuirá favorablemente a la sostenibilidad ambiental mediante el aprovechamiento de neumáticos fuera de uso, lo cual se evidenciará a través de la identificación y valoración de los impactos ambientales mediante la Matriz de Leopold.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles mediante la incorporación parcial de caucho reciclado, utilizando el método Marshall para evaluar el

comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla, así como su contribución al aprovechamiento sostenible de neumáticos fuera de uso.

1.4.2. Objetivos Específicos

- OE1: Determinar el porcentaje óptimo de incorporación de granos de caucho reciclado mediante el análisis de los parámetros establecidos por el método Marshall.
- OE2: Evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica modificada mediante la determinación de los parámetros Marshall (vacíos de aire, VMA, VFA y gravedad específica Bulk) con incorporación parcial de granos de caucho reciclado.
- OE3: Evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada mediante los parámetros de estabilidad y flujo del Método Marshall con incorporación parcial de granos de caucho reciclado.
- OE4: Analizar los impactos ambientales derivados de la incorporación parcial de granos de caucho reciclado en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles mediante la aplicación de la Matriz de Leopold, valorando la magnitud e importancia de los impactos para determinar su contribución a la sostenibilidad ambiental.

1.5. ALCANCE

En cuanto a los alcances de la investigación, si se confirma que la adición de caucho reciclado mejora las propiedades de las mezclas asfálticas, lo ideal sería implementar un tramo de prueba para evaluar su rendimiento y comprobar la viabilidad técnica y económica de emplear este tipo de mezclas en la capa de rodadura de pavimentos flexibles. Sin embargo, este trabajo de titulación se limitará a analizar en laboratorio los efectos de la incorporación de caucho utilizando el método propuesto.

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque experimental y comprenderá el diseño y evaluación de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos flexibles con incorporación parcial de granos de caucho reciclado (GCR), utilizando materiales pétreos y cemento asfáltico que cumplan las especificaciones técnicas vigentes. El estudio se llevará a cabo mediante el método Marshall, con el propósito de determinar el efecto de diferentes porcentajes de GCR sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica e identificar la dosificación que proporcione el mejor desempeño físico y mecánico.

Las variables evaluadas corresponderán al porcentaje de incorporación de grano de caucho reciclado como variable independiente y a las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla como variables dependientes, considerando parámetros como estabilidad, flujo, densidad, vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA), de acuerdo con los criterios establecidos por el método Marshall. Complementariamente, se realizará una evaluación de los impactos ambientales asociados a la incorporación del GCR mediante la aplicación de la matriz de Leopold, con el fin de valorar su contribución desde una perspectiva de sostenibilidad.

La investigación se desarrollará a escala de laboratorio y sus resultados estarán limitados a las características de los materiales empleados, a las dosificaciones evaluadas y a las condiciones experimentales establecidas durante el diseño de la mezcla. En consecuencia, el estudio no comprenderá la construcción de tramos piloto, el monitoreo del comportamiento del pavimento en servicio, la evaluación del desempeño a largo plazo bajo condiciones reales de tránsito y clima, ni el análisis económico detallado de la implementación de esta tecnología en proyectos viales. Por tanto, las conclusiones obtenidas serán aplicables únicamente a las condiciones y materiales considerados en la presente investigación, constituyendo una base técnica para futuras investigaciones y aplicaciones en pavimentos flexibles.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables Dependientes:

Propiedades físicas, volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con granos de caucho reciclado (GCR), evaluadas mediante el método Marshall.

1.6.2. Variable Independiente

Porcentaje de incorporación de granos de caucho reciclado (GCR) en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles, expresado como porcentaje de sustitución del material establecido en el diseño experimental.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

2.1.1. Definición

De acuerdo a Salinas (2019) los agregados son aquellas partículas inorgánicas añadidas intencionalmente a la mezcla; al distribuirse de forma homogénea en la pasta cementante y endurecerse, actúan como la estructura que le otorga al hormigón sus propiedades características, permitiendo alcanzar las resistencias mecánicas y las condiciones hidráulicas requeridas; además, constituyen alrededor del 75 % del volumen total de la muestra.

Los materiales de relleno constituyen la fracción más fina de los agregados minerales y desempeñan un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas. De acuerdo con Meza (2019), estos materiales deben pasar el tamiz de 0,075 mm, ya que su reducido tamaño les permite ocupar los espacios vacíos existentes entre las partículas de agregado, favoreciendo una estructura más compacta y estable. Asimismo, Padilla (2021) señala que el material incrementa la rigidez de la mezcla, mejora la cohesión entre el ligante asfáltico y los agregados, y contribuye a aumentar la resistencia frente al ahuellamiento, al agrietamiento y a la acción del agua. En conjunto, estas características permiten obtener mezclas con un mejor desempeño estructural y una mayor durabilidad.

En el contexto de la presente investigación, la adecuada proporción de material de relleno adquiere especial importancia debido a que la incorporación de granos de caucho reciclado modifica la estructura interna de la mezcla asfáltica. Un contenido apropiado de material de relleno favorece el llenado de los vacíos generados entre los agregados y contribuye a mantener la cohesión del sistema, permitiendo evaluar de forma más confiable el efecto que produce el GCR sobre parámetros como la estabilidad Marshall, el flujo y las propiedades volumétricas de la mezcla. En este sentido, los resultados obtenidos podrán compararse con investigaciones previas que han demostrado que el desempeño de las mezclas modificadas depende no solo

del porcentaje de caucho incorporado, sino también de la interacción entre el ligante, los agregados y el material de relleno.

2.1.2. Características

Entre las principales características físicas de los agregados que condicionan el comportamiento y desempeño de la mezcla asfáltica Gálvez (2016), se destacan las siguientes:

Granulometría

La granulometría es una de las propiedades más importantes de los agregados porque determina la distribución de tamaños de las partículas y, en consecuencia, el grado de compactación que pueda alcanzar la mezcla asfáltica.

Una adecuada gradación favorece el contacto entre los agregados, reduce los vacíos internos y mejora la estabilidad de la mezcla. En la presente investigación, esta propiedad adquiere especial relevancia debido a que la incorporación de granos de caucho reciclado puede modificar la estructura interna de la mezcla; por ello, se empleó una granulometría previamente establecida conforme a las especificaciones técnicas para garantizar que las variaciones observadas en los parámetros Marshall fueran atribuibles al porcentaje de GCR y no a cambios en la distribución granulométrica de los agregados.

Gravedad específica y densidad

La gravedad específica permite conocer la relación entre la masa y el volumen de los agregados, constituyendo un parámetro indispensable para el diseño Marshall, ya que interviene en el cálculo de la densidad aparente de la mezcla y en la determinación de las propiedades volumétricas como los vacíos de aire (V_a), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA). En esta investigación, la determinación de la gravedad específica permitió realizar los cálculos volumétricos necesarios para evaluar el efecto de la incorporación parcial de GCR sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Absorción

La absorción refleja la capacidad de los agregados para retener agua o ligante asfáltico en sus poros. Cuando esta propiedad presenta valores elevados, parte del cemento asfáltico es absorbido por el agregado, disminuyendo la cantidad efectiva de ligante disponible para recubrir las partículas minerales. En la presente investigación, conocer la absorción de los agregados fue fundamental para asegurar una adecuada dosificación del cemento asfáltico y evitar que las variaciones en el contenido efectivo de ligante afectaran la evaluación del comportamiento de las mezclas modificadas con GCR.

Forma y textura superficial

La forma y la textura superficial de los agregados influyen directamente en el entrelazamiento mecánico entre las partículas y en la adherencia con el ligante asfáltico. Los agregados angulares y de superficie rugosa favorecen una mayor estabilidad y resistencia al desplazamiento interno de la mezcla. En este estudio, estas características resultan importantes porque la incorporación de granos de caucho reciclado modifica la interacción entre los materiales, por lo que una adecuada calidad de los agregados contribuye a que las variaciones observadas en la estabilidad Marshall respondan principalmente al efecto del GCR.

2.1.3. Clasificación de Agregados Pétreos

Clasificación según el tamaño

Según Neville (2006) los agregados pétreos pueden clasificarse en dos categorías principales en función de su tamaño:

- Agregado fino, comúnmente conocido como arena, está compuesto por partículas que en un 95 % o más atraviesan el tamiz N.º 4 (con abertura de 4,76 mm). Por otro lado.
- Agregado grueso, denominado grava, corresponde a las partículas que quedan retenidas en el tamiz de 150 mm (6”) y que, en un 95 % o más, son mayores al tamaño del tamiz N.º 4.

La clasificación específica por tamaño distingue fracciones como arcilla, limo, arena, gravilla, grava, piedra y rajón, las cuales se diferencian por el rango de dimensiones de sus partículas y su idoneidad para ser usadas en la elaboración del concreto (Sánchez, 2006).

Clasificación según el origen

De acuerdo con el Instituto Colombiano del Concreto (1997), los agregados se clasifican en:

- Naturales: se extraen directamente de depósitos fluviales, glaciares o de canteras, incluyendo arenas, gravas y piedras rodadas.
- Artificiales: provienen de procesos industriales o de subproductos, como la escoria de alto horno, el Clinker o las arcillas expandidas, los cuales pueden presentar un peso superior o inferior al de los agregados convencionales, según su origen y características.

Clasificación según la forma

Giraldo (2003) en el Manual de Agregados para Hormigón explica que la forma de las partículas depende del origen del material y de los procesos de trituración y clasificación. Entre las formas más comunes se encuentran:

- Redondeadas: propias de arenas de playa o gravas de río, producto del desgaste por agua o fricción.
- Irregulares: partículas de bordes poco definidos, resultado de fricción o erosión; por ejemplo, gravas trituradas.
- Escamosas: que corresponden a láminas delgadas y planas derivadas de rocas laminares.
- Angulares: caracterizadas por aristas bien definidas que favorecen la adherencia, como ocurre en piedra triturada.
- Alargadas: con un eje longitudinal considerablemente mayor que los otros dos; se encuentran en fragmentos de rocas estratificadas.

- Escamosas y alargadas: una combinación asociada a materiales meteorizados.

Clasificación según la textura

La textura se define como el grado de pulimento o desgaste presente en la superficie del agregado, característica que incide de manera directa en su capacidad de adherirse a la pasta de cemento y en la facilidad de trabajabilidad del concreto cuando se encuentra en estado fresco (Instituto Colombiano del Concreto, 1997). En cuanto a las texturas identificadas Ferreira y Torres (2014) indica que son:

- Vítrea: superficie con fractura concoidal.
- Lisa: resultado del desgaste por agua o fractura de granos finos.
- Granular: presencia de granos gruesos y redondeados.
- Áspera: fractura de granos finos o medianos que generan rugosidad.
- Cristalina: presencia de cristales fácilmente distinguibles.
- Con cavidades o poros: superficies con poros visibles.

Según la densidad

De acuerdo con la masa unitaria, los agregados pueden clasificarse según el Instituto Colombiano del Concreto (1997) en:

- Ligeros ($< 2000 \text{ kg/m}^3$): utilizados en concretos no estructurales o de aislamiento (piedra pómez, perlita).
- Normales (2400 kg/m^3 aprox.): los más usados en construcción (arena y grava de río, piedra triturada).
- Pesados ($> 3000 \text{ kg/m}^3$): empleados en concretos especiales de protección contra radiación (barita, magnetita).

2.1.4. Propiedades de los Agregados Empleados en una Mezcla Asfáltica

En una carpeta asfáltica densamente graduada producida en caliente, los agregados representan entre el 90 % y el 95 % del peso total, convirtiendo así su calidad en un aspecto decisivo para el buen desempeño del pavimento. A pesar de ello, la selección del material no puede basarse en factores como costo o disponibilidad, pues es indispensable que el agregado reúna propiedades técnicas específicas que garanticen su idoneidad en la construcción de mezclas asfálticas de alto rendimiento (Padilla, 2004). Entre estas propiedades destacan:

Gradación y tamaño máximo de la partícula

Las especificaciones para pavimentos asfálticos en caliente indican que los agregados deben ajustarse a un rango de tamaños definido y que cada fracción granulométrica debe estar representada en proporciones precisas. A esta distribución se le denomina graduación del agregado o de la mezcla, y su análisis, junto con la verificación del tamaño de partícula, permite comprobar que el material cumple con los requisitos normativos establecidos (Chamba y Benavides, 2019).

Tamaño máximo de partícula

Para Chamba y Benavides (2019) existen dos formas de designar el tamaño máximo de partículas:

- **Tamaño máximo nominal:** corresponde al tamiz más grande que retiene más del 10% de las partículas de agregado.
- **Tamaño máximo absoluto:** es el tamiz más grande a través del cual pasa el 100% del agregado.

Limpieza

Padilla (2004) establece que, las normas fijan límites en cuanto a la presencia de materiales indeseables como restos vegetales, arcilla o terrones, debido a que estos pueden comprometer el desempeño de la mezcla. Para controlar esto, la limpieza del agregado puede determinarse mediante una revisión visual o a través de un procedimiento de lavado y tamizado, comparando el peso del material antes y después del proceso para calcular el porcentaje de finos que pasan por el tamiz N.º

200 (0,075 mm). Asimismo, el ensayo de equivalente de arena (ASTM D 2419-95) se emplea para medir la proporción de polvo fino y arcillas en la fracción que atraviesa el tamiz N° 4 (4,75 mm).

Dureza

Los agregados deben mostrar alta resistencia al desgaste causado por el tráfico y las cargas cíclicas, soportando la abrasión y el deterioro durante la fabricación, colocación y compactación de la mezcla, así como durante toda la vida útil del pavimento. La evaluación de esta resistencia al desgaste se realiza mediante el ensayo de abrasión con la máquina de Los Ángeles, conforme a la norma ASTM C-131 (Padilla, 2004).

Forma de partícula

La forma de las partículas afecta la trabajabilidad de la mezcla y la energía necesaria para lograr la densidad deseada. Las partículas con bordes angulares tienden a entrelazarse, ofreciendo mayor resistencia al movimiento dentro del pavimento. Mientras que las partículas gruesas contribuyen a la resistencia estructural, las finas favorecen una mejor trabajabilidad de la mezcla. De acuerdo a Padilla (2004) para evaluarlas se utilizan los ensayos:

- Agregado grueso: angularidad del agregado grueso y caras fracturadas (ASTM D 5821-01), partículas alargadas y planas (ASTM D 4791-99).
- Agregado fino: angularidad del agregado fino (ASTM C 1252-98).

Textura superficial

La textura superficial de los agregados impacta la trabajabilidad de la mezcla, su resistencia y el coeficiente de fricción del pavimento. Las superficies rugosas permiten la adherencia del asfalto y elevan la fricción, contribuyendo de esta forma a la seguridad vial. Al triturarse, las gravas naturales desarrollan superficies ásperas que optimizan su desempeño dentro de la mezcla (Padilla, 2004).

La incorporación de GCR también modifica la textura interna de la mezcla asfáltica. Aunque el caucho presenta una superficie menos rugosa que los agregados pétreos triturados, sus partículas aportan una mayor elasticidad al sistema y favorecen una

mejor distribución de esfuerzos cuando se encuentran uniformemente dispersas. No obstante, si el contenido de caucho es excesivo o la granulometría no es adecuada, puede reducirse el contacto directo entre las partículas minerales, disminuyendo el entrelazamiento mecánico que proporciona estabilidad a la mezcla. Por ello, diferentes investigaciones recomiendan emplear porcentajes moderados de GCR, ya que permiten conservar la resistencia estructural sin perder los beneficios asociados a la flexibilidad del material (Vega, 2016; Cabrera y Galarza, 2024).

Capacidad de absorción

La porosidad de los agregados define la cantidad de líquido que pueden absorber, lo que influye en la disponibilidad de asfalto para unir las partículas. En el caso de agregados con alta absorción, se necesita un mayor contenido de asfalto para asegurar una adecuada adhesión (Padilla, 2004).

Cuando se incorpora grano de caucho reciclado (GCR) mediante el proceso de vía seca, el comportamiento de la absorción de la mezcla presenta diferencias respecto a una mezcla convencional. A diferencia de los agregados minerales, el caucho posee una absorción de agua muy baja; sin embargo, durante el mezclado a elevadas temperaturas puede absorber parte de los componentes ligeros del cemento asfáltico y experimentar un proceso de hinchamiento. Como consecuencia, disminuye la cantidad de ligante libre disponible para recubrir los agregados minerales, situación que puede hacer necesario un ligero incremento en el contenido óptimo de asfalto para mantener una adecuada cohesión de la mezcla. Diversos estudios señalan que este fenómeno depende del tamaño de las partículas de caucho, del tiempo de mezclado y de la temperatura de fabricación, por lo que su efecto varía según las condiciones del diseño de la mezcla (Rodríguez, 2016; Díaz y Castro, 2017).

Afinidad con el asfalto

La afinidad entre el agregado y el asfalto refleja su capacidad para mantener una película de cemento asfáltico sobre su superficie. Los agregados hidrofóbicos, como las calizas y dolomitas presentan una adhesión adecuada, mientras que los hidrofílicos, como ciertos granitos y cuarcitas experimentan desprendimiento en presencia de agua. Esta es una característica que se evalúa mediante el ensayo de recubrimiento y peladura de asfalto según la norma ASTM D 3625 (Padilla, 2004).

Gravedad específica o peso específico

La gravedad específica establece la relación entre el peso y el volumen del agregado, siendo necesario en el diseño de la mezcla al considerar la absorción de agua y asfalto. A partir de ello, se distinguen tres tipos:

- **Gravedad específica seca (bulk):** que excluye los poros llenos de agua.
- **Gravedad específica aparente:** que descarta los poros y espacios capilares que podrían llenarse con agua
- **Gravedad específica efectiva:** que no incluye el volumen de asfalto absorbido en los poros.

Modulo resiliente de las mezclas modificadas con GCR

Aunque el módulo resiliente no constituye una propiedad propia de los agregados, representa uno de los parámetros mecánicos más utilizados para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con caucho. Este parámetro expresa la capacidad del material para recuperar su forma después de ser sometido repetidamente a cargas de tránsito. Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de grano de caucho reciclado incrementa la capacidad de recuperación elástica de la mezcla y mejora su resistencia frente a esfuerzos cíclicos, reduciendo la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga. Sin embargo, cuando el porcentaje de GCR supera el contenido óptimo, la mezcla experimenta una disminución de su rigidez, provocando una reducción del módulo resiliente y de la estabilidad estructural del pavimento. En consecuencia, el comportamiento del módulo resiliente depende directamente de la dosificación de caucho empleada y de la interacción entre el ligante asfáltico, los agregados pétreos y las partículas de GCR (Díaz y Castro, 2017; Cabrera y Galarza, 2024).

La determinación de estas propiedades se realiza mediante los ensayos descritos en la norma ASTM C 128, aplicables a los agregados gruesos (retenidos en el tamiz N°4) y los finos (pasantes del tamiz N°4).

En conjunto, las investigaciones recientes coinciden en que la incorporación de grano de caucho reciclado modifica el comportamiento de las mezclas asfálticas

desde el punto de vista físico y mecánico. Entre los principales efectos se encuentran cambios en la absorción efectiva del ligante, variaciones en la textura interna de la mezcla y un incremento de la capacidad de recuperación elástica cuando se emplean porcentajes adecuados de GCR. No obstante, también se ha evidenciado que dosificaciones excesivas pueden disminuir la rigidez y la estabilidad de la mezcla, razón por la cual resulta indispensable determinar experimentalmente el contenido óptimo de caucho para cada combinación de materiales y condiciones de diseño. Este criterio constituye uno de los fundamentos de la presente investigación, en la que se evalúa el comportamiento de mezclas modificadas mediante el Método Marshall.

2.1.5. Propiedades Físicas y Mecánicas de los Agregados Pétreos que Conforman una Mezcla Asfáltica

La distribución del tamaño de las partículas que conforman los agregados constituye uno de los aspectos más importantes en el diseño de mezclas asfálticas, ya que influye directamente en su comportamiento mecánico y en su desempeño durante la vida útil del pavimento. Una granulometría adecuada favorece el acomodo de las partículas, permitiendo obtener una estructura más compacta y estable, lo que incrementa la resistencia de la mezcla frente a las cargas del tránsito y mejora su durabilidad. Asimismo, una correcta combinación de tamaños contribuye a optimizar los vacíos en el agregado mineral (VMA) y a mantener un contenido apropiado de vacíos de aire (Va), parámetros indispensables para garantizar una adecuada compactación y un correcto desempeño del pavimento.(Concho y Pérez, 2023).

La angularidad describe el grado de irregularidad que presentan las partículas de los agregados, tanto en sus aristas como en sus superficies. Esta característica influye significativamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas, ya que las partículas con formas más angulosas desarrollan un mayor entrelazamiento entre sí, incrementando la fricción interna y la resistencia al desplazamiento. Como consecuencia, la mezcla adquiere una mayor estabilidad estructural y una mejor capacidad para soportar esfuerzos de corte, condición especialmente importante en pavimentos sometidos a tránsito pesado o cargas repetitivas, donde se requiere minimizar las deformaciones permanentes.

La densidad de los agregados es una propiedad física que tiene una influencia directa sobre las características volumétricas y el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. Los agregados con mayor densidad permiten obtener mezclas más compactas, reduciendo la presencia de vacíos tanto en el agregado mineral como en el interior de la mezcla. Esta condición mejora la estabilidad, la resistencia a la deformación y la capacidad estructural del pavimento, además de favorecer una distribución más uniforme del ligante asfáltico entre las partículas minerales.

La gravedad específica y la absorción son propiedades fundamentales para la caracterización de los agregados empleados en mezclas asfálticas, debido a que proporcionan información sobre la densidad relativa y la capacidad del material para absorber agua o ligante asfáltico. Estos parámetros son indispensables durante el diseño Marshall, ya que permiten realizar los cálculos volumétricos de la mezcla con mayor precisión y determinar la cantidad efectiva de asfalto que participa en la cohesión entre los agregados.

En el caso del agregado grueso, la gravedad específica se determina considerando tres condiciones del material: gravedad específica aparente, gravedad específica a granel (Bulk) y gravedad específica saturada superficialmente seca (SSS). Estos valores permiten conocer el volumen real ocupado por las partículas y son utilizados en el cálculo de propiedades como la densidad de la mezcla, los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de aire (V_a). Por su parte, el ensayo de absorción establece el porcentaje de agua que el agregado puede retener en sus poros, información que resulta esencial para estimar la cantidad de ligante que será absorbida durante la elaboración de la mezcla y evitar variaciones en el contenido efectivo de asfalto.

De manera similar, en el agregado fino permiten evaluar las características físicas de las partículas de menor tamaño que conforman la mezcla asfáltica. La gravedad específica del agregado fino interviene en los cálculos de las propiedades volumétricas del diseño Marshall, mientras que el porcentaje de absorción permite identificar la capacidad del material para incorporar humedad o ligante dentro de su estructura porosa. Cuando la absorción es elevada, parte del cemento asfáltico es retenido por el agregado, reduciendo la cantidad de ligante disponible para recubrir las partículas, situación que puede afectar la cohesión, la durabilidad y el

desempeño de la mezcla asfáltica. Por esta razón, ambos ensayos constituyen una etapa indispensable en la caracterización de los materiales antes del diseño de la mezcla.

La calidad de los agregados utilizados en mezclas asfálticas suele verificarse mediante ensayos como abrasión Los Ángeles, equivalente de arena y porcentaje de caras fracturadas, los cuales permiten evaluar su resistencia al desgaste, limpieza y forma de las partículas. Sin embargo, dichos ensayos no formaron parte del presente estudio, debido a que se emplearon agregados suministrados por una constructora que ya cumplían con las especificaciones técnicas requeridas para la elaboración de la mezcla.

Considerando la importancia que tiene la distribución granulométrica en el comportamiento de las mezclas asfálticas, es necesario establecer los rangos de tamaño que deben cumplir los agregados de acuerdo con las especificaciones técnicas. En este sentido, la Tabla 1 presenta la composición granulométrica propuesta para mezclas asfálticas densamente graduadas, conforme a la norma ASTM D3515, la cual constituye un referente para la selección y combinación de los agregados utilizados en el diseño de la mezcla.

Tabla 1.*Composición de los agregados para una mezcla asfáltica*

Graduación Propuestas para Mezclas Cerradas (ASTM D 3515)										
Abertura de malla		Mezclas Cerradas								
		Tamaño máximo nominal del agregado								
in	Mm	2in	1 1/2 in	1 in	3/4in	1/2in	3/8in	N°4	N°8	N°16
		(50mm)	(37.5mm)	(25mm)	(19mm)	(12.5mm)	(9.5mm)	(4.74mm)	(2.36mm)	(1.18mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (Grueso, Fino y Filler)										
2 1/2	63	100								
2	50	90-100	100							
1 1/2	37,5		90-100	100						
1	25	60-80		90-100	100					
3/4	19		56-80		90-100	100				
1/2	12,5	35-65		56-80		90-100	100			

3/8	9,5				56-80		90-100	100		
N°4	4,75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100		100
N°8	2,36	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100		95-100
N°16	1,16							40-60		85-100
N°30	600um							35-65		70-95
N°50	300um	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40		45-75
N°100	150um							3-20		20-40
N°200	75um	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10		9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla										
		2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Nota. En la tabla se muestra la composición granulométrica de los agregados para mezclas asfálticas en función de la norma ASTM D3515, indicando los rangos de retención en diferentes aberturas de malla.

Como se observa en la Tabla 1, la norma ASTM D3515 establece los rangos granulométricos que deben cumplir las diferentes fracciones de agregados para obtener una mezcla asfáltica con adecuada estabilidad, compactación y resistencia mecánica. En la presente investigación, estos criterios sirvieron como base para la selección de la granulometría de los agregados, permitiendo que las variaciones observadas en las propiedades de la mezcla se atribuyan principalmente a la incorporación del grano de caucho reciclado (GCR) y no a diferencias en la distribución del material pétreo.

2.2. CEMENTO ASFÁLTICO

2.2.1. Definición

El cemento asfáltico es un subproducto del proceso de destilación del petróleo, que se mantiene en un estado semisólido a temperatura ambiente. Al combinarse con agregados, da lugar al hormigón asfáltico, un material ampliamente empleado en la construcción de pavimentos, capas de rodadura y bases (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

Este material, formado por asfalto y un aceite fluidificante, presenta una elevada viscosidad, característica que lo hace especialmente adecuado para la construcción de pavimentos. Según Montejo (2002), en su obra *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*, el cemento asfáltico es un ligante denso, usualmente pegajoso, semisólido a temperatura ambiente y de color que varía entre café oscuro y negro.

El cemento asfáltico se produce a partir de la destilación al vapor de los residuos más pesados obtenidos del fraccionamiento del petróleo, continuando el proceso hasta alcanzar la consistencia requerida. El uso de vapor permite separar los componentes volátiles pesados sin elevar excesivamente la temperatura, evitando la pérdida de ductilidad, aumento de fragilidad y la descomposición, lo que garantiza un producto uniforme.

La calidad del cemento asfáltico está determinada por las características del crudo, que pueden diferir incluso dentro de un mismo yacimiento, y por el proceso de refinación empleado. Comercialmente, se clasifica en cinco grados o rangos de

consistencia, los cuales se definen mediante el ensayo de penetración (Montejo, 2002).

Con el fin de asegurar que el cemento asfáltico sea adecuado para la producción de mezclas asfálticas en caliente, es necesario comprobar que sus propiedades físicas se ajusten a los requisitos establecidos en la normativa vigente. Para ello, se realizan diversos ensayos de control de calidad que permiten verificar si el ligante cumple con las especificaciones técnicas exigidas. En la Tabla 2 se presentan los principales ensayos aplicados al cemento asfáltico, junto con los valores de referencia correspondientes a los agregados de penetración 60-70 y 85-100, conforme a lo establecido en la norma MPO-001-F-2002. La evaluación de estos parámetros permite determinar la idoneidad del material para su empleo en la construcción de pavimentos flexibles.

Tabla 2.

Ensayos al Cemento Asfáltico

ENSAYOS	60-70		85-100	
Betún Original	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Penetración (25°C, 100gr, 5s), mm/10	60	70	85	100
Punto de ablandamiento A y B, °C	48	57	45	53
Índice de Penetración	-1,5	1,5	-1,5	1,5
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	100	---	100	---
Contenido de agua (en volumen), %	---	0,2	---	0,2
Solubilidad en tricloroetileno, %	99	---	99	---
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	232	---	232	---
Densidad Relativa, 25°C / 25°C	1,00	---	1,00	---
Ensayo de la mancha	NEGATIVO		NEGATIVO	
Contenido de parafina, %	---	2,2	---	2,2

Nota. En esta tabla se muestran los principales ensayos realizados al cemento asfáltico de acuerdo con la norma MOP-001F-2002, donde se comparan los rangos de penetración 60-70 y 85-100.

En conjunto, los ensayos descritos permiten evaluar las principales características físicas y el comportamiento del cemento asfáltico, considerando aspectos como su consistencia, capacidad de deformación, resistencia frente a temperaturas elevadas, presencia de impurezas y estabilidad durante su vida útil. Verificar que el ligante cumpla con estos requisitos resulta indispensable, ya que de ello depende, en gran medida, su desempeño dentro de la mezcla asfáltica. Asimismo, estas propiedades influyen en la adherencia entre el asfalto y los agregados, en la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones permanentes y en la durabilidad del pavimento. En consecuencia, las especificaciones establecidas constituyen un referente técnico para la selección y el control de calidad del cemento asfáltico empleado en el desarrollo de la presente investigación.

2.2.2. Técnicas de Producción de Asfalto

El petróleo crudo contiene algunos productos, entre ellos el asfalto. Mediante el proceso de refinación hay la posibilidad de separar estos componentes y recuperar el asfalto. En primera instancia, el crudo se dirige a un calentador tubular, donde su temperatura se eleva rápidamente para iniciar la destilación. Posteriormente, se introduce en una torre de destilación, en la cual las fracciones más ligeras y volátiles se vaporizan y se separan, destinándose luego a la producción de derivados como nafta, gasolina, queroseno y otros productos del petróleo (Chamba y Benavides, 2019).

El residuo resultante de esta destilación, denominado crudo reducido o fracción pesada, puede utilizarse como aceite residual o someterse a procesos adicionales para obtener productos específicos, incluido el asfalto. La fracción asfáltica se extrae mediante solventes y, posteriormente, se refina para producir cemento asfáltico. Según el método de refinación utilizado, hay la posibilidad de obtener cementos asfálticos de alta o baja consistencia, los cuales se combinan en proporciones controladas para lograr la consistencia final requerida (Chamba y Benavides, 2019).

2.2.3. Propiedades Físicas y Químicas del Asfalto

El asfalto es una sustancia bituminosa de color negro, formada por asfaltos, resinas y aceites, los cuales le confieren propiedades como cohesión, ductilidad y capacidad de adhesión. Puede encontrarse en estado sólido o semisólido y funciona como material aglutinante a temperatura ambiente. Al ser calentado, se ablanda gradualmente hasta adquirir un estado líquido (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte, 2022).

El asfalto cuenta con propiedades químicas que lo hacen un material sumamente versátil para la construcción de carreteras. Estas características son importantes para que los tecnólogos de asfalto y los diseñadores de pavimentos identifiquen, caractericen y controlen la calidad de las mezclas asfálticas en caliente.

El asfalto está constituido por hidrocarburos, con pequeñas cantidades de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. Al disolverse en un solvente como el heptano, se divide en dos fracciones principales: asfaltenos y maltenos. Los asfaltenos, insolubles en heptano, presentan un color negro o marrón oscuro y son responsables de la dureza y el color del asfalto. En contraste, los maltenos se disuelven en el solvente y son líquidos viscosos compuestos por resinas y aceites; las resinas, generalmente de color ámbar o marrón oscuro, proporcionan propiedades adhesivas, mientras que los aceites, de tonalidad más clara, facilitan el transporte de los asfaltenos y resinas dentro del material (Navarro, 2013).

La proporción de asfaltenos y maltenos puede verse afectada por factores, como las altas temperaturas, exposición al oxígeno y a la luz, tipo de agregado y espesor de la película de asfalto sobre las partículas. Estas variaciones producen cambios químicos como por ejemplo la evaporación de componentes volátiles, oxidación, la polimerización y otras reacciones, las cuales modifican de manera significativa las propiedades del asfalto. Durante estos procesos, las resinas se transforman progresivamente en asfaltenos y los aceites en resinas, aumentando así la viscosidad del material (Chamba y Benavides, 2019).

Propiedades Físicas del Asfalto

Las propiedades físicas del asfalto son relevantes para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos. De acuerdo a Chamba y Benavides (2019) entre las más importantes están: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, endurecimiento, envejecimiento y resistencia a la peladura, mismas que se encuentran especificadas en las siguientes líneas:

- **Durabilidad**

La durabilidad se define como la capacidad del asfalto para conservar sus propiedades originales frente al envejecimiento natural. Esta característica incide directamente en el rendimiento del pavimento, el cual también depende del diseño de la mezcla, las propiedades de los agregados y la calidad de la construcción. Para su evaluación, se utilizan ensayos como el Horno de Película Delgada (TFOT) y el Horno de Película Delgada Rodante (RTFOT), que simulan el envejecimiento del asfalto mediante el calentamiento de finas películas del material (Asphalt Institute, 2001).

- **Adhesión y cohesión**

Adhesión: se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse a los agregados dentro de la mezcla.

- Cohesión: es la capacidad del asfalto para mantener unidas las partículas de agregado en el pavimento terminado.

Si bien la prueba de ductilidad no evalúa directamente estas propiedades, se considera un indicador que deja en evidencia aspectos como la adhesión y cohesión del material.

- **Susceptibilidad a la temperatura**

El asfalto es un material termoplástico, es decir, que se endurece y aumenta su viscosidad a bajas temperaturas, mientras que se ablanda y se vuelve más fluido a altas temperaturas. Esta característica, conocida como susceptibilidad a la temperatura, puede variar entre asfaltos provenientes de diferentes crudos, incluso si poseen el mismo grado de penetración o viscosidad. Comprender esta propiedad es importante para determinar las temperaturas óptimas de mezcla y compactación,

lo que asegura de que exista una distribución y adhesión del asfalto sobre los agregados durante la construcción.

- **Endurecimiento**

El endurecimiento del asfalto se da durante la construcción y a lo largo de la vida útil del pavimento. Esto se relaciona con la oxidación, la cual se acelera en condiciones de altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto. La rapidez del endurecimiento depende del tipo de asfalto, por lo que cada material debe evaluarse para comprender su comportamiento frente al envejecimiento. Reducir los vacíos de aire en el pavimento contribuye a ralentizar este proceso (Asphalt Institute, 2001).

- **Envejecimiento**

El envejecimiento del asfalto puede ser causado por procesos como la oxidación, la volatilización y la tixotropía, entre otros. Su efecto principal es la pérdida de ductilidad y cohesión, lo que reduce la vida útil del pavimento. Además, algunos productos generados durante el envejecimiento son solubles en agua, lo que provoca la pérdida de material asfáltico de la mezcla (Asphalt Institute, 2001).

- **Recubrimiento y resistencia a la peladura**

Esta propiedad define la capacidad del asfalto para mantener unidos los agregados. La norma ASTM D 3625 permite evaluar visualmente la adhesión entre el asfalto y los agregados. El procedimiento consiste en sumergir una muestra de al menos 250 g de mezcla suelta en agua destilada y hervirla durante 10 minutos, para luego observar qué cantidad de agregado permanece recubierta por asfalto. Este ensayo permite determinar si la adherencia es adecuada o deficiente (Asphalt Institute, 2001).

2.2.4. Tipos de Asfalto

Asfaltos Naturales

El nombre de este tipo de asfalto se debe a que se forma mediante un proceso natural de volatilización, en el cual el petróleo crudo asciende a la superficie de la tierra a través de grietas. Al llegar al exterior, los aceites ligeros y los gases se separan

debido a factores ambientales como el sol y el aire, dejando como residuo el asfalto. En su composición es normal encontrar ciertos porcentajes de arcilla o arena fina, debido a que estas partículas se incorporan al material mientras asciende. Este asfalto se presenta de distintas formas, siendo las más frecuentes lagos, manantiales y exudaciones (Reyes, 2003).

Asfaltos Derivados del Petróleo

Este tipo de asfalto se diferencia a los naturales porque se obtiene a partir del residuo del alambicamiento del petróleo, motivo por el cual también se le conoce como asfalto residual. A pesar de ello, debido a la interpretación equivocada del término residual, la industria del asfalto ha preferido emplear la denominación asfalto de destilación directa. Aun así, este nombre puede inducir a error, puesto que rara vez un asfalto se obtiene exclusivamente por destilación directa del petróleo sin requerir posteriormente algún tipo de tratamiento (Reyes, 2003).

Cementos Asfálticos Sólidos

Una de las principales características de este tipo de asfalto es que se obtiene mediante la mezcla de asfaltos refinados con gasóleo, un aceite disuelto, empleándose debido a que su viscosidad es óptima para la aplicación en pavimentos. Este asfalto se representa con las letras AC. Además, tiene propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, contribuyendo de esta forma a que el pavimento sea más resistente frente a agentes dañinos como ácidos o sales (Ortiz, 2019).

Asfaltos Líquidos

Estos asfaltos están constituidos por una base asfáltica y un fluidificante volátil, que generalmente puede ser bencina, queroseno o aceite. Los fluidificantes son sometidos a un proceso de evaporación, de modo que únicamente permanece el residuo asfáltico. Debido a su consistencia extremadamente blanda, en este caso no se aplica el ensayo de penetración, puesto que el límite máximo permitido es de 300 (Ortiz, 2019).

Emulsiones Asfálticas

En este caso, al asfalto (60-70%) se le suele adicionar un agente activador de superficies en una proporción de 0,2 a 1%, que puede ser un tensoactivo o emulsificante de base jabonosa, ya sea básica o ácida, con el fin de mantener el sistema disperso. En términos generales, estos asfaltos consisten en un conjunto de mecanismos irregulares que se organizan en dos fases inmiscibles: asfalto y agua, donde interviene el agente activador de superficies. En esta configuración, el agua actúa como fase continua y los glóbulos de asfalto forman la fase discontinua, cuyo tamaño puede variar entre uno y diez micrones (Reyes, 2003).

2.2.5. Aditivos

Definición

El término aditivo es amplio y hace referencia a una variedad de materiales. Con los avances tecnológicos, se han desarrollado productos en el mercado que ofrecen beneficios, aunque su uso requiere precaución y conocimiento sobre su comportamiento. Los aditivos se emplean para mejorar las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas, proporcionando mayor resistencia a la degradación por temperaturas extremas, mejorando la trabajabilidad al incrementar fluidez y viscosidad, y favoreciendo la adhesión para que la mezcla funcione de manera uniforme. Actualmente, existen aditivos de alta tecnología, incluso fabricados mediante nanotecnología, que se incorporan a los ligantes asfálticos para optimizar su desempeño, garantizando que la mezcla soporte las cargas de tráfico y las variaciones de temperatura durante su vida útil.

Aditivos mejoradores de adherencia

Son productos químicos que, al incorporarse al cemento asfáltico, incrementan la adhesión entre el asfalto y los agregados, aumentando la durabilidad de la carpeta asfáltica. Deben añadirse al asfalto en estado líquido, utilizando dispositivos mecánicos de agitación, por circulación o siguiendo las recomendaciones y especificaciones del fabricante.

2.3. CAUCHO

2.3.1. Antecedentes

El caucho natural es un líquido lechoso extraído de ciertos árboles, siendo la mayoría de sus plantaciones ubicadas en América del Sur. El término “caucho” proviene de la palabra “cautchuc”, utilizada por los indígenas peruanos para referirse al árbol *Hevea*, cuyo significado es “árbol que llora”. A partir de este árbol se obtiene el caucho, también llamado hule o goma. Descubierta hace más de un siglo, el caucho se ha convertido en una de las materias primas más importantes a nivel mundial (Importadora de Accesorios y Neumáticos, 2015).

De acuerdo a Chamba y Benavides (2019) las propiedades del caucho natural han incrementado su demanda en sectores como la fabricación de llantas, industria textil y calzado. Estas características impidieron que fuera reemplazado por completo por el caucho sintético. Para mantener su competitividad, se implementaron importantes programas de investigación y desarrollo, destacando el surgimiento en Malasia en 1965 de los cauchos técnicamente especificados (TSB, Technically Specified Rubber), que valorizaron el caucho natural al garantizar al comprador un producto con características definidas de elasticidad, color, nivel de impurezas, entre otras.

Estos esfuerzos han permitido que el caucho natural compita de manera más equilibrada con el caucho sintético, el cual puede producirse en cualquier región del mundo y cuyo desarrollo ha sido promovido principalmente por países desarrollados, ante la limitación de contar con fuentes propias de caucho natural. Desde el punto de vista químico, el caucho natural es un polímero de metilbutadieno o isopreno, con fórmula química (C_5H_8) (Mora y Chicaiza, 2013).

Los primeros usos del caucho natural fueron limitados debido a su sensibilidad a los cambios de temperatura, que alteraban su forma y consistencia. En 1839, Charles Goodyear mejoró el proceso de vulcanización, permitiendo que se modificara el caucho para que soportara temperaturas extremas. A partir de entonces, el caucho natural se volvió adecuado para la fabricación de mangueras, neumáticos, bandas industriales, láminas, zapatos, suelas y otros productos. El

inicio del llamado “Rubber Boom” estuvo impulsado por la popularización de la bicicleta, y su auge se intensificó después de 1900 con el desarrollo de la industria del automóvil y la expansión de la producción de neumáticos para vehículos (Weinstein, 1983; Dean 1987).

2.3.2. Definición

El caucho es un polímero elástico que puede obtenerse de forma natural o sintética. En su versión natural, se extrae de la savia del árbol *Hevea brasiliensis*, originario de América del Sur, aunque actualmente se cultiva en diversas regiones tropicales alrededor del mundo (Arroyo et al., 2024).

El caucho natural está formado por polisopreno, un polímero constituido por unidades repetitivas de isopreno, lo que le otorga sus características elásticas y flexibles. Este material se utiliza en diversas aplicaciones, que van desde la fabricación de neumáticos y productos industriales hasta artículos de consumo como guantes y juguetes (Chellappa, 2017).

Por otra parte, el caucho sintético se obtiene mediante procesos químicos a partir de derivados del petróleo, como estireno y butadieno. Los polímeros sintéticos resultantes poseen propiedades similares a las del caucho natural y se emplean en muchas de las mismas aplicaciones. (Chellappa, 2017).

El caucho se caracteriza por su capacidad de deformarse bajo presión y recuperar su forma original al eliminarla, propiedad conocida como elasticidad, importante para muchas de sus aplicaciones. Además de esta elasticidad, el caucho presenta resistencia a la abrasión, al desgarro y a la degradación por agentes químicos, lo que lo convierte en un material ideal para productos que requieren durabilidad y resistencia (Arroyo et al., 2024).

En resumen, el caucho es un material versátil y utilizado en una variedad de aplicaciones debido a sus propiedades elásticas, resistencia y durabilidad. Su producción, tanto natural como sintética, desempeña un papel importante en diversas industrias y en la fabricación de numerosos productos de uso diario.

2.3.3. Caucho de neumáticos

El caucho de neumáticos, también denominado caucho reciclado o triturado, se obtiene a partir de la trituración de neumáticos usados. En lugar de desecharlos al final de su vida útil, estos neumáticos pueden reciclarse para producir distintos materiales, lo que incluye también el caucho de neumáticos (Arroyo et al., 2024).

El proceso de reciclaje consiste generalmente en triturar los neumáticos en fragmentos más pequeños, que luego se emplean como material de relleno en la construcción de carreteras, como componente en mezclas asfálticas para pavimentos o en la fabricación de pisos de caucho para parques infantiles y gimnasios, entre otros usos (Villagaray, 2017).

Según Arroyo et al. (2024), el caucho reciclado algunas ventajas como, por ejemplo, reduce la cantidad de neumáticos desechados en vertederos, disminuye la contaminación ambiental y, al sustituir al caucho virgen, reduce el consumo de recursos naturales y la energía necesaria para producir nuevos materiales.

En pavimentación, su incorporación en mezclas asfálticas mejora propiedades como la resistencia al agrietamiento por fatiga, la resistencia al deslizamiento y la durabilidad, contribuyendo a la construcción de pavimentos resistentes. La producción de caucho, ya sea natural o sintético, sigue siendo fundamental en diversas industrias y en la fabricación de múltiples productos de uso cotidiano (Chamba y Benavides, 2019).

2.3.4. Tipos de Caucho Empleados en la Fabricación de Neumáticos

Caucho Natural

El caucho natural es un polímero de adición que se obtiene como un fluido blanco lechoso, denominado látex, proveniente de árboles de caucho tropical. Su estructura se basa en el monómero isopreno (2-metil-1,3-butadieno), un hidrocarburo de dieno conjugado, y la mayoría de los dobles enlaces en la cadena polimérica presentan configuración Z, lo que le confiere sus propiedades elastoméricas. Charles Goodyear descubrió que al mezclar caucho con azufre se mejoraban sus propiedades, aumentando su resistencia al calor y al frío, así como su elasticidad.

Este procedimiento, conocido como vulcanización, permite que las cadenas poliméricas más cortas se entrecrucen mediante el azufre, formando cadenas más largas y resistentes (Buehr, 1964).

Caucho Sintético

Los dienos conjugados y utilizados en la fabricación de cauchos sintéticos son el isopreno (2-metil-1,3-butadieno), el 1,3-butadieno y el cloropreno (2-cloro-1,3-butadieno). El 1,3-butadieno polimerizado se conoce como polibutadieno, mientras que el cloropreno polimerizado, desarrollado por DuPont, se comercializa bajo el nombre de neopreno. Además, en algunos tipos de caucho sintético se emplean monómeros no dienos, generalmente copolimerizados con dienos, dando lugar a copolímeros, que son polímeros formados por dos o más monómeros. Un ejemplo es el caucho estirenobutadieno (SBR), un copolímero de 1,3-butadieno y estireno en proporción 3:1, desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial ante la escasez de caucho natural. El SBR toma relevancia por su mayor resistencia a la abrasión y oxidación, y puede vulcanizarse; representa más del 40 % de la producción de caucho sintético y se utiliza principalmente en neumáticos, aunque una pequeña cantidad se emplea en goma de mascar no vulcanizada. Otros ejemplos incluyen el caucho de nitrilo, copolimerizado a partir de butadieno y acrilonitrilo ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHCN}$), y el caucho de butilo, formado por isobutileno (metilpropeno, $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$) con un pequeño porcentaje de isopreno. Los cauchos de silicona y otros polisiloxanos no son dienos conjugados, pero presentan unidades repetitivas de la forma $-\text{O}-\text{SiR}_2-$, donde R es un grupo orgánico como el metilo (Buehr, 1964).

2.3.5. Composición de los neumáticos

Generalmente la materia prima que compone los neumáticos es la siguiente:

Caucho

La llanta está constituida aproximadamente en un 50 % por caucho, que puede ser de origen natural, sintético o una combinación de ambos. El caucho natural se obtiene del árbol de hule Hevea, mientras que el caucho sintético se fabrica a partir de derivados del petróleo (Orozco et al., 2004).

Negro de humo

Este material representa entre el 20 y el 25 % de la composición de la llanta. Se trata de un residuo de la combustión de hidrocarburos líquidos, utilizado como agente de relleno y refuerzo en el caucho, aportándole resistencia y dureza (Orozco et al., 2004).

Figuras o cuerdas de acero o textiles

Representan entre el 15 y el 20 % del peso total de la llanta, empleadas sobre todo en el esqueleto o armadura de la llanta

Productos químicos

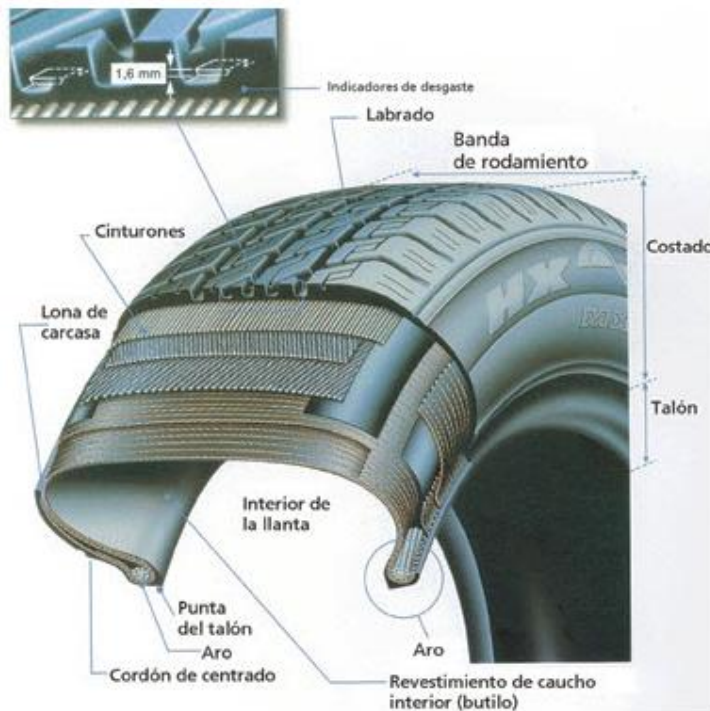
Estos componentes representan aproximadamente el 8 % de la llanta e incluyen más de 200 sustancias químicas adicionales. La composición va a variar según el fabricante y el tipo de llanta, y se utilizan como estabilizadores, endurecedores, catalizadores y aditivos especiales (Orozco et al., 2004).

Partes de la banda de neumáticos

En la Figura 1 se muestran las partes que constituyen a la banda de rodadura del neumático:

Figura 1.

Parte de la banda de neumáticos



Nota. En esta figura se presentan las partes que tiene una banda de neumáticos. Tomado de *Estudio de paneles de aislamiento acústico a base de neumáticos reciclados y fibras de polipropileno para uso comercial* (p. 34), por C. Íñiga y G. Ledesma, 2019, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil.

2.3.6. Propiedades de los Neumáticos

Wong (2010) hace referencia a las propiedades de los neumáticos:

Amortiguación

Se refiere a la capacidad de la llanta para adaptarse a las irregularidades del terreno y absorber de manera elástica los impactos causados por pequeños obstáculos. Esta característica depende de la elasticidad del material de la banda de rodadura, presión de inflado y de la flexibilidad de los flancos de la cubierta.

Flexibilidad

Debido a su estructura, los neumáticos se deforman al aplicarse fuerzas externas; la flexibilidad se define como la facilidad con que ocurre esta deformación y la capacidad del neumático para recuperar su forma. Según la dirección de las fuerzas aplicadas, la flexibilidad puede clasificarse en vertical, transversal y longitudinal.

Flexibilidad vertical

Permite que el neumático se aplaste bajo el peso del vehículo, dependiendo de la rigidez de los flancos y de la presión de inflado.

Flexibilidad transversal

Se manifiesta cuando el neumático se deforma por esfuerzos laterales, como la fuerza centrífuga o los vientos laterales.

Flexibilidad longitudinal

Esta ocurre durante la aceleración y el frenado, cuando el eje de la rueda se desplaza en la dirección de la marcha, provocando deformación del neumático que amortigua los esfuerzos y evita el deslizamiento.

Capacidad de carga

Es el peso máximo que un neumático puede soportar, determinado por sus características de construcción, presión de inflado, velocidad del vehículo y tipo de terreno. Esta información, especificada por el fabricante para la presión de inflado recomendada, se encuentra indicada en el flanco del neumático

Adherencia

Es el agarre del neumático al suelo, influenciado no solo por la fricción, sino también por la superficie de contacto. A mayor área de contacto y deformación de las asperezas del pavimento, mayor será el agarre del neumático.

2.3.7. Características físicas y especificaciones técnicas del Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El material utilizado corresponde a grano de caucho reciclado (GCR), obtenido mediante trituración mecánica de neumáticos fuera de uso. Durante este proceso se reduce progresivamente el tamaño de las partículas y se eliminan los componentes metálicos y textiles, obteniéndose un material granular que puede emplearse como modificador de mezclas asfálticas, especialmente mediante el proceso de vía seca. Gracias a este tratamiento, el GCR puede incorporarse en aplicaciones de ingeniería civil como pavimentos, rellenos, sistemas de contención y superficies deportivas, además de contribuir al aprovechamiento de residuos de difícil disposición final.

La calidad del grano de caucho reciclado constituye un aspecto fundamental para garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla asfáltica. Antes de su incorporación, es necesario comprobar que el material cumpla con determinadas especificaciones físicas relacionadas con su limpieza, uniformidad y composición, ya que la presencia de humedad, impurezas o materiales extraños puede afectar la interacción entre el ligante asfáltico y los agregados. En este contexto, la Tabla 3 presenta las principales especificaciones técnicas que debe de cumplir el GCR para su utilización en mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del GCR

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA
Humedad	Máximo 0,75% de la masa total; el material debe permanecer suelto y sin aglomeraciones.
Gravedad específica	$1,15 \pm 0,05$
Contenido de metales ferrosos	Máximo 0,01% en masa
Contenido de metales no ferrosos	No debe existir presencia visible
Contenido de fibras textiles	Máximo 0,5% para mezclas asfálticas en caliente

Contenido de polvo mineral (talco u otros antiaglomerantes)	Máximo 4,0%
Impurezas (vidrio, arena, madera u otros materiales extraños)	Máximo 0,25% en masa

Nota: En esta tabla se encuentran las especificaciones que aseguran que el caucho reciclado posea un grado adecuado de limpieza y uniformidad antes de ser incorporado a la mezcla asfáltica, evitando la presencia de materiales que puedan afectar negativamente la adherencia, la compactación o el comportamiento mecánico del pavimento.

2.4. MÉTODO DE DISEÑO

El diseño de una mezcla asfáltica se basa principalmente en elegir una granulometría y un contenido de asfalto que permitan obtener, tras su fabricación y colocación en obra, las propiedades requeridas para su desempeño. Los métodos de dosificación buscan establecer el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados, garantizando que cumpla con las características técnicas y funcionales deseadas (Chamba y Benavides, 2019).

Se han utilizado diferentes métodos para establecer un diseño óptimo de mezclas asfálticas los cuales son:

- Hveem,
- Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements)
- Marshall

2.4.1. Diseño Hveem

El método de diseño Hveem Mix fue creado por Francis Hveem durante su trabajo como ingeniero en la División de Carreteras de California, entre las décadas de 1920 y 1930. En este procedimiento se utiliza el medidor de estabilidad Hveem, instrumento permite realizar una evaluación de la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir desplazamientos laterales bajo cargas verticales. En la actualidad, continúa utilizándose en varios estados del oeste de Estados Unidos (Sáenz y Calderón, 2024).

A través de este método se puede hacer un análisis de la densidad, estabilidad y resistencia al hinchamiento por agua de las mezclas. Las ventajas son el uso del compactador por amasado y la inclusión de un parámetro de estabilidad, que mejoran la valoración de la resistencia del material (Hveem, 1949). Pero también hay que mencionar que presenta limitaciones como el alto costo y baja portabilidad del equipo, ausencia de determinaciones volumétricas rutinarias relacionadas con la durabilidad y un proceso de selección del asfalto subjetivo, que da paso a mezclas menos resistentes con el tiempo.

2.4.2. Diseño Superpave

En 1987, el Congreso de los Estados Unidos estableció el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP), con una inversión de 150 millones de dólares destinada a mejorar la durabilidad, desempeño y seguridad vial. De este proyecto nació el sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), un método que permite seleccionar y especificar materiales asfálticos y agregados, así como diseñar mezclas asfálticas con parámetros aún más precisos y actuales para predecir el comportamiento del pavimento (Sáenz y Calderón, 2024).

El método Superpave analiza de forma separada los componentes de la mezcla agregados minerales y ligante asfáltica y su interacción al combinarse, puesto que el desempeño final depende de sus propiedades individuales y del modo en que actúan en conjunto. El cemento asfáltico funciona como ligante, uniendo las partículas de agregado para formar una masa compacta y resistente al paso del agua, mientras que el agregado mineral da soporte y resistencia mecánica al sistema (Aguilar, 2019).

2.4.3. Diseño Marshall

El método Marshall es un procedimiento muy empleado para el diseño de mezclas asfálticas. Fue desarrollado por Bruce Marshall y posteriormente perfeccionado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, hasta ser estandarizado como la norma ASTM D1559. A través de este método se pueden evaluar los parámetros fundamentales como la estabilidad, fluidez, densidad, vacíos de la

mezcla, y vacíos en el agregado mineral, entre otros (Sequeira-Rojas y Cervantes-Calvo, 2014).

El objetivo principal del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregados. En esta línea se debe mencionar que, da información sobre el comportamiento de la mezcla en caliente y define los valores ideales de densidad y contenido de vacíos que deben alcanzarse durante la construcción. Con ello puede asegurar que las proporciones volumétricas de los componentes se mantengan dentro de límites adecuados, garantizando así una mezcla resistente, estable y duradera (Kandhal y Roberts, 1996).

2.5. PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen algunas propiedades que determinan la calidad y el desempeño de los pavimentos elaborados con mezclas asfálticas en caliente. Entre las fundamentales se encuentran: estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento (Chamba y Benavides, 2019).

El propósito fundamental del diseño de mezclas asfálticas es asegurar que el material resultante reúna un equilibrio idóneo entre todas estas propiedades. Para lograrlo, es necesario tener en cuenta lo que representa cada una, la forma en que se evalúa, su influencia en el comportamiento y el rendimiento del pavimento durante su vida útil.

2.5.1. Estabilidad

Para Chamba y Benavides (2019) la estabilidad de una mezcla asfáltica se define como su capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones bajo la acción de las cargas del tránsito. Un pavimento estable mantiene su forma y nivel de superficie aun cuando es sometido a cargas repetidas. En cambio, un pavimento inestable tiende a presentar ahuellamientos, ondulaciones y otras deformaciones que evidencian fallas en la composición de la mezcla.

Los requisitos de estabilidad deben establecerse a partir de un análisis detallado del tránsito previsto, ya que las especificaciones dependen directamente del tipo y volumen de vehículos que circularán sobre la vía. Es importante lograr un equilibrio: valores de estabilidad demasiado bajos pueden provocar deformaciones prematuras, mientras que valores excesivamente altos generan mezclas demasiado rígidas, reduciendo su durabilidad (Ramírez, 2006).

La estabilidad estructural de la mezcla está determinada por dos factores principales: la fricción interna y la cohesión. La fricción interna se relaciona con la forma y la textura superficial de las partículas del agregado mineral, mientras que la cohesión depende de la capacidad ligante del asfalto. Una combinación adecuada de ambos factores impide que los agregados se desplacen entre sí cuando el pavimento está sometido a esfuerzos repetidos (Granados, 2017).

Desde una perspectiva general, cuanto más angular sea la forma de las partículas y más áspera su textura, mayor será la estabilidad de la mezcla asfáltica, siempre que se mantenga un contenido de ligante óptimo que garantice la cohesión necesaria. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en los pavimentos.

Tabla 4.

Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Proporción inadecuada de ligante asfáltico (ya sea por exceso o por deficiencia)	Aparición de deformaciones permanentes, como ahuellamientos o exudación del asfalto en la superficie del pavimento.
Compactación deficiente durante el proceso constructivo	Reducción de la densidad y pérdida de resistencia estructural, lo que favorece la formación de fisuras y fallas tempranas.
Empleo de agregados de baja calidad o con geometría inadecuada (formas redondeadas o con poca angularidad)	Disminución de la fricción interna y de la trabazón entre partículas, lo que provoca inestabilidad frente a cargas repetidas del tránsito.
Presencia de humedad o deficiente drenaje dentro de la estructura del pavimento	Daños por bombeo, pérdida de adherencia del ligante y reducción de la capacidad de soporte de las

Nota. En esta tabla se muestran las causas de inestabilidad en mezclas asfálticas y los efectos, vinculados con deficiencias en el contenido de ligante, compactación, calidad de los agregados y drenaje del pavimento.

2.5.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es la capacidad para resistir procesos de deterioro como la desintegración del agregado, la oxidación del ligante asfáltico y la pérdida de adherencia entre ambos materiales. Estos fenómenos pueden presentarse por la acción del clima, tránsito vehicular o la combinación de ambos factores (Granados, 2017).

Para Ángulo y Duarte (2005) existen tres estrategias para mejorar la durabilidad de una mezcla asfáltica: 1) incrementar el contenido de asfalto, 2) emplear una gradación densa de agregados resistentes a la segregación y diseñar, y 3) compactar la mezcla de modo que se logre la máxima impermeabilidad.

Un mayor contenido de asfalto prolonga la vida útil del pavimento, puesto que las películas más gruesas de ligante envejecen con menor rapidez y mantienen mejor sus propiedades. Además, al reducir los vacíos interconectados, se limita la penetración de aire y agua en la estructura. Por lo que es necesario conservar un porcentaje mínimo de vacíos para permitir la expansión térmica del asfalto en condiciones de altas temperaturas.

Por su parte, Granados (2017) manifiesta que una gradación densa con agregados duros, firmes y resistentes favorece la durabilidad, al aumentar el contacto entre partículas y mejorar la impermeabilidad. Este tipo de agregados soporta mejor las cargas del tránsito y evita la separación de la película asfáltica, reduciendo así el riesgo de deterioro prematuro del pavimento.

Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 5.

Causas y efectos de baja durabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Contenido insuficiente de asfalto en la mezcla	Pérdida de cohesión y aparición de fisuras y desprendimientos prematuros
Agregados de baja calidad o mal gradados.	Desintegración superficial, desgaste acelerado y reducción de la vida útil del pavimento
Deficiente compactación durante la construcción	Alta permeabilidad y penetración de agua y aire, lo que acelera el envejecimiento del asfalto
Falta de mantenimiento y exposición prolongada a condiciones climáticas severas	Oxidación del ligante, fisuración y pérdida progresiva de la capacidad estructural del pavimento

Nota. La tabla muestra las causas que reducen la durabilidad de los pavimentos asfálticos y los efectos que provocan sobre su desempeño estructural y funcional.

2.5.3. Impermeabilidad

Según Granados (2017) la impermeabilidad de un pavimento se define como su capacidad para resistir la penetración de aire y agua hacia su interior o a través de sus capas. Es así como esta propiedad está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica compactada, razón por la cual el análisis de vacíos es un aspecto importante en el diseño de mezclas.

Hay que dejar claro que, la cantidad de vacíos influye en la permeabilidad, su distribución, tamaño y grado de interconexión, los cuales son factores igualmente determinantes. La impermeabilidad depende, en gran medida, del tamaño de los poros y de su conexión con la superficie del pavimento, más que del volumen total de vacíos existentes. Aunque una baja permeabilidad contribuye a una mayor durabilidad, prácticamente todas las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras presentan cierto nivel de permeabilidad. Esto no será un problema,

siempre que se mantenga dentro de los límites establecidos por las especificaciones técnicas (Reyes, et al., 2007).

Tabla 6.

Causas y efectos de mezclas permeables

CAUSAS	EFFECTOS
Mala compactación o presencia excesiva de vacíos en la mezcla asfáltica	Mayor infiltración de agua, lo que provoca daños en las capas inferiores y reducción de la vida útil del pavimento
Contenido insuficiente de ligante asfáltico	Pérdida de cohesión entre las partículas y fisuración superficial por la acción del agua y el aire
Mala gradación del agregado (mezcla abierta o discontinua)	Incremento de vacíos interconectados, facilitando la entrada de humedad y la erosión interna del pavimento
Drenaje deficiente o acumulación de agua en la superficie	Daños por bombeo, desprendimiento del ligante y debilitamiento de la base o subrasante

Nota. En esta tabla se plantean las causas de permeabilidad en mezclas asfálticas y los efectos que están relacionados con deficiencias en compactación, gradación, contenido de ligante y drenaje del pavimento.

2.5.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad es la facilidad con que una mezcla asfáltica puede colocarse y compactarse durante el proceso de construcción. Una mezcla con buena trabajabilidad permite una colocación uniforme y una compactación eficiente, mientras que una mezcla con baja trabajabilidad tiene dificultades en los dos procesos (Granados, 2017).

Esta propiedad puede optimizarse ajustando parámetros de diseño, como, por ejemplo, el tipo y la gradación del agregado. Las mezclas con alta proporción de agregado grueso tienden a segregarse durante el manejo y tienen mayor dificultad para lograr una compactación adecuada. Del mismo modo, un contenido excesivo

de relleno mineral puede incrementar la viscosidad de la mezcla, reduciendo su facilidad de colocación (Ángulo y Duarte, 2005).

Aunque el ligante asfáltico no suele ser la causa principal de los problemas de trabajabilidad, sí influye en esta propiedad. La temperatura de la mezcla afecta directamente la viscosidad del asfalto: temperaturas demasiado bajas reducen la trabajabilidad, mientras que temperaturas excesivamente altas pueden hacer que la mezcla se torne blanda o “tierna”. Además, tanto el grado como el porcentaje de asfalto empleado tienen incidencia en el comportamiento de la mezcla durante su colocación y compactación (Granados, 2017).

Tabla 7.

Causas y efectos de mezclas con mala trabajabilidad

CAUSA	EFEECTO
Temperatura inadecuada durante el mezclado o la compactación	Dificultad para extender y compactar la mezcla, generando vacíos excesivos y baja densidad
Contenido insuficiente de asfalto	Mezcla seca y poco cohesiva, con mayor tendencia a la segregación y falta de uniformidad
Gradación inadecuada del agregado (muy gruesa o con falta de finos)	Mezcla difícil de manejar, que no se asienta uniformemente y presenta baja cohesión interna
Exceso de humedad en los agregados	Mala adherencia entre el asfalto y el agregado, provocando desprendimiento y pérdida de material
Uso de agregados con forma redondeada o pulida	Reducción de la fricción interna y menor estabilidad durante la compactación
Tiempo excesivo entre la mezcla y la colocación en obra	Enfriamiento prematuro del material, lo que dificulta la compactación y aumenta la permeabilidad del pavimento

Nota. En esta tabla se determinan las causas de la baja trabajabilidad en mezclas asfálticas y los efectos, los cuales están relacionados con deficiencias en temperatura, gradación, contenido de ligante, humedad y tiempo de colocación.

2.5.5. Flexibilidad

La flexibilidad de un pavimento asfáltico se refiere a la capacidad para adaptarse a los movimientos o asentamientos graduales de la subrasante sin presentar agrietamientos. Esto es importante puesto que todas las subrasantes experimentan, en mayor o menor medida, deformaciones por carga o expansiones del suelo debidas a variaciones de humedad y temperatura (Granados, 2017).

En general, las mezclas de granulometría abierta y con mayor contenido de asfalto dan una flexibilidad superior a la de las mezclas densamente graduadas con bajo contenido de ligante. A pesar de ello, los requerimientos de flexibilidad entran en un conflicto con los de estabilidad estructural, siendo necesario equilibrar las dos propiedades para el aseguramiento de un buen desempeño del pavimento.

2.5.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento asfáltico es la capacidad para soportar flexiones repetidas provocadas por el tránsito vehicular sin que se generen grietas o fallas estructurales. Algunas investigaciones han demostrado que factores como el contenido de vacíos estrechamente vinculado con la cantidad de asfalto y la viscosidad del ligante influyen significativamente en esta propiedad (Granados, 2017).

Cuando el porcentaje de vacíos aumenta, por un diseño inadecuado o por una compactación deficiente, la mezcla pierde cohesión y disminuye su resistencia a la fatiga, reduciendo así su vida útil. De la misma manera, el envejecimiento y endurecimiento del asfalto con el tiempo afectan de una manera negativa a su capacidad de flexión, haciéndolo más propenso al agrietamiento (Granados, 2017).

Las características que permiten la durabilidad del sistema son el espesor y la capacidad de soporte de la subrasante. De manera general, los pavimentos más gruesos construidos sobre subrasantes firmes se deforman menos bajo la acción de las cargas, mientras que los más delgados o los apoyados sobre suelos débiles son más susceptibles a la fatiga y al deterioro prematuro (Reyes, et al., 2007).

Tabla 8.

Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

CAUSA	EFEECTO
Contenido insuficiente de asfalto en la mezcla	Fisuración por fatiga prematura, debido a la baja flexibilidad y capacidad de absorción de esfuerzos repetidos
Alta rigidez o baja ductilidad del ligante asfáltico (por envejecimiento o mala selección)	Grietas en forma de piel de cocodrilo, originadas por la incapacidad del material para deformarse sin fracturarse
Espesor inadecuado de la capa asfáltica	Concentración excesiva de esfuerzos bajo las cargas del tránsito, lo que acelera la formación de grietas por fatiga
Deficiencias estructurales en la base o subrasante	Flexiones excesivas del pavimento, que provocan agrietamiento progresivo y pérdida de capacidad estructural

Nota. La tabla muestra las causas que reducen la resistencia a la fatiga de los pavimentos asfálticos y sus efectos. Se observa que factores como el bajo contenido de asfalto, rigidez del ligante, espesor insuficiente de la capa y deficiencias estructurales de la base o subrasante influyen en la aparición de grietas y en la disminución de la vida útil del pavimento.

2.5.7. Resistencia al Deslizamiento

La resistencia al deslizamiento se refiere a la capacidad de la superficie de un pavimento para evitar que las ruedas de los vehículos patinen, más aún en condiciones húmedas. Para lograr un buen nivel de adherencia, es necesario que los neumáticos conserven el contacto directo con las partículas del agregado y no se deslicen sobre una capa de agua superficial, fenómeno conocido como hidroplaneo (Granados, 2017).

Un pavimento con una textura rugosa y áspera da mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. De la misma forma, los agregados empleados tienen que mantener su aspereza y resistir el desgaste o pulimiento que es causado por el tránsito vehicular. Las mezclas asfálticas inestables, que tienden a deformarse

o exudar asfalto hacia la superficie, suelen generar serios inconvenientes en la adherencia y seguridad del pavimento (Ángulo y Duarte, 2005).

Tabla 9.

Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

CAUSA	EFEECTO
Exceso de asfalto en la mezcla	Deformaciones plásticas o ahuellamientos en las zonas de rodadura debido a la pérdida de estabilidad bajo carga
Compactación deficiente durante la construcción	Baja densidad y cohesión interna, lo que facilita el movimiento y desplazamiento del material con el tránsito
Agregados redondeados o con poca angularidad	Disminución de la fricción interna, provocando fluencia y deslizamiento en la mezcla bajo cargas repetidas
Temperatura elevada en servicio o ligante asfáltico muy blando	Reblandecimiento del asfalto, generando deformaciones permanentes y pérdida de la forma del pavimento

Nota. La tabla muestra las causas que afectan la resistencia al deslizamiento de los pavimentos asfálticos y los efectos que producen en su comportamiento estructural y funcional. Se hace referencia a la selección adecuada de materiales, control del contenido de asfalto y una compactación apropiada durante la construcción.

2.6. AFECTACIONES CAUSADAS AL AMBIENTE POR NEUMÁTICOS DESECHADOS

Contaminación del medio terrestre

El suelo es un recurso vital pero altamente vulnerable a la contaminación. En Ecuador, millones de neumáticos se desechan cada año, muchos de los cuales no son llevados a centros de reciclaje y terminan acumulándose en carreteras, terrenos baldíos y áreas naturales, generando riesgos ambientales y de salud (Zamora et al., 2023).

Estos residuos tienen compuestos químicos, como polímeros sintéticos, azufre, zinc, resinas, arcillas y sílice, que al liberarse alteran el equilibrio del suelo, reducen su productividad agrícola y afectan la composición de los cultivos, representando un riesgo para la seguridad alimentaria (Vignart, 2010).

Debido a que están diseñados para resistir condiciones extremas, los neumáticos se degradan lentamente y al permanecer en el suelo provocan cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Contaminación acuática

Cuando no se gestionan correctamente, los neumáticos terminan en ríos, lagunas y mares, afectando la vida acuática y poniendo en riesgo a las comunidades que dependen de esas aguas. En espacios abiertos, los neumáticos acumulados retienen agua de lluvia, convirtiéndose en criaderos de mosquitos que transmiten enfermedades como dengue y paludismo. A nivel mundial, los neumáticos constituyen una de las principales fuentes de microplásticos en los océanos; estos fragmentos permanecen durante largos periodos, son ingeridos por peces y otras especies marinas, y alteran el equilibrio de los ecosistemas y la biodiversidad (Cruz, 2012).

Contaminación atmosférica

El uso de neumáticos contribuye a la contaminación y es que el contacto con el asfalto incrementa el consumo de combustible y la emisión de gases, como dióxido de carbono, y partículas finas perjudiciales para la salud. Su quema al aire libre libera compuestos altamente tóxicos, incluyendo monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, plomo y benceno, los cuales deterioran la calidad del aire, contribuyen al cambio climático y generan sustancias cancerígenas que permanecen en la atmósfera (Instituto Nacional de Salud, 2018).

Impactos en la salud humana

El manejo inadecuado de neumáticos usados favorece la proliferación de plagas y vectores de enfermedades. Los neumáticos viejos que acumulan agua se convierten en criaderos de mosquitos transmisores de virus como dengue y chikungunya.

Por otro lado, la quema de neumáticos libera más de 30 sustancias químicas peligrosas que afectan los sistemas respiratorio, circulatorio y nervioso. Estas emisiones pueden provocar mareos, falta de oxígeno en la sangre, irritación ocular, tos, dificultad para respirar y complicaciones en personas con enfermedades pulmonares previas (Zamora et al., 2023).

Además, entre los compuestos liberados se encuentra el benceno, considerado cancerígeno, lo que incrementa el riesgo de desarrollar cáncer tras exposiciones prolongadas. En general, la incineración de neumáticos ocasiona tres problemas principales: contaminación del aire, contaminación del suelo y del agua, y exposición directa a emisiones tóxicas que representan una seria amenaza para la salud y el medio ambiente (Salazar, 2018).

Uso de las llantas fuera de uso

El reciclaje de llantas permite obtener productos con aplicaciones en distintos sectores. Entre ellos se encuentran el relleno oligante, que mejora las propiedades mecánicas del suelo; asfalto modificado con caucho, que incrementa la resistencia y durabilidad de las vías; combustible alternativo, utilizado en la industria petrolera para facilitar la extracción de hidrocarburos; las materias primas para la industria del caucho y sus derivados, empleadas en la fabricación de nuevos productos de goma; y productos decorativos, elaborados con fines estéticos y recreativos (Vega, 2020).

Fariño (2022) establece que, a mayoría de las llantas usadas se recolectan y retornan a la fábrica de origen. Tras la recolección, se extrae el acero de las llantas desechadas y luego se trituran para ser enviadas a empresas que producen materiales a partir de caucho en pequeños fragmentos. En Ecuador, de cada 100 llantas, aproximadamente 55 son retiradas por sus propietarios para uso como repuestos u otros fines, mientras que los 45 restantes se entregan a puntos de recolección al no poder reutilizarse. De estas, el 67% se utiliza como combustible alternativo en hornos de la industria cementera y el 33% restante se recicla, generando productos como césped sintético, suelos para pistas deportivas y alfombrillas.

Obtención del grano de caucho reciclado (GCR)

El grano de caucho reciclado (GCR) es un material obtenido a partir de la trituración mecánica y separación de las llantas en desuso de vehículos automotores. Está compuesto por caucho vulcanizado y no es tóxico. Sin embargo, cuando las llantas no reciben un tratamiento adecuado, suelen terminar en rellenos sanitarios, basureros o plantas térmicas, lo que genera impactos ambientales negativos (Correa, 2018).

El GCR se produce mediante la trituración mecánica y posterior separación de llantas de vehículos fuera de uso. Este material está formado por caucho vulcanizado y no representa toxicidad. No obstante, cuando las llantas no son gestionadas correctamente, se acumulan en rellenos sanitarios, vertederos o plantas de incineración, ocasionando impactos ambientales adversos.

Correa (2018) determina que el caucho triturado de llantas desechadas se denomina grano de caucho reciclado (GCR). Este material puede obtenerse mediante distintos métodos, como el recapado, la molienda a temperatura ambiente y la molienda criogénica, los cuales tienen costos crecientes según se enumeran. Cada proceso produce GCR con características particulares. En países como México, Colombia, Chile y Perú, se observa un uso predominante del GCR obtenido mediante recapado o recauchutado, donde, mediante herramientas mecánicas como amoladoras o desgastadoras, se obtiene el material sin generar contaminación significativa. Posteriormente, el caucho se muele a temperatura ambiente, logrando granulometrías que van desde 1 mm hasta aproximadamente 10 mm. Asimismo, este autor diferencia dos procesos básicos de incorporación a los sistemas asfálticos:

- **Vía Húmeda**

Este proceso produce el “asfalto modificado con caucho” o “asfalto-caucho”, aumentando la viscosidad del cemento asfáltico y otorgando propiedades específicas. La plasticidad disminuye a altas temperaturas, reduciendo fenómenos como el ahuellamiento, mientras que a bajas temperaturas mejora la flexibilidad, evitando fisuración. Factores críticos para este proceso incluyen el tamaño, textura y proporción del GCR, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica, contenido aromático del asfalto y posibles aditivos.

En la vía húmeda, los granos de caucho se integran al cemento asfáltico en un tanque con agitación, formando el asfalto-caucho, que funciona como ligante modificado. Normalmente, se utiliza GCR de hasta 0.85 mm y se adiciona entre 18-24% en peso respecto al cemento asfáltico. La mezcla requiere mantener temperaturas de 180-210 °C durante 1 a 4 horas para asegurar la correcta unión del caucho con el asfalto.

Figura 2.

Proceso de adición del Granulo de Caucho Reciclado (GCR) por vía húmeda



Nota. En la figura se presenta un proceso en el cual el betún se mezcla con el GCR en un tanque con tornillos sin fin para garantizar la reacción adecuada entre ambos materiales (45 a 60 min). Tomado de *Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito* (p.21), C. Correa, 2018, Universidad Militar Nueva Granada.

- **Vía seca**

Se trata del método en el cual el caucho reciclado se incorpora directamente a los agregados antes de añadir el cemento asfáltico. En este procedimiento, los granos de caucho actúan como un agregado adicional o como reemplazo parcial del agregado fino, representando entre el 1% y 3% del peso total de los agregados de la mezcla.

Los granos de caucho se mezclan con los áridos previamente calentados, mientras que el cemento asfáltico utilizado es el mismo que en las mezclas convencionales.

No obstante, las temperaturas de mezclado son más elevadas, normalmente entre 160 °C y 190 °C, y las de compactación se sitúan entre 150 °C y 160 °C.

Figura 3.

Proceso de adición del Granulo de Caucho Reciclado (GCR) por vía seca



Nota. En la figura se muestra que el GCR reemplaza un porcentaje reducido de los agregados, equivalente aproximadamente entre el 1 % y el 3 % del peso total. Tomado de *Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito* (p.21), C. Correa, 2018, Universidad Militar Nueva Granada

Reciclaje por Trituración Mecánica o físico

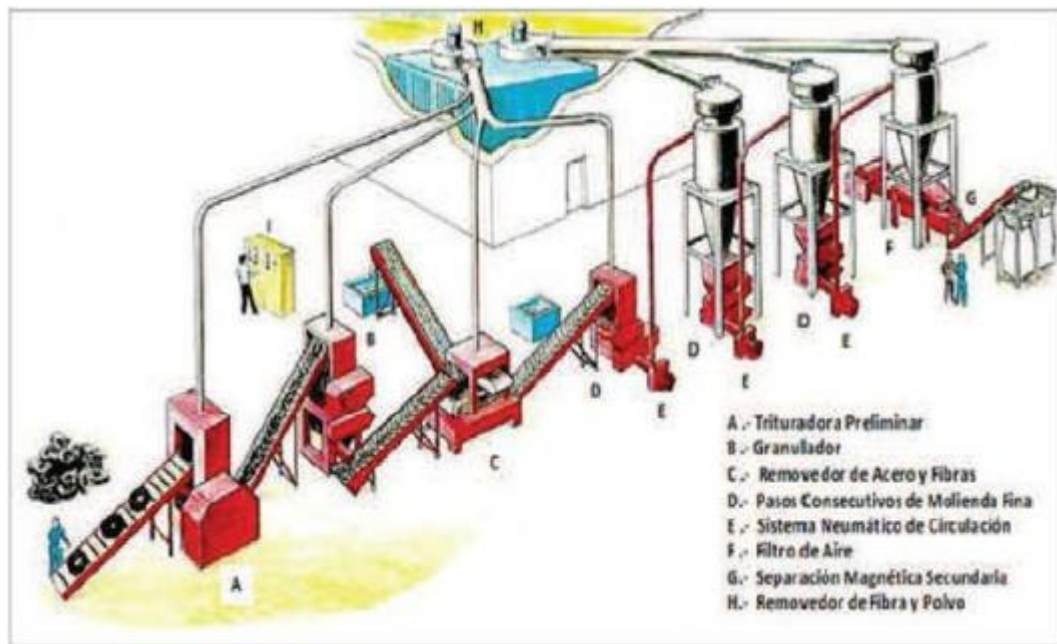
En el reciclaje mecánico, los materiales obtenidos presentan alta calidad y están libres de impurezas, lo que facilita su uso en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración mediante sistemas mecánicos es el paso inicial en los distintos métodos de recuperación de residuos de neumáticos. Este procedimiento se realiza generalmente con trituradoras que tienen dos o más ejes paralelos con cuchillas girando a distintas velocidades, lo que favorece la incorporación del neumático. La separación entre los ejes determina el tamaño de los fragmentos obtenidos, y este paso constituye la etapa previa a la molienda (Cadenas, 2014).

La molienda a temperatura ambiente generalmente se realiza en un molino de dos rodillos tipo “cracker”, estos tienen ranuras con bordes afilados que fragmentan el caucho. Estos molinos clásicos están conformados por un rotor y un estator circundante. Antes del molido, es imprescindible retirar los componentes metálicos para evitar daños al equipo, normalmente mediante separadores magnéticos

ubicados sobre las cintas transportadoras. Para eliminar las fibras textiles, se utilizan cintas o bandejas vibratorias que apelmazan las fibras, las cuales luego se separan mediante tamizado u otros dispositivos (Cadenas, 2014).

Figura 4.

Proceso productivo del reciclaje de caucho por molienda mecánica



Nota. En la figura se presenta un proceso básico de reciclaje donde se describen cada una de sus etapas. Tomado de *Recuperación de cauchos a partir de neumáticos fuera de uso* (p.20), N. Cadenas, 2014, República Bolivariana de Venezuela.

Reciclaje por Trituración Criogénica

El proceso criogénico consiste en enfriar los residuos de caucho, incluidos neumáticos completos, a temperaturas extremadamente bajas, entre -80°C y -198°C , con el objetivo de volver el material frágil, en un estado similar al vítreo. En estas condiciones, el caucho puede triturarse mediante impacto en molinos de martillo o de choque. Normalmente se utiliza nitrógeno líquido por ser eficaz e inerte, lo que reduce la oxidación superficial, aunque también pueden emplearse dióxido de carbono líquido o aire frío. El enfriamiento puede realizarse antes de la trituración, mediante cintas transportadoras, extrusoras, túneles o baños de nitrógeno, o directamente durante el molido; la primera opción es hasta dos veces más eficiente. El resultado es un polvo de caucho fino y homogéneo, generalmente

entre las mallas 30 y 120, lo que mejora la calidad del producto. Sin embargo, este método presenta limitaciones, como la presencia de restos de acero, elevado consumo de nitrógeno (aproximadamente 0,5 kg por cada kilo de caucho desde piezas de 50 mm hasta granulados de 2 mm), necesidad de equipos especializados, instalaciones costosas y mantenimiento complejo, lo que incrementa los costos operativos y restringe su aplicación práctica (López, 2020).

Figura 5.

Esquema de una planta criogénica de procesamiento de desechos de caucho



Nota. La figura presenta un esquema de una planta criogénica utilizada para el procesamiento de desechos de caucho, donde se evidencia la integración de etapas destinadas a la reducción y clasificación del material. Tomado de *Estudio de los procesos de reciclaje de los residuos de caucho* (p.19), E. López, 2020, Pontifica Universidad Católica del Perú.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL Y MODIFICADA (ADICIONANDO CAUCHO TRITURADO DE NEUMÁTICO RECICLADO)

3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Tipo

La presente investigación se define bajo un diseño de carácter experimental de un factor con seis tratamientos. Esto se debe a que el estudio no se limita observar las variables de manera pasiva, sino que manipula deliberadamente la variable independiente (los porcentajes de adición de grano de caucho reciclado: 1%, 1.5%, 2%, 2.5% y 3%) bajo condiciones estrictamente controladas. A través de esta manipulación, se busca provocar y analizar de manera intencional modificaciones físicas y volumétricas sobre la variable dependiente (las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, tales como la estabilidad, el flujo, la densidad y el porcentaje de vacíos de aire).

3.1.2 Nivel

La investigación se desarrolló a un nivel explicativo, debido a que buscó determinar el efecto de la incorporación parcial de granos de caucho reciclado (GCR) sobre las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Para ello, se evaluaron diferentes porcentajes de GCR mediante el método Marshall, analizando indicadores como la estabilidad, el flujo, la densidad aparente (Bulk), los vacíos de aire (Va), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA). Adicionalmente, los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), con el propósito de establecer si las diferencias observadas entre los tratamientos evaluados eran estadísticamente

significativas, permitiendo explicar la influencia del porcentaje de GCR sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica.

3.2 ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 Enfoque

El estudio se inscribe bajo un enfoque predominantemente cuantitativo, caracterizado por la objetividad, la recolección de datos medibles y el análisis estadístico comparativo. El proceso de investigación se fundamenta en la cuantificación numérica extraída de rigurosos ensayos estandarizados (normas ASTM, AASHTO e INEN) aplicados a diferentes briquetas de asfalto. Las propiedades mecánicas evaluadas; como la estabilidad medida en libras (lb) o el flujo medido en centésimas de pulgada (0.01”); representan magnitudes numéricas exactas que permiten validar o rechazar de manera científica la hipótesis planteada. Asimismo, este enfoque analítico facilita la comparación empírica entre una “mezcla patrón convencional” y las “mezclas modificadas”, utilizando gráficas de tendencias y correlaciones volumétricas para hallar el punto exacto de optimización del material.

3.2.2 Diseño

El diseño fue experimental, dado que se manipularon las mezclas asfálticas incluyendo distintos porcentajes de granos de caucho reciclado (GCR), a esto se denomina manipulación de la variable independiente y el análisis de los cambios efectuados en la dependiente.

3.3 POBLACIÓN

En el marco de la ingeniería de materiales, la población estuvo constituida por las mezclas asfálticas elaboradas mediante el método Marshall, tanto la mezcla convencional (patrón), como las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de incorporación de granos de caucho reciclado (GCR), susceptibles de ser evaluadas mediante sus propiedades volumétricas y mecánicas. Estas mezclas representan las unidades experimentales sobre las cuales se analizó el efecto de la incorporación de

los cinco porcentajes de GCR (1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3.0%) en el desempeño de pavimentos flexibles.

3.4 MUESTRA

La muestra estuvo conformada por 33 briquetas Marshall, elaboradas bajo condiciones controladas de laboratorio. En la primera fase experimental se fabricaron 18 briquetas correspondientes a la mezcla patrón, distribuidas en cinco contenidos de cemento asfáltico (4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%), con tres briquetas por cada dosificación, además de tres briquetas adicionales elaboradas con el contenido óptimo de cemento asfáltico. En la segunda fase se elaboraron 15 briquetas correspondientes a las mezclas modificadas, incorporando granos de caucho reciclado (GCR) en porcentajes de 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3.0%, utilizando el contenido óptimo de asfalto determinado previamente y fabricando tres especímenes por cada tratamiento. En total, la investigación evaluó 33 briquetas Marshall, las cuales constituyeron la muestra para el análisis de las propiedades volumétricas y mecánicas.

3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica principal empleada es la observación experimental directa mediante ensayos de laboratorio, la cual permite registrar de manera precisa el comportamiento físico-mecánico de los especímenes ante fuerzas de compresión y factores térmicos controlados. Como técnica secundaria, se implementa la revisión documental, orientada a recopilar antecedentes normativos e internacionales sobre la tecnología del asfalto modificado y los criterios volumétricos de diseño vial vigentes, tales como las especificaciones de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI).

Los datos se recolectan y registran mediante el uso de infraestructura tecnológica e instrumentos de medición calibrados del Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la UPSE. Entre los instrumentos clave destacan:

- La Prensa Marshall, equipada con un medidor de estabilidad (anillo de carga) y un medidor de flujo (dial indicador), con una capacidad de 10.000lbs, modelo MQA-1, del fabricante MAQUISUELOS.

- Moldes metálicos cilíndricos y el Compactador Marshall mecánico/manual (para la aplicación exacta de los golpes de compactación por cara).
- Hornos de calentamiento con control digital de temperatura (rangos de 110 °C hasta 210 °C), modelo BJPX-HGZ270 con nombre FORCED AIR DRYING OVEN de la marca BIOBASE, balanzas analíticas de alta precisión (sensibilidad ≤ 0.1 g) y picnómetros de vacío (para el ensayo Rice de gravedad específica teórica máxima).
- Para la recolección de los datos cualitativos e impactos de sostenibilidad, se emplea como instrumento metodológico la Matriz de Impacto Ambiental de Leopold.

Las fases de la investigación se basan en:

Caracterización y Preparación de Materiales

Se inicia con el acopio, secado en horno y tamizado de los agregados pétreos finos y gruesos para verificar sus propiedades físicas y mecánicas (angularidad, absorción, abrasión y densidad). Paralelamente, se define la curva granulométrica del Grano de Caucho Reciclado (GCR) homogeneizando las partículas bajo el tamiz N°4.

Dosificación y Mezclado (Vía Seca)

La dosificación de los elementos para la mezcla asfáltica se controla por medio de la normativa ASTM D3515, se realiza teniendo en consideración el tamaño máximo nominal del agregado (3/4”), de igual forma, cumpliendo la norma ecuatoriana del MTOP. Posteriormente, se calcula y pesa el porcentaje de GCR que sustituyó parcialmente la masa de arena, manteniendo constante la masa total del agregado. Se precalientan los agregados (entre 170 °C y 210 °C) y se mezclan en seco con el caucho durante un tiempo aproximado de 2 minutos antes de incorporar el cemento asfáltico caliente, controlando los tiempos de digestión del ligante.

Moldeo y Compactación

La mezcla asfáltica modificada se vierte en los moldes metálicos previamente acondicionados y se somete al proceso de compactación estandarizado mediante la

aplicación de 75 golpes por cara de acuerdo con las especificaciones MTOP-001F-2002 pensado para un tránsito alto para la compactación Marshall, extrayendo posteriormente las briquetas para su curado y posterior registro volumétrico.

Ensayos de Rotura y Evaluación Ambiental

Las briquetas preparadas se sumergen en un baño de agua termostático y se ensayan en la Prensa Marshall, para la realización de este ensayo se emplea un recipiente metálico destinado al acondicionamiento de las briquetas mediante baño María, el cual se llena con agua limpia y se calienta hasta alcanzar una temperatura de 60°C (140 °F). Durante este proceso es importante controlar periódicamente la temperatura con un termómetro, procurando que permanezca estable durante todo el acondicionamiento. De acuerdo con el procedimiento para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado, establecido en la ASTM D1559 (Diseño de Mezclas Método Marshall e Interpretación de Resultados), las briquetas deben de acondicionarse a 60°C antes de realizar el ensayo de estabilidad y flujo, con el propósito de que todas las muestras sean evaluadas bajo las mismas condiciones de temperatura.

Una vez alcanzada la temperatura requerida, las briquetas se colocan cuidadosamente dentro del recipiente, distribuyéndolas de forma ordenada para facilitar un calentamiento uniforme. Durante esta etapa es necesario utilizar el equipo de protección adecuado para evitar quemaduras ocasionadas por la temperatura del agua.

Las muestras permanecen completamente sumergidas entre 30 y 40 minutos, verificando de manera constante que la temperatura del baño no presente variaciones significativas. De esta manera, se asegura que todas las briquetas alcancen un acondicionamiento homogéneo antes de ser sometidas al ensayo Marshall.

Finalmente, la evaluación de los impactos ambientales se desarrolló mediante la Matriz de Leopold, debido a que esta metodología permite identificar y valorar de manera ordenada las interacciones entre las actividades del proyecto y los componentes del ambiente que podrían verse afectados. Su aplicación resulta apropiada para la presente investigación, ya que el propósito no es realizar un

análisis ambiental de una obra vial en funcionamiento, sino evaluar los posibles efectos derivados de la incorporación de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas elaboradas bajo condiciones de laboratorio.

La elección de esta metodología también responde el alcance del estudio. Si bien existen otros métodos de evaluación ambiental, como la Matriz de Conesa o el sistema Batelle-Columbus, estos requieren un mayor nivel de detalle, información de campo y variables propias de proyectos en etapa de construcción o de operación. En contraste, la Matriz de Leopold ofrece un procedimiento más práctico para investigaciones experimentales, permitiendo relacionar directamente cada actividad desarrollada con los factores ambientales involucrados y asignar una valoración de acuerdo con la magnitud e importancia de los impactos identificados.

En este sentido, la Matriz de Leopold constituye una herramienta adecuada para complementar la evaluación técnica realizada mediante el método Marshall, ya que facilita la identificación de los beneficios ambientales asociados al aprovechamiento de neumáticos fuera de uso, la reducción del consumo de agregados naturales y la disminución de residuos que podrían generar efectos negativos sobre el entorno. De esta manera, la valoración ambiental se integra con los resultados mecánicos, proporcionando una visión más completa sobre la viabilidad del uso de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

El procesamiento de la información recolectada se efectúa mediante el uso de la estadística descriptiva, explicativa con un análisis de varianza (ANOVA), los análisis volumétricos de ingeniería y la modelación gráfica comparativa. Los datos crudos obtenidos en los ensayos mecánicos se procesan mediante fórmulas matemáticas estandarizadas para calcular propiedades como los Vacíos de Aire (V_a), los Vacíos en el Agregado Mineral (VMA), los Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) y la Gravedad Específica Bulk (G_{mb}), conforme a los procedimientos descritos en la Norma ASTM D1559, estos parámetros constituyen la base para evaluar el comportamiento físico de las mezclas y comparar el efecto de la incorporación de grano de caucho reciclado.

Una vez obtenidos los promedios numéricos de cada serie de briquetas resultado de los ensayos Marshall, la información se organizó en una hoja electrónica de Microsoft Excel para facilitar su procesamiento y análisis. Posteriormente, se elaboraron las gráficas correspondientes a cada uno de los parámetros evaluados, considerando en el eje horizontal el porcentaje de contenido de cemento asfáltico y en el eje vertical los valores de estabilidad Marshall, Flujo, Gravedad específica Bulk (Gmb), vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

La determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizó mediante el procedimiento tradicional del método Marshall. Para ello, se elaboraron briquetas con contenidos de cemento asfáltico de 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, valores seleccionados dentro del rango habitualmente recomendado para el diseño Marshall (4% - 8%), intervalo recomendado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente y suficiente para identificar el contenido óptimo de ligante, de acuerdo con el procedimiento descrito por el Manual MS-2 del Asphalt Institute y las especificaciones granulométricas de la ASTM D3515. Posteriormente, se analizó la curva correspondiente a los vacíos de aire (Va) en función del contenido de asfalto y se identificó el porcentaje asociado a un contenido de vacíos cercano al 5,2%, valor de referencia recomendado por el método Marshall para mezclas destinadas a pavimentos de tráfico pesado. Finalmente, este porcentaje se verificó en las curvas de estabilidad Marshall, Flujo, Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) y Vacíos llenos de asfalto (VFA), comprobando que cumpliera con los criterios de aceptación establecidos para el diseño de la mezcla que se pueden observar en la Tabla 12.

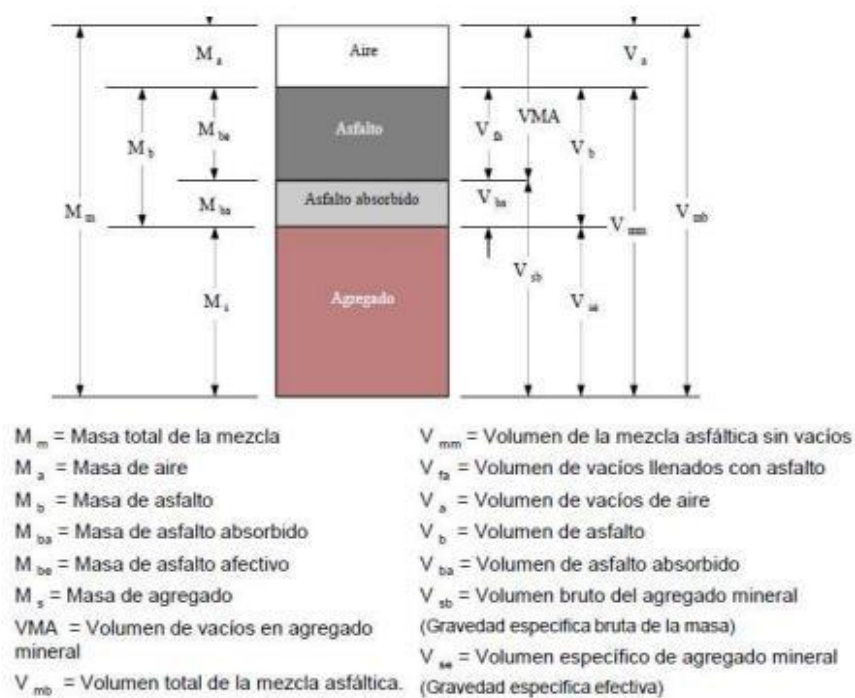
3.6 METODOLOGÍA DEL O.E.1.: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE INCORPORACIÓN DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS POR EL MÉTODO MARSHALL.

La mezcla asfáltica es el resultado de la combinación de cemento asfáltico con agregados minerales en proporciones cuidadosamente determinadas. El producto obtenido forma, al enfriarse, un material estable y resistente, capaz de soportar la

acción del tránsito vehicular. Las principales propiedades son rigidez, durabilidad y resistencia a la fatiga, como también un nivel de permeabilidad que contribuye a la estabilidad y funcionalidad del pavimento.

Figura 6.

Sección típica de una mezcla asfáltica



Nota. En esta figura se representa la composición volumétrica y másica de una mezcla asfáltica. Tomado del Curso de entrenamiento en Materiales Asfálticos (p. 70), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014, Subsecretaría de Obras Públicas.

3.6.1 Ensayos Físicos y Mecánicos de los Agregados Pétreos que Conforman una Mezcla Asfáltica

3.6.1.1 Análisis granulométrico de los Agregados Pétreos según la norma ASTM D 3515

Este es un ensayo que permite determinar la distribución de las partículas según su tamaño, lo cual facilita un control más preciso en la producción de agregados y asegura el cumplimiento de las especificaciones requeridas. Es importante destacar que este método no es aplicable cuando las partículas a ensayar tienen tamaños menores a 75 micrómetros (Concho y Pérez, 2023). Se clasifica el material en:

- Agregado Grueso: porción del material que pasa el tamiz INEN 4.74 (N°4). (M.O.P, 2002)
- Agregado Fino: porción del material que pasa el tamiz INEN 4.75mm(N°4) y es retenida en el tamiz INEN 75 micrones (N°200). (M.O.P, 2002)

3.6.1.2 Determinación de Gravedad Especifica y Absorción del Agregado Grueso (Norma ASTM C 127)

Concho y Pérez (2023) hacen referencia a la determinación de gravedad especifica y absorción del agregado grueso, los equipos a utilizar, preparación de la muestra y los cálculos a obtener, lo que se establece en las siguientes líneas:

El procedimiento de este ensayo permite determinar la gravedad específica saturada superficialmente seca, gravedad específica aparente y absorción de agua de una muestra de partículas de agregados gruesos.

Equipos a utilizar

- Balanzas
- Canastilla metálica
- Recipiente de agua
- Dispositivo para la suspensión del recipiente con la muestra

Preparación de la muestra

La muestra debe estar compuesta por material que se retenga en el tamiz N°4, asegurando que se obtenga la cantidad necesaria para el ensayo, con un peso mínimo de 2 kg. Una vez realizado el tamizado, se debe lavar completamente la muestra para eliminar cualquier polvo adherido. Seguidamente, se procede a secar la muestra en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C y se deja enfriar durante un periodo de 1 a 3 horas a temperatura ambiente. Después de esto, el agregado grueso se sumerge en agua a temperatura ambiente durante 24 ± 4 horas.

Al cumplirse el tiempo de inmersión, la muestra se retira del agua y se seca con un paño absorbente, eliminando el exceso de agua superficial, y luego se pesa en su

estado saturado superficialmente seco (SSS). Posteriormente, la muestra se coloca en una canastilla metálica y se determina su peso mientras está sumergida en agua. Una vez obtenido este valor, se seca nuevamente la muestra en horno a 110 ± 5 °C y, después de enfriarla a temperatura ambiente, se registra su peso final.

Cálculos a obtener:

Gravedad Específica Bulk: $G_{sb} = \frac{A}{B-C}$

Gravedad Especifica Bulk Saturada superficialmente Seca: $G_{sssb} = \frac{B}{B-C}$

Gravedad Especifica Aparente: $G_{sa} = \frac{A}{A-C}$

Absorción: $\%Abs = \frac{B-A}{A} \times 100$

Donde:

A= Peso en Aire del Agregado Secado al Horno (gr).

B= Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco (gr).

C= Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco Sumergido en Agua (gr).

3.6.1.3 Determinación de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino (Norma ASTM C 128)

Por su parte, Concho y Pérez (2023) se refieren a la determinación de la gravedad específica y absorción del agregado fino, considerando los equipos a utilizar, preparación de la muestra y cálculos a obtener.

Este ensayo describe el procedimiento utilizado para determinar la gravedad específica aparente, la gravedad específica saturada superficialmente seca y la absorción de agua de los agregados finos.

Equipos a utilizar:

- Balanzas (≤ 0.1 gr)

- Picnómetro (Matraz)
- Molde Cónico
- Pisón

Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra de ensayo, se pesa inicialmente 1 kg de agregado fino, que luego se seca en horno a 110 ± 5 °C. Una vez enfriada, la muestra se sumerge en agua durante 24 ± 4 horas.

Al concluir el tiempo de inmersión, se retira el agua y se esparce el agregado fino sobre una superficie plana y no absorbente, preparándolo para alcanzar su condición de saturado superficialmente seco (SSS). Para ello, se coloca un molde cónico con el diámetro mayor hacia abajo y se llena con la cantidad necesaria de agregado fino, compactando ligeramente con un pisón mediante 25 golpes, dejando que este caiga por gravedad desde una altura de aproximadamente 5 mm respecto al material. Se nivela la superficie y se retira el cono; si la muestra mantiene la forma del cono, se procede con el secado. Si el material se derrite o seca demasiado, se agrega un poco de agua hasta que el agregado fino pierda mínimamente su forma, indicando que ha alcanzado la condición SSS.

Posteriormente, se llena parcialmente de agua un picnómetro y se incorporan 500 ± 10 g de la muestra en condición SSS, completando el picnómetro hasta la marca de calibración. Se agita o invierte el picnómetro para eliminar burbujas de aire, retirando la espuma con una toalla si es necesario. Luego, se coloca el picnómetro en agua fría hasta alcanzar una temperatura de 23 ± 2 °C y se determina el peso total del picnómetro con la muestra y el agua.

Para finalizar, se vacía todo el contenido en un recipiente, se seca nuevamente en horno a 110 ± 5 °C, se deja enfriar y se registra el peso final de la muestra.

Cálculos a obtener:

Gravedad Específica Bulk: $G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$

Gravedad Específica Bulk Saturada superficialmente Seca: $G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$

Gravedad Específica Aparente: $G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$

Absorción: $\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$

Dónde:

A = Peso en Aire del Agregado Secado al Horno (gr).

B = Peso del Picnómetro (Matraz) Lleno de Agua (gr).

C = Peso del Picnómetro Calibrado con el Agregado y Agua hasta la marca (gr).

D = Peso del Material en Estado Saturado Superficialmente Seco (gr).

3.7 METODOLOGÍA DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA MODIFICADA MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MARSHALL CON INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO.

3.7.1 Diseño de mezcla asfáltica convencional utilizando el método Marshall

El diseño de una mezcla asfáltica consiste, en esencia, en definir la granulometría del agregado y el porcentaje adecuado de ligante asfáltico de manera que, una vez elaborada y colocada en obra, la mezcla cumpla con las propiedades estructurales y de desempeño previstas. Los métodos de dosificación buscan establecer el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, tomando como referencia las propiedades mecánicas y volumétricas deseadas (Sequeira-Rojas y Cervantes Calvo, 2014).

El método Marshall original fue concebido para mezclas asfálticas en caliente destinadas a pavimentos, utilizando agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1"). Posteriormente, se desarrolló el método Marshall modificado, aplicable a mezclas con agregados de hasta 38 mm (1.5") y diseñado tanto para ensayos de laboratorio como para control de calidad en campo, especialmente en mezclas de gradación densa. Dado que la prueba de estabilidad es de carácter empírico,

cualquier modificación a los procedimientos estándar puede reducir la precisión al momento de predecir el comportamiento real del pavimento (Kandhal y Roberts, 1996).

Este método utiliza briquetas cilíndricas de 64 mm (2½”) de altura y 102 mm (4”) de diámetro, preparadas según la norma ASTM D1559, que establece las condiciones de calentamiento, mezclado y compactación del asfalto y los agregados (Asphalt Institute, 2007).

Según Sequeira-Rojas y Cervantes-Calvo, 2014 los dos parámetros fundamentales del ensayo Marshall son:

- Densidad y análisis de vacíos, que permiten evaluar la compactación y la durabilidad de la mezcla.
- Estabilidad y flujo, donde la estabilidad representa la máxima carga (en Newtons o libras) que soporta el espécimen a 60 °C, y el flujo corresponde a la deformación total (en incrementos de 0,25 mm) que experimenta la muestra desde el inicio de la carga hasta alcanzar su punto máximo de resistencia.

3.7.2 Características y Propiedades volumétricas en una Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)

Una mezcla asfáltica elaborada en laboratorio debe someterse a un análisis detallado que permita evaluar su comportamiento dentro de la estructura del pavimento. Este análisis tiene como objetivo determinar la calidad, estabilidad y durabilidad del material, considerando los factores que influyen directamente en su desempeño bajo las condiciones reales de carga y clima. Para Chiquito y Torres (2015) entre las principales características que se analizan en una mezcla asfáltica en caliente se encuentran:

- Gravedad o Densidad Específica de la mezcla (Gmb)
- Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla Asfáltica Compactada (Gmm)
- Contenido de asfalto (Pb)

- Gravedad Específica Efectiva de la Mezcla (Gse)
- Volumen del agregado (Vagr)
- Vacíos de aire (Va)
- Volumen de Asfalto Efectivo (Vca)
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Vacíos llenos de asfalto (VFA)
- Porcentaje de Asfalto Absorbido (Pba)
- Contenido de Asfalto Efectivo (Pbe)

Chiquito y Torres (2015) describen cada una de las características:

La gravedad específica o densidad de una mezcla asfáltica se define como su peso por unidad de volumen, expresado en kilogramos por metro cúbico (kg/m³) o libras por pie cúbico (lb/ft³). Este parámetro es fundamental, ya que una mayor densidad en la capa de rodadura compactada se traduce en una mayor durabilidad y resistencia del pavimento frente al tránsito y las condiciones ambientales.

Generalmente, las mezclas asfálticas diseñadas y compactadas en laboratorio alcanzan densidades superiores a las obtenidas en campo, debido a las diferencias entre los métodos de compactación empleados. Por esta razón, las especificaciones técnicas suelen requerir que la densidad lograda en obra corresponda a un porcentaje mínimo (por ejemplo, el 95%) de la densidad determinada en laboratorio.

El procedimiento de ensayo consiste en sumergir las briquetas en un baño de agua a 25 °C durante cinco minutos. Antes de la inmersión, se registra el peso seco de cada muestra. Luego, las briquetas se secan superficialmente y se pesan nuevamente, para finalmente ser colocadas en una canasta y pesadas sumergidas en agua a la misma temperatura. Con estos datos se determina la densidad específica de la mezcla mediante la fórmula correspondiente.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{SSS} - W_w}$$

Donde:

W_a = Masa de la probeta seca en el aire

W_{ss} = Masa en el aire de probeta saturada superficialmente seca

W_w = Masa de la probeta sumergida en agua

La Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla Asfáltica compactada (Gmm) – Ensayo RICE según la norma ASTM D2041 se utiliza para determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm) de una mezcla asfáltica suelta mediante la aplicación de vacío, con el fin de eliminar el aire contenido en la muestra y obtener su densidad real sin vacíos.

El procedimiento consiste en colocar una muestra suelta previamente pesada, según el tamaño máximo nominal especificado (ver Tabla 10), dentro de la olla de vacío manteniendo una temperatura de 25 °C. A continuación, se activa la bomba de vacío durante 15 minutos para extraer completamente el aire atrapado en la mezcla. Transcurrido este tiempo, se pesa el conjunto de la muestra y la olla de vacío llena de agua, manteniendo la misma temperatura. Con los datos obtenidos, se calcula la gravedad específica teórica máxima (Gmm) mediante la fórmula correspondiente, lo que permite evaluar la densidad y grado de compactación de la mezcla asfáltica.

Se emplea la siguiente fórmula para calcularla:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad Específica Máxima de la muestra

A = Peso en Aire de la Mezcla Asfáltica Secada al Horno

B = Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua a 25°C ± 1°C (77°F)

C = Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua y Mezcla Asfáltica a 25°C

Tabla 10.*Cantidad de material para el ensayo Rice*

Tamaño máximo nominal de la partícula en la muestra; mm (pulgada)	Muestra mínima (gr)
50,0 (2")	6000
37,5 (1 ½")	4000
25,0 (1")	2500
19,0 (¾")	2000
12,5 (½")	1500
9,5 (¾")	1000
4,75 (Nº4)	500

Nota. La tabla presenta los pesos mínimos de muestra requeridos para realizar el ensayo de gravedad específica teórica máxima (Gmm) de mezclas asfálticas, según el tamaño máximo nominal del agregado. Esto permite que la cantidad de material empleada sea representativa y suficiente para obtener resultados precisos conforme a los lineamientos establecidos en la Norma ASTM D2041 y Normas NEVI-12.

Contenido de Asfalto (Pb) de la mezcla se determinó siguiendo el procedimiento establecido por el método Marshall, empleando diferentes porcentajes de cemento asfáltico para identificar el contenido óptimo de ligante. Para ello, se prepararon briquetas con los porcentajes de asfalto previamente definidos y se evaluaron sus propiedades volumétricas y mecánicas de acuerdo con los procedimientos descritos en las normas ASTM D1559, complementados con los lineamientos del Manual MS-2 del Asphalt Institute, referencia técnica ampliamente utilizada para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

La selección del contenido óptimo de asfalto se realizó mediante el análisis conjunto de las curvas obtenidas para la estabilidad Marshall, el Flujo, la gravedad específica Bulk (Gmb), los vacíos de aire (Va), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA). Se consideró como contenido óptimo aquel que cumplió simultáneamente con los criterios de aceptación establecidos por el método Marshall para mezclas asfálticas destinadas a pavimentos de tráfico

pesado, garantizando que el ligante disponible fuera suficiente para proporcionar una adecuada cohesión y recubrimiento de los agregados sin afectar el comportamiento mecánico de la mezcla.

Gravedad Específica Efectiva de la Mezcla (Gse) considera el volumen total de las partículas del agregado, haciendo a un lado los poros que son ocupados por el asfalto absorbido.

Se determina por la ecuación:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad Específica Teórica Máxima (Ensayo RICE)

P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100%

P_b = Contenido de cemento asfáltico

G_b = Gravedad Específica del cemento asfáltico

Volumen del agregado. ($V_{agr.}$) se trata de la proporción total de agregados presentes en la mezcla asfáltica, expresada en función del volumen que estos ocupan dentro de la masa total de la mezcla.

$$V_{agr} = \frac{\%Agr. * G_{mb}}{G_{sb}}$$

Donde:

V_{agr} = Volumen del agregado en porcentaje

$\%Agr.$ = Porcentaje del agregado = (100% – %Asfalto)

G_{mb} = Gravedad Específica Bulk de la mezcla asfáltica

G_{sb} = Gravedad Específica de la mezcla de agregados

Volumen de Vacíos de Aire (V_a) son espacios microscópicos que quedan entre las partículas del agregado recubiertas por el ligante asfáltico y que están presentes en toda mezcla asfáltica y guardan una relación inversa con la densidad: a mayor contenido de vacíos, menor será la densidad de la mezcla. Dicha relación incide

directamente en la durabilidad del pavimento, pues una mezcla con mayor densidad y, por ende, menor cantidad de vacíos tiende a ser más resistente y duradera en la capa de rodadura compactada.

Hay que indicar que cumplen una función importante, es decir, permiten que se produzca una compactación adicional por efecto del tráfico y facilitan el desplazamiento del asfalto dentro de la mezcla durante este proceso. De acuerdo con la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, emitida por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), el porcentaje de vacíos de aire recomendado para mezclas diseñadas en laboratorio con gradaciones cerradas oscila entre el 3% y el 5%. El cálculo del Porcentaje de Vacíos de Aire se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

V_a

= Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total de la mezcla.

G_{mm} = Gravedad Específica Máxima de la Mezcla Asfáltica

G_{mb} = Gravedad Específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

Volumen de Asfalto Efectivo (V_{ca}) corresponde a la cantidad real de ligante asfáltico presente en la mezcla que contribuye a recubrir las partículas del agregado y a mantener su cohesión. Su fórmula es:

$$V_{ca} = 100 - V_{agr.} - V_a$$

Donde:

$V_{agr.}$ = Volumen del agregado en porcentaje

V_a = Volumen de vacíos de aire en porcentaje

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) representa el volumen de espacios vacíos existentes entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada. Dichos espacios son los que permiten albergar el asfalto efectivo y los vacíos de aire (V_a), expresándose como un porcentaje del volumen total de la

mezcla. Un valor elevado de VMA indica una mayor capacidad para contener el ligante asfáltico, lo que contribuye a obtener una mezcla más resistente, flexible y duradera.

De acuerdo con la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 (MTOP), se establecen valores mínimos de VMA dependiendo del tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 11.

Criterios Marshall para VMA

Tamaño máximo nominal de partícula		% Mínimo VMA		
		% Diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	N°16	21.5	22.5	23.5
2.36	N°8	19.0	20.0	21.0
4.75	N°6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8"	14.0	15.0	16.0
19	3/4"	12.0	13.0	14.0
25	1"	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5"	10.0	11.0	12.0

Nota. La tabla presenta los valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA) exigidos por la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 (MTOP) según el tamaño máximo nominal de partícula y el porcentaje de vacíos de aire considerados en el diseño Marshall.

A continuación, se detalla la fórmula:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * \%Agr.}{G_{sb}} = 100 - V_{agr.}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

%Agr

= contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

Vacíos llenos de asfalto (VFA) corresponden al porcentaje del volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) que está ocupado por el cemento asfáltico. En otras

palabras, representan la proporción del espacio intergranular del agregado que ha sido llenado por el ligante asfáltico, mientras que el resto corresponde a los vacíos de aire. El valor de los VFA se obtiene restando los vacíos de aire del VMA y dividiendo el resultado para el VMA total. Su fórmula es la siguiente:

$$VFA = \frac{VMA - V_a}{VMA} \times 100$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

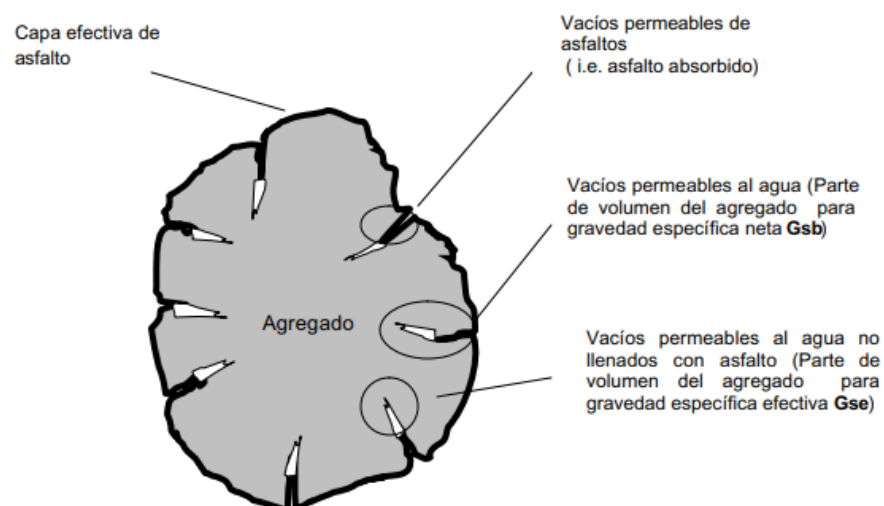
VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen mineral

V_a = Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

Porcentaje de Asfalto Absorbido (P_{ba}) representa la fracción del cemento asfáltico que es retenida por los poros internos de los agregados durante la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. Este parámetro resulta fundamental en el diseño de la mezcla, ya que permite diferenciar el ligante que permanece disponible para recubrir las partículas minerales del que es absorbido por el agregado.

Figura 7.

Parámetros de diseño volumétricos



Nota. La figura ilustra los diferentes tipos de vacíos y capas de asfalto presentes en una mezcla asfáltica, destacando la relación entre el agregado, el asfalto absorbido y la capa efectiva de ligante utilizada para el diseño volumétrico. Tomado de Curso

de entrenamiento en Materiales Asfálticos (p. 78), por Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2014, Subsecretaría de Obras Públicas.

La absorción del asfalto, P_{ba} se determina a través de la siguiente fórmula:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b$$

Donde:

G_{se} = Gravedad Específica Efectiva del agregado

G_{sb} = Gravedad Específica neta del agregado

G_b = Gravedad Específica del asfalto

Contenido de Asfalto Efectivo (P_{be}) se trata del volumen total de ligante asfáltico presente en la mezcla, descontando la fracción absorbida por los poros del agregado. En otras palabras, representa la cantidad de asfalto disponible para recubrir las partículas y formar una película cohesiva entre ellas. Su valor se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} \times V_{agr.} \right)$$

Donde:

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

$V_{agr.}$ = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

3.8 METODOLOGÍA DEL O.E.3.: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MEZCLA MODIFICADA MEDIANTE LOS PARÁMETROS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DEL MÉTODO MARSHALL CON INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO.

3.8.1 Especificaciones del método de diseño Marshall

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico se determinó utilizando el Método Marshall, el cual establece que el contenido de ligante se define en función del volumen de vacíos del 4%. Para ello, se elabora la gráfica de estabilidad frente al porcentaje de asfalto, seleccionando el punto de mayor valor en la curva. De igual manera, se construye la gráfica de gravedad específica bulk en función del porcentaje de asfalto, eligiendo el valor máximo indicado por la curva correspondiente.

Las propiedades obtenidas y calculadas con este contenido de ligante deben ser contrastadas con los criterios establecidos para el diseño de mezclas asfálticas. A continuación, se presentan los parámetros y valores de referencia del método Marshall:

Tabla 12.*Criterio de diseño de la mezcla por el Método Marshall*

Método Marshall	Tráfico Ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, número de golpes por capa	35		50		75	
Estabilidad: (lb)	3336	---	5338	---	8006	---
Flujo, (0,25mm) (0.01 in)	750	---	1200	---	1800	---
Porcentaje de vacíos	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos en agregados minerales	3	5	3	5	3	5
Ver tabla 11						
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Nota. La tabla 12 presenta los parámetros de diseño establecidos por la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 para el método Marshall, donde se detallan los criterios de mezcla, rangos de estabilidad, flujo, vacíos y número de golpes de compactación según el nivel de tráfico (ligero, medio o pesado).

3.8.2 Procedimiento de preparación de los agregados

El método Marshall establece que los agregados empleados en los ensayos deben estar completamente secos, a fin de evitar que la humedad altere los resultados obtenidos. Para ello, la mezcla de agregados se dispone en una bandeja y se somete a secado en horno a una temperatura de 110 °C (230 °F) hasta alcanzar un peso constante, registrándose dicho valor para el proceso de diseño.

Los agregados pétreos utilizados en esta investigación fueron proporcionados por la Constructora Morocho (CM), de donde se obtuvieron los materiales grava ¾”, gravilla 3/8” y arena. A estos se les practicaron los ensayos correspondientes para

verificar el cumplimiento de los requerimientos establecidos en la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI); los resultados respectivos se detallan en el Anexo 1.

Para la elaboración de la mezcla asfáltica, los agregados fueron combinados conforme a los criterios de graduación de la norma ASTM D3515, asegurando que la mezcla cumpla con los rangos granulométricos establecidos y que la curva resultante se ajuste a los parámetros normativos aplicables.

En la siguiente tabla se muestra la dosificación de agregados utilizada para el diseño de la mezcla asfáltica convencional desarrollada en este estudio.

Tabla 13.

Dosificación de la mezcla asfáltica convencional

Dosificación – Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional	
Agregados	Porcentaje (%)
$\frac{3}{4}$ "	30
$\frac{3}{8}$ "	45
Arena	25

Nota. La tabla presenta la proporción en porcentaje de los diferentes tamaños de agregados utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica convencional empleada en la investigación.

3.8.3 Preparación de las briquetas para el Método Marshall

Una vez definida la gradación del agregado, se procede a la elaboración de las briquetas (tres unidades). El material se calienta a una temperatura de 110 ± 5 °C y se mezcla con distintos porcentajes de cemento asfáltico, incrementados en intervalos de 0,5 %. Posteriormente, la mezcla se coloca en moldes previamente calentados para evitar pérdidas de temperatura durante el proceso.

Luego, las muestras se compactan en el equipo Marshall, aplicando 75 golpes por cada cara de la briqueta. Finalizada la compactación, las briquetas se dejan enfriar a temperatura ambiente durante 24 horas, tras lo cual se desmoldan para proceder con los ensayos correspondientes.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla patrón, se elaboraron cinco combinaciones con diferentes porcentajes de ligante: 4 %, 4,5 %, 5 %, 5,5 %

y 6 %. En este estudio se utilizó cemento asfáltico AC-20 (60–70), proporcionado por la Constructora Morocho, adecuado tanto para tránsitos ligeros como pesados y para condiciones climáticas con temperaturas superiores a 15 °C.

En el ensayo de Rotura Marshall, según lo señalado por Chiquito y Torres (2015) es necesario tener en cuenta algunas propiedades que caracterizan el comportamiento de las mezclas asfálticas, entre las cuales se destacan las siguientes:

Valor de Estabilidad Marshall. Este parámetro mide la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación bajo carga, siendo un indicador de su calidad estructural. Sin embargo, dicha resistencia depende del tipo de mezcla asfáltica empleada y también de la durabilidad y características del agregado pétreo, puesto que los valores más altos de estabilidad se relacionan con materiales de mejor desempeño mecánico.

Valor de Flujo Marshall. El flujo representa la deformación vertical experimentada por la briqueta durante el ensayo. Las mezclas que presentan bajos valores de flujo combinados con altas estabilidades suelen ser demasiado rígidas y frágiles, haciéndolas susceptibles a agrietarse bajo el tránsito. De manera contraria, las mezclas con flujos elevados resultan excesivamente plásticas, deformándose con mayor facilidad ante las cargas vehiculares.

Corrección de la estabilidad según la altura de la briqueta. Una vez concluido el ensayo Marshall, se realiza una corrección del valor de estabilidad en función de la altura del espécimen compactado, de acuerdo con los factores establecidos para cada rango de altura. Estos factores se detallan en la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 14.

Factor de corrección por altura de briqueta

Espesor (mm)	Factor Correcc.	Espesor (mm)	Factor Correcc.	Espesor (mm)	Factor Correcc.
31.5	3.902	36.0	3.124	40.5	2.385
31.6	3.884	36.1	3.108	40.6	2.371
31.7	3.867	36.2	3.086	40.7	2.356
31.8	3.850	36.3	3.068	40.8	2.342

31.9	3.833	36.4	3.049	40.9	2.328
32.0	3.815	36.5	3.030	41.0	2.313
32.1	3.798	36.6	3.009	41.1	2.299
32.2	3.781	36.7	2.988	41.2	2.285
32.3	3.763	36.8	2.963	41.3	2.270
32.4	3.746	36.9	2.938	41.4	2.256
32.5	3.728	37.0	2.912	41.5	2.241
32.6	3.711	37.1	2.892	41.6	2.227
32.7	3.693	37.2	2.872	41.7	2.212
32.8	3.676	37.3	2.852	41.8	2.198
32.9	3.658	37.4	2.832	41.9	2.183
33.0	3.641	37.5	2.812	42.0	2.169
33.1	3.623	37.6	2.792	42.1	2.154
33.2	3.606	37.7	2.772	42.2	2.140
33.3	3.588	37.8	2.752	42.3	2.125
33.4	3.570	37.9	2.731	42.4	2.110
33.5	3.553	38.0	2.711	42.5	2.096
33.6	3.535	38.1	2.690	42.6	2.081
33.7	3.517	38.2	2.669	42.7	2.066
33.8	3.500	38.3	2.648	42.8	2.052
33.9	3.482	38.4	2.628	42.9	2.037
34.0	3.464	38.5	2.608	43.0	2.022
34.1	3.446	38.6	2.587	43.1	2.008
34.2	3.428	38.7	2.566	43.2	1.993
34.3	3.410	38.8	2.545	43.3	1.978
34.4	3.394	38.9	2.523	43.4	1.963
34.5	3.376	39.0	2.503	43.5	1.948
34.6	3.358	39.1	2.483	43.6	1.933
34.7	3.340	39.2	2.462	43.7	1.918
34.8	3.326	39.3	2.445	43.8	1.902
34.9	3.310	39.4	2.428	43.9	1.887
35.0	3.293	39.5	2.417	44.0	1.872
35.1	3.270	39.6	2.403	44.1	1.856
35.2	3.255	39.7	2.392	44.2	1.841
35.3	3.235	39.8	2.382	44.3	1.825
35.4	3.215	39.9	2.373	44.4	1.810
35.5	3.195	40.0	2.364	44.5	1.794
35.6	3.180	40.1	2.355	44.6	1.778
35.7	3.165	40.2	2.347	44.7	1.763
35.8	3.146	40.3	2.338	44.8	1.747
35.9	3.124	40.4	2.329	44.9	1.732
49.5	1.543	54.0	1.320	58.5	1.149
49.6	1.538	54.1	1.316	58.6	1.146
49.7	1.532	54.2	1.311	58.7	1.143
49.8	1.526	54.3	1.307	58.8	1.140
49.9	1.521	54.4	1.303	58.9	1.137
50.0	1.515	54.5	1.298	59.0	1.134
50.1	1.509	54.6	1.294	59.1	1.131
50.2	1.504	54.7	1.289	59.2	1.128
50.3	1.498	54.8	1.285	59.3	1.124

50.4	1.492	54.9	1.281	59.4	1.121
50.5	1.487	55.0	1.276	59.5	1.118
50.6	1.481	55.1	1.272	59.6	1.115
50.7	1.476	55.2	1.268	59.7	1.112
50.8	1.470	55.3	1.263	59.8	1.109
50.9	1.465	55.4	1.259	59.9	1.106
51.0	1.459	55.5	1.255	60.0	1.103
51.1	1.455	55.6	1.250	60.1	1.099
51.2	1.449	55.7	1.246	60.2	1.096
51.3	1.445	55.8	1.242	60.3	1.093
51.4	1.440	55.9	1.237	60.4	1.090
51.5	1.435	56.0	1.233	60.5	1.087
51.6	1.429	56.1	1.229	60.6	1.084
51.7	1.425	56.2	1.224	60.7	1.081
51.8	1.419	56.3	1.220	60.8	1.078
51.9	1.415	56.4	1.216	60.9	1.074
52.0	1.409	56.5	1.213	61.0	1.071
52.1	1.406	56.6	1.209	61.1	1.068
52.2	1.400	56.7	1.205	61.2	1.065
52.3	1.396	56.8	1.201	61.3	1.062
52.4	1.390	56.9	1.198	61.4	1.059
52.5	1.386	57.0	1.194	61.5	1.056
52.6	1.380	57.1	1.190	61.6	1.053
52.7	1.377	57.2	1.187	61.7	1.050
52.8	1.373	57.3	1.183	61.8	1.047
52.9	1.368	57.4	1.179	61.9	1.043
53.0	1.364	57.5	1.178	62.0	1.040
53.1	1.360	57.6	1.172	62.1	1.037
53.2	1.357	57.7	1.169	62.2	1.034
53.3	1.352	57.8	1.166	62.3	1.031
53.4	1.348	57.9	1.162	62.4	1.028
53.5	1.344	58.0	1.159	62.5	1.025
67.5	0.910	69.0	0.864	71.9	0.825
67.6	0.908	69.2	0.862	72.0	0.824
67.7	0.906	69.4	0.859	72.1	0.821
67.8	0.903	69.6	0.856	72.2	0.818
67.9	0.900	69.8	0.853	72.3	0.815
68.0	0.898	70.0	0.850	72.4	0.812
68.1	0.895	70.3	0.847	72.5	0.809
68.2	0.893	70.5	0.844	72.6	0.806
68.3	0.890	70.7	0.841	72.7	0.803
68.4	0.888	70.9	0.838	72.8	0.800
68.5	0.885	71.1	0.835	72.9	0.797
68.6	0.884	71.3	0.832	73.0	0.794
68.7	0.881	71.5	0.829	73.1	0.791
68.8	0.878	71.7	0.826	73.2	0.788
68.9	0.875	71.9	0.824	73.3	0.785
69.0	0.873	72.1	0.821	73.4	0.782
69.1	0.870	72.3	0.818	73.5	0.779
69.2	0.867	72.5	0.815	73.6	0.776

69.3	0.864	72.7	0.812	73.7	0.773
69.4	0.861	72.9	0.809	73.8	0.770
69.5	0.858	73.1	0.806	73.9	0.767
69.6	0.856	73.3	0.803	74.0	0.764

Nota. La tabla presentada corresponde a los factores de corrección para la estabilidad del ensayo Marshall, de acuerdo con la Norma AASHTO T 245 – 97 (2004), la cual establece los procedimientos para determinar la estabilidad y el flujo de mezclas asfálticas mediante el método Marshall.

Para determinar el contenido considerado adecuado de asfalto se promedió el porcentaje correspondiente a los valores obtenidos en las gráficas de máxima estabilidad, máxima densidad (Bulk) y vacíos de aire en la mezcla. A partir del análisis de las curvas, se observó que la máxima densidad se alcanza con un 5,3% de cemento asfáltico, la máxima estabilidad con un 5,41% y los vacíos de aire con un 4,9%, considerando un valor de referencia de 4% de huecos en la mezcla.

En consecuencia, para este diseño de mezcla asfáltica, el contenido óptimo de asfalto se estableció en 5,2%. Con dicho valor, los parámetros de estabilidad, densidad y vacíos de aire, entre otros definidos por el método Marshall, cumplen de manera adecuada con las especificaciones técnicas que se requieren para una carpeta de rodadura destinada a tráfico pesado. Los resultados correspondientes se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 15.

Comprobación del porcentaje óptimo de asfalto

Comprobación del Porcentaje óptimo de asfalto de 5,2%			
Tráfico pesado (75 golpes)			
Descripción	Resultados obtenidos	Especificación del diseño Marshall	
		Mín.	Máx.
Estabilidad (lb)	2631,94	1800	---
Flujo (1/100")	11	8	14
% Vacíos de aire	4,158	3	5
% Vacíos llenos de Asfalto	68,297	65	75

Nota. Los valores presentados en la tabla corresponden a la verificación del contenido óptimo de asfalto determinado mediante el método Marshall, aplicado a una mezcla asfáltica para tráfico pesado.

3.9 METODOLOGÍA DEL O.E.4.: ANALIZAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DERIVADOS DE LA INCORPORACIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA MATRIZ LEOPOLD.

3.9.1 Matriz de impacto ambiental (Matriz Leopold)

El método aplicado se basa en la matriz interactiva de Leopold, una tabla de doble entrada que cruza las acciones del proyecto (columnas) con los factores ambientales susceptibles de ser afectados (filas). Al evaluar cada cruce, si se detecta un impacto potencial, la casilla correspondiente se divide con una línea diagonal. El siguiente paso consiste en valorar dicha interacción según su magnitud e importancia. Para medir la magnitud (M), se utiliza el triángulo superior de la celda, asignando un valor en una escala del 1 al 3 (donde 1 es el mínimo y 3 el máximo), antecedido por un signo positivo (+) o negativo (-) según el tipo de efecto.

La magnitud indica el grado de posible cambio en la calidad ambiental de los factores considerados. Se refiere al significado y medición del impacto causado.

La importancia se sitúa en el triángulo inferior y tiene valores entre I y III. Es decir, nos da el peso relativo de un posible impacto y refleja la importancia del mismo y la extensión del entorno afectado.

Tabla 16

Valoración de impactos partiendo de la Magnitud e Importancia.

			M(+/-)
Magnitud			I
Positivo	Negativo	Consideración	Importancia
+3	-3	Máximo	3: Alta
+2	-2	Medio	2: Media
+1	-1	Mínimo	1: Baja

Nota: La tabla presenta la valoración utilizada en la matriz Leopold en base de la Magnitud e Importancia, donde se evalúa una lista de medidas y factores ambientales y su impacto potencial en cada elemento ambiental.

Tabla 17

Matriz Leopold para Mezcla asfáltica con adición parcial de caucho reciclado

ACTIVIDAD- MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN PARCIAL DE CAUCHO RECICLADO														
FACTOR AMBIENTAL	Características química y física						Condición Biológica		Condición Socio económica				TOTAL	
	Agua		Aire		Suelo		FLORA	FAUNA	Estéticos de interés humano					
	Calidad	Calidad	Ruido	Residuos sólidos	Compactación de suelos	Contaminación			Alteración del paisaje	Valorización del terreno	Generación de empleo	Sostenibilidad		
IMPACTOS AMBIENTALES														
CONSTRUCCIÓN	Campamento provisional	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	+1	0	-11
	Movilización y desmovilización de maquinaria	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11
		-1	-3	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-3	+1	0	-17
	Transporte de agregados pétreos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11
		-1	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-2	+1	0	-15
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11

/														
OPERACIÓN	Trituración del caucho reciclado	-1	-3	-3	-1	-1	-1	0	0	-1	-3	+2	+2	-10
	Producción de mezcla asfáltica	1 -2	1 -3	1 -2	1 -2	1 -1	1 -2	0 -1	0 -1	1 -2	1 -3	1 +2	1 +1	10 -16
	Calentamiento del asfalto	1 -1	1 -3	1 -1	1 -1	1 0	1 -2	1 0	1 0	1 -1	1 -3	1 +1	1 0	12 -11
	Colocación de mezcla asfáltica	1 -1	1 -2	1 -2	1 -1	0 -2	1 -1	0 0	0 0	1 -1	1 -2	1 +2	0 +1	8 -9
	Compactación del pavimento	1 0	1 -1	1 -3	1 -1	1 -3	1 -1	0 0	0 0	1 -1	1 -2	1 +1	1 +1	10 -10
	Funcionamiento del pavimento	0 +1	1 +1	1 +1	1 +2	1 +1	1 +1	0 +1	0 +1	1 +1	1 +2	1 +2	1 +3	9 +17
	Reducción de residuos por reutilización de neumáticos	1 +2	1 +1	1 0	1 +3	1 +1	1 +3	1 +1	1 +1	1 +1	1 +2	1 +2	1 +3	12 +20
		1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11

ABANDONO	Mayor durabilidad del pavimento	+1	+1	+1	+2	+1	+1	0	0	+1	+2	+1	+3	+14
		1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	10
	Retiro de maquinaria y limpieza final	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	+1	+1	-6
		1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	10

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANOS DE CAUCHO MEDIANTE EL PROCESO DE VÍA SECA

Para llevar a cabo el estudio sobre la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca, se elaboró una mezcla patrón convencional para comparar las variaciones en las propiedades al incorporar diferentes porcentajes de caucho. En este caso, la mezcla patrón corresponde a una mezcla densa convencional, utilizando los mismos materiales pétreos y el mismo cemento asfáltico tanto para la mezcla base como para las mezclas modificadas.

El Grano de Caucho Reciclado (GCR) empleado proviene del reciclaje de neumáticos, obtenidos a través de un proceso de trituración mecánica y posterior separación de los componentes ajenos al caucho presentes en las llantas. Para esta investigación, el GCR fue proporcionado por el Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). Cabe señalar que dicho material ya se encontraba disponible en el laboratorio, pues había sido adquirido previamente para el desarrollo de proyectos de investigación.

La granulometría del caucho utilizado en el estudio se presenta en la siguiente tabla. Se seleccionó un GCR con tamaños inferiores al tamiz N.º 4 (4,75 mm), dado que las partículas de mayor tamaño corresponden a una fracción más gruesa. De esta manera, se trabajó con un material más uniforme y de textura homogénea, adecuado para su incorporación en la mezcla asfáltica.

Tabla 18.

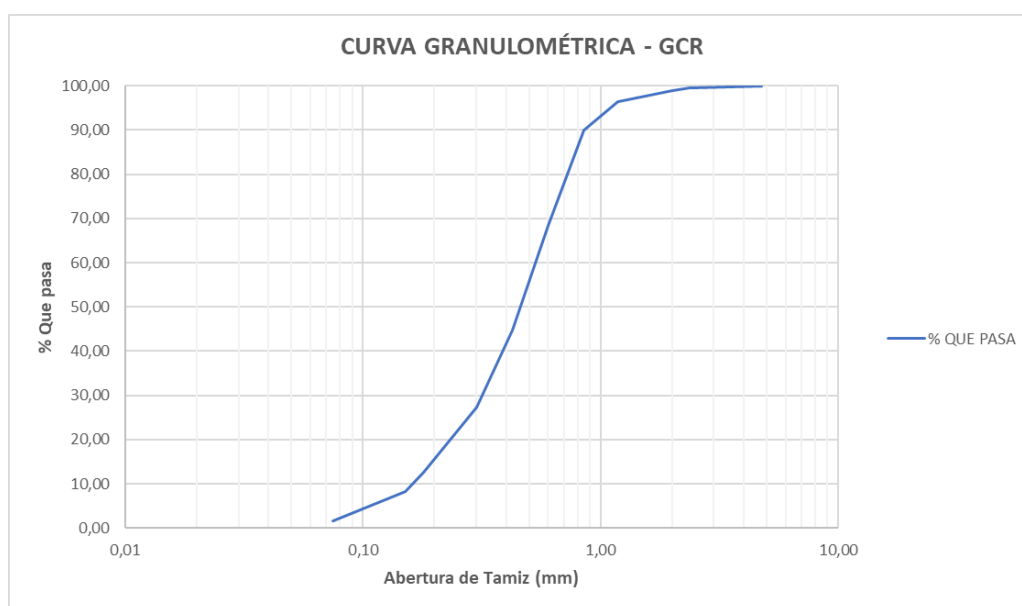
Granulometría del caucho reciclado

TAMICES		W PESO PARCIAL (gr)	% RETENIDO	% QUE PASA
Nº	mm			
Nº4	4,75	0	0,00	100,00
Nº8	2,36	5,19	0,50	99,50
Nº10	2,00	5,76	0,56	98,94
Nº16	1,18	27,02	2,61	96,33
Nº20	0,85	64,84	6,27	90,05
Nº30	0,6	224,42	21,71	68,34
Nº40	0,425	244,14	23,62	44,72
Nº50	0,3	179,33	17,35	27,37
Nº80	0,18	152,13	14,72	12,65
Nº100	0,15	44,68	4,32	8,33
Nº200	0,075	69,98	6,77	1,56
FONDO		16,12	1,56	0,00
TOTAL		1033,61		

Nota. La tabla muestra la distribución granulométrica del Grano de Caucho Reciclado (GCR) empleado en la investigación.

Figura 8.

Representación gráfica de la granulometría del caucho reciclado



Nota. La figura presenta la curva granulométrica del Grano de Caucho Reciclado (GCR) utilizado en la investigación.

El proceso de vía seca se emplea para analizar la influencia del Grano de Caucho Reciclado (GCR) cuando se incorpora como parte de los agregados finos en la elaboración de mezclas asfálticas. Esta técnica, considerada una de las formas convencionales de adición del caucho, utiliza porcentajes de incorporación generalmente inferiores al 5% del peso total de los agregados.

En este estudio, el GCR fue añadido a la mezcla modificada del mismo modo que cualquier otro agregado, determinando previamente el peso específico en gramos correspondiente a cada porcentaje de caucho utilizado. La inclusión de diferentes cantidades de GCR alteró la franja granulométrica de la mezcla convencional, debido al incremento de material fino. Por ello, se llevó a cabo un ajuste en la dosificación de la mezcla, con el propósito de cumplir las especificaciones granulométricas establecidas en la Norma ASTM D 3515.

En los Anexos 1 se presentan las granulometrías y dosificaciones correspondientes a los distintos porcentajes de caucho triturado empleados en la investigación.

La preparación de las briquetas con incorporación de GCR siguió un procedimiento similar al de las mezclas asfálticas convencionales, elaborándose tres briquetas por cada variación de porcentaje de GCR. Los porcentajes considerados fueron de 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3.0%, resultando un total de 15 briquetas modificadas.

Para la elaboración de cada conjunto, se trabajó con un peso total de mezcla de 4000 gramos, distribuidos en 1200 g para las briquetas, 2400 g destinados a los ensayos de la mezcla asfáltica y 400 g considerados como desperdicio. Además, se tomó en cuenta un contenido de humedad del 1.25% en la mezcla de agregados empleada en el estudio.

Tabla 19.*Dosificación de mezcla asfáltica modificada con GCR*

DOSIFICACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GCR							
Porcentaje de asfalto		5,20%	$W_{asfalto}$ (gr)		191	W_{total} (gr)	4000,00
GCR		PIEDRA 3/4"		PIEDRA 3/8"		ARENA	
%	gr	%	gr	%	gr	%	gr
1,00%	38	30,00%	1143	45,00%	1714	24,00%	914
1,50%	57	29,50%	1124	45,00%	1714	24,00%	914
2,00%	76	29,00%	1105	45,00%	1714	24,00%	914
2,50%	95	29,00%	1105	44,50%	1695	24,00%	914
3,00%	114	29,00%	1105	44,00%	1676	24,00%	914

Nota. La tabla presenta las dosificaciones de los agregados empleadas para cada porcentaje de incorporación de GCR. En todas las dosificaciones se mantuvo un contenido de cemento asfáltico de 5,20 %, equivalente a 191 g, para un peso total de mezcla de 4000 g.

El procedimiento para la elaboración de la mezcla asfáltica con adición de caucho en laboratorio es, en esencia, similar al utilizado para una mezcla convencional. No obstante, presenta una diferencia importante: la determinación previa del tiempo y la temperatura de digestión que requiere este tipo de mezcla antes del proceso de compactación.

A continuación, se detallan las etapas seguidas durante la preparación:

- Preparación de la granulometría de los agregados pétreos conforme a las especificaciones del diseño.
- Calentamiento de los agregados en horno a temperaturas comprendidas entre 170°C y 210°C.
- Determinación de la proporción de caucho reciclado (GCR) en función del peso total de los áridos.
- Mezclado de los agregados calientes con el GCR, colocando la mezcla en horno entre 150°C y 190°C durante aproximadamente 2 minutos, permitiendo así que el caucho adquiriera la temperatura adecuada.

- Incorporación del cemento asfáltico, previamente calentado a la temperatura de mezclado, a la combinación de agregados con caucho, mezclando durante 2 a 3 minutos.
- Digestión térmica de la mezcla, manteniéndola en el horno durante 2 horas a 170°C. Este proceso favorece la integración del caucho con el asfalto, mejorando la adhesión y la resistencia a la humedad de la mezcla modificada.
- Retiro del material del horno y homogenización mediante agitación manual.
- Compactación de la mezcla caliente en moldes Marshall precalentados, aplicando 75 golpes por cada cara con el martillo Marshall, a una temperatura 10°C menor que la utilizada durante la digestión.
- Reposo de las briquetas durante 24 horas antes de proceder a su extracción del molde.

Finalmente, una vez confeccionadas las briquetas modificadas con GCR, se sometieron a ensayos Marshall, aplicando la carga correspondiente para determinar los valores de Estabilidad, Flujo y Peso Específico, con el fin de realizar los análisis comparativos pertinentes.

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA MEZCLA CONVENCIONAL Y LA MEZCLA MODIFICADA

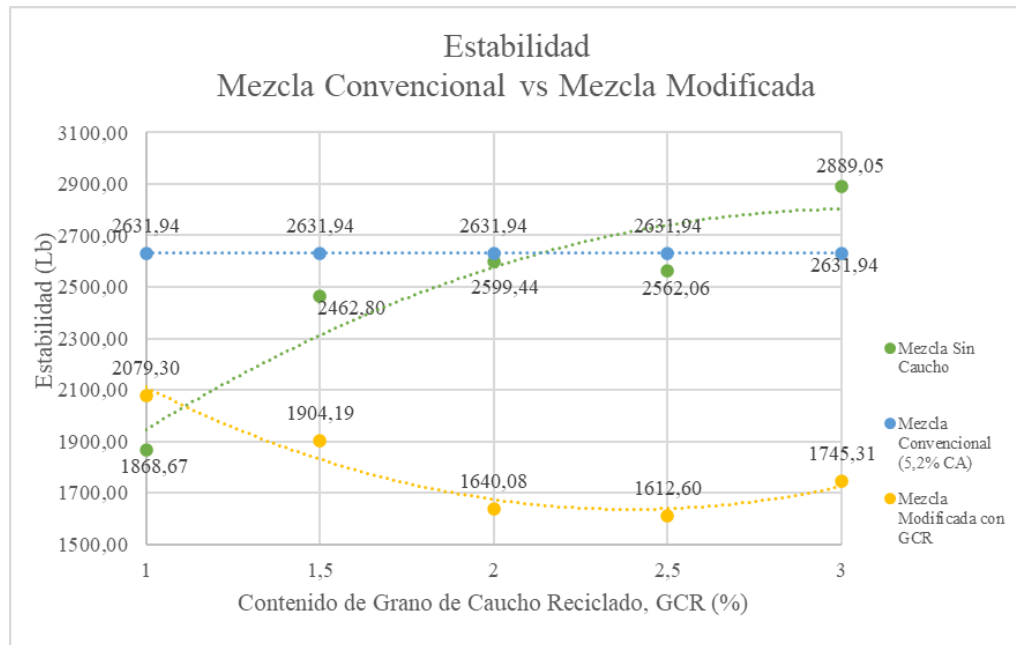
De acuerdo con los resultados obtenidos de la mezcla con GCR se obtuvieron las siguientes comparaciones de los diferentes parámetros Marshall:

- ESTABILIDAD

Tráfico Pesado: Min. 1800 Lb.

Figura 9.

Valores de la estabilidad con los diferentes porcentajes de caucho agregado a la mezcla asfáltica.



Nota. Los valores presentados en la gráfica evidencian la variación de la estabilidad Marshall en función del porcentaje de caucho incorporado a la mezcla asfáltica.

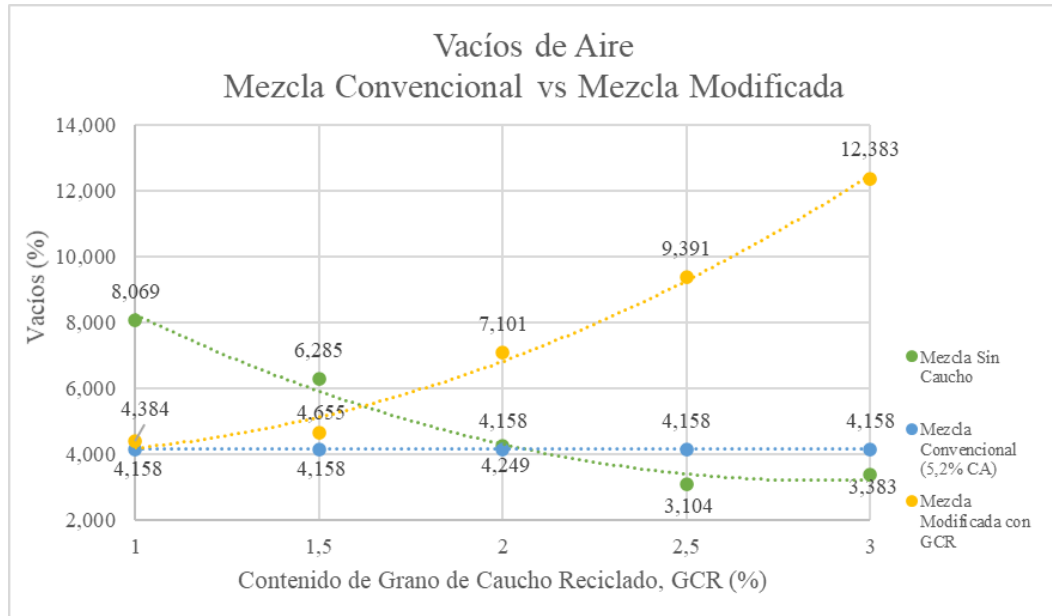
En la gráfica se aprecia que las mezclas modificadas con 1% y 1.5% de caucho presentan las mayores estabilidades, cumpliendo con los criterios establecidos para el diseño de una carpeta asfáltica. En cambio, al incrementar la proporción de caucho a 2% y 2.5%, la estabilidad tiende a disminuir, lo que indica que un mayor contenido de caucho en la mezcla reduce la resistencia de la misma.

- VACÍOS DE AIRE

Tráfico Pesado: Min. 3% - Max. 5%.

Figura 10.

Valores de Vacíos de Aire en la mezcla modificada con los distintos porcentajes de caucho reciclado



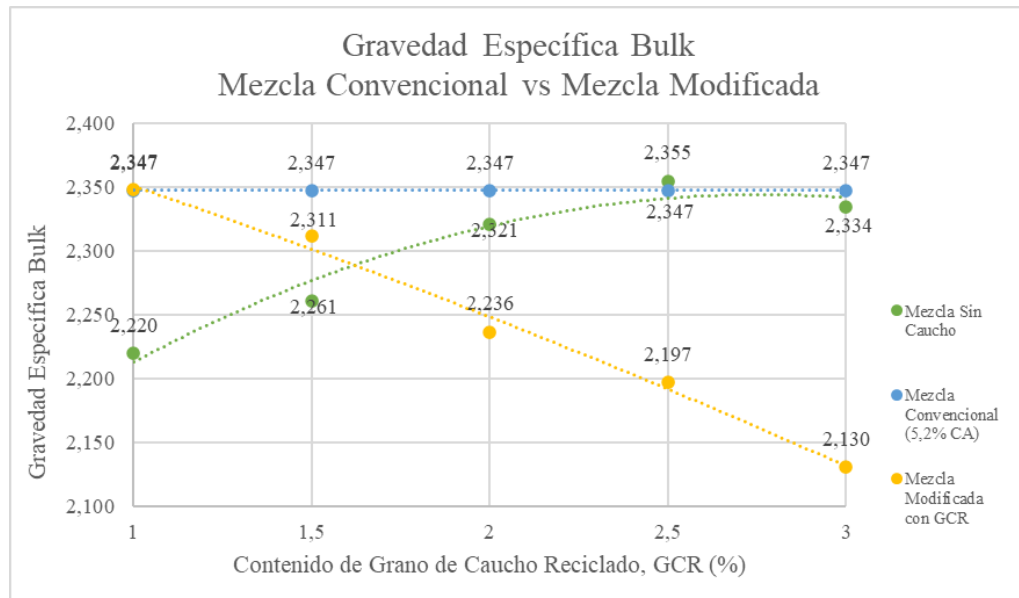
Nota. En la figura se observa la comparación de los valores de vacíos de aire entre la mezcla convencional y la mezcla modificada con diferentes porcentajes de caucho reciclado.

Para la mezcla fabricada con caucho se tiene en la gráfica que los valores obtenidos con 1% y 1,5% se encuentran dentro de los parámetros permitidos para el diseño de una mezcla asfáltica, mientras con el 2%, 2,5% y 3% de caucho los valores se encuentran fuera del intervalo permitido. A medida que aumenta el contenido de caucho, los vacíos de aire en la mezcla aumentan, lo cual también sucede a medida que el contenido de cemento asfáltico disminuye.

- GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK

Figura 11.

Valores de la gravedad específica bulk con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla



Nota. En la figura se observa la variación de la gravedad específica Bulk entre la mezcla convencional y la mezcla modificada con distintos porcentajes de caucho reciclado.

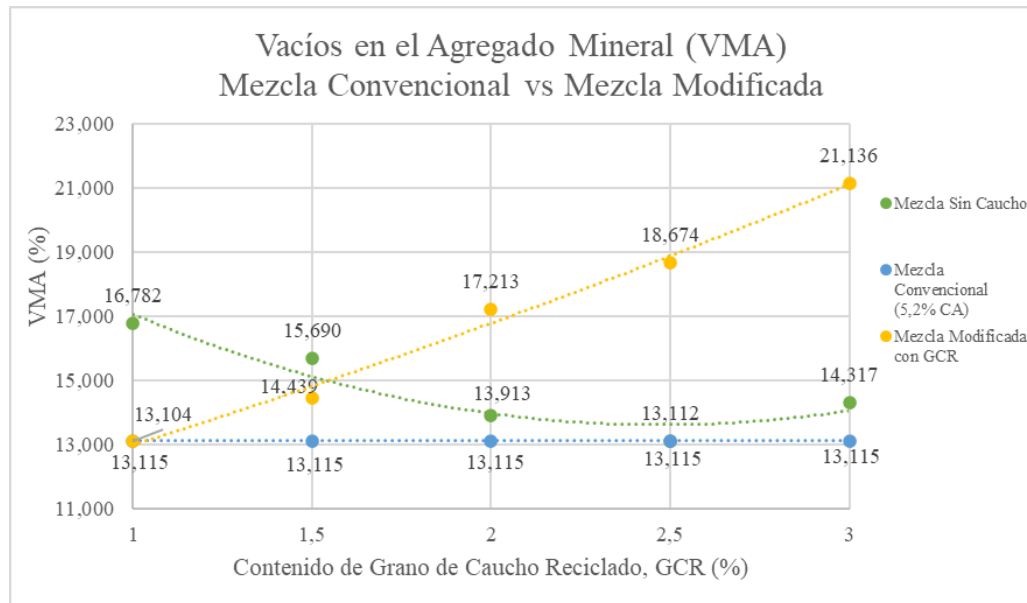
En la densidad Bulk de las mezclas mejoradas con caucho podemos observar que ésta disminuye a medida que la proporción de caucho se incrementa, la disminución de la densidad puede deberse a que los granos de caucho al interactuar con el ligante, se hinchan, aumentando de esta forma el volumen de las briquetas y teniendo una variación en sus pesos donde mientras el porcentaje de caucho aumente, el peso de la briketa disminuirá.

✓ AGREGADO MINERAL (VMA)

Tráfico Pesado: Min. 13%.

Figura 12.

Valores de VMA con diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica



Nota. En la figura se muestra la variación de los valores de VMA (vacíos del agregado mineral) en la mezcla convencional y en la mezcla modificada con diferentes porcentajes de caucho reciclado.

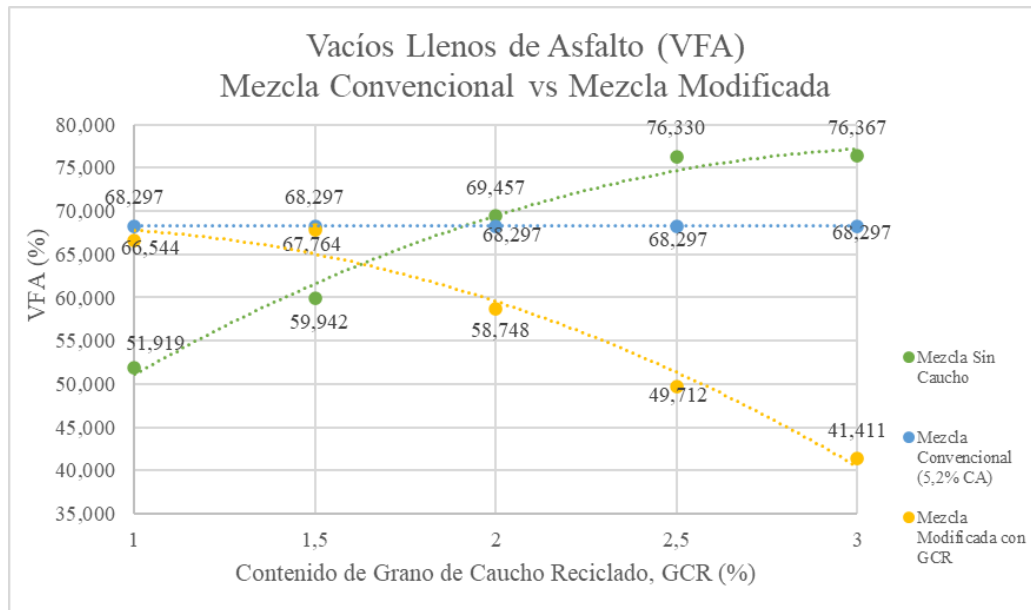
En la gráfica se observa que los vacíos en el agregado mineral aumentan a medida que el porcentaje de caucho se incrementa. Todas las proporciones de caucho tienen la tendencia esperada y cumplen el requisito que se requiere para el diseño, como de igual forma cumple con la mezcla convencional.

- VACÍOS LLENO DE ASFALTO (VFA).

Tráfico Pesado: Min. 65% - Max. 75%.

Figura 13.

Valores de VFA con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica.



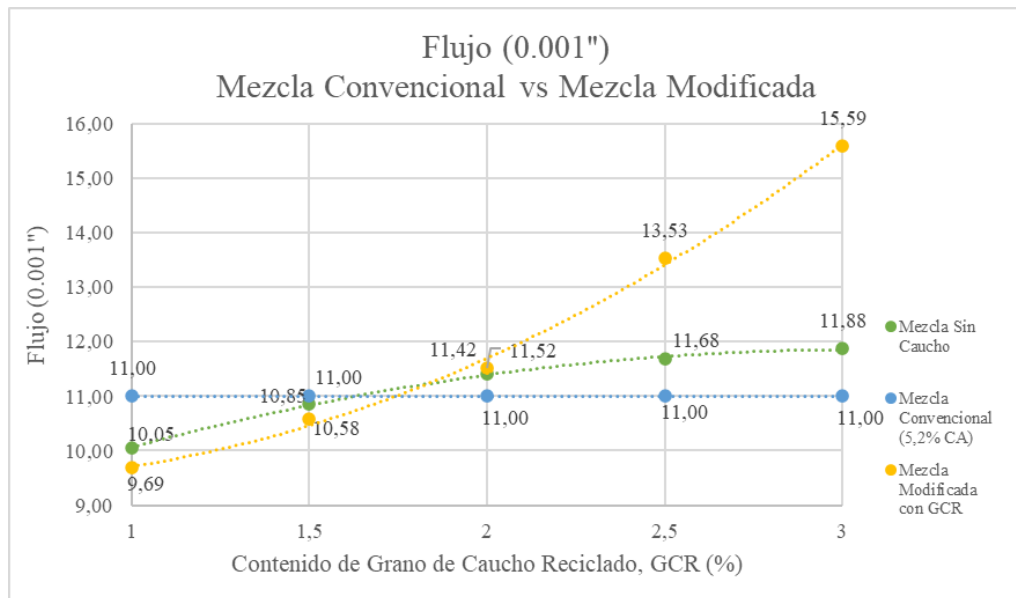
Nota. En la figura se observa la variación de los valores de VFA (vacíos llenos de asfalto) en la mezcla convencional y en la mezcla modificada con diferentes porcentajes de caucho reciclado.

En los vacíos llenos de asfalto de la mezcla modificada se puede apreciar que disminuye a medida que el porcentaje de caucho se incrementa, donde con los porcentajes de 1% y 1.5% de caucho existe una aproximación a los valores requeridos y cumplen con el intervalo de diseño establecido, mientras con los porcentajes de 2%, 2.5% y 3% de caucho no cumplen este intervalo.

- FLUJO (0.001")
- Tráfico Pesado: Min. 8 – Max. 14.

Figura 14.

Valores del flujo con los diferentes porcentajes de caucho reciclado en la mezcla asfáltica



Nota. En la figura se presenta la variación de los valores de flujo en la mezcla convencional y en la mezcla modificada con diferentes porcentajes de caucho reciclado.

Para la mezcla modificada con caucho los valores de flujo que se encuentran dentro del intervalo permitido para un diseño son con los valores del 1%, 1,5%, 2% y 2,5% de caucho, a diferencia del 3%, porcentaje cuyo valor sobrepasa el límite superior especificado por la Norma.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL (ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA)

El análisis estadístico se planteó con el propósito de establecer si la incorporación de grano de caucho reciclado (GCR) produce cambios medibles en las propiedades de mezcla asfáltica. El porcentaje de GCR se consideró como la variable independiente o factor de estudio, con seis niveles: 0,00%, 1,00%, 1,50%, 2,00%, 2,50% y 3,00%. Como variables de respuesta se analizaron la estabilidad Marshall, el flujo, la gravedad específica Bulk, los vacíos de aire (V_a), los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos llenos de asfalto (VFA).

Debido a que se comparan más de dos grupos independientes, se seleccionó el análisis de varianza de un factor (ANOVA). Esta prueba permite evaluar en una sola operación si las medias obtenidas para los distintos porcentajes de GCR pueden considerarse estadísticamente iguales o si, por el contrario, al menos una de ellas presenta un comportamiento diferente. Para todas las pruebas se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, equivalente a trabajar con un nivel de confianza del 95%.

4.3.1 Descripción general del proceso estadístico

El procedimiento comenzó con la organización de los resultados experimentales en una base de datos, procurando que cada fila correspondiera a una probeta y que cada columna identificara el porcentaje de GCR y las propiedades Marshall medidas o calculadas. Antes de ejecutar las pruebas inferenciales, se revisó la consistencia de las unidades, la presencia de datos faltantes, posibles errores de digitación y valores atípicos que pudieran alterar el comportamiento de las medias.

Luego se realizó una revisión descriptiva de cada variable mediante el número de observaciones, la media, la desviación estándar y el rango de valores. Esta etapa es importante porque permite conocer la tendencia y la dispersión de los resultados antes de tomar una decisión estadística. Después, se verificaron los supuestos del ANOVA y, cuando estos fueron razonables, se comparó el valor de significancia obtenido con $\alpha = 0,05$. Si el valor p fue menor que 0,05, se rechazó la hipótesis nula y se aplicó la prueba HSD de Tukey para identificar entre qué porcentajes se encontraban las diferencias.

Tabla 20.*Parámetros utilizados y finalidad*

Parámetro	Finalidad dentro del análisis	Criterio de lectura
Media	Representa el valor promedio obtenido en cada porcentaje de GCR.	Permite comparar la tendencia central de los grupos.
Desviación estándar	Mide cuánto se dispersan los resultados alrededor de la media.	Una desviación pequeña indica mayor uniformidad entre las briquetas.
Suma de cuadrados entre grupos	Cuantifica la variación atribuible a las diferencias entre los porcentajes de GCR	Mientras mayor sea respecto a la variación interna, mayor evidencia existe de un efecto del factor.
Suma de cuadrados dentro de los grupos	Representa la variación existente entre briquetas sometidas al mismo porcentaje.	Se utiliza como estimación del error experimental.
Grados de libertad (gl)	Ajustan la cantidad de información disponible para estimar cada fuente de variación.	En un ANOVA de un factor, los gl entre grupos dependen del número de tratamientos y el gl internos del número total de observaciones.
Media cuadrática	Se obtiene al dividir cada suma de cuadrados para sus grados de libertad.	Permite construir el estadístico F.
Estadístico F	Compara la variación entre grupos con la variación dentro de los grupos.	Un valor F elevado sugiere que las diferencias entre medias superan el error experimental.
Significancia o valor p	Indica qué tan compatibles son los resultados con la hipótesis de igualdad de medias.	Si $p < 0,05$ se rechaza H_0 ; si $p \geq 0,05$ no existe evidencia suficiente para rechazarla.

Intervalo de confianza del 95%	de	Muestra un rango plausible para la diferencia entre dos medias.	Cuando el intervalo de una diferencia no incluye el cero, la comparación suele ser significativa al 5%.
Prueba de Tukey	HSD	Compara todos los pares de medias controlando el error por comparaciones múltiples.	Se aplica después de un ANOVA significativo, siempre que se mantenga la homogeneidad de varianzas.
Tamaño efecto (η^2 u ω^2)	del	Complementa el valor p indicando qué proporción de la variabilidad se relaciona con el porcentaje de GCR.	Se recomienda reportarlo para distinguir la significancia estadística de la importancia práctica.

Nota. La tabla resume los principales parámetros estadísticos empleados en el análisis de los resultados, indicando su finalidad y el criterio utilizado para su interpretación dentro del ANOVA de un factor.

Supuestos estadísticos considerados

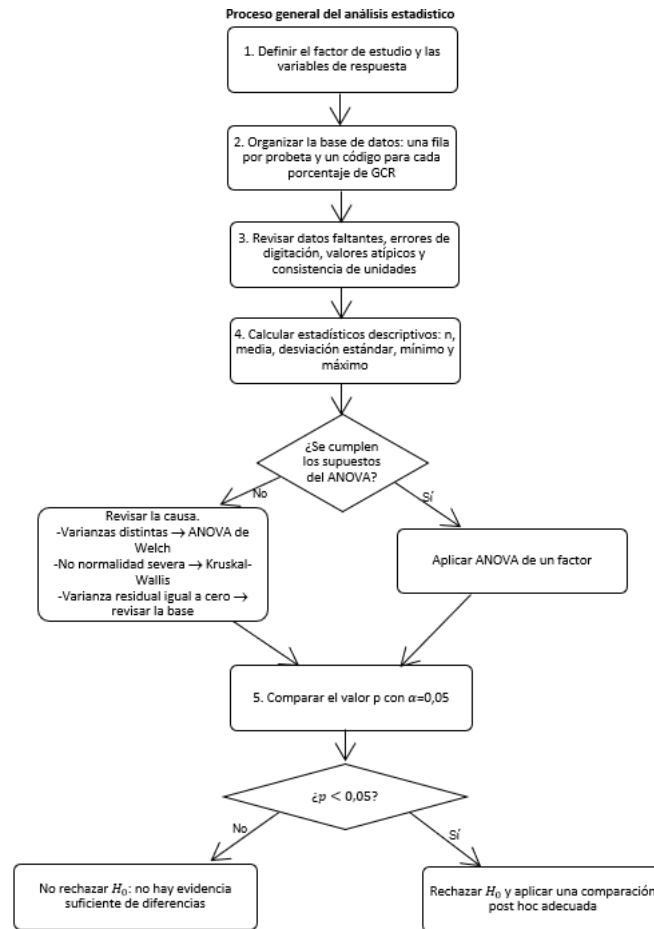
La aplicación del ANOVA no debe basarse únicamente en el valor p. Para que sus resultados sean confiables, se consideran los siguientes supuestos:

- **Independencia de las observaciones.** Cada probeta debe de haberse preparado y ensayado como una unidad independiente. Este supuesto se garantiza principalmente desde el diseño experimental y no mediante una prueba estadística.
- **Normalidad aproximada de los residuos.** Las diferencias entre cada observación y la media de su grupo deben presentar una distribución aproximadamente normal. Puede revisarse mediante gráficos Q-Q y la prueba de Shapiro-Wilk; sin embargo, con pocas réplicas por grupo, la inspección gráfica y la coherencia experimental adquieren mayor importancia.
- **Homogeneidad de varianzas.** La dispersión de los resultados debe ser semejante entre los porcentajes de GCR. Este supuesto puede evaluarse mediante la prueba de Levene o Brown-Forsythe.

- **Ausencia de valores atípicos severos.** Los datos extremos deben revisarse para determinar si corresponden a un error de ensayo, de registro o a una variación real del material.
- **Variable dependiente cuantitativa y grupos correctamente definidos.** Las propiedades analizadas deben expresarse numéricamente y cada probeta debe pertenecer a un único porcentaje de GCR.

Si la homogeneidad de varianzas no se cumple, resulta más apropiado utilizar el ANOVA de Welch y la comparación Games-Howell. Cuando existe una desviación fuerte de la normalidad, valores atípicos que no pueden justificarse o una escala que no responde adecuadamente al modelo, puede considerarse la prueba de Kruskal-Wallis y comparaciones posteriores ajustadas. Si la varianza dentro de los grupos es igual a cero, el estadístico F no puede calcularse y se debe revisar la base de datos antes de emitir una conclusión.

Figura 15.
Diagrama de flujo acerca del proceso de análisis ANOVA



Nota. El diagrama presenta el proceso general seguido para el análisis estadístico de los resultados, desde la organización y revisión de los datos hasta la aplicación de pruebas estadísticas y la toma de decisiones con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Elaboración propia.

4.3.2 Formulación de hipótesis

Las hipótesis se plantearon de forma independiente para cada prioridad analizada:

Hipótesis nula (H_0): las medias de la propiedad evaluada son iguales para los seis porcentajes de GCR ($\mu_0 = \mu_{1,0} = \mu_{1,5} = \mu_{2,0} = \mu_{2,5} = \mu_{3,0}$).

Hipótesis alternativa (H_1): al menos una de las medias difiere de las demás, lo que indicaría que el porcentaje de GCR influye en la propiedad estudiada.

4.3.3 Análisis de la estabilidad Marshall

La Tabla 21 presenta la descomposición de la variabilidad de la estabilidad Marshall en dos componentes: la variación explicada por los porcentajes de GCR y la variación observada entre briquetas de un mismo grupo. Esta comparación permite establecer si los cambios registrados en la estabilidad pueden relacionarse con el porcentaje de caucho incorporado o si se encuentran dentro del error experimental.

Tabla 21.

ANOVA de la estabilidad Marshall según el porcentaje de GCR

ANOVA					
ESTABILIDAD					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	2203222,426	5	440644,485	3,828	,026
Dentro de grupos	1381176,350	12	115098,029		
Total	3584398,776	17			
a. Intervalo de confianza: 95%					

El ANOVA obtuvo $F(5, 12) = 3,828$ y $p = 0,026$. Como el valor de significancia es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula para esta variable. En consecuencia, existe evidencia estadística de que la estabilidad Marshall no se mantiene igual en todos los porcentajes de GCR. No obstante, el ANOVA únicamente confirma que existe al menos una diferencia y no señala de manera directa entre qué tratamientos se presenta; por esta razón, se requiere una comparación post hoc.

La Tabla 22 muestra las comparaciones por pares realizadas mediante la prueba HSD de Tukey. En esta salida, la diferencia de medias se obtiene restando la media del grupo J a la media del grupo I; el asterisco identifica las comparaciones significativas al 5 %, mientras que el intervalo de confianza permite verificar si la diferencia incluye o no el valor cero.

Tabla 22.*Comparaciones múltiples de Tukey para la estabilidad Marshall*

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: ESTABILIDAD						
HSD Tukey						
(I) GCR	(J) GCR	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
,00	1,00	552,64333	277,00545	,398	-377,7961	1483,0827
	1,50	727,76000	277,00545	,164	-202,6794	1658,1994
	2,00	991,86667*	277,00545	,034	61,4273	1922,3061
	2,50	1019,34667*	277,00545	,029	88,9073	1949,7861
	3,00	886,63667	277,00545	,065	-43,8027	1817,0761
1,00	,00	-552,64333	277,00545	,398	-1483,0827	377,7961
	1,50	175,11667	277,00545	,986	-755,3227	1105,5561
	2,00	439,22333	277,00545	,622	-491,2161	1369,6627
	2,50	466,70333	277,00545	,565	-463,7361	1397,1427
	3,00	333,99333	277,00545	,826	-596,4461	1264,4327
1,50	,00	-727,76000	277,00545	,164	-1658,1994	202,6794
	1,00	-175,11667	277,00545	,986	-1105,5561	755,3227
	2,00	264,10667	277,00545	,924	-666,3327	1194,5461
	2,50	291,58667	277,00545	,891	-638,8527	1222,0261
	3,00	158,87667	277,00545	,991	-771,5627	1089,3161
2,00	,00	-991,86667*	277,00545	,034	-1922,3061	-61,4273
	1,00	-439,22333	277,00545	,622	-1369,6627	491,2161
	1,50	-264,10667	277,00545	,924	-1194,5461	666,3327
	2,50	27,48000	277,00545	1,000	-902,9594	957,9194
	3,00	-105,23000	277,00545	,999	-1035,6694	825,2094
2,50	,00	-1019,34667*	277,00545	,029	-1949,7861	-88,9073

	1,00	-466,70333	277,00545	,565	-1397,1427	463,7361
	1,50	-291,58667	277,00545	,891	-1222,0261	638,8527
	2,00	-27,48000	277,00545	1,000	-957,9194	902,9594
	3,00	-132,71000	277,00545	,996	-1063,1494	797,7294
3,00	,00	-886,63667	277,00545	,065	-1817,0761	43,8027
	1,00	-333,99333	277,00545	,826	-1264,4327	596,4461
	1,50	-158,87667	277,00545	,991	-1089,3161	771,5627
	2,00	105,23000	277,00545	,999	-825,2094	1035,6694
	2,50	132,71000	277,00545	,996	-797,7294	1063,1494

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

La prueba HSD de Tukey evidenció que la mezcla convencional (0,00% de GCR) presentó una estabilidad significativamente mayor que las mezclas con 2,00% y 2,50% de GCR ($p < 0,05$). No se detectaron diferencias significativas entre las demás comparaciones, incluida la mezcla con 3,00% de GCR ($p > 0,05$).

4.3.4 Análisis de los vacíos de aire (Va)

La Tabla 23 resume el ANOVA aplicado a los vacíos de aire. El propósito de esta prueba era determinar si el contenido de vacíos cambia de manera sistemática al variar el porcentaje de GCR, comparando la variación entre tratamientos con la variación existente entre las réplicas de un mismo tratamiento.

Tabla 23.

ANOVA de los vacíos de aire según el porcentaje de GCR

ANOVA					
Vacíos de Aire					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	147,040	5	29,408	.	.
Dentro de grupos	,000	10	,000		
Total	147,040	15			
a. Intervalo de confianza: 95%					

En esta tabla, la suma de cuadrados y la media cuadrática dentro de los grupos son iguales a cero. Por esta razón, el programa no pudo calcular el estadístico F ni el valor p. Este resultado no debe interpretarse como una diferencia significativa ni como igualdad entre los grupos; indica que no existe una estimación del error experimental. Esta situación puede atribuirse a que las réplicas de cada porcentaje presentan exactamente el mismo valor, a un redondeo excesivo de los datos o al uso de valores repetidos. Asimismo, los 15 grados de libertad del total corresponden a 16 observaciones válidas, aspecto que debe considerarse al interpretar los resultados del ANOVA para la variable Va.

4.3.5 Análisis de la gravedad específica Bulk

La Tabla 24 evalúa si la gravedad específica Bulk presenta cambios estadísticamente comprobables entre los seis porcentajes de GCR. Esta propiedad se relaciona con el grado de compactación y la masa de la mezcla por unidad de volumen, por lo que su comparación permite observar si la incorporación del caucho altera de forma consistente la densidad de las briquetas.

Tabla 24.

ANOVA de la gravedad específica Bulk según el porcentaje de GCR

ANOVA					
Densidad Bulk					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	,115	5	,023	1,074	,422
Dentro de grupos	,258	12	,021		
Total	,373	17			
a. Intervalo de confianza: 95%					

El resultado fue $F(5, 12) = 1,074$ y $p = 0,422$. Debido a que p es mayor que 0,05, no se rechaza la hipótesis nula. En consecuencia, la gravedad específica Bulk se mantuvo estadísticamente similar entre las mezclas con los diferentes porcentajes de GCR evaluados.

4.3.6 Análisis de los vacíos en el agregado mineral (VMA)

La Tabla 25 presenta el análisis correspondiente al porcentaje de vacíos existentes entre las partículas del agregado mineral dentro de la mezcla compactada. El objetivo era comprobar si la modificación con GCR genera cambios en la estructura interna de la mezcla y en el espacio disponible para el asfalto y los vacíos de aire.

Tabla 25.

ANOVA del VMA según el porcentaje de GCR

ANOVA					
VMA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	161,028	5	32,206	.	.
Dentro de grupos	,000	12	,000		
Total	161,028	17			
a. Intervalo de confianza: 95%					

Al igual que en la variable Va, la variación dentro de los grupos fue igual a cero; por tanto, no se obtuvo una media cuadrática del error que permitiera calcular el estadístico F ni el valor de significancia. En consecuencia, no fue posible determinar, mediante el ANOVA, si existían diferencias estadísticamente significativas del VMA entre los porcentajes evaluados.

4.3.7 Análisis de los vacíos llenos de asfalto (VFA)

La Tabla 26 analiza el porcentaje de los vacíos del agregado mineral que se encuentra ocupado por asfalto. La comparación entre tratamientos permite establecer si el aumento de GCR modifica la relación entre el ligante y la estructura de vacíos de la mezcla.

Tabla 26.*ANOVA del VFA según el porcentaje de GCR*

ANOVA					
VFA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	1846,410	5	369,282	.	.
Dentro de grupos	,000	12	,000		
Total	1846,410	17			
a. Intervalo de confianza: 95%					

La suma de cuadrados dentro de los grupos también es cero, por lo que el estadístico F y el valor p no fueron estimados. En estas condiciones, el ANOVA no permitió determinar si existían diferencias estadísticamente significativas del VFA entre los porcentajes evaluados. Este resultado evidencia que no fue posible estimar la variabilidad experimental dentro de los grupos para esta variable.

4.3.8 Análisis del flujo Marshall

La Tabla 27 compara el flujo Marshall obtenido para cada porcentaje de GCR. Esta variable representa la deformación que experimenta la probeta al alcanzar la carga máxima, por lo que su análisis permite identificar si la incorporación de caucho modifica la respuesta a deformaciones de la mezcla.

Tabla 27.*ANOVA del flujo Marshall según el porcentaje de GCR*

ANOVA					
FLUJO					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.a
Entre grupos	72,944	5	14,589	43,767	<,001
Dentro de grupos	4,000	12	,333		
Total	76,944	17			
a. Intervalo de confianza: 95%					

El ANOVA produjo $F(5, 12) = 43,767$ y $p < 0,001$. Este resultado permite rechazar la hipótesis nula y demuestra que el flujo Marshall presenta diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de GCR. La magnitud del estadístico F evidencia que la variación entre tratamientos es considerablemente mayor que la variación interna de las réplicas. Para precisar cuáles porcentajes difieren entre sí, se aplicó la prueba de Tukey.

La Tabla 28 presenta las comparaciones múltiples para el flujo. La interpretación se realiza considerando el signo de la diferencia de medias, el valor p y el intervalo de confianza. Una diferencia positiva indica que el grupo I tiene un flujo medio mayor que el grupo J; una diferencia negativa indica lo contrario.

Tabla 28.*Comparaciones múltiples de Tukey para el flujo Marshall*

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: FLUJO						
HSD Tukey						
(I) GCR	(J) GCR	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
,00	1,00	1,66667*	,47140	,037	,0833	3,2501
	1,50	,66667	,47140	,719	-,9167	2,2501
	2,00	,00000	,47140	1,000	-1,5834	1,5834
	2,50	-2,33333*	,47140	,004	-3,9167	-,7499
	3,00	-4,33333*	,47140	<,001	-5,9167	-2,7499
1,00	,00	-1,66667*	,47140	,037	-3,2501	-,0833
	1,50	-1,00000	,47140	,339	-2,5834	,5834
	2,00	-1,66667*	,47140	,037	-3,2501	-,0833
	2,50	-4,00000*	,47140	<,001	-5,5834	-2,4166
	3,00	-6,00000*	,47140	<,001	-7,5834	-4,4166
1,50	,00	-,66667	,47140	,719	-2,2501	,9167
	1,00	1,00000	,47140	,339	-,5834	2,5834
	2,00	-,66667	,47140	,719	-2,2501	,9167
	2,50	-3,00000*	,47140	<,001	-4,5834	-1,4166
	3,00	-5,00000*	,47140	<,001	-6,5834	-3,4166
2,00	,00	,00000	,47140	1,000	-1,5834	1,5834
	1,00	1,66667*	,47140	,037	,0833	3,2501
	1,50	,66667	,47140	,719	-,9167	2,2501
	2,50	-2,33333*	,47140	,004	-3,9167	-,7499

	3,00	-4,33333*	,47140	<,001	-5,9167	-2,7499
2,50	,00	2,33333*	,47140	,004	,7499	3,9167
	1,00	4,00000*	,47140	<,001	2,4166	5,5834
	1,50	3,00000*	,47140	<,001	1,4166	4,5834
	2,00	2,33333*	,47140	,004	,7499	3,9167
	3,00	-2,00000*	,47140	,011	-3,5834	-,4166
3,00	,00	4,33333*	,47140	<,001	2,7499	5,9167
	1,00	6,00000*	,47140	<,001	4,4166	7,5834
	1,50	5,00000*	,47140	<,001	3,4166	6,5834
	2,00	4,33333*	,47140	<,001	2,7499	5,9167
	2,50	2,00000*	,47140	,011	,4166	3,5834

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Las comparaciones muestran un cambio claro en los niveles altos de incorporación. El porcentaje de 3,00 % presentó un flujo significativamente mayor que todos los demás tratamientos ($p \leq 0,011$), incluido el 2,50 %. A su vez, el 2,50 % fue significativamente mayor que 0,00 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 % ($p \leq 0,004$). Entre 0,00 % y 2,00 % no se observó diferencia ($p = 1,000$), y tampoco fueron significativas las comparaciones 0,00 %–1,50 %, 1,00 %–1,50 % y 1,50 %–2,00 %. El grupo de 1,00 % mostró valores inferiores a 0,00 % y 2,00 % en 1,67 unidades ($p = 0,037$). En términos generales, el flujo aumenta de forma marcada a partir de 2,50 % de GCR; sin embargo, un incremento estadístico no implica necesariamente un mejor desempeño, por lo que estos resultados deben contrastarse con los límites técnicos establecidos para la mezcla.

En conjunto, el porcentaje de GCR mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la estabilidad Marshall y el flujo. En la estabilidad, las diferencias se concentraron entre la mezcla convencional y los porcentajes de 2,00 % y 2,50 %. En el flujo, los cambios fueron más amplios y se hicieron especialmente notorios en 2,50 % y 3,00 %. Para la gravedad específica Bulk no se encontró evidencia suficiente de diferencias. En las variables Va, VMA y VFA no fue posible

establecer la existencia de diferencias estadísticamente significativas, debido a que la variación dentro de los grupos fue igual a cero y el ANOVA no pudo estimar el estadístico F ni el valor p.

La selección de un porcentaje de GCR no debe apoyarse únicamente en la significancia estadística. La decisión final debe integrar el cumplimiento de los criterios Marshall, la magnitud de los cambios, la variabilidad de las briquetas y la conveniencia técnica de cada dosificación. De esta manera se evita considerar como favorable una diferencia que, aunque sea estadísticamente detectable, pueda ubicarse fuera de los rangos de desempeño exigidos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se logró diseñar una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles con incorporación parcial de granos de caucho reciclado (GCR), aplicando el método Marshall. Los resultados obtenidos demostraron que la inclusión de este material modifica las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla de acuerdo con el porcentaje utilizado. Entre las dosificaciones analizadas, las mezclas con 1 % y 1,5 % de GCR presentaron un comportamiento adecuado, al cumplir con los parámetros de estabilidad, flujo y propiedades volumétricas establecidos por el método Marshall, por lo que se consideran las alternativas más convenientes para conservar un desempeño estructural satisfactorio.

Desde una perspectiva ambiental, el uso de GCR permite aprovechar parcialmente los neumáticos fuera de uso, promoviendo la reutilización de estos residuos y reduciendo los problemas asociados con su disposición inadecuada. En este sentido, su incorporación representa una opción con potencial para contribuir al desarrollo de pavimentos flexibles más sostenibles. No obstante, para determinar con mayor precisión su sostenibilidad, será necesario realizar una evaluación ambiental cuantitativa que considere aspectos como el consumo de energía, las emisiones generadas, el procesamiento del caucho y los posibles beneficios ambientales durante el ciclo de vida de la mezcla asfáltica.

El diseño de la mezcla patrón permitió establecer un contenido óptimo de asfalto de 5,2 %, el cual cumplió con los requisitos del método Marshall para tráfico pesado. Con esta dosificación, la mezcla presentó una estabilidad de 2631,94 lb, un flujo de 11 (0,01”), un contenido de vacíos de 4,15 % y un porcentaje de vacíos llenos de asfalto de 68,3 %. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos normativos, por lo que la mezcla patrón presenta condiciones adecuadas para su aplicación en pavimentos sometidos a tráfico pesado.

La incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) mediante el proceso de vía seca provocó una disminución progresiva de la estabilidad Marshall respecto a la mezcla convencional, especialmente a partir del 2% de adición de caucho. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza elástica del caucho reciclado, la cual incrementa la flexibilidad de la mezcla, pero reduce la rigidez y cohesión interna entre las partículas minerales y el ligante asfáltico. A pesar de ello, los porcentajes de 1% y 1,5% mantuvieron valores de estabilidad superiores al mínimo exigido por la normativa para tráfico pesado. Por tanto, dentro de las condiciones evaluadas en esta investigación, estas proporciones de GCR no comprometieron el cumplimiento del requisito de estabilidad Marshall, aunque su posible influencia sobre otras propiedades funcionales deberá comprobarse mediante ensayos complementarios.

La incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) mediante el proceso por vía seca permitió determinar que las dosificaciones de 1 % y 1,5 % cumplieron con los criterios de estabilidad, flujo y propiedades volumétricas establecidos por el método Marshall. Entre ambas alternativas, la mezcla con 1 % de GCR presentó la mayor estabilidad, por lo que fue seleccionada como la dosificación modificada más favorable. Aunque su estabilidad fue aproximadamente 21 % inferior a la obtenida en la mezcla patrón, el valor alcanzado se mantuvo por encima del mínimo exigido para tráfico pesado. En cambio, a partir del 2 % de GCR se observó una reducción más marcada de la estabilidad, lo que indica que el incremento del contenido de caucho modifica el comportamiento mecánico de la mezcla.

Las composiciones que cumplieron con los parámetros evaluados fueron las siguientes:

- Dosificación con 1 % de GCR: 30 % de agregado grueso de 3/4", 45 % de agregado grueso de 3/8", 24 % de agregado fino, 5,2 % de asfalto y 1 % de caucho reciclado.
- Dosificación con 1,5 % de GCR: 29,5 % de agregado grueso de 3/4", 45 % de agregado grueso de 3/8", 24 % de agregado fino, 5,2 % de asfalto y 1,5 % de caucho reciclado.

Los resultados de VMA (Vacíos en el Agregado Mineral) dejaron como evidencia un aumento progresivo con el incremento del porcentaje de caucho, lo que da a entender que el material caucho da un volumen en la matriz asfáltica y, por tanto, mejora la capacidad de alojamiento del ligante dentro del agregado.

En el caso de los VFA (Vacíos Llenos de Asfalto), se observó que existe una tendencia decreciente con mayores proporciones de caucho, estableciendo así que un exceso de este aditivo puede reducir la cantidad efectiva de asfalto que rellena los vacíos, afectando potencialmente la durabilidad. Además, al presentar valores inferiores a los obtenidos en la mezcla patrón y ubicarse por debajo de los criterios establecidos para el diseño, las dosificaciones más altas de GCR reflejan una composición volumétrica no aceptable.

La incorporación de caucho reciclado favorece la flexibilidad y la respuesta elástica de la mezcla asfáltica, lo que podría mejorar su comportamiento frente a las deformaciones permanentes. No obstante, antes de recomendar su aplicación en zonas con altas temperaturas o sometidas a tránsito pesado, es necesario comprobar su resistencia al ahuellamiento mediante un ensayo específico. Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento de este material contribuye a reducir la disposición inadecuada de neumáticos fuera de uso, promueve una gestión más responsable de los residuos y favorece la aplicación de principios de economía circular en la ingeniería vial.

De acuerdo con la interpretación de la matriz de Leopold y los resultados obtenidos en la investigación, se concluye que la incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles se identificaron posibles impactos ambientales tanto negativos como positivos durante las diferentes etapas del proyecto. Durante la fase constructiva se identificaron impactos negativos moderados sobre la calidad del aire, el suelo y la salud humana, ocasionados principalmente por la emisión de gases, material particulado, ruido y operación de maquinaria pesada. Sin embargo, dichos impactos son temporales y pueden ser mitigados mediante la aplicación de medidas adecuadas de control ambiental.

Por otra parte, los resultados evidencian impactos positivos significativos asociados a la reutilización de neumáticos fuera de uso, la disminución de residuos sólidos contaminantes y el aprovechamiento sostenible de materiales reciclados dentro del proceso constructivo. Asimismo, mejora del desempeño Marshall del pavimento contribuye a reducir futuras actividades de mantenimiento, reduciendo el consumo de recursos naturales y las emisiones generadas durante estas actividades. No obstante, la matriz aplicada permitió identificar y valorar los posibles impactos ambientales únicamente de manera cualitativa, por lo que sus resultados constituyen una evaluación preliminar. En consecuencia, el proyecto presenta un potencial ambiental favorable; sin embargo, se requiere una evaluación cuantitativa complementaria que permita confirmar su viabilidad y sustentar su consideración como una alternativa sostenible para el mejoramiento de pavimentos flexibles.

5.2 RECOMENDACIONES

Analizar la influencia de distintos tamaños de grano de caucho reciclado (GCR) en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas modificadas mediante el proceso de vía seca es fundamental. En este sentido, es recomendable desarrollar estudios comparativos utilizando partículas de caucho de mayor tamaño que las utilizadas en este trabajo, con el objetivo de determinar cómo la variación granulométrica del material influye en aspectos como la estabilidad, el flujo, la densidad y la durabilidad de la mezcla. A través de estos estudios se puede definir el tamaño de partícula más apropiado para optimizar el desempeño del pavimento flexible y ampliar el conocimiento técnico sobre el uso del caucho reciclado en la ingeniería vial.

Se recomienda evaluar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado utilizando porcentajes inferiores como 0,5% 0,75% 1,0% y 1,25% y 1,50%, debido a que contenidos elevados generan disminución de estabilidad y alteraciones en los parámetros volumétricos VMA y VFA. Asimismo, se sugiere estudiar el uso de aditivos o modificadores complementarios que permitan mejorar la cohesión y adherencia del ligante asfáltico, compensando la pérdida de rigidez ocasionada por el incremento del contenido de caucho reciclado.

De la misma manera, antes de ejecutar tramos experimentales en campo, se recomienda evaluar la dosificación seleccionada mediante ensayos de susceptibilidad a la humedad, resistencia al ahuellamiento, fatiga y envejecimiento. Estos análisis permitirán verificar su comportamiento frente a los principales mecanismos de deterioro que puede experimentar la mezcla durante su vida útil. Una vez comprobado su desempeño en laboratorio, podrán construirse tramos de prueba bajo condiciones reales de tránsito y clima, con el propósito de validar los resultados obtenidos, establecer curvas de comportamiento y estimar la vida útil del pavimento modificado. Previamente, también deberán realizarse los ensayos físicos y mecánicos correspondientes a los agregados pétreos finos y gruesos, verificando el cumplimiento de las normas INEN, ASTM y AASHTO, a fin de garantizar la calidad y aptitud de los materiales utilizados en el diseño de la mezcla.

En efecto, se recomienda que futuras investigaciones generen evidencia técnica que contribuya al desarrollo de lineamientos nacionales para el uso del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en mezclas asfálticas. Estos estudios servirían de base para formular especificaciones técnicas y normativas que unifiquen los criterios de calidad y desempeño, permitiendo su aplicación bajo parámetros controlados que garanticen la durabilidad y eficiencia de los pavimentos. Además, los resultados obtenidos podrían constituirse en una referencia para nuevas investigaciones orientadas al perfeccionamiento y validación de este tipo de mezclas.

Por consiguiente, para obtener resultados precisos e importantes en la elaboración de briquetas destinadas al diseño de mezclas asfálticas y determinar con exactitud el contenido óptimo de asfalto, se recomienda emplear un protocolo estándar, equipos calibrados y personal capacitado, registrando operador, temperatura, tiempo y orden de fabricación. Es así como se minimiza el riesgo de errores por manipulación indebida y se asegura la consistencia de los resultados durante todo el proceso experimental.

Se recomienda implementar planes de manejo ambiental durante todas las etapas del proyecto, especialmente en las actividades relacionadas con la producción y colocación de la mezcla asfáltica, con el fin de minimizar los impactos negativos asociados a emisiones atmosféricas, ruido, generación de residuos y contaminación

del suelo. Entre las principales medidas se sugiere realizar el control periódico de emisiones de maquinaria, riego de superficies para disminuir material particulado, manejo adecuado de residuos y uso obligatorio de equipos de protección personal para los trabajadores.

Además, se recomienda continuar investigando el comportamiento ambiental y mecánico de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado utilizando diferentes porcentajes de incorporación y condiciones de servicio; así como desarrollar tramos experimentales en campo que permitan evaluar su desempeño a largo plazo bajo condiciones reales de tránsito y clima. Esto permitirá fortalecer el uso de materiales reciclados en pavimentos flexibles y promover prácticas constructivas sostenibles en futuros proyectos de infraestructura vial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, L., Hernández, A. G., Hasbum, I., y Solano, J. (2019). Gestión de materiales de construcción en Costa Rica para reducción de residuos: barreras y motivaciones. *Tecnología En Marcha*, 32(9), 6577. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i6.4230>
- Aguilar-Velásquez, D. A. (2019). *Análisis de desempeño por humedad de una mezcla asfáltica convencional con gradación Marshall y Superpave* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional de San Agustín.
- Angulo, R., y Duarte, J. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos* [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander]. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6916/2/118188.pdf>
- Arroyo, J., Rodríguez, L., Rodríguez, F., Saavedra, K. (2024). *Caucho de neumáticos aplicados en el pavimento* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Santa]. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-santa/mecanica/mecanica-de-material-3-unidad/94752868>
- Asphalt Institute. (1986). *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*. MS-22.
- Asphalt Institute. (2007). *The Asphalt Handbook*. Kentucky.
- Buehr, W. (1964). *Rubber: natural and synthetic*. Universidad de Alberta.
- Cabrera, F., Galarza, B. (2024). *Análisis de desempeño del uso de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para mejorar la resistencia a la fatiga* [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/52048e69-47da-4ba8-ae72-d3fcc936f6ac/content>
- Cadenas, N. (2014). *Recuperación de cauchos a partir de neumáticos fuera de uso*. República Bolivariana de Venezuela.

- Carrizales, J. (2020). *Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3274319?show=full>
- Cerda, E., y Pintado, Y. (2018). *Uso del caucho en el diseño del pavimento flexible, en avenida Los Algarrobos, tramo avenida Las Amapolas – avenida Gustavo Mohme, Veintiséis de Octubre, Piura – 2018* [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32285>
- Chamba, F., y Benavides, J. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente incorporando caucho triturado de neumático reciclado* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena].
- Chamba, F., y Benavides, J. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente incorporando caucho triturado de neumático reciclado* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/ab27c0b9-b60c-41d6-a5ad-3f8609ad449e/content>
- Chellappa, C. (2017). *Revestimiento de caucho anticorrosivo*. ElSevier.
- Chiquito, A., y Torres, F. (2015). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente empleando agregados de la cantera San Vicente de Colonche y del Río San Rafael de la Provincia de Santa Elena utilizando el método Marshall* [Tesis de Pregrado, Universidad de la Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/dc8c8895-d871-4be8-9b00-fa8d35a106fe/content>
- Concho, L., y Pérez, A. (2023). *Estudio comparativo de la resistencia a la deformación mediante el ensayo Marshall entre una mezcla asfáltica convencional y con suplencia parcial de material granular fino por conchas de ostras trituradas, Lima, Perú* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Perú].

https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/8603/L.Cconcho_Tesis_Titulo_Profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Correa, C. (2018). *Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito* [Tesis de Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada].
<https://repositorio.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/8e07fee6-8952-4974-a274-630168d065f0/content>

Cruz, C. (2012). *Plan de negocios de reciclado de llantas usadas como oportunidad de negocios, en la utilización de productos innovadores* [Tesis de Pregrado, Universidad Internacional del Ecuador].
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/70/4/TUIDE-0869.pdf>

Dean, W. (1987). *Brasil y la lucha por el caucho: Un estudio de historia ambiental*. Cambridge University Press.

Díaz, C., y Castro, L. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (gcr) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá* [Tesis de Pregrado, Universidad Santo Tomás].
<https://repositorio.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>

Fariño, K. (2022). *Análisis del impacto ambiental causado por la fabricación, uso, disposición final de neumáticos, con propuesta de reciclaje en bloques de hormigón* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23599/1/UPS-GT003983.pdf>

Ferreira, D., y Torres, K. (2014). *Caracterización física de agregados pétreos para concretos casos: vista hermosa (Mosquera) y mina Cemex (Apulo)* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia].
<https://repositorio.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/fdc2350b-e4dc-4c3b-a477-6b8494ec9e2f/content>

- Flores, P., Gatica, A., Trinidad, D., y Sulca, V. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Investigatio*, (18), 37 – 52. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2022.18.2>
- Gálvez, A. (2016). *Bondades de las puzolanas en las reacciones degradantes del concreto* [Tesis de Pregrado, Universidad de Sonora]. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8650/Capitulo3.pdf>
- Giraldo, B. (2003). *Manual de Agregados para Hormigón*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gordillo, C., Carvajal, P., Fonseca, C., y Villalobos, D. (2015). *Experiencias en Ecuador de prueba piloto de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho*. Ministerio de Transporte de Obras Públicas.
- Granados, J. (2017). *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional* [Tesis de Pregrado, Universidad Ricardo Palma]. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/15df2dc0-7294-43a1-9888-a7297a190d98>
- Hveem, F. N. (1949). *Gradación de los áridos minerales en las mezclas bituminosas densas*. The Crushed Stone.
- Importadora de Accesorios y Neumáticos. (10 de noviembre de 2015). *Hablemos del Origen del Caucho*. IMANE. <http://www.imaneumagic.com/index.php/noticias/43-hablemos-del-origendel-caucho>
- Instituto Colombiano del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Asocreto.
- Instituto Nacional de Salud. (3 de abril de 2018). *Por qué la quema de llantas daña tanto la salud*. INSP. <https://web.ins.gob.pe/es/prensa/noticia/por-quela-quema-de-llantas-dana-tanto-la-salud>

- Íñiga, C. y Ledesma, G. (2019). *Estudio de paneles de aislamiento acústico a base de neumáticos reciclados y fibras de polipropileno para uso comercial* [Tesis de Pregrado, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil]. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/bitstream/44000/2852/1/T-ULVR-1773.pdf>
- Kandhal, P., y Roberts. (1996). *Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. National Center for Asphalt Technology.
- Kumar, H., Giri, D., y Sekhar, S. (2020). Modification of Bitumen Using Sustainable Materials for Pavement Design. (I. P. Ltd, Ed.) IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 9(70), 1-13. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/970/1/012022>
- López, E. (2020). *Estudio de los procesos de reciclaje de los residuos de caucho* [Tesis de Pregrado, Pontifica Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/58eb00cd-a643-4de0-a7a0-6c57692b8a8c/content>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2 de octubre de 2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. MOP-001-F 2002: https://www.obraspublicas.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-EspecificacionesTecnicas.pdf
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2014). *Curso de entrenamiento en Materiales Asfálticos*. Subsecretaría de Obras Públicas.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Universidad Católica de Colombia.
- Mora, P., y Chicaiza, M. (2013). *Propuesta económica técnica y operativa para la creación de una empresa recicladora de llanta desechable de vehículos para producir polvo de caucho y comercializarlo para la ciudad de Quito. Caso práctico aplicación del asfalto* [Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional de Quito]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7992>

- Navarro, N. (2013). *Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuero de uso (NFU) mediante vía seca* [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115523>
- Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. Limusa.
- Orellana, J., y Solano, J. (2019). *Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región* [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33528/1/Trabajo-deTitulación.pdf>
- Orozco, P., Fabella, M. y Martínez M. (2004). *Diseño conceptual de un banco de pruebas para determinar rigidez en llantas neumáticas*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Ortiz, N. (2019). *Diseño de mezclas asfálticas con agregados pétreos y polímeros tipo i aplicado al pavimento flexible* [Tesis de Pregrado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. <http://201.159.223.2/handle/123456789/3182>
- Padilla, A. (2004). *Materiales Básicos* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-13.pdf?sequence=13&isAllowed=y>
- Peñaloza, V., y Cisneros, M. (2021). *Análisis económico de productos a partir de reciclados. Caso: Recicladora Verde Neumático* [Artículo de Investigación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ambato, Ecuador]. <https://revistas.ecotec.edu.ec/index.php/rnv/article/download/618/423/1818>
- Perea, J. (2024). *Metodología para diseño de pavimento asfáltico reciclado, y su aplicación en capas de rodadura de vías urbanas* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Machala].

<https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/23093/1/JONATHAN%20PEREA%20MUÑIZ%20TMAVIALIDAD%2008.pdf>

Ramírez Palma, N. I. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco* [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/ramirez_n/sources/ramirez_n.pdf

Reyes, F. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. Universidad Javeriana.

Reyes, F., Guáqueta, C., Porras, L., y Rondón, H. (2014). Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 75-84. <https://doi.org/10.22395/rium.v12n22a6>

Reyes, F., Madrid, M., y Salas, S. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). *Infraestructura Vial*, 9(17), 25-34. <https://www.redalyc.org/pdf/4782/478276555003.pdf>

Rodríguez, E. (2016). *Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos* [Tesis de Pregrado, Universidad de Costa Rica]. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/316>

Sáenz, J. y Calderón, K. (2024). *Análisis de las propiedades mecánicas y desempeño de mezclas asfálticas de granulometría alterada, por la supresión de los tamaños intermedios del árido grueso, Huancayo 2022* [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14351/2/IV_FIN_105_TE_Saenz_Calderon_2023.pdf

Salazar, J. (12 de abril de 2018) *Cómo afecta la quema de llantas a la salud del ser humano*. Diario Correo. <https://diariocorreo.pe/salud/como-afectala-quema-de-llantas-la-salud-del-ser-humano-813073/?ref=dcr>

Salinas, E. (2019). *Análisis de la influencia de tipo agregados pétreos en las propiedades físico-mecánicas del hormigón producido con la aplicación del súper e hiper- plastificantes* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Cuenca].

<https://dspace.ucacue.edu.ec/server/api/core/bitstreams/604da41c-5873-4a2a-b6ae-e00838b686db/content>

Sánchez, D. (2006). *Tecnología del Concreto y del mortero*. Bhandar Editores.

Sarabia Lescano, K. N. (2023). *Análisis comparativo de la mezcla asfáltica modificada con la adición de polímeros termoplásticos, caucho de llanta reciclado y pavimento asfáltico tradicional para el mantenimiento vial en fallas piel de cocodrilo*. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil.] <https://repositorio.uta.edu.ec/items/5c9bf442-ec38-4a5f-a979-11c07ac9ecaa>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte. (2022). *Norma técnica N-CMT-4-05-001/22*. Instituto Mexicano de Transporte.

Sequeira Rojas, W., & Cervantes Calvo, V. (2014). Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología de Marshall. *Lanname*, 331(1), 1-10. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/889/CONSISTENCIA-DISE%C3%91OS-MEZCLA-METOD.MARSHALL.pdf?sequence=1>

Soto, E. (2023). *Uso de caucho de llantas recicladas en mezclas asfálticas en caliente como adición del cemento asfáltico* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/7400/E.Soto_Tesis_Titulo_Profesional_2023.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Ubidia, L. (2019). *Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín* [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo].

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/31570/Ubidi_a_PLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vega, D. (2016). *Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25264>

Vega, M. (2020). *Iniciativas nacionales para el reciclaje de llantas usadas en Colombia* [Tesis de Pregrado, Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7844/1/233203-2020-I-GA.pdf>

Vignart, J. (2010). *Problemática del neumático fuera de uso* [Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico Buenos Aires]. <https://ri.itba.edu.ar/items/fe0d94c3-b54a-4834-9595-8858a68fe618>

Villagaray, E. (2017). *Aplicación de caucho reciclado en un diseño de mezcla asfáltico para el tránsito vehicular de la avenida Trapiche-Comas* [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/1535>

Villegas, R., Moya, J., y Salazar, L. (2018). Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 8(1), 07–18.

Weinstein, B. (1983). *El auge del caucho en el Amazonas, 1850-1920*. Stanford University Press.

Wong, J. (2010). *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, Inc.

Wulf, F. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero* [Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciw961a/sources/bmfciw961a.pdf>

Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and*

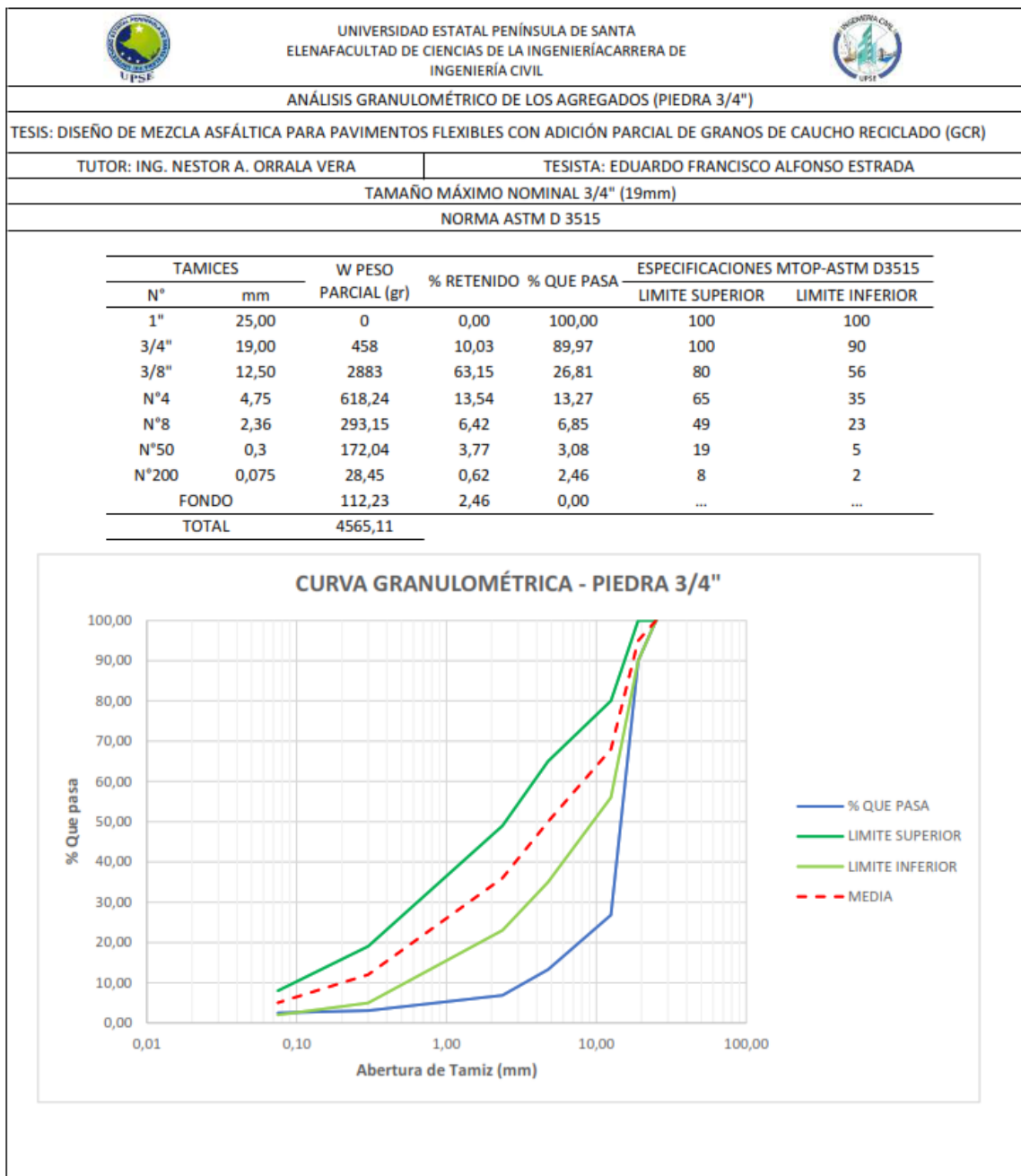
Building Materials, 180, 579–604.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.006>

Zamora, I. (2023). Los neumáticos y su impacto en los ecosistemas. *Revista FMD*, 3(4), 1-12. <https://revistafdm.uleam.edu.ec/wp-content/uploads/2023/01/Los-neumaticos-y-su-impacto-en-los-ecosistemas.pdf>

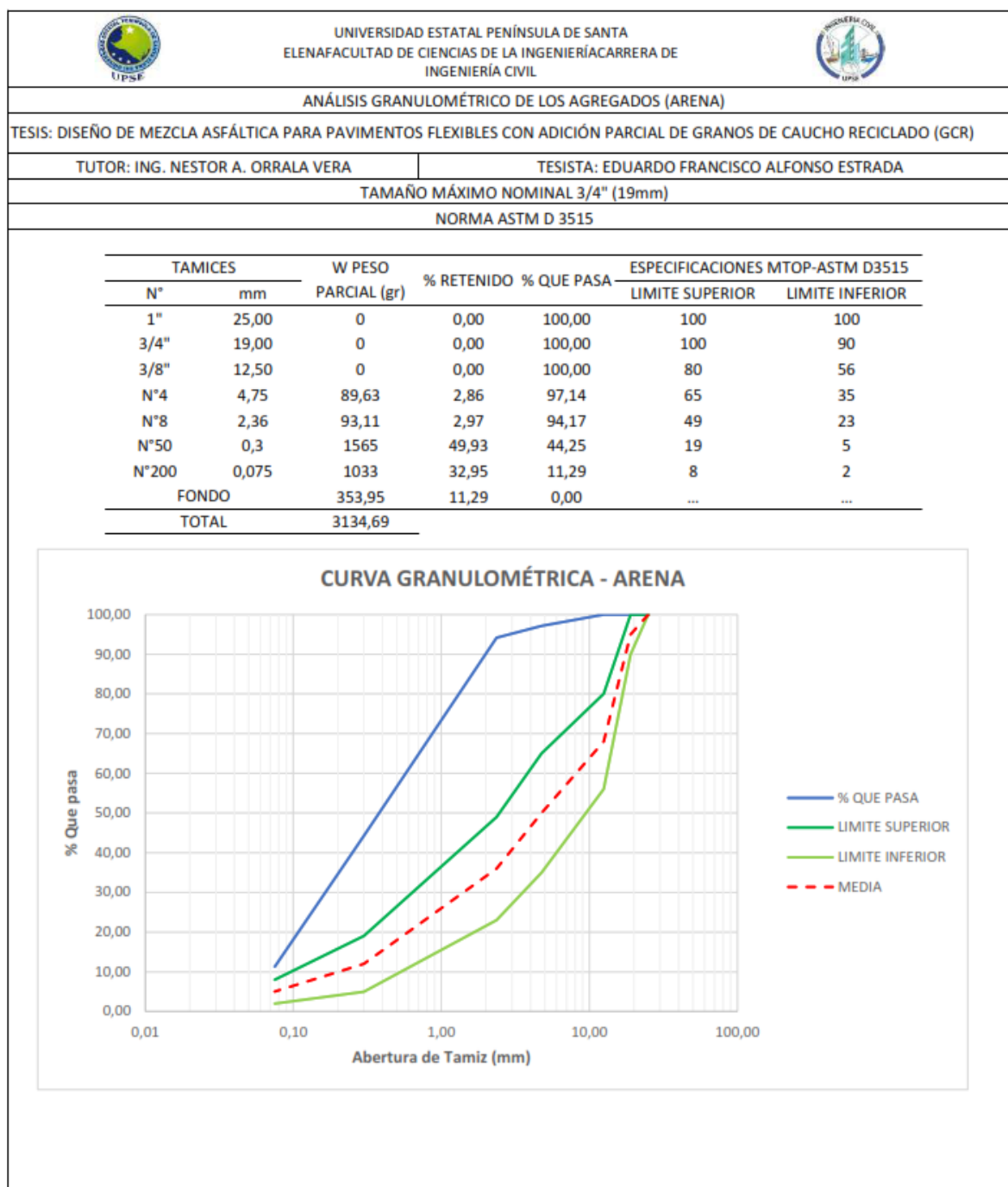
ANEXOS

Anexo I

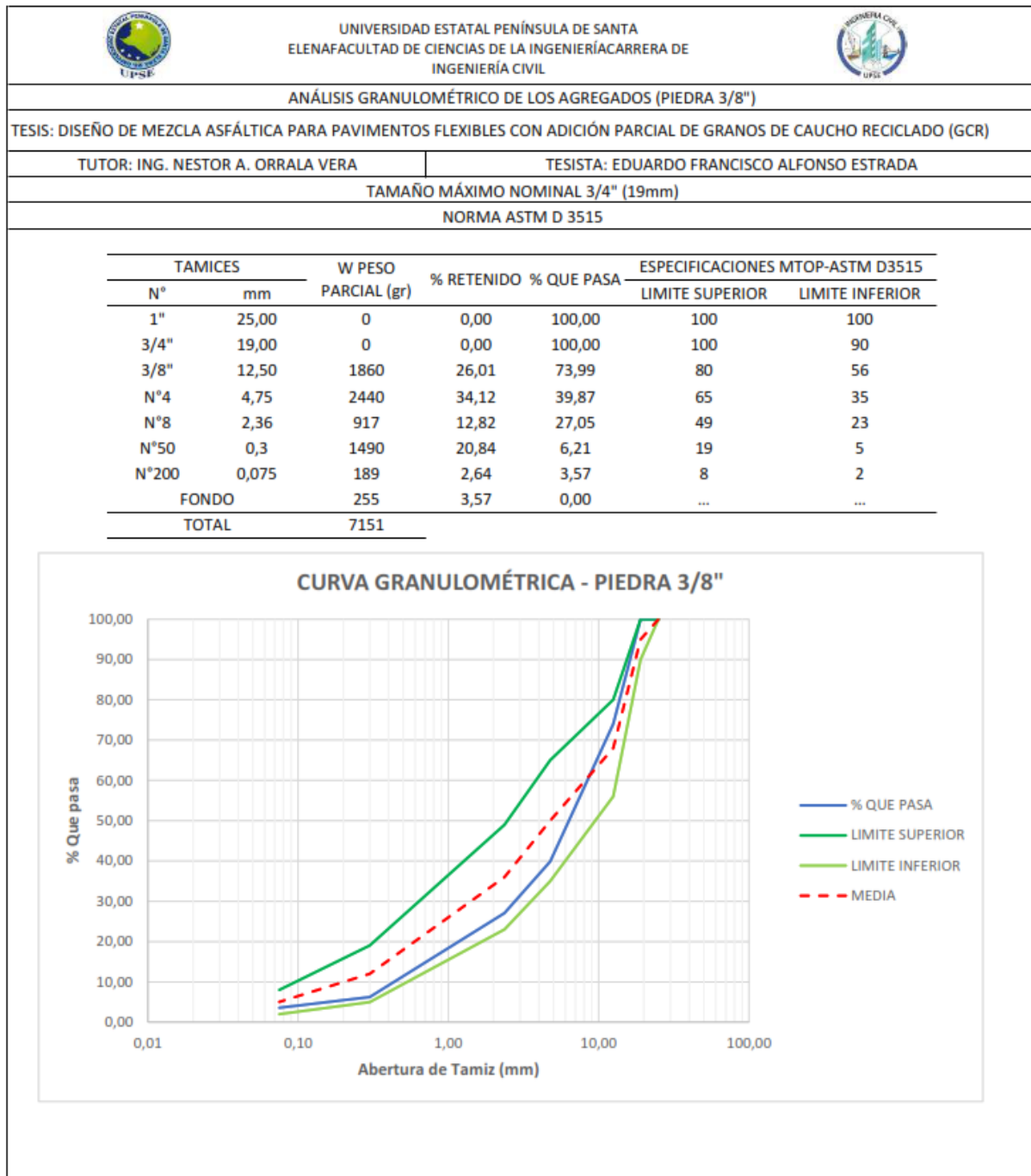
Análisis Granulométrico de la Piedra ¾"



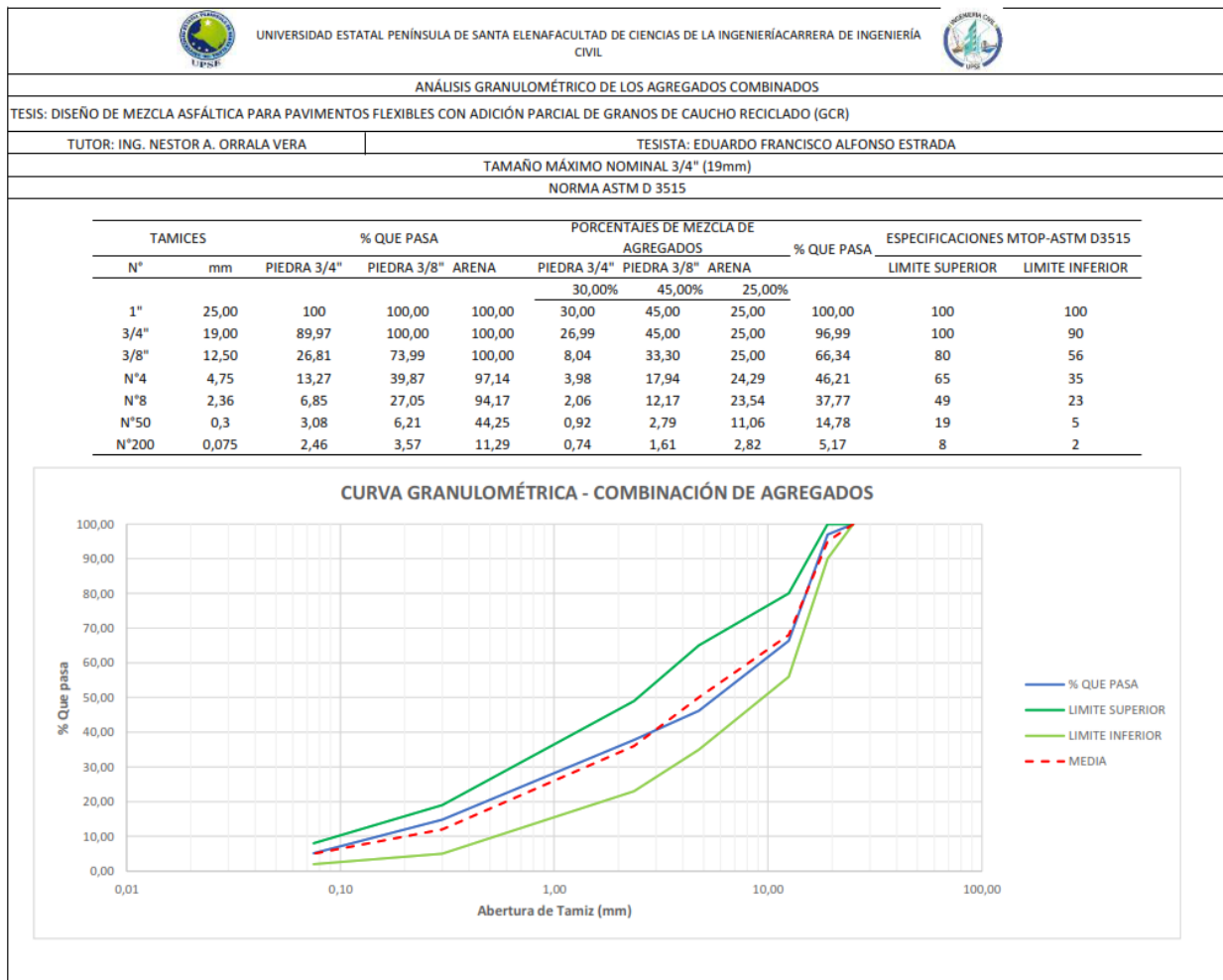
Anexo 1. Análisis Granulométrico de la Arena



Anexo 1. Análisis Granulométrico de la Piedra 3/8" – Cisco



Anexo 1. Análisis Granulométrico de la Combinación de Agregados



Anexo 1. Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados (Piedra 3/4”).

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																															
DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS																																
TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)																																
TUTOR: ING. Nestor A. Orrala Vera	TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA																															
AGREGADO GRUESO (3/4")																																
NORMA ASTM C 127- ASSTHO T 85																																
Nomenclatura: Gravedad Especifica Seca Bulk o Gravedad Especifica Neta del Agregado Gravedad Especifica Saturada Superficialmente Seca Bulk Gravedad Especifica Seca Aparente Porcentaje de Absorción A Peso en Aire del Agregado Secado al Horno B Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco C Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco Sumergido en Agua																																
Datos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th colspan="2">Muestra 1 (gr)</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>4997</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>5035</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>3062</td> </tr> </table>	Muestra 1 (gr)		A	4997	B	5035	C	3062	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th colspan="2">Muestra 2 (gr)</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>4998</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>5038</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>3050</td> </tr> </table>	Muestra 2 (gr)		A	4998	B	5038	C	3050	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th colspan="2">Muestra 3 (gr)</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>4999</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>5037</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>3099</td> </tr> </table>	Muestra 3 (gr)		A	4999	B	5037	C	3099					
Muestra 1 (gr)																																
A	4997																															
B	5035																															
C	3062																															
Muestra 2 (gr)																																
A	4998																															
B	5038																															
C	3050																															
Muestra 3 (gr)																																
A	4999																															
B	5037																															
C	3099																															
Cálculos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th rowspan="2">Fórmulas</th> <th colspan="4">Resultados</th> </tr> <tr> <th>Muestra 1</th> <th>Muestra 2</th> <th>Muestra 3</th> <th>Promedio</th> </tr> <tr> <td>$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$</td> <td>2,53</td> <td>2,51</td> <td>2,58</td> <td>2,542</td> </tr> <tr> <td>$G_{ssb} = \frac{B}{B - C}$</td> <td>2,55</td> <td>2,53</td> <td>2,60</td> <td>2,56</td> </tr> <tr> <td>$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$</td> <td>2,58</td> <td>2,57</td> <td>2,58</td> <td>2,58</td> </tr> <tr> <td>$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$</td> <td>0,76</td> <td>0,80</td> <td>0,76</td> <td>0,774</td> </tr> </table>			Fórmulas	Resultados				Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$	2,53	2,51	2,58	2,542	$G_{ssb} = \frac{B}{B - C}$	2,55	2,53	2,60	2,56	$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$	2,58	2,57	2,58	2,58	$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	0,76	0,80	0,76	0,774
Fórmulas	Resultados																															
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio																												
$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$	2,53	2,51	2,58	2,542																												
$G_{ssb} = \frac{B}{B - C}$	2,55	2,53	2,60	2,56																												
$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$	2,58	2,57	2,58	2,58																												
$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	0,76	0,80	0,76	0,774																												

Anexo 1. Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados (ARENA).



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. Nestor A. Orrala Vera

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

AGREGADO FINO (ARENA)

NORMA ASTM C 128- ASSTHO T 84

Nomenclatura:

Gravedad Especifica Seca Bulk o Gravedad Especifica Neta del Agregado

Gravedad Especifica Saturada Superficialmente Seca Bulk

Gravedad Especifica Seca Aparente

Porcentaje de Absorción

A

Peso en Aire del Agregado Secado al Horno.

B

Peso del Picnómetro (Matraz) Lleno de Agua.

C

Peso del Picnómetro (Matraz) calibrado con el Agregado y Agua hasta la marca.

D

Peso del Material en Estado Saturado Superficialmente seco (SSD)

Datos:

Muestra 1 (gr)		Muestra 2 (gr)		Muestra 3 (gr)	
A	485,92	A	488,2	A	487,85
B	652,9	B	652,5	B	652,7
C	960,9	C	960,7	C	960,6
D	500	D	500	D	500

Cálculos:

Fórmulas	Resultados			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$	2,53	2,55	2,54	2,539
$G_{ssdb} = \frac{D}{B + D - C}$	2,60	2,61	2,60	2,60
$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$	2,73	2,71	2,71	2,72
$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$	2,90	2,42	2,49	2,602

Anexo 1. Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados (Piedra 3/8", Retenido N°4).



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS

TUTOR: ING. Nestor A. Orrala Vera, MsC.,

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

AGREGADO GRUESO (3/8") - RETENIDO N°4

NORMA ASTM C 127- ASSTHO T 85

Nomenclatura:

Gravedad Especifica Seca Bulk o Gravedad Especifica Neta del Agregado

Gravedad Especifica Saturada Superficialmente Seca Bulk

Gravedad Especifica Seca Aparente

Porcentaje de Absorción

A

Peso en Aire del Agregado Secado al Horno

B

Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco

C

Peso en Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco Sumergido en Agua

Datos:

Muestra 1 (gr)		Muestra 2 (gr)		Muestra 3 (gr)	
A	4970	A	4997	A	4988
B	5000	B	5000	B	5000
C	3014	C	3010	C	3007

Cálculos:

Fórmulas	Resultados			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$	2,50	2,51	2,50	2,505
$G_{ssb} = \frac{B}{B - C}$	2,52	2,51	2,51	2,51
$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$	2,54	2,51	2,50	2,520
$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	0,60	0,06	0,24	0,301

Anexo 1. Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados (Piedra 3/8", Pasante N°4).

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																																
DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS																																	
TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)																																	
TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MsC.,	TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA																																
AGREGADO FINO CISCO (3/8") - PASANTE N°4																																	
NORMA ASTM C 128- ASSTHO T 84																																	
Nomenclatura: Gravedad Especifica Seca Bulk o Gravedad Especifica Neta del Agregado Gravedad Especifica Saturada Superficialmente Seca Bulk Gravedad Especifica Seca Aparente Porcentaje de Absorción A Peso en Aire del Agregado Secado al Horno. B Peso del Picnómetro (Matraz) Lleno de Agua. C Peso del Picnómetro (Matraz) calibrado con el Agregado y Agua hasta la marca. D Peso del Material en Estado Saturado Superficialmente seco (SSD)																																	
Datos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Muestra 1 (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>489,73</td></tr> <tr><td>B</td><td>657,1</td></tr> <tr><td>C</td><td>973,9</td></tr> <tr><td>D</td><td>500</td></tr> </tbody> </table>	Muestra 1 (gr)		A	489,73	B	657,1	C	973,9	D	500	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Muestra 2 (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>488,93</td></tr> <tr><td>B</td><td>657,8</td></tr> <tr><td>C</td><td>973,7</td></tr> <tr><td>D</td><td>500</td></tr> </tbody> </table>	Muestra 2 (gr)		A	488,93	B	657,8	C	973,7	D	500	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Muestra 3 (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>489,85</td></tr> <tr><td>B</td><td>657,4</td></tr> <tr><td>C</td><td>973,6</td></tr> <tr><td>D</td><td>500</td></tr> </tbody> </table>	Muestra 3 (gr)		A	489,85	B	657,4	C	973,6	D	500
Muestra 1 (gr)																																	
A	489,73																																
B	657,1																																
C	973,9																																
D	500																																
Muestra 2 (gr)																																	
A	488,93																																
B	657,8																																
C	973,7																																
D	500																																
Muestra 3 (gr)																																	
A	489,85																																
B	657,4																																
C	973,6																																
D	500																																
Cálculos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fórmulas</th> <th colspan="4">Resultados</th> </tr> <tr> <th>Muestra 1</th> <th>Muestra 2</th> <th>Muestra 3</th> <th>Promedio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$</td> <td>2,67</td> <td>2,66</td> <td>2,67</td> <td>2,665</td> </tr> <tr> <td>$G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$</td> <td>2,73</td> <td>2,72</td> <td>2,72</td> <td>2,72</td> </tr> <tr> <td>$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$</td> <td>2,83</td> <td>2,83</td> <td>2,82</td> <td>2,826</td> </tr> <tr> <td>$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$</td> <td>2,10</td> <td>2,26</td> <td>2,07</td> <td>2,144</td> </tr> </tbody> </table>			Fórmulas	Resultados				Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$	2,67	2,66	2,67	2,665	$G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$	2,73	2,72	2,72	2,72	$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$	2,83	2,83	2,82	2,826	$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$	2,10	2,26	2,07	2,144	
Fórmulas	Resultados																																
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio																													
$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$	2,67	2,66	2,67	2,665																													
$G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$	2,73	2,72	2,72	2,72																													
$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$	2,83	2,83	2,82	2,826																													
$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$	2,10	2,26	2,07	2,144																													

Anexo II

Diseño de Mezcla Asfáltica – Método Marshall (ASTM D 1559)

Anexo 2. Ensayo de Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Combinados (Mezcla Ensayada)

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS COMBINADOS

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MSc.

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

AGREGADOS COMBINADOS (MEZCLA ENSAYADA)

DATOS

Agregados Combinados			
% Pasante Tamiz N°4	Agregado Fino	50,91 %	
% Retenido Tamiz N°4	Agregado Grueso	49,09 %	
Gravedad Específica Bulk o Neta	$G_{sb\text{Grueso}}$	2,505 gr/cm3	
	$G_{sb\text{Fino}}$	2,665 gr/cm3	
Gravedad Específica Aparente	$G_{sa\text{Grueso}}$	2,520 gr/cm3	
	$G_{sa\text{Fino}}$	2,826 gr/cm3	
% de Absorción	$\%Abs_{\text{Grueso}}$	0,301 gr/cm3	
	$\%Abs_{\text{Fino}}$	2,144 gr/cm3	

Fórmulas	Resultados
$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\%Ret. N^{\circ}4}{G_{sb\text{Grueso}}} + \frac{\%Pasa. N^{\circ}4}{G_{sb\text{Fino}}}}$	2,561
$G_{sa} = \frac{100}{\frac{\%Ret. N^{\circ}4}{G_{sa\text{Grueso}}} + \frac{\%Pasa. N^{\circ}4}{G_{sa\text{Fino}}}}$	2,655
$\%Abs. = \frac{100}{\frac{\%Ret. N^{\circ}4}{\%Abs_{\text{Grueso}}} + \frac{\%Pasa. N^{\circ}4}{\%Abs_{\text{Fino}}}}$	1,181

Anexo 2. Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA CONVENCIONAL

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MsC.

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

ENSAYO RICE

NORMA ASTM D 2041 - ASSTHO T 209

Nomenclatura:

G_{mm}
Gravedad Específica Teórica Máxima

A
Peso en Aire de la Mezcla Asfáltica Secada al Horno (gr)

B
Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua a 25 °C ± 1 °C (77°F), gr

C
Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua y Mezcla Asfáltica a 25 °C, gr

PORCENTAJE DE ASFALTO		4,0%
W recipiente (gr)		2191
W recipiente + muestra (gr)		4205
W muestra (gr)		2014
W recipiente + agua (gr)		7412
W recipiente + muestra + agua (gr)		8592
Gmm		2,415

PORCENTAJE DE ASFALTO		4,5%
W recipiente (gr)		2191
W recipiente + muestra (gr)		4191
W muestra (gr)		2000
W recipiente + agua (gr)		7412
W recipiente + muestra + agua (gr)		8583
Gmm		2,413

PORCENTAJE DE ASFALTO		5,0%
W recipiente (gr)		2191
W recipiente + muestra (gr)		4193
W muestra (gr)		2002
W recipiente + agua (gr)		7412
W recipiente + muestra + agua (gr)		8588
Gmm		2,424

PORCENTAJE DE ASFALTO		5,5%
W recipiente (gr)		2191
W recipiente + muestra (gr)		4191
W muestra (gr)		2000
W recipiente + agua (gr)		7412
W recipiente + muestra + agua (gr)		8589
Gmm		2,430

PORCENTAJE DE ASFALTO		6,0%
W recipiente (gr)		2191
W recipiente + muestra (gr)		4194
W muestra (gr)		2003
W recipiente + agua (gr)		7412
W recipiente + muestra + agua (gr)		8586
Gmm		2,416

TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

PORCENTAJE DE ASFALTO	Gmm
4,0%	2,415
4,5%	2,413
5,0%	2,424
5,5%	2,430
6,0%	2,416
VALOR PROMEDIO PARA LA MEZCLA	2,42

Anexo 2. Cálculo para la Obtención del Porcentaje Óptimo de Asfalto

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MEZCLA CONVENCIONAL)

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MsC.

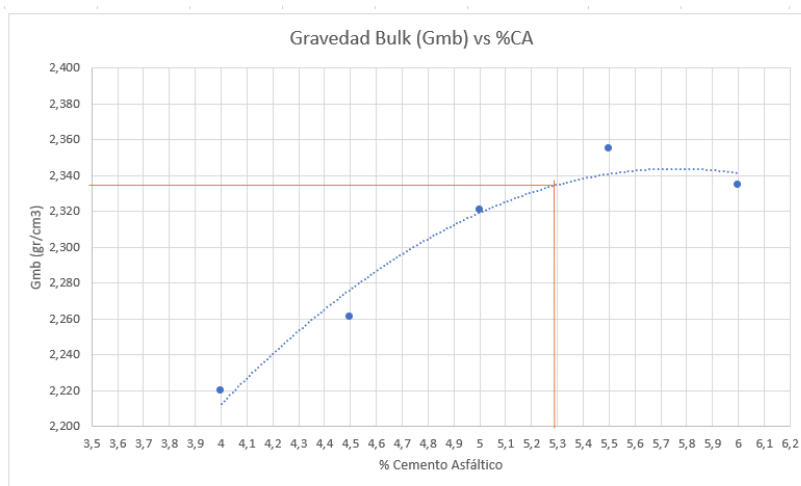
TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

MÉTODO MARSHALL - NORMA ASTM DE1559

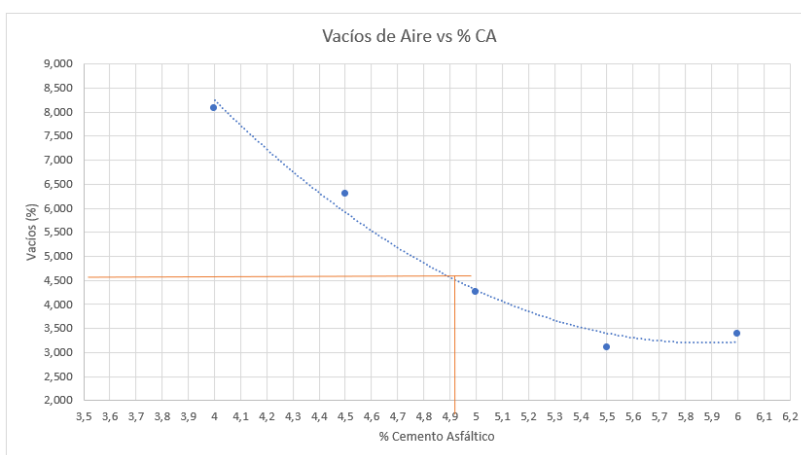
TRÁFICO PESADO - 75 GOLPES

FECHA	Nº Briqueta	% Asfalto Utilizado	de los Agregados =			2,561 gr/cm3		de los Agregados =			2,655 gr/cm3		Gravedad Especifica del Afalto						1,017 gr/cm3		Estabilidad				Flujo 0,01"
			Altura	Diámetro	Volumen	Peso de Briqueta			Gravedad Especifica de la Mezcla			% Volumen Total (Briqueta)			% Volumen de Vacios		% Asfalto		Estabilidad Ensayo (kg)	Corrección por Altura de Briqueta	Estabilidad Corregida (kg)	Estabilidad Corregida (Lb)			
						Aire (gr)	SSS (gr)	Agua (gr)	Bulk	Teorica Maxima	Efectiva	Agregado	Vacios de Aire	Asfalto	Agregado Mineral (VMA)	Llenos de Asfalto (VFA)	Absorbido	Efectivo							
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X		
										ENSAYO RICE															
01/10/2025	1	4	6.13	10,25	505,82	1066,8	1072,4	592,8	2,224	2,415	2,562	83,218	8,069	8,713	16,782	51,919	0,009	3,991	994,5	1,062	1056,16	2328,43	10		
01/10/2025	2		6.42	10,27	531,82	1073,1	1084,5	600,2	2,216										655,5	0,983	644,36	1420,56	10		
01/10/2025	3		6.27	10,26	518,38	1070,0	1078,5	596,5	2,220										825,0	1,021	842,33	1857,01	10		
Promedio			6.27	10,26	518,68	1069,97	1078,47	596,50	2,220										825,0		847,61	1868,67	10		
01/10/2025	1	4,5	6.42	10,23	527,69	1080,7	1092,8	625,6	2,313	2,413	2,579	84,310	6,285	9,405	15,690	59,942	0,282	4,231	1090,5	0,983	1071,96	2363,27	9		
02/10/2025	2		6.69	10,29	556,35	1160,9	1168,0	650,4	2,243										1222,0	0,925	1130,35	2491,99	11		
02/10/2025	3		6.14	10,28	509,62	1069,5	1082,1	601,8	2,227										1085,0	1,059	1149,02	2533,14	12		
Promedio			6.42	10,27	531,22	1103,7	1114,3	625,9	2,261										1132,5		1117,11	2462,80	11		
02/10/2025	1	5	5.61	10,27	464,72	1102,8	1109,4	660,8	2,458	2,424	2,614	86,087	4,249	9,663	13,913	69,457	0,806	4,235	1085,0	1,231	1335,64	2944,57	10		
02/10/2025	2		6.43	10,27	532,65	1195,4	1208,9	662,7	2,189										1078,5	0,980	1056,93	2330,13	12		
02/10/2025	3		6.15	10,18	500,57	1135,2	1147,1	656,8	2,315										1084,0	1,056	1144,70	2523,64	13		
Promedio			6.06	10,24	499,31	1144,5	1155,1	660,1	2,321										1082,5		1179,09	2599,44	12		
03/10/2025	1	5,5	6.24	10,20	509,89	1077,3	1092,2	638,2	2,373	2,430	2,644	86,888	3,104	10,008	13,112	76,330	1,246	4,323	1057,5	1,029	1088,17	2399,00	12		
03/10/2025	2		6.42	10,21	525,63	1115,8	1137	631,8	2,209										1076,0	0,983	1057,71	2331,84	12		
03/10/2025	3		5.97	10,25	492,62	1070	1076,8	645,8	2,483										1205,5	1,112	1340,52	2955,33	12		
Promedio			6.21	10,22	509,38	1087,7	1102,0	638,6	2,355										1113,0		1162,13	2562,06	12		
03/10/2025	1	6	6.15	10,24	506,48	1101,1	1107,1	621,1	2,266	2,416	2,649	85,683	3,383	10,933	14,317	76,367	1,316	4,763	1342,5	1,056	1417,68	3125,45	11		
06/10/2025	2		6.03	10,19	491,76	1107,2	1109,5	626,2	2,291										1085,5	1,093	1186,45	2615,67	13		
06/10/2025	3		5.91	10,27	489,57	1055,5	1061,2	629,8	2,447										1173,5	1,131	1327,23	2926,03	12		
Promedio			6.03	10,23	495,94	1087,9	1092,6	625,7	2,334										1200,5		1310,45	2889,05	12		

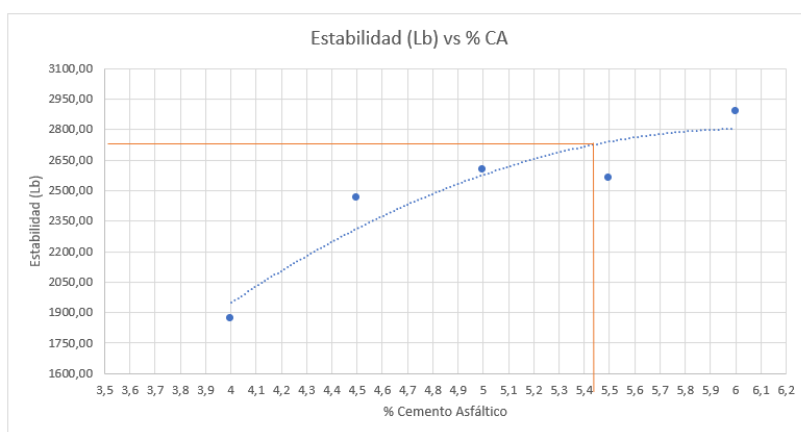
Anexo 2. Cálculo para la Obtención del Porcentaje Óptimo de Asfalto



GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK			
% ASFALTO	5,3	Gmb	2,335

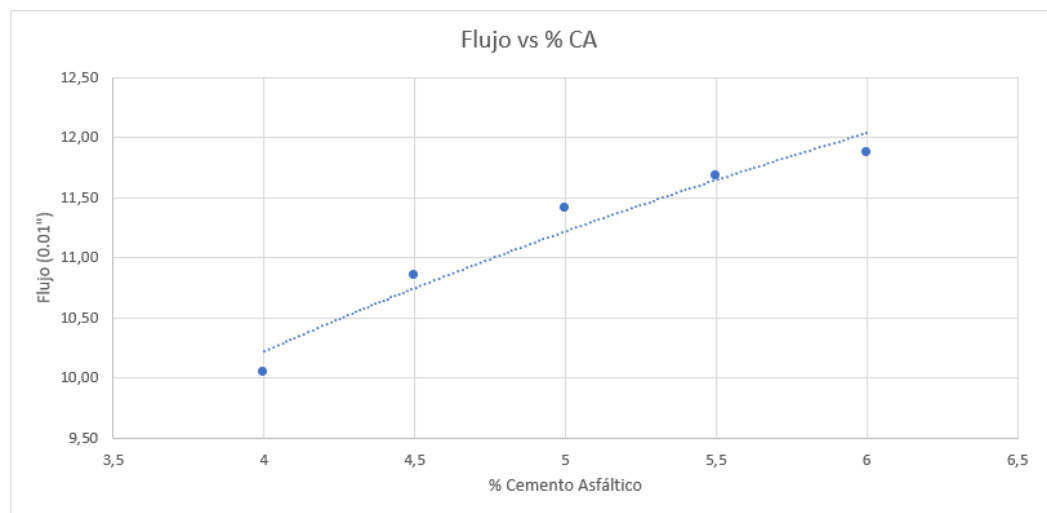
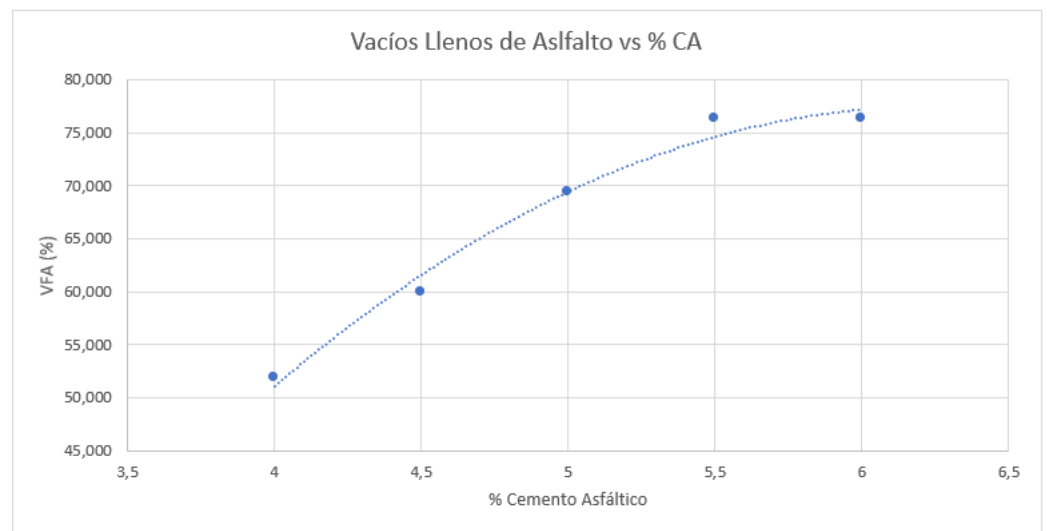
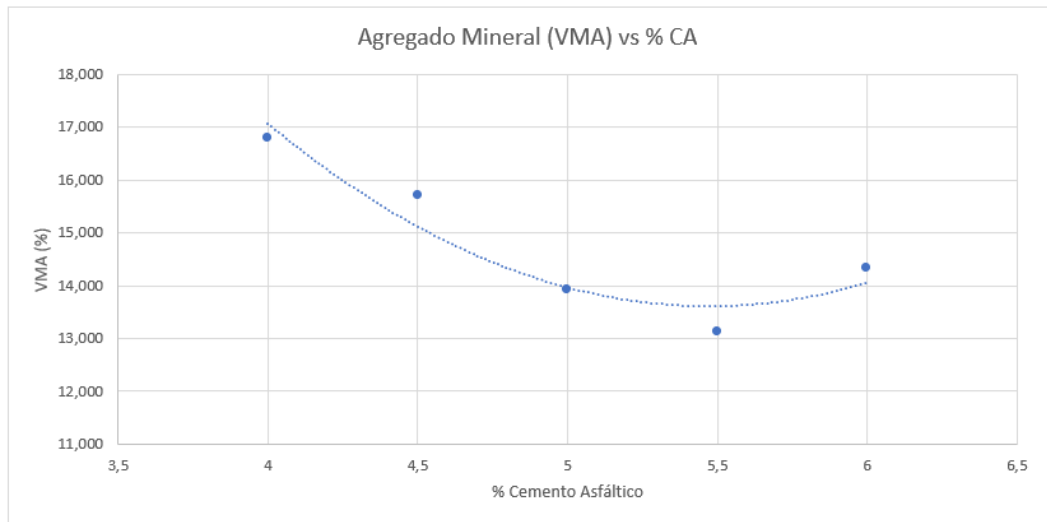


VACÍOS DE AIRE			
% ASFALTO	4,9	Va	4,51



ESTABILIDAD			
% ASFALTO	5,41	Estabilidad	2725

PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (INSTITUTO DEL ASFALTO)	
Vacíos de Aire	5,30
Gravedad Bulk	4,9
Estabilidad	5,41
% de Asfalto	5,2



Anexo 2. Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional (Porcentaje Óptimo de Asfalto)

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MEZCLA CONVENCIONAL %ÓPTIMO DE ASFALTO)

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MSc.

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

MÉTODO MARSHALL - NORMA ASTM DE1559

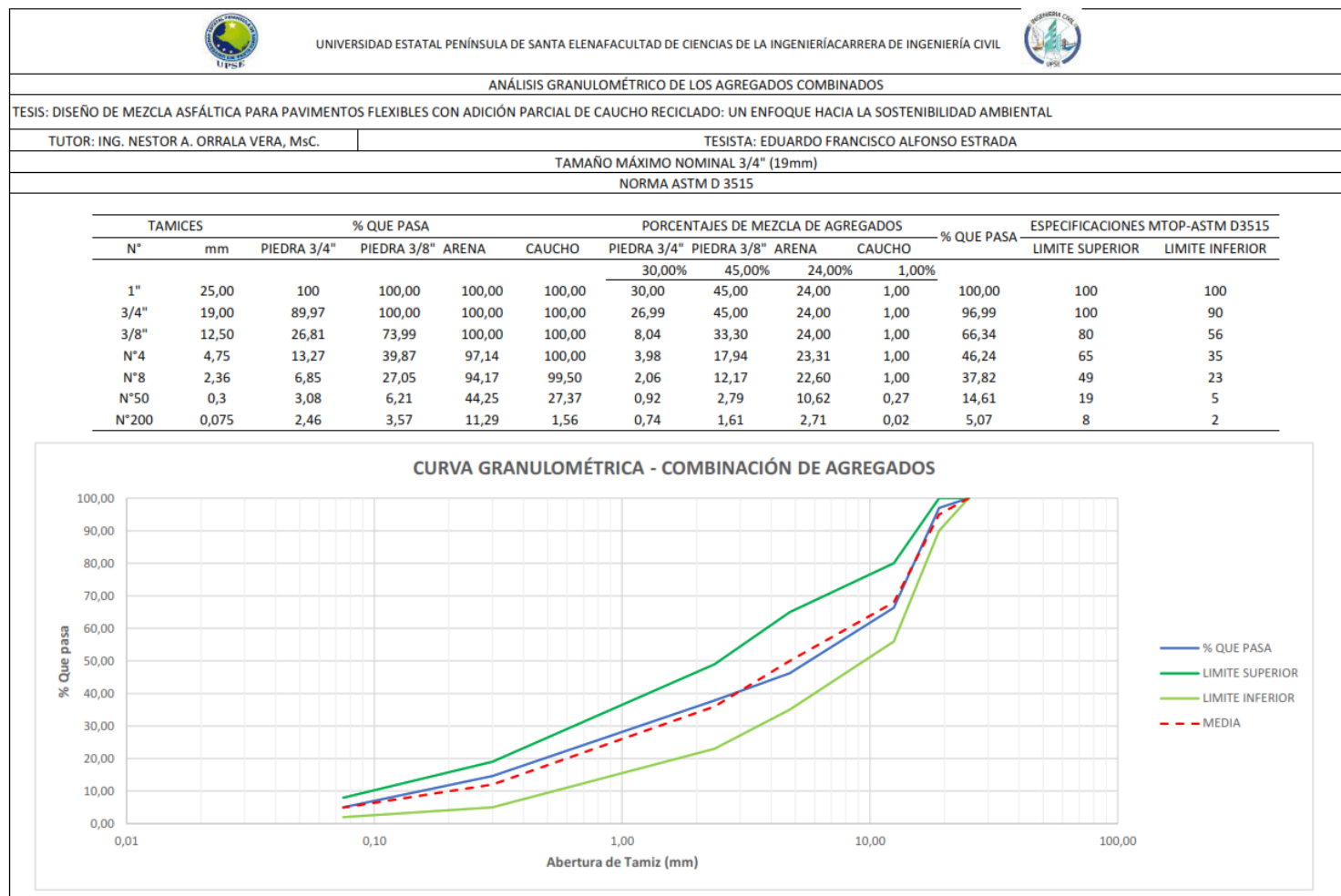
TRÁFICO PESADO - 75 GOLPES

FECHA	Nº Briqueta	% Asfalto Utilizado	de los Agregados =			2,561 gr/cm3		de los Agregados =			2,655 gr/cm3		Gravedad Especifica del Asfalto				1,017 gr/cm3						
			Altura	Diametro	Volumen	Peso de Briqueta			Bulk	Gravedad Especifica de la Mezcla		% Volumen Total (Briqueta)		% Volumen de Vacios		% Asfalto		Estabilidad					
						Aire (gr)	SSS (gr)	Agua (gr)		Teorica Maxima	Efectiva	Agregado	Vacios de Aire	Asfalto	Agregado Mineral (VMA)	Llenos de Asfalto (VFA)	Absorbido	Efectivo	Estabilidad Ensayo (kg)	Corrección por Altura de Briqueta	Estabilidad Corregida (kg)	Estabilidad Corregida (Lb)	Flujo 0,01"
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
										ENSAYO RICE													
23/10/2025	1	5,2	6,43	10,27	532,65	1195,4	1208,9	662,7	2,189	2,449	2,654	86,885	4,158	8,957	13,115	68,297	1,391	3,881	1204,5	0,98	1180,41	2602,36	11
23/10/2025	2		6,42	10,21	525,63	1115,8	1137,0	691,7	2,506										1187,5	0,983	1167,31	2573,48	12
23/10/2025	3		6,24	10,20	509,89	1087,7	1102,0	638,6	2,347										1199,0	1,029	1233,77	2720,00	11
Promedio			6,36	10,23	522,72	1132,97	1149,30	664,33	2,347														

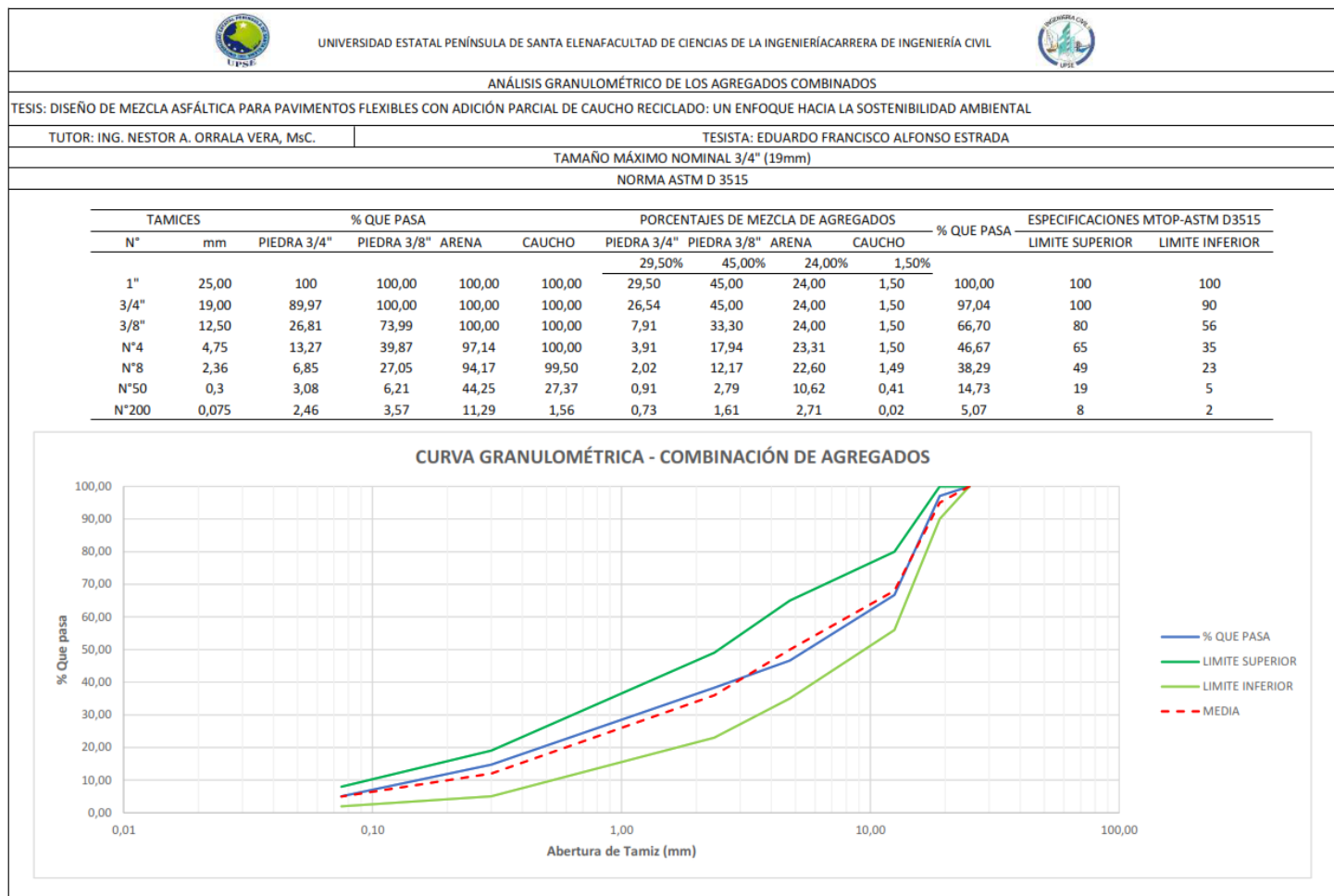
Anexo III

Diseño de Mezcla Asfáltica – Modificada con Granos de Caucho Reciclado (GCR)

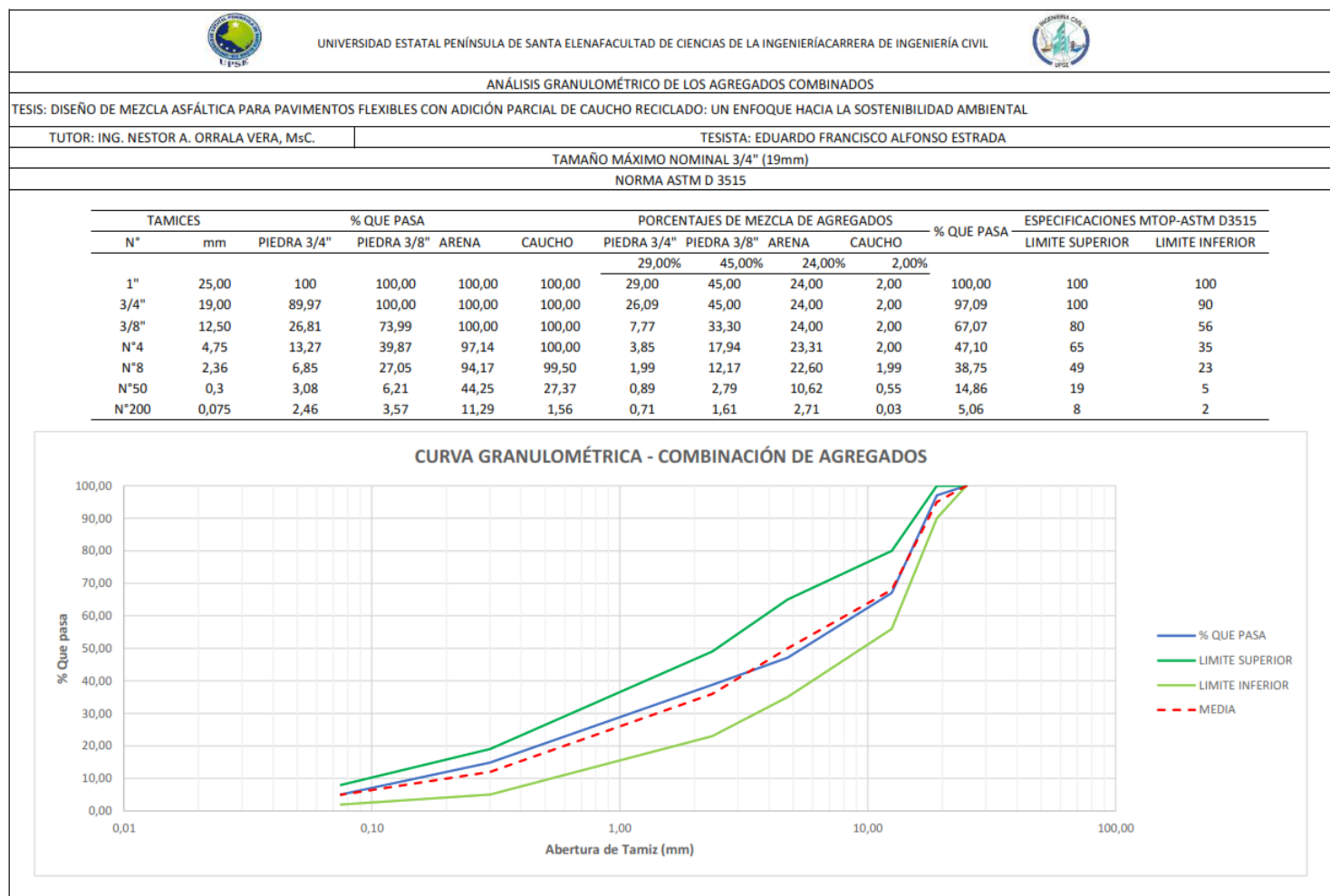
Anexo 3. Granulometría de la Combinación de Agregados – Mezcla Modificada con 1% de caucho



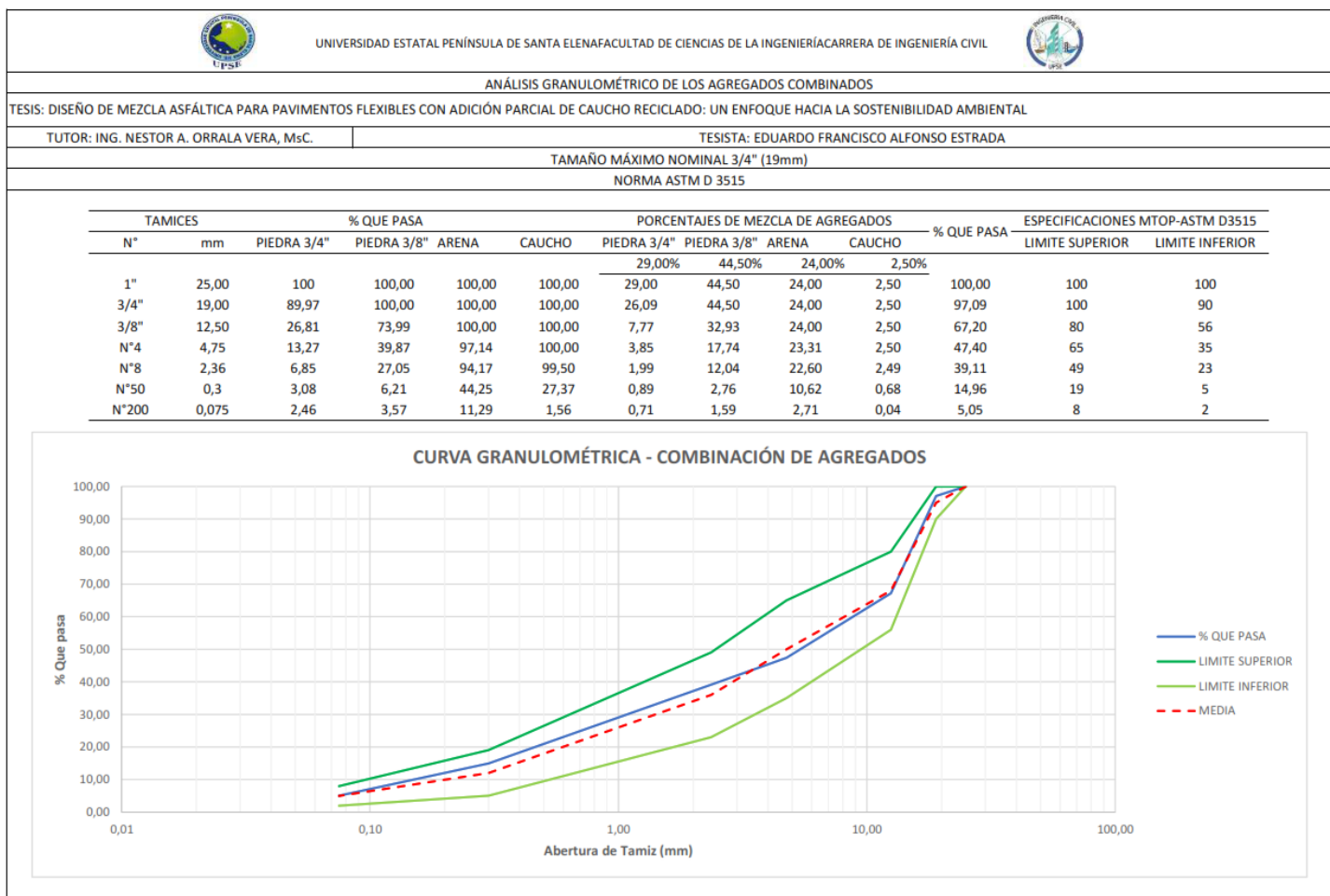
Anexo 3. Granulometría de la Combinación de Agregados – Mezcla Modificada con 1,5% de caucho



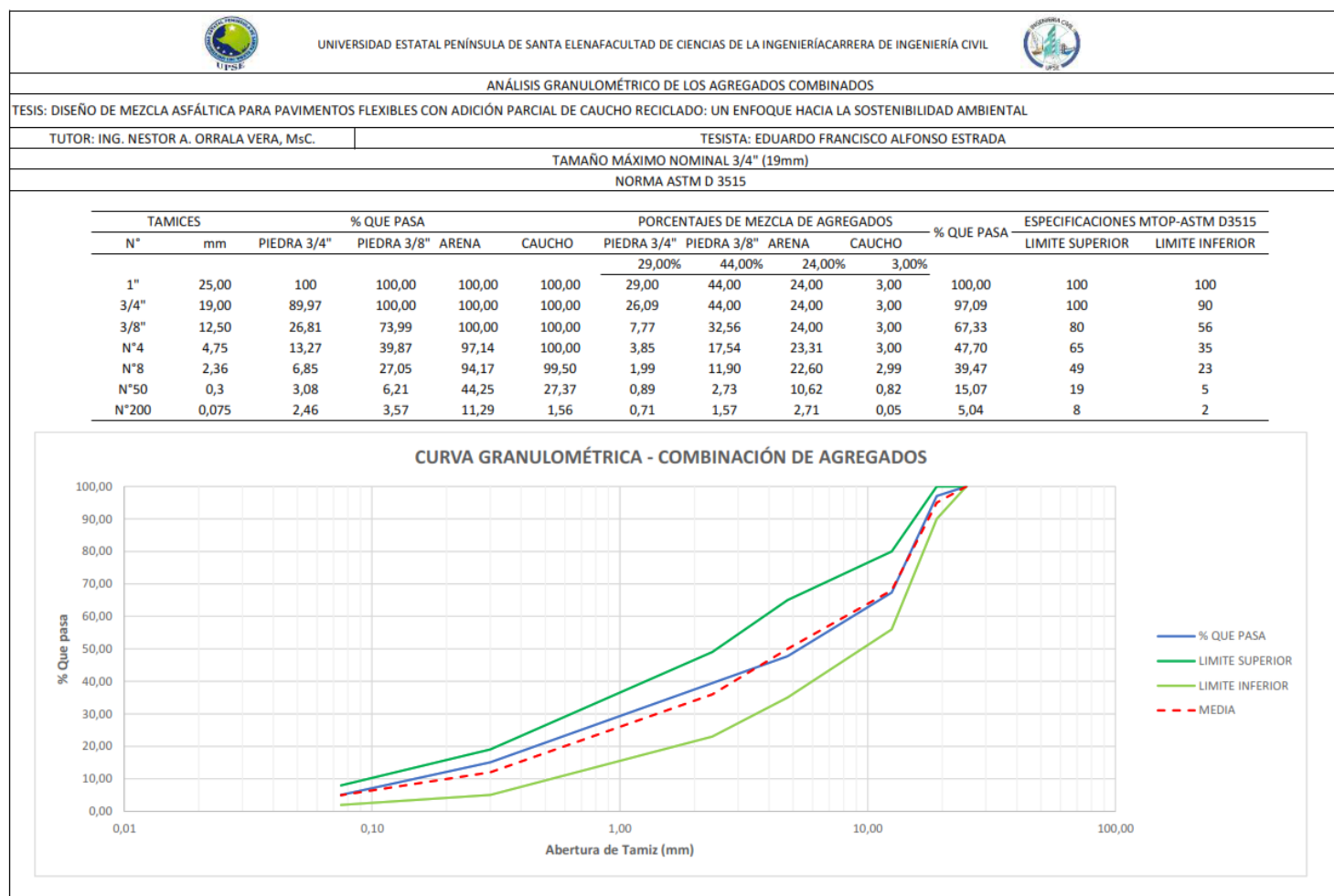
Anexo 3. Granulometría de la Combinación de Agregados – Mezcla Modificada con 2% de caucho



Anexo 3. Granulometría de la Combinación de Agregados – Mezcla Modificada con 2,5% de caucho



Anexo 3. Granulometría de la Combinación de Agregados – Mezcla Modificada con 3% de caucho



Anexo 3. Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla (Mezcla Modificada con Caucho)

 UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																	
DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA MODIFICADA																	
TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)																	
TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MsC.	TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA																
ENSAYO RICE																	
NORMA ASTM D 2041 - ASSTHO T 209																	
Nomenclatura:																	
G_{mm}	Gravedad Específica Teórica Máxima																
A	Peso en Aire de la Mezcla Asfáltica Secada al Horno (gr)																
B	Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (77°F), gr																
C	Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua y Mezcla Asfáltica a 25°C , gr																
<table> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>1,0%</th></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$</td><td>2191</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>4597</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>2406</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>7412</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>8838</td></tr> <tr> <td>G_{mm}</td><td>2,455</td></tr> </table>		PORCENTAJE DE ASFALTO	1,0%	$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4597	$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2406	$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8838	G_{mm}	2,455		
PORCENTAJE DE ASFALTO	1,0%																
$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4597																
$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2406																
$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8838																
G_{mm}	2,455																
<table> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>1,5%</th></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$</td><td>2191</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>4591</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>2400</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>7412</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>8822</td></tr> <tr> <td>G_{mm}</td><td>2,424</td></tr> </table>		PORCENTAJE DE ASFALTO	1,5%	$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4591	$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2400	$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8822	G_{mm}	2,424		
PORCENTAJE DE ASFALTO	1,5%																
$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4591																
$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2400																
$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8822																
G_{mm}	2,424																
<table> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>2,0%</th></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$</td><td>2191</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>4596</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>2405</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>7412</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>8818</td></tr> <tr> <td>G_{mm}</td><td>2,407</td></tr> </table>		PORCENTAJE DE ASFALTO	2,0%	$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4596	$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2405	$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8818	G_{mm}	2,407		
PORCENTAJE DE ASFALTO	2,0%																
$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4596																
$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2405																
$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8818																
G_{mm}	2,407																
<table> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>2,5%</th></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$</td><td>2191</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>4606</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>2415</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>7412</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>8831</td></tr> <tr> <td>G_{mm}</td><td>2,425</td></tr> </table>		PORCENTAJE DE ASFALTO	2,5%	$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4606	$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2415	$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8831	G_{mm}	2,425		
PORCENTAJE DE ASFALTO	2,5%																
$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4606																
$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2415																
$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8831																
G_{mm}	2,425																
<table> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>3,0%</th></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$</td><td>2191</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>4591</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$</td><td>2400</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>7412</td></tr> <tr> <td>$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$</td><td>8825</td></tr> <tr> <td>G_{mm}</td><td>2,432</td></tr> </table>		PORCENTAJE DE ASFALTO	3,0%	$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4591	$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2400	$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412	$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8825	G_{mm}	2,432		
PORCENTAJE DE ASFALTO	3,0%																
$W_{\text{recipiente}} \text{ (gr)}$	2191																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra}} \text{ (gr)}$	4591																
$W_{\text{muestra}} \text{ (gr)}$	2400																
$W_{\text{recipiente} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	7412																
$W_{\text{recipiente} + \text{muestra} + \text{agua}} \text{ (gr)}$	8825																
G_{mm}	2,432																
<table> <tr> <th colspan="2">TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS</th></tr> <tr> <th>PORCENTAJE DE ASFALTO</th><th>G_{mm}</th></tr> <tr> <td>1,0%</td><td>2,455</td></tr> <tr> <td>1,5%</td><td>2,424</td></tr> <tr> <td>2,0%</td><td>2,407</td></tr> <tr> <td>2,5%</td><td>2,425</td></tr> <tr> <td>3,0%</td><td>2,432</td></tr> <tr> <td>VALOR PROMEDIO PARA LA MEZCLA</td><td>2,43</td></tr> </table>		TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS		PORCENTAJE DE ASFALTO	G_{mm}	1,0%	2,455	1,5%	2,424	2,0%	2,407	2,5%	2,425	3,0%	2,432	VALOR PROMEDIO PARA LA MEZCLA	2,43
TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS																	
PORCENTAJE DE ASFALTO	G_{mm}																
1,0%	2,455																
1,5%	2,424																
2,0%	2,407																
2,5%	2,425																
3,0%	2,432																
VALOR PROMEDIO PARA LA MEZCLA	2,43																

Anexo 3 Diseño de Mezcla Asfáltica Modificada con Granos de Caucho Reciclado (GCR)

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MEZCLA MODIFICADA)

TESIS: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ADICIÓN PARCIAL DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

TUTOR: ING. NESTOR A. ORRALA VERA, MsC.

TESISTA: EDUARDO FRANCISCO ALFONSO ESTRADA

MÉTODO MARSHALL - NORMA ASTM DE1559

TRÁFICO PESADO - 75 GOLPES

				de los Agregados =			2,561 gr/cm3			de los Agregados =			2,655 gr/cm3			Gravedad Especifica del Afalto				1,017 gr/cm3			Estabilidad				Flujo 0,01"
FECHA	Nº Briqueta	% Asfalto Utilizado	% de Caucho Utilizado	Altura	Diametro	Volumen	Peso de Briqueta			Bulk	Gravedad Especifica de la Mezcla		% Volumen Total (Briqueta)			Agregado Mineral (VMA)	Llenos de Asfalto (VFA)	Absorbido	Efectivo	Estabilidad Ensayo (kg)	Correccion por Altura de Briqueta	Estabilidad Corregida (kg)	Estabilidad Corregida (lb)				
							Aire (gr)	SSS (gr)	Agua (gr)		Teorica Maxima	Efectiva	Agregado	Vacios de Aire	Asfalto												
A	B	C		D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X			
											ENSAJO RICE																
23/10/2025	1	5,2	1	6,5	10,27	538,45	1134,1	1141,8	667,6	2,392	2,455	2,662	86,896	4,384	8,720	13,104	66,544	1,500	3,778	1002,0	0,963	964,93	2127,30	10			
23/10/2025	2			7,22	10,2	589,97	1260,3	1270,3	700,0	2,210										1158,5	0,821	951,13	2096,88	10			
23/10/2025	3			6,57	10,24	541,07	1170,9	1175,9	696,2	2,441										962,5	0,949	913,41	2013,73	9			
Promedio				6,76	10,24	556,50	1188,43	1196,00	687,93	2,347													1041,0		943,16	2079,30	10
23/10/2025	1	5,2	1,5	6,92	10,24	569,90	1185,9	1191,9	657,3	2,218	2,424	2,623	85,561	4,655	9,785	14,439	67,764	0,944	4,305	899,0	0,873	784,83	1730,25	11			
23/10/2025	2			6,6	10,19	538,25	1160,8	1163,8	667,5	2,339										948,0	0,943	893,96	1970,85	11			
23/10/2025	3			6,26	10,27	518,57	1099,6	1107,6	645,0	2,377										891,0	1,024	912,38	2011,46	10			
Promedio				6,59	10,23	542,24	1148,8	1154,4	656,6	2,311													912,7		863,73	1904,19	11
23/10/2025	1	5,2	2	7,25	10,25	598,24	1269,3	1279,3	666,4	2,071	2,407	2,603	82,787	7,101	10,113	17,213	58,748	0,634	4,599	886,0	0,818	724,75	1597,79	11			
23/10/2025	2			6,63	10,25	547,08	1069	1080	657,6	2,531										805,0	0,938	755,09	1664,69	11			
23/10/2025	3			6,79	10,2	554,83	1122,1	1143,1	610,7	2,108										835,5	0,9	751,95	1657,76	12			
Promedio				6,89	10,23	566,72	1153,5	1167,5	644,9	2,236													842,2		743,93	1640,08	11
24/10/2025	1	5,2	2,5	6,6	10,26	545,67	1093,1	1101,1	999,5	2,179	2,425	2,624	81,326	9,391	9,283	18,674	49,712	0,952	4,297	783,0	0,943	738,37	1627,82	14			
24/10/2025	2			6,38	10,3	531,60	1163,7	1164,7	628,1	2,169										732,0	0,993	726,88	1602,49	14			
24/10/2025	3			6,4	10,18	520,91	1109	1115	620,6	2,243										738,0	0,988	729,14	1607,49	13			
Promedio				6,46	10,25	532,73	1121,9	1126,9	616,1	2,197													751,0		731,46	1612,60	14
24/10/2025	1	5,2	3	6,46	10,20	527,86	1030	1037	519,6	1,991	2,432	2,632	78,864	12,383	8,753	21,136	41,411	1,078	4,178	377,5	0,973	367,31	809,77	15			
24/10/2025	2			6,41	10,26	529,96	1167,1	1168,1	647,3	2,241										1016,0	0,985	1000,76	2206,30	16			
24/10/2025	3			6,75	10,27	559,16	1239,5	1241,5	667,6	2,160										1106,5	0,91	1006,92	2219,86	16			
Promedio				6,54	10,24	538,99	1145,5	1148,9	611,5	2,130													833,3		791,66	1745,31	16

Anexo IV

FOTOGRAFIAS

Anexo 4. Ensayos realizados a los Agregados

A1. Análisis Granulométrico de los Agregados Pétreos



Fracciones Retenidas de los agregados (Grava $\frac{3}{4}$ ", Arena, Cisco $\frac{3}{8}$ ") en cada Tamiz

A2. Determinación de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso



Lavado del Agregado



Agregado Saturado



Secado del Agregado Saturado Superficialmente Seco (SSS)



Peso Sumergido SSS del Agregado

A3. Determinación de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino



Llenado del Picnómetro con el Agregado y extracción de las burbujas de aire



Picnómetro con el Agregado SSS más el agua (tanto del cisco y de la arena)

A4. Mezcla Asfáltica convencional (Método Marshall)

Análisis Granulométrico del Caucho



Caucho Triturado



Tamices a utilizar en el ensayo



Fracciones del Caucho

Elaboración de Briquetas



Adición de Asfalto y mezclado con los porcentajes de asfalto



Elaboración y extracción de las briquetas

Gravedad Específica Bulk de las Briquetas



Determinación del peso seco, SSS y sumergido de las briquetas

Gravedad Específica Teórica Máxima



Equipo para el Ensayo Rice



Muestra previa al Ensayo

Rotura Marshall



Briquetas sumergidas a Baño María



Rotura de Briquetas

Anexo 4. Mezcla Asfáltica modificada con granos de caucho reciclado (Método Marshall)

Elaboración de briquetas modificadas



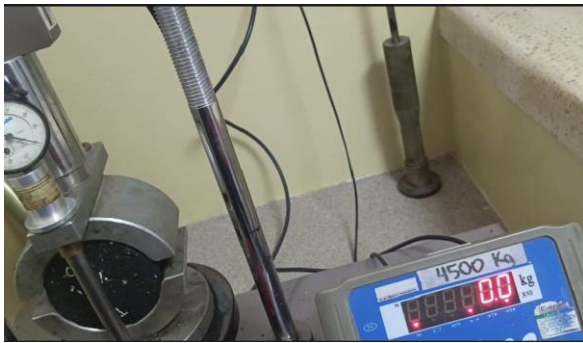
Gravedad Específica Teórica Máxima (Mezcla modificada)



Mezcla asfáltica con porcentajes de caucho para el ensayo



Rotura Marshall (Briquetas modificadas)



Rotura de briquetas con caucho