



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO EXPERIMENTAL
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

TEMA:

**“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.”**

AUTORA: Karen Nicole Sarabia Lescano

TUTOR: Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg.

AMBATO – ECUADOR

Julio – 2023

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención de Título de Ingeniera Civil, con el tema: “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”, elaborado por la Srta. Karen Nicole Sarabia Lescano, portadora de la cédula de ciudadanía: C.I. 0503932204, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autora.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, julio 2023



Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, **Karen Nicole Sarabia Lescano** con C.I: 0503932204, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“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”**, así como también análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autora del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, julio 2023



Karen Nicole Sarabia Lescano

C.I. 0503932204

AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, julio 2023



Karen Nicole Sarabia Lescano

C.I. 0503932204

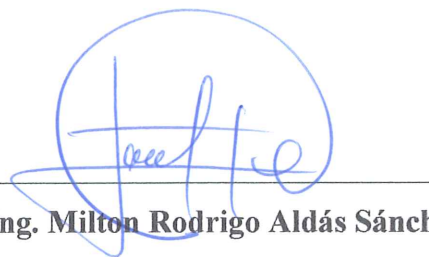
AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por la estudiante Karen Nicole Sarabia Lescano de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“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”**.

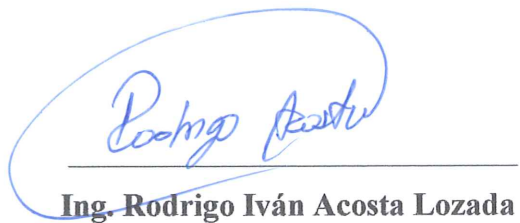
Ambato, julio 2023

Para constancia firman:



Ing. Milton Rodrigo Aldás Sánchez PhD.

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi Niñito Manuelito quien me lleno de bendiciones y me ayudo a sobre llevar y afrontar cada uno de mis obstáculos. A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestra manera de pensar. A mi padre, quien ha sido mi principal motor para no rendirme y seguir adelante con este sueño. A mi hermana Heidy quien estuvo conmigo en los momentos más difíciles de esta etapa, quien siempre estaba dispuesta a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi hermanita Mirely quien estuvo presente toda la carrera y con solo saber de su existencia me motivo a no detenerme y seguir adelante para ser su ejemplo en la vida. A toda mi familia en general que de una forma u otra me han apoyado en varios momentos.

Karen Sarabia

AGRADECIMIENTO

El amor, la dedicación y la paciencia de mis padres con los que se preocupaban día a día por el progreso y desarrollo de esta tesis, es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo.

Doy gracias a Dios por darles la vida a mis padres, también quiero agradecer lo mucho que me ha bendecido dándome la oportunidad de disfrutar al lado de las personas que me aman, y a las que yo sé que amo en mi vida, gracias a Dios por permitirme amar a mis padres, gracias a mis padres por permitirme conocer a Dios y de su infinito amor.

Agradezco a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y sobre todo en mis expectativas, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme en cada pasito que he dado en mis estudios, gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y cada palabra que me motivaba a salir adelante durante todo este proceso que fue parte de mi vida, a mi enamorado Cristian Jiménez por formar parte de mi crecimiento personal y profesional brindándome su apoyo y su amor.

Al Ing. Alex Frías por su dedicación y por los valiosos consejos que me brindó mientras llevaba a cabo mi trabajo de titulación.

De igual manera mis agradecimientos a la Planta de asfalto JEAL construcciones, de manera especial al Ing. Marcelo Quispe por la confianza y ayuda incondicional.

Gracias a la vida por permitirme lograr un nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en mí.

Karen Sarabia

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Justificación.....	6
1.1.3 Fundamentación Teórica.....	7
1.1.4 Hipótesis.....	30
1.2 Objetivos	31
1.2.1 Objetivo General	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	32
2.1 Materiales.....	32
2.2 Métodos.....	37
2.2.1 Etapa 1 Preliminar	39

2.2.2	Etapa 2. Preparación de la mezcla y elaboración de las briquetas en base al Método Marshall.....	49
2.2.3	Etapa 3. Desempeño de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas	52
2.2.4	Población y muestra.....	59
2.2.5	Plan de recolección de información.....	60
2.2.6	Plan para análisis de resultados	60
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		61
3.1	Análisis y discusión de los resultados.....	61
3.1.1	Ensayos realizados a los agregados pétreos	61
3.1.2	Ensayo realizado al asfalto	73
3.1.3	Método Marshall (ASTM D 1559-89).....	74
3.1.4	Análisis comparativo de resultados entre los porcentajes óptimos de los materiales modificadores y la mezcla convencional.....	98
3.2	Verificación de hipótesis.....	103
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		104
4.1	Conclusiones	104
4.2	Recomendaciones	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		107
ANEXOS.....		113
A1.	Anexos fotográficos	113
A2.	Factor de Corrección de la Estabilidad Marshall	120
A3.	Formato de Informe de prueba de laboratorio para el diseño del Método Marshall	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Capas constitutivas de un pavimento flexible.....	8
Tabla 2 Ficha técnica del Asfalto AC-20.....	11
Tabla 3 Causas y efectos de la baja estabilidad.....	12
Tabla 4 Causas y efectos de la impermeabilidad.....	12
Tabla 5 Causas y efectos de la mala trabajabilidad	13
Tabla 6 Causas y efectos de la mala resistencia a la fatiga	14
Tabla 7 Causas y efectos a la poca resistencia al deslizamiento	14
Tabla 8 Porcentaje de peso por tamices	20
Tabla 9 Tamaño del agregado para ensayo de porcentaje de caras fracturadas en los minerales	21
Tabla 10 Cantidades según el tamaño nominal	22
Tabla 11 Criterio de diseño de mezcla Marshall	24
Tabla 12 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)	24
Tabla 13 Materiales y equipos utilizados en los ensayos del proyecto	32
Tabla 14 Materiales y equipos utilizados en los ensayos de los agregados.....	34
Tabla 15 Materiales y equipos empleados en las muestras de asfalto convencional y modificadas	35
Tabla 16 Requisitos granulométricos para mezclas asfálticas en planta según especificaciones del MTOP.....	42
Tabla 17 Factor de corrección de constancia K (temperatura).....	44
Tabla 18 Valores estandarizados de ensayo granulométrico	46
Tabla 19 Porcentajes de cada tamaño de agregado que intervienen en la mezcla.....	55
Tabla 20 Gravedades específicas Bulk de cada tamaño de agregado.....	56
Tabla 21 Gravedades específicas aparentes de cada tamaño de agregado.....	56
Tabla 22 Plan de recolección de información	60
Tabla 23 Granulometría del agregado grueso y fino	62

Tabla 24 Gravedad específica del agregado fino (Arena).....	64
Tabla 25 Gravedad específica del agregado grueso 3/4"	67
Tabla 26 Gravedad específica del agregado grueso 3/8"	69
Tabla 27 Resistencia al desgaste por abrasión	70
Tabla 28 Porcentaje de caras fracturadas	71
Tabla 29 Recubrimiento y peladura.....	72
Tabla 30 Gravedad específica del asfalto.....	73
Tabla 31 Dosificación de agregados para la mezcla convencional.	74
Tabla 32 Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE.....	75
Tabla 33 Diseño de mezcla asfáltica convencional por el método de Marshall.	76
Tabla 34 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla convencional	77
Tabla 35 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.....	77
Tabla 36 Porcentaje óptimo de asfalto.....	81
Tabla 37 Comprobación del porcentaje óptimo de asfalto.....	81
Tabla 38 Dosificación de agregados para la mezcla modificada con polímero	82
Tabla 39 Determinación de la gravedad específica teórica máxima- RICE	83
Tabla 40 Diseño de mezcla asfáltica modificada con polímero termoplástico por el método de Marshall	84
Tabla 41 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla modificada con polímero	85
Tabla 42 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.....	85
Tabla 43 Porcentaje óptimo de asfalto.....	89
Tabla 44 Resumen de resultados – mezcla modificada con polímero	89
Tabla 45 Dosificación de agregados para la mezcla modificada con Caucho	90
Tabla 46 Determinación de la gravedad específica teórica máxima- RICE	91

Tabla 47 Diseño de mezcla asfáltica modificada con caucho de llanta por el método de Marshall.....	92
Tabla 48 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla modificada con caucho.	93
Tabla 49 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.....	93
Tabla 50 Porcentaje óptimo de caucho.	97
Tabla 51 Resumen de resultados – mezcla modificada con caucho de llanta.....	97
Tabla 52 Propiedades de los tres tipos de mezclas asfálticas.....	98
Tabla 53 Factor de Corrección de la Estabilidad Marshall de acuerdo al Volumen de la probeta (cm ³).....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Capas de un pavimento flexible.....	8
Figura 2 Proceso de refinación del petróleo para obtención de petróleo	10
Figura 3 Representación de los Volúmenes en una Briqueta Compactada de Mezcla Asfáltica.	17
Figura 4 Ahuellamiento	28
Figura 5 Falla piel de cocodrilo	28
Figura 6 Desprendimiento de Partículas	29
Figura 7 Fisuras y grietas longitudinales	29
Figura 8 Falta de adherencia	30
Figura 9 Etapas de trabajo	38
Figura 10 Planta de asfalto JEAL Construcciones	40
Figura 11 Compra del Polímero	40
Figura 12 Compra de caucho de llanta triturado	41
Figura 13 Caucho de llanta triturado	41
Figura 14 Curva granulométrica del agregado grueso y fino	63
Figura 15 Curva de Vacíos con Aire vs Porcentaje de Asfalto	78
Figura 16 Curva de Densidad bulk vs Porcentaje de Asfalto.....	78
Figura 17 Curva de Estabilidad vs Porcentaje de Asfalto.....	79
Figura 18 Curva de Flujo vs Porcentaje de Asfalto	79
Figura 19 Curva de Vacíos en Agregado Minerales vs Porcentaje de Asfalto	80
Figura 20 Curva de Vacíos Llenos de Asfalto vs Porcentaje de Asfalto	80
Figura 21 Curva de Vacíos en aire vs. porcentaje de polímero	86
Figura 22 Curvas de Densidad bulk vs. porcentaje de polímero	86
Figura 23 Curvas de Estabilidad vs. porcentaje de polímero	87
Figura 24 Flujo o deformación vs. porcentaje de polímero	87
Figura 25 Vacíos en agregados minerales vs. porcentaje de polímero	88

Figura 26 Porcentaje de Vacíos llenos de asfalto vs. porcentaje de polímero	88
Figura 27 Curva de Vacíos con Aire vs Porcentaje de Caucho.....	94
Figura 28 Curva de Densidad bulk vs Porcentaje de Caucho	94
Figura 29 Curva de Estabilidad vs Porcentaje de Caucho	95
Figura 30 Curva de Flujo vs Porcentaje de Caucho	95
Figura 31 Curva de Vacíos en Agregado Minerales vs Porcentaje de Caucho	96
Figura 32 Curva de Vacíos Llenos de asfalto vs Porcentaje de Caucho.....	96
Figura 33 Variación del Peso Específico Bulk.....	98
Figura 34 Variación de Vacíos.....	99
Figura 35 Variación de Estabilidad.....	99
Figura 36 Variación del Flujo.....	100
Figura 37 Variación del VAM.....	100
Figura 38 Variación del VAF.....	101
Figura 39 Informe de prueba que muestra datos típicos de laboratorio para el diseño mediante el Método Marshall.....	121

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo de analizar y comparar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas con la adición de: polímeros termoplásticos y caucho de llanta reciclado en comparación al asfalto tradicional.

Se elaboraron briquetas de asfalto: modificadas y convencionales utilizando el Método Marshall luego se analizó el comportamiento de una mezcla asfáltica modificándola con la adición de los siguientes porcentajes de polímero termoplástico de 5, 10, 15 y 20, por ciento en peso; y de caucho se utilizó el 2, 3, 4 y 5 por ciento, en donde se fabricaron 36 muestras, de las cuales 12 corresponden a mezclas asfálticas convencionales y 24 a mezclas modificadas; utilizando dichos materiales se alcanzó el porcentaje óptimo de polímeros reciclados que se puede añadir a las mezclas asfálticas cumpliendo y mejorando en gran parte los requisitos de diseño que establecen las normas para que puedan ser utilizadas en el proceso de pavimentación.

Se determinó que la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho de llanta si mejoró algunas de las propiedades mecánicas, ya que presentó características resistentes y duraderas, obteniendo un porcentaje óptimo de adición del 5,7 por ciento de caucho y un porcentaje óptimo de adición de polímero termoplástico de 6,6 por ciento.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, Durabilidad, Método Marshall, Polímero termoplástico, Caucho de llanta, Polímeros modificadores.

ABSTRACT

This research work was carried out with the objective of analyzing and comparing the mechanical properties of modified asphalt mixes with the addition of: thermoplastic polymers and recycled tire rubber compared to traditional asphalt.

Asphalt briquettes were made: modified and conventional using the Marshall Method, then the behavior of an asphalt mixture was analyzed by modifying it with the addition of the following thermoplastic polymer percentages of 5, 10, 15 and 20 percent by weight; and rubber, 2, 3, 4 and 5 percent were used, where 36 samples were manufactured, of which 12 correspond to conventional asphalt mixes and 24 to modified mixes; By using these materials, the optimum percentage of recycled polymers that can be added to asphalt mixtures was achieved, largely fulfilling and improving the design requirements established by the standards so that they can be used in the paving process.

It was determined that the hot mix asphalt modified with tire rubber did improve some of the mechanical properties, since it presented resistant and durable characteristics, obtaining an optimal percentage of addition of 5.7 percent of rubber and an optimal percentage of addition of 6.6 percent thermoplastic polymer.

Keywords: Asphalt mix, Durability, Marshall method, Thermoplastic polymer, Tire rubber, Modifying polymers.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1 Antecedentes

En el pasado, se emplearon mezclas asfálticas convencionales en el mantenimiento de las carreteras. Estas mezclas consistían principalmente en la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico, los cuales se aplicaban sobre la superficie de la carretera. Aunque estas mezclas resultaban adecuadas en muchos casos, presentaban limitaciones en cuanto a la proporción entre el ligante y los agregados, compactación de la mezcla, así como en el rendimiento de los materiales ante cambios bruscos de temperatura.

Con el fin de superar estas limitaciones, se introdujeron las mezclas asfálticas modificadas para mejorar el mantenimiento vial y así asegurar una mayor seguridad y durabilidad en la carretera. Estas mezclas se componen de agregados pétreos, ligante asfáltico y aditivos que mejoran sus propiedades físicas y mecánicas. Los aditivos utilizados pueden ser polímeros, elastómeros, fibras o materiales reciclados, entre otros, que se añaden a la mezcla para modificar su comportamiento y proporcionar características específicas.[1]

Esto significa que el mantenimiento de carreteras es una tarea extremadamente desafiante. Estas mezclas de asfalto fueron probadas en numerosos proyectos a lo largo del mundo, y pueden ofrecer una solución a muchos de los problemas de mantenimiento vial en Ecuador. Además, son considerablemente más impermeables que el asfalto convencional, reduciendo así la probabilidad de que se formen baches. El uso de mezclas asfálticas modificadas también puede contribuir a la reducción de los costos de mantenimiento, dado que los materiales suelen ser más duraderos y se requiere menos trabajo para repararlos.

Así también, el incremento del flujo vehicular ha generado la necesidad de contar con asfaltos que ofrezcan mejores propiedades y características a las que presentan los materiales convencionales usados en la construcción de carreteras. Por esta razón, se

han buscado soluciones que permitan mejorar las propiedades y el desempeño de los asfaltos.[2]

Ante la problemática, se lleva a cabo investigaciones en todo el mundo sobre mezclas asfálticas en caliente. Obteniendo resultados prometedores al emplear polímeros en estas mezclas, como el SBS (estireno-butadieno-estireno) y el SBR (estireno-butadieno). Estos demostraron una serie de beneficios para el asfalto, como: reducir la penetración, aumentar la viscosidad, elevar el punto de inflamación, disminuir la susceptibilidad a las variaciones de temperatura y mejorar la recuperación elástica del asfalto, entre otros.[3]

Algunos países como Australia, Bélgica, Francia, Gran Bretaña, Portugal, Estados Unidos, España y Alemania implementaron métodos de modificación de los ligantes en las mezclas asfálticas utilizando polímeros. Permitiendo mejorar las propiedades reológicas de dichas mezclas y lograr resultados más rentables desde el punto de vista económico.

En América Latina, implementaron ampliamente la utilización de asfaltos modificados, y un ejemplo notable de esto es Brasil. En 1968, el ingeniero Jean Claude Vogt realizó los primeros experimentos en Bahía, donde introdujo manualmente látex SBR en un mezclador de concreto asfáltico. Al año siguiente, en colaboración con Farah, estableció un tramo experimental entre dos comunidades donde se incorporó el látex como parte del betún utilizado en la mezcla asfáltica.[4]

Kaa, Mogoruza y Anguizola [5], de la Universidad Tecnológica de Panamá, llevaron a cabo la investigación titulada "Análisis de propiedades de mezclas asfálticas modificadas en Panamá". En este estudio, se propuso evaluar y comparar los efectos positivos tanto técnicos como económicos que los polímeros tienen sobre el cemento asfáltico, al analizar su rendimiento en mezclas asfálticas frente a deformaciones causadas por altas temperaturas y cargas. Mediante pruebas de laboratorio, se descubrió que al agregar un 2% de polímero elastómero (SBR) al asfalto AC-20, se logró reducir la penetración en aproximadamente 5 mm.

Villegas; Aguiar y Loria [6], llevaron a cabo una investigación denominada "Diseño de Mezcla Asfáltica con Materiales de Desecho". El objetivo principal de este estudio es abordar la gestión de materiales de diseño en la mezcla asfáltica, utilizando dichos

materiales como modificadores. Una parte fundamental de esta investigación consistió en evaluar diferentes productos como posibles modificadores del asfalto. Se llevaron a cabo diversos análisis físico-químicos para evaluar las propiedades de los materiales, y se obtuvieron pruebas de deformación permanente y fatiga para evaluar el rendimiento del ligante modificado.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de la mezcla asfáltica, llegaron a la conclusión de que el material de desecho mejoró tanto el comportamiento del asfalto como el de la mezcla asfáltica en general. La utilización de estos residuos como modificadores no muestran efectos negativos en ninguno de los parámetros analizados. Este tipo de antecedentes es relevante para la investigación, ya que proporciona una forma efectiva de reducir los desechos no biodegradables generados por las industrias al utilizarlos como modificadores en asfaltos convencionales. Además, estos resultados favorables permiten considerar su aplicación en otros países, ya que la problemática de los desechos es global.

Palma; Ortiz; Ávalos y Castañeda [7], llevaron a cabo una investigación denominada “Modificación de Asfalto con Elastómeros para su Uso en Pavimentos “en la Universidad Autónoma de Coahuila, Coahuila –México. Este estudio se enfocó en mejorar las propiedades fisicoquímicas de un asfalto convencional mediante la adición de polímeros, específicamente elastómeros. La incorporación de polímeros en pavimentos tiene como resultado un mejor rendimiento y una mayor duración de vida de los mismos. La modificación de asfaltos con polímeros fue patentada en la década de 1940, aunque ya en la década de 1930 se utilizaron en Europa como parte de proyectos piloto. Existen diversos tipos de polímeros, pero según estudios realizados, los elastómeros son los más compatibles con el asfalto, por lo cual se utilizan en esta investigación para comparar la mejora de las propiedades de la mezcla asfáltica.

Este antecedente respalda investigaciones previas que han demostrado que la incorporación de polímeros, particularmente elastómeros, mejora significativamente las propiedades de los asfaltos convencionales y, como resultado, el comportamiento de la mezcla, prolongando la vida útil del pavimento.

Castro; Rondón y Barrero [8], realizaron un estudio titulado “Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con

un desecho de PEBD”. En el estudio, se llevó a cabo la modificación del asfalto mediante un proceso húmedo utilizando una proporción de PEBD/CA (asfalto convencional) de 5% en relación a la masa. Los investigadores realizaron una serie de pruebas utilizando un reómetro dinámico de corte (DSR) para evaluar las propiedades reológicas del asfalto y técnicas de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para analizar sus propiedades térmicas.

Los resultados obtenidos indicaron que el asfalto modificado con PEBD mostró un aumento notable en la rigidez, lo que significa que se volvió menos susceptible a la deformación bajo estrés. Además, se demostró una mejora en el rendimiento del asfalto a temperaturas, lo que implica una mayor estabilidad y resistencia a la fluencia en condiciones de calor intenso.

Adicionalmente, se encontró que el asfalto modificado era más resistente a la oxidación y al envejecimiento causado por el aumento de temperatura. Esto significa que el asfalto modificado podría conservar mejores propiedades físicas y químicas a lo largo del tiempo, lo que resulta en una mayor durabilidad y vida útil en comparación con el asfalto convencional.

En resumen, la modificación del asfalto con PEBD en este estudio sobresalieron resultados prometedores, ya que condujo a un aumento en la rigidez, una mejora en el rendimiento a altas temperaturas y una mayor resistencia a la oxidación y al envejecimiento. [8]

El asfalto desempeña un papel fundamental en la construcción de carreteras en la provincia de Tungurahua y en todo el mundo, ya que posee características indispensables para garantizar una adecuada unión y cohesión entre los agregados utilizados. Además, su propiedad impermeable es crucial para evitar que la humedad afecte la estructura del pavimento, y su capacidad de resistir la presión y la disgregación causadas por el tráfico vehicular es fundamental. En resumen, el asfalto es un componente esencial que cumple múltiples funciones para asegurar la durabilidad y el buen rendimiento de las carreteras.

De las investigaciones mencionadas cabe destacar que tanto los materiales poliméricos, como los termoplásticos, son polímeros solubles que se ablandan con el calor y fluyen. Por ende, la idea de utilizar caucho de llanta reciclado para crear

mezclas asfálticas surge de la afinidad de ambos materiales, debido a que las llantas y el asfalto provienen de los derivados del petróleo. Ahora bien, lo que se pretende es aprovechar un residuo que no modifique las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas o que las mejore, y que también ofrezca beneficios ambientales y técnicos, haciendo las mezclas asfálticas más duraderas y minimizando las operaciones de mantenimiento vial.

A partir de lo mencionado anteriormente, este proyecto busca realizar una comparativa entre una mezcla asfáltica modificada con polímeros termoplásticos y caucho de llanta reciclado y la mezcla asfáltica convencional, con el objetivo de mejorar las propiedades del pavimento y proporcionar una aplicación para la pavimentación y el mantenimiento de carreteras. Esto permitiría la viabilidad de proyectos que presenten condiciones especiales para su funcionamiento y garantizaría una mayor utilización de materiales de desecho que, de lo contrario, contaminarían y dañarían el medio ambiente al ser acumulados en vertederos. El trabajo se enmarca en un proyecto más amplio titulado "Evaluación del estado de la capa de rodadura en la red vial Intercantonal de la provincia de Tungurahua y su efecto en la conservación vial", el cual presenta un enfoque a la conservación ambiental y al cuidado del planeta Tierra mediante la mejora de la capa de rodadura en carreteras y caminos.

1.1.2 Justificación

La infraestructura vial es un aspecto fundamental para el desarrollo de cualquier ciudad o país. El mantenimiento y la mejora de las carreteras y calles es una tarea continua que requiere la implementación de nuevas tecnologías y materiales para garantizar su durabilidad y resistencia al desgaste por el uso diario.

La mezcla asfáltica es uno de los materiales utilizados en la construcción de carreteras y calles, sin embargo, su durabilidad puede verse afectada por diversos factores, como el tráfico vehicular, las condiciones climáticas y la calidad de los materiales utilizados. Por esta razón, esta propuesta tiene como objetivo utilizar polímeros en combinación con materiales reciclados, con el fin de mantener y mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. [9]

Estamos en una etapa en la que disminuir la contaminación ambiental se ha convertido en uno de los principales objetivos, y los proyectos relacionados con el reciclaje, tratamiento y reutilización de residuos están en constante crecimiento. Ante la escasez cada vez mayor de reservas de petróleo en Ecuador y en todo el mundo, y, por consiguiente, la disponibilidad limitada de sus derivados, como el asfalto, surge la necesidad de buscar nuevos materiales para mejorar las mezclas bituminosas. [10]

Del mismo modo, la modificación de la mezcla asfáltica con polímeros termoplásticos y caucho de llanta reciclado es una alternativa efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento.

Además, las fallas en la superficie de las carreteras conocidas como "piel de cocodrilo" son un problema común que afecta la calidad del pavimento y la seguridad de los conductores. Por lo tanto, es importante llevar a cabo un análisis comparativo de la mezcla asfáltica tradicional con la mezcla modificada con polímeros termoplásticos y caucho de llanta reciclada para evaluar su eficacia en la prevención y tratamiento de las fallas en la superficie de las carreteras. Esta investigación reviste importancia, ya que el análisis comparativo es esencial para mejorar las prácticas de mantenimiento vial y garantizar la durabilidad y la calidad de las vías afectadas por las diversas anomalías. [4]

Finalmente, se pueden identificar múltiples beneficios en cuanto a las propiedades mecánicas del pavimento asfáltico modificado con polímero y caucho. Entre ellos se encuentra la reducción de la susceptibilidad térmica, mejora del comportamiento frente a la fatiga, mejora de la flexibilidad y elasticidad, y el aumento de la resistencia al envejecimiento.

1.1.3 Fundamentación Teórica

1.1.3.1 Pavimento

El pavimento es una superficie construida para soportar el tránsito de personas, vehículos y ganado. Se construye con diferentes materiales, como asfalto, adoquines, concreto, ladrillos, piedras, madera, grava y otros. [11]

Estos materiales se combinan para crear una superficie sólida y estable que sea fuerte y resistente a los elementos. El pavimento también se coloca en los caminos y carreteras para mejorar su usabilidad. Este tipo de estructuras ayuda a reducir el impacto de los vehículos sobre el terreno, al mismo tiempo que mejora la seguridad en el tránsito.

Las mezclas de asfalto contienen materiales pétreos (agregados) y asfálticos (ligantes). La dosis de material asfáltico – agregado es importante y requiere un control muy estricto. Dado que la mezcla con exceso de asfalto causa una superficie inestable y un contenido bajo, además produce una capa áspera que tiende a disminuir a desaparecer, reduciendo sus capacidades de impermeabilidad y su durabilidad. Hay varios tipos pavimentos: flexibles, duras, dispersas, mezcladas, de adoquines y semirrígidos. [11]

1.1.3.2 Pavimento flexible

Se compone de una capa delgada de desgaste o carpeta que se coloca sobre unas capas (base y subbase). Estas capas se apoyan en la subrasante compactada, formando así las partes estructurales de este tipo de pavimento: la subbase, la base y la capa superficial de desgaste o carpeta. [12]

Debido a la manera en que la carga del pavimento se transfiere al suelo subyacente, se clasifica como un pavimento flexible. El asfalto no absorbe por completo la carga del vehículo, sino que actúa como un distribuidor. Por esta razón, los pavimentos flexibles generalmente requieren capas intermedias adicionales entre la capa de desgaste y la

capa de relleno. En la tabla se presenta la composición típica de un pavimento flexible convencional.

Tabla 1 Capas constitutivas de un pavimento flexible

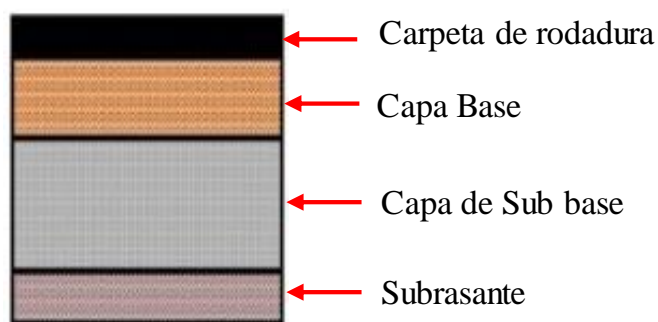
Carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica
Base	Base
Subbase	Subbase
Subrasante	Subrasante mejorada
	Subrasante

Fuente: Formación de una capa constitutiva en un pavimento flexible. [12]

Las capas de un pavimento flexible se disponen en orden descendente de capacidad de carga, lo que significa que la capa superior tiene la mayor capacidad de carga de todas. Esta capa superior es la que soporta la mayor parte de las cargas vehiculares, mientras que las cargas restantes se transfieren a la subrasante.

La estructura del pavimento flexible está compuesta por varias capas. En la parte superior se encuentra la capa asfáltica o capa de rodadura, seguida por la base y la subbase en sucesión. Estas capas se apoyan sobre la subrasante o terreno natural, donde parte de la carga vehicular. [12]

Figura 1 Capas de un pavimento flexible.



Fuente: Formación de una capa constitutiva en un pavimento flexible.

- Capa de rodadura: Esta es la capa de la carretera que se compone de una mezcla de roca y asfalto, utilizada como base para este tipo de pavimento. El asfalto, que es un material de consistencia distinta y tiene un color más oscuro,

desempeña un papel crucial. Uno de los elementos clave de esta mezcla es el betún derivado del petróleo crudo, que tiene propiedades aglutinantes.

- Base granular: Su función principal es transferir y distribuir las cargas hacia las capas inferiores del pavimento, como la subbase y la subcapa. Actúa como una especie de plataforma elevada para el pavimento, ocupando soporte estructural.
- Subbase granular: Esta capa consiste en partículas y actúa como un filtro para evitar que las partículas finas dañen la capa subyacente. Es la última capa antes de la subbase y juega un papel muy importante ya que debe llevar una mayor carga la cual disiparía para activar la superficie de la carretera. [12]

1.1.3.3 Asfalto

Se trata de un material conformado por una serie de elementos complejos y compuestos, en los que sobresalen los hidrocarburos. Presenta propiedades ligantes y aglutinantes, sin embargo, lo que lo hace especial es que presenta una consistencia semisólida a temperaturas ambiente, pero se vuelve líquido rápidamente al aumentar la temperatura lo que la convierte en un material adecuado para usos en la construcción de obras civiles. [13]

1.1.3.4 Cemento asfáltico

Es definido por la ASTM como un cementante compuesto especialmente por asfáltenos que pueden ser de origen natural o como producto de la refinación del petróleo. Entre sus principales propiedades químicas se encuentran: la consistencia, seguridad y pureza. [14]

1.1.3.5 Composición química del asfalto

La importancia de conocer la composición química del asfalto permite controlar sus propiedades físicas y de este modo conseguir un mejor funcionamiento del pavimento, en tal sentido, se puede mencionar que, el asfalto se encuentra constituido por distintos hidrocarburos (mezclas moleculares de hidrogeno y carbono) y residuos de oxígeno, azufre, nitrógeno y otros elementos.

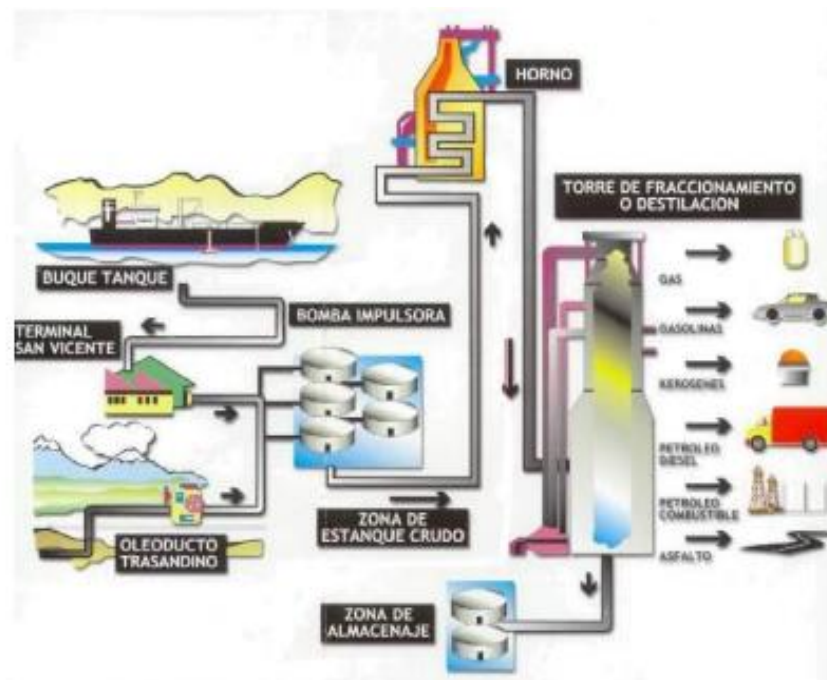
Por medio de la adición de un heptano se puede dividir al asfalto en dos partes, el primero, son los asfáltenos que le dan al asfalto su color y dureza, y, en segundo lugar,

los máltenos que al ser disueltos en heptano se vuelven líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. [15]

1.1.3.6 Producción del Asfalto AC-20

Existen dos métodos principales de destilación: destilación por vacío y extracción con solventes. Los componentes más pesados, conocidos como gasóleos, solo pueden ser separados mediante una combinación de calor y vacío a una temperatura aproximada de 480 °C. Sin embargo, esta temperatura puede variar dependiendo del tipo de petróleo crudo o del grado de asfalto que se está produciendo. [16]

Figura 2 Proceso de refinación del petróleo para obtención de petróleo



Fuente: MONTEJO Alfonso. Ingeniería de pavimento en carreteras. [16]

El asfalto utilizado en este proyecto es el AC-20 ya que es uno de los asfaltos actualmente utilizados en las carreteras ecuatorianas el cual posee los siguientes requisitos de calidad:

Tabla 2 Ficha técnica del Asfalto AC-20

CARCATERÍSTICA DEL ASFALTO AC-20	NORMA
DEL CEMENTO ASFÁLTICO ORIGINAL	
Viscosidad rotacional a 60 °C. máximo, Pa. S (1)	200± 40
Viscosidad Cinemática a 135 °C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	300
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C, s. mínimo	120
Penetración a 25 °C, 100 gr. 5 s, 101 mm, mínimo.	60
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo.	232
Solubilidad, %, mínimo.	99
Punto de Reblandecimiento, °C	48 – 56
DEL RESIDUO DE LA PRUEBA DE LA PELÍCULA DELGADA	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	0,5
Viscosidad dinámica a 60 °C, Pa. S (1), máximo.	800
Ductilidad a 25 °C y 5 cm/min, cm, mínimo	50
Penetración retenida a 25 °C, %, mínimo.	54

Fuente: SCT N-CMT-4-05-001/06 (NTE INEN 2515). [17]

1.1.3.7 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las mezclas asfálticas en caliente son adecuadas cuando tras su proceso de diseño, producción y colocación en obra se logra obtener las propiedades deseadas del asfalto, garantizando la buena calidad del pavimento y con ello se asegura que cumplirá su tiempo de vida útil.

Entre las propiedades que permiten obtener una buena calidad del pavimento de mezclas en caliente se encuentran: estabilidad, la impermeabilidad, trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. [18]

Estabilidad. – Es la capacidad para mantener su forma bajo cargas repetitivas, es decir que puede resistir los desplazamientos y deformaciones producidas por cargas en tránsito. En este sentido, se establece que la estabilidad de un asfalto debe ser el idóneo, de tal modo que soporte de manera adecuada el tránsito esperado, sin ser a la vez demasiado alto, ya que valores de estabilidad muy altos inciden en un asfalto muy rígido cuyo tiempo de vida útil es inferior al deseado. [18]

La Tabla 3 contiene información sobre las causas y efectos de la estabilidad baja.

Tabla 3 Causas y efectos de la baja estabilidad

ESTABILIDAD BAJA

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento, y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente dificultad para la compactación
Agregado redondeado con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas. [19]

Impermeabilidad. – En términos sencillos se trata de la resistencia que ofrece el pavimento asfáltico al paso del aire y agua hacia su interior, o a través de él. [18] Siendo una propiedad muy importante, pues en función del contenido de vacíos en la mezcla compactada se dará paso a la aparición de grietas y otros imperfectos que reducen el tiempo de vida útil del pavimento. La Tabla 4 muestra información sobre las causas y efectos de una mezcla demasiado permeable.

Tabla 4 Causas y efectos de la impermeabilidad

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y poca estabilidad.

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas. [19]

Trabajabilidad. – Se trata de la facilidad con la que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada en el lugar de la obra. En los casos donde la

trabajabilidad sea mala, se puede optar por modificar los parámetros de diseño de la mezcla, la granulometría y el tipo de agregado. [19]

Para una mayor comprensión se puede observar en la Tabla 5 las causas y efectos de una inadecuada trabajabilidad.

Tabla 5 Causas y efectos de la mala trabajabilidad

MALA TRABAJABILIDAD

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas. [19]

Flexibilidad. – Es una cualidad importante en los pavimentos asfálticos, ya que les permite adaptarse gradualmente a los movimientos y asentamientos de la subrasante sin sufrir agrietamientos. Esto es importante, debido a que todas las subrasantes experimentan algún grado de asentamiento (bajo cargas) o expansión. [18]

Resistencia a la fatiga. – Es la capacidad del asfalto para soportar la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Esta resistencia se ve reducida en un pavimento con asfalto envejecido y endurecido, o por falla de compactación que incide en la aparición de un alto porcentaje de vacíos. [19]

La Tabla 6 contiene información sobre las causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga.

Tabla 6 Causas y efectos de la mala resistencia a la fatiga

MALA TRABAJABILIDAD

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas. [19]

Resistencia al deslizamiento. – Es la capacidad que presenta la superficie del pavimento para reducir el deslizamiento de las ruedas de los vehículos cuando el pavimento se encuentra mojado. [18]

Las causas por las que el pavimento presente una inadecuada resistencia al pavimento son diversas, en tal sentido se ha visto necesario describir sus causas y efectos, mismos que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Causas y efectos a la poca resistencia al deslizamiento

POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropelaje
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Diseño de mezclas asfálticas.[19]

1.1.3.8 Propiedades del asfalto

Propiedades químicas. – Como se mencionó anteriormente el asfalto se encuentra constituido por varios hidrocarburos y trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos, que lo convierten en un material idóneo para su uso en la construcción de carreteras.[18]

Propiedades físicas. – Entre las principales propiedades del asfalto, tenemos: la durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, el endurecimiento y envejecimiento. Estas propiedades tienen un rol importante dentro del diseño, construcción y mantenimiento de vías [18], ya que en función del grado de cumplimiento de las distintas propiedades se puede garantizar un asfalto de calidad.

1.1.3.9 Propiedades del asfalto de pavimentación

Dada la complejidad de los materiales bituminosos, estos se caracterizan por medio de ensayos empíricos, es decir por medio de la experimentación a través de la mezcla de diferentes tipos de agregados que doten a la mezcla asfáltica de las mejores propiedades para su aplicación en obras civiles. [20]

A continuación, se describen las características más importantes para el diseño, la construcción y el mantenimiento de vías.

– Durabilidad

Medida de resistencia que ofrece el asfalto para mantener sus propiedades originales en condiciones normales de descomposición y envejecimiento. [18]

– Adhesión y cohesión

En primera instancia, la adhesión es la capacidad del asfalto para unirse a los demás agregados de la mezcla previo a la pavimentación, mientras que la cohesión, se trata de la capacidad que posee el asfalto para mantener unidas las partículas de agregado, tras la pavimentación. [19]

– **Susceptibilidad a la temperatura**

El asfalto es susceptible a la temperatura, pues se trata de un termoplástico. De tal modo que se vuelve más rígido con la disminución de la temperatura y menos viscoso conforme se aumenta la temperatura, siendo una de las propiedades más importantes del asfalto. [18]

– **Endurecimiento y Envejecimiento**

El endurecimiento del asfalto se produce durante la construcción y en el pavimento terminado después de la construcción, debido a la oxidación, es decir por la combinación de asfalto y oxígeno. [18]

– **Pureza**

Se trata de la carencia de humedad, así como de cualquier otra impureza que pueda estar presente en un cemento asfáltico. Cuando el cemento asfáltico se vuelve espumoso al ser expuesto a temperaturas superiores a 100°C es una clara señal de que no perdió toda el agua durante el proceso de refinación, por lo que no presenta un alto grado de pureza. [19]

1.1.3.10 Comportamiento de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas realizadas en laboratorio pueden ser analizadas para determinar su desempeño en la estructura del pavimento, de este modo el análisis se enfoca en las siguientes características:

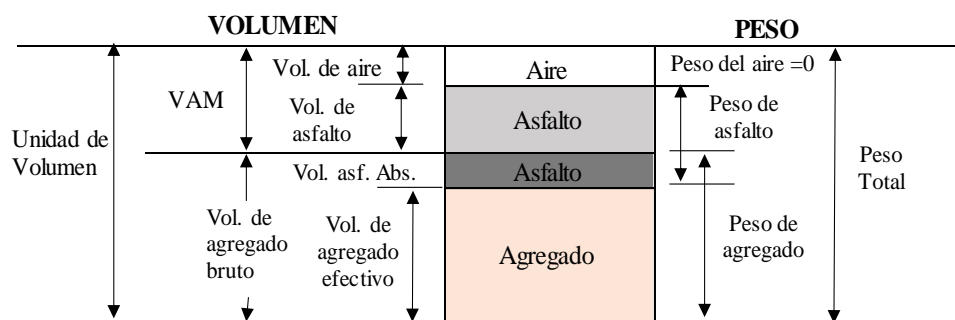
Densidad de la mezcla. – Es definida como su peso unitario, es decir como el peso de un volumen específico de mezcla. Siendo considerada como una característica de suma importancia, ya que en función de si la densidad es más alta o no, se tendrá un mejor o menor rendimiento del pavimento terminado. [21]

Vacíos de aire. – Son pequeños espacios de aire, que se encuentran presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. En tal sentido, es importante que todas las mezclas graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos que posibilite la compactación adicional, cuando la vía se encuentre en uso. De tal modo, que el efecto del tránsito permita fluir el asfalto hacia los vacíos. Finalmente, cabe mencionar que

para muestras de laboratorio el porcentaje permitido de vacíos por capas de base y superficie se encuentra entre el 3% y 5%, dependiendo del diseño específico. [21]

Vacíos en el agregado mineral (VAM). – Representa los espacios de aire existentes entre las partículas del agregado en una mezcla compactada de pavimentación y los espacios que están llenos de asfalto. En este sentido, cuando mayor sea el VMA, existirá mayor espacio. [21]

Figura 3 Representación de los Volúmenes en una Briqueta Compactada de Mezcla Asfáltica.



Fuente: Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA) [21]

Contenido de asfalto. – La cantidad adecuada de asfalto a emplear para la construcción de una vía depende del método de diseño seleccionado, así como de las características del agregado como: la granulometría (granulometría fina, se empleará una mayor cantidad de asfalto; mientras que para agregados gruesos se utilizará una menor cantidad de asfalto); y la capacidad de absorción. Una vez determinada la proporción de asfalto óptimo en la mezcla, esta cantidad deberá ser controlada durante la ejecución de la obra. [21]

1.1.3.11 Clasificación de los asfaltos de pavimentación

Los asfaltos se pueden clasificar según su uso o aplicación en:

- **Pavimentación:** Mezclas Cerradas, mezclas abiertas, drenantes, base asfáltica.
- **Tratamientos y Lechadas:** Sellos de arena, tratamientos superficiales
- **Otras aplicaciones:** Micro aglomerados, asfalto espumado.
- **Riegos:** Matapolvos, imprimaciones, riegos de liga.

De la anterior clasificación se puede observar que la principal aplicación del asfalto es la pavimentación, debido a que es un material que posee características adecuadas que permiten una óptima impermeabilización, es decir que impide el paso del agua o aire a través de él. Así también proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, dotándole de la capacidad para resistir la acción mecánica de disgregación generada por el tránsito vehicular. [22]

1.1.3.12 Producción del asfalto

La producción del asfalto se puede dar por destilación por vacío o extracción con solventes, en cualquier caso, durante el proceso productivo se separan las distintas fracciones del crudo por medio del aumento de la temperatura. [20]

Destilación por vacío: Se da a una temperatura de 480°C, misma que puede variar en función del crudo de petróleo. [20]

1.1.3.13 Características de los materiales asfálticos

Debido a la complejidad que presentan los materiales asfálticos, estos son caracterizados por medio de ensayos empíricos, de tal manera que se puedan valorar las propiedades que deben presentar para su aplicación como ligantes en la construcción de vías, entre sus propiedades fundamentales se encuentran:

Carácter termoplástico. – Por medio del aumento de temperatura el asfalto debe ser capaz mojar y envolver los árido, mientras que al enfriarse debe adquirir una consistencia sólida que brinde cohesión a la mezcla. [23]

Buen comportamiento mecánico y reológico. – El adecuado comportamiento mecánico y reológico permite resistir las tensiones impuestas por el tráfico vehicular, así también, mantener a las temperaturas de servicio, en la estructura de la mezcla asfáltica. [23]

Resistir al envejecimiento. – Capacidad de conservar sus propiedades iniciales frente a la continua exposición a condiciones ambientales y atmosféricas cambiantes. [23]

1.1.3.14 Diseño de la mezcla asfáltica

Durante el diseño de una mezcla asfáltica es necesario determinar una combinación adecuada entre los agregados y el asfalto de tal manera que la mezcla realizada contenga la cantidad de asfalto suficiente para la construcción de un pavimento

durable; brinde la estabilidad necesaria, de tal modo que cumpla con las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos; permita una compactación ligera adicional por medio de un adecuado contenido de vacíos; finalmente, ofrezca una buena trabajabilidad. [19]

1.1.3.15 Materiales pétreos

Son minerales duros e inertes empleados en forma de partículas graduadas que forman parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. En tal sentido, los agregados constituyen entre el 90% y 95% del peso de la estructura del pavimento, mientras que ocupan entre el 75% y el 85% del volumen, siendo estos agregados de grava, piedra triturada, arena y polvo de roca. [24]

Los agregados que están compuestos por piedra triturada, grava o piedra natural, arena y otras partículas deben presentar el desempeño apropiado que cumpla con los requisitos de clasificación los mismo que se dividen en tres categorías A, B y C según lo establecido a continuación:

- Grado A: hace referencia al árido derivado de la molienda de todas las partículas que componen el árido grueso. El agregado fino puede ser arena natural o material triturado.
- Grado B: representa al menos el 50% de las partículas que componen el árido grueso obtenido por molienda. Los agregados finos y los rellenos minerales pueden molerse o conseguirlo de depósitos naturales.
- Grado C: que se usa en el concreto asfáltico es agregado natural o agregado triturado, dependiendo de la disponibilidad local, siempre que se haya determinado que la estabilidad medida por la prueba de Marshall está dentro de los límites especificados. [24]

Una adecuada selección del agregado llega a afectar en gran medida el desempeño de un pavimento, debido a que la mayoría de las propiedades de carga portantes están determinadas por el agregado empleado, motivo por el que deben cumplir con los requisitos de graduación que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Porcentaje de peso por tamices

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
1" (25,4 mm)	100	--	--
3/4" (19,0mm)	90-100	100	---
1/2" (12,5mm)	--	90-100	100
3/8" (9,5mm)	56-80	--	90-100
N°4 (4,75mm)	35-65	44-74	56-85
N°8 (2,36mm)	23-49	28-58	32-67
N°16 (1,18mm)	--	--	--
N°30 (0,60mm)	--	--	--
N°50 (0,30mm)	5-19	5-19	7-23
N°100 (0,15mm)	--	--	--
N°200 (0,075mm)	2-8	2-10	2-10

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F2002. Tabla 401-1.1 [25]

1.1.3.16 Caracterización de los agregados pétreos

1.1.3.16.1 Agregado grueso

– Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso Norma INEN 696

El análisis granulométrico se realiza debido a que la forma de las partículas de agregados llega a afectar de manera directa a la trabajabilidad durante su colocación in situ, así también, conlleva a la aplicación de una mayor o menor fuerza para compactarla y finalmente, porque influye en la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.

Por ende, el ensayo busca dotar de estabilidad a los agregados empleados por carpeta, maximizar la resistencia al esfuerzo cortante mediante el incremento de la fricción entre las partículas, así también, dar fricción y textura a aquellos agregados empleados en pavimentos. [24]

– **Porcentaje de partículas fracturadas en agregados gruesos ASTM D 5821-95**

Se usa con la finalidad de determinar el porcentaje de caras fracturadas existentes en la muestra de agregado grueso. El proceso se realiza por medio del tamizado comprendido entre 25,4 mm a 19,00 mm de tamaño, extendiendo la muestra de la superficie lisa a inspeccionar la partícula del agregado separando las partículas que tenga una o más caras fracturadas. [26]

La Tabla 9 muestra información sobre el tamaño del agregado a emplear para realizar el ensayo de porcentaje de caras fracturadas en minerales.

Tabla 9 Tamaño del agregado para ensayo de porcentaje de caras fracturadas en los minerales

Tamaño del agregado	Peso en g
37,5 a 25,0 mm (1 ½" a 1")	200
25,4 a 19,0 mm (1" a ¾")	1500
19,0 a 12,5 mm (¾" a ½")	1200
12,5 a 9,5 mm (½" a 3/8")	300

Fuente: Adaptation de Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. AASHTO 1998. VOL. 2 [27]

– **Prueba de abrasión ASTM C-131:**

La prueba se realiza mediante el uso de la máquina de los Ángeles, con la finalidad de determinar la resistencia al desgaste que presentan los agregados naturales o triturados. Debido a que, estos deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y la degradación que se genera durante los procesos de producción, colocación y compactación que se dan al momento de la construcción de vías, y sobre todo durante su tiempo de vida útil.[28]

– **Gravedad específica ASTM C-127:**

Se da con el objetivo de establecer la gravedad específica aparente y la masa, así también, busca determinar la capacidad de absorción de agua que presenta el agregado grueso tras su inmersión por un periodo de 24 horas, esta capacidad de absorción viene expresada como porcentaje de masa. [29]

La Tabla 10 muestra la cantidad mínima de muestra a emplear por tamaño máximo nominal.

Tabla 10 Cantidades según el tamaño nominal

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
Milímetros	Pulgadas	Kg
Hasta 12,5	1/2	2
19,0	3/4	3
25,0	1	4
37,5	1 ½	5
40,0	2	8
63,0	2 ½	12
75,0	3	18
90,0	3 ½	25

Fuente: Adaptation de Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. AASHTO 1998. VOL. 2 [27]

1.1.3.16.2 Agregado fino

– **Equivalente de arena ASTM D-2419:**

El método busca determinar el valor experimental de la finura, la cantidad relativa y la identidad del material granular que se encuentre presente en una determinada muestra de prueba, a eso se le incluye el suelo granular que pasa por el tamiz 4 (4,75 mm). [30]

– **Determinación de la densidad de agregados finos ASTM C-128:**

La prueba fue diseñada con el objetivo de determinar la cantidad de agua absorbida por el agregado fino tras estar inmersa en agua durante 24 horas, misma que viene expresada como porcentaje de masa, así también, busca determinar la gravedad específica aparente. [31]

– **Análisis de tamaño de partículas ASTM D-422:**

El análisis de tamaño de partículas busca asegurar que las partículas del agregado se encuentren dentro de un rango determinado de tamaño, y que cada tamaño de partícula se encuentre presente en una cierta proporción en el recubrimiento. [30]

1.1.3.17 Métodos para el diseño de mezclas asfálticas

Existen diferentes métodos para el diseño de mezclas asfálticas, por lo que, el responsable o encargado de esta tarea debe establecer el método que más le convenga en función del tipo de mezcla que se estudia, a continuación, se presentan algunos métodos empleados para el diseño de mezclas:

- Método Marshall (ASTM D 1559)
- Método Hubbard Field
- Método de HVEEM

1.1.3.18 Método de diseño Marshall ASTM D1559

El método fue desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall, con la finalidad de determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, esta investigación se llevó a cabo por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en el año 1943.[32]

No obstante, el método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, por lo cual establece los contenidos óptimos de vacíos y densidades que deben cumplirse durante la construcción del pavimento. En este sentido, el método es aplicable únicamente a mezclas asfálticas en caliente que emplean cemento asfáltico clasificado por penetración y que contienen agregados con un tamaño máximo de 1 pulgada. [32],[33]

Finalmente, el método puede ser usado para el diseño en laboratorio o para el control de campo de pavimentos. El estudio se da con el uso de probetas de 64 x 102 mm de diámetro, para lo cual se toma una serie de muestras (cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferente proporción de asfalto), los datos más importantes del diseño de mezclas aplicando el método Marshall son:

- Prueba de estabilidad y flujo de muestras compactadas.
- Análisis de la relación de vacíos – densidad

Durante el estudio, las probetas son compactadas mediante golpes de martillos, cabe mencionar que el número de golpes depende del tráfico a diseñar, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Criterio de diseño de mezcla Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y Base		Carpeta y Base		Carpeta y Base	
Criterio de mezcla	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336		5338		8006	
Estabilidad (lb)	750	---	1200	---	1800	---
Flujo, (0,25mm) (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver tabla					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Tabla 7.2 [34]

La Tabla 12 indica el porcentaje mínimo de vacíos por máximo agregado de mineral.

Tabla 12 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	In	3,0	4,0	5,0
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19,0	20,0	21,0
4,75	No. 6	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	1/2	13,0	14,0	15,0
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

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Tabla 7.3 [34]

1.1.3.19 Mezclas asfálticas modificadas

La modificación de asfaltos se da con el propósito de mejorar sus propiedades físicas y reológicas, mediante la adición de polímeros, convirtiéndose en una nueva técnica para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías.

En tal sentido, se puede definir a un asfalto modificado como un ligante hidrocarbonado resultante de la adición de polímeros con un ligante asfáltico. Para la realización de mezclas asfálticas modificadas se pueden emplear polímeros termoplásticos o cauchos, este segundo material presenta un comportamiento elastomérico que al juntarse con el asfalto convencional se dispersa sin ejercer efectos y absorbe los aceites málenos. [23]

Según el Ministerio de Obras Públicas y Comunicación MOP-001-F2002. Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. Los polímeros pueden ser agregados durante la elaboración de la solución jabonosa o pueden ser mezclados con el cemento asfáltico en la planta de emulsión, antes del proceso de emulsificación. La cantidad mínima y el tipo de polímero modificador deberá ser definida por el laboratorio responsable del diseño de mezcla. [25]

1.1.3.20 Objetivo de la modificación

Las mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de un polímero adecuado permiten modificar la susceptibilidad térmica del asfalto, as también, incide en la disminución de la deformación plástica a alta temperatura, como la rigidez a baja temperatura, brindando un mejor comportamiento en servicio ante la acción del tráfico vehicular. [35]

1.1.3.21 Modificadores de Asfalto

Los polímeros son compuestos de gran peso molecular que resultan de la combinación de múltiples unidades más pequeñas conocidas como monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Al unirse, estas moléculas forman estructuras de gran tamaño con diversas formas, tales como cadenas en forma de escalera o cadenas largas y sueltas. [36]

– Principales modificadores utilizados en asfaltos

Los principales modificadores poliméricos aprobados por la ASTM (American Society for Testing Materials), son:

- **Tipo I.** – Se trata de polímeros elastómeros a base de estireno, estos son empleados principalmente en carpetas delgadas, pavimentos expuestos a tránsito pesado, siendo idóneos para cualquier tipo de clima. [37]
- **Tipo II.** – Son polímeros elastoméricos con una configuración de caucho de estireno, neopreno látex o butadieno. Este tipo de modificador mejora el comportamiento del asfalto a bajas temperaturas, siendo empleado en vías que se encuentren ubicadas en localidades donde predomine un clima frío. [37]
- **Tipo III.** – Se trata de un polímero tipo plastómero, el cual permite mejorar el comportamiento del asfalto a altas temperaturas. Este tipo de modificador mejora el comportamiento del asfalto en climas calientes, siendo empleado en vías que se encuentren ubicadas en localidades donde predomine un clima cálido. [37]
- **Caucho Molido de Neumático.** – Reduce la aparición de grietas por fatiga o cambios de temperatura, ya que dota de una mejora al asfalto en la flexibilidad y resistencia a la tensión. Su uso se presenta en carpetas delgadas de granulometría abierta. [37]

1.1.3.22 Fundamentación legal

Norma Técnica Ecuatoriana 2680:2013, (INEN, 2013) establece los requisitos y métodos de ensayo a emplearse para la ejecución de mezclas asfalto-caucho, aplicable para la industria de la construcción.

Norma Técnica Ecuatoriana 2515:2011, (INEN, 2011) establece los requerimientos para la conformación de la mezcla.

Norma Técnica Ecuatoriana 0154:1987, (INEN, 1987) establece las dimensiones nominales de las aberturas de las mallas de alambre y de las placas perforadas que se usan en los tamices de ensayo.

Norma Técnica Ecuatoriana 2061:1987, (INEN, 1987) establece los requisitos que deben cumplir los asfaltos diluidos obtenidos de la mezcla de productos derivados de la refinación del petróleo.

ASTM D 1559-89, (Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus), Diseño de Mezclas Método Marshall.

ASTM D2041-11, (Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures) o Clasificación de Suelos y Agregados para la construcción de vías.

ASTM D1188-07, (Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples) o (AASHTO T 275) sirve para determinar valores de densidad bulk, que son utilizados en muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de agregados.

1.1.3.23 Tipos de deterioro de las mezclas asfálticas en caliente

Algunos tipos de fallas en la mezcla asfáltica están ligados con las características reológicas utilizado como ligante, entre las fallas se tiene:

Ahuellamiento.- Esto ocurre debido a la deformación progresiva de los materiales en las capas de asfalto bajo cargas repetidas. Como resultado, se produce una depresión longitudinal en la superficie causada por las ruedas de los vehículos. Debido a una compactación deficiente, las partículas se desplazan entre sí bajo las llantas, lo que resulta en hundimientos debido al cumplimiento del porcentaje de vacíos establecido en el diseño. Cuando se utiliza un alto porcentaje de asfalto, puede producirse una deformación permanente debido al flujo lateral plástico de la mezcla asfáltica, lo que resulta en una pérdida de fricción interna entre las partículas del agregado. Los hundimientos menos severos pueden ser visibles durante la lluvia, ya que las grietas son reemplazadas por el agua. Sin embargo, si los hundimientos son significativos, pueden provocar fallas estructurales más graves e incluso causar el fenómeno de hidropneumático en los vehículos. [38]

Figura 4 Ahuellamiento



Fuente: MIRANDA Javier, Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos

Piel de cocodrilo. - Se refiere a la presencia de grietas interconectadas que forman patrones en forma de polígonos con dimensiones menores a 30 cm. Estas grietas son visualmente similares a la piel de un cocodrilo o una malla metálica. Las causas de su formación pueden ser la fatiga del material debido a cargas repetidas causadas por el tráfico constante de vehículos, así como el envejecimiento o la falta de espesor adecuado de la capa de asfalto. [38]

Figura 5 Falla piel de cocodrilo



Fuente: MIRANDA Javier, Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos

Desprendimiento de Partículas. - Esta falla está asociada a una cantidad insuficiente de aglutinante o a una cantidad demasiado baja de agregado fino, lo cual puede ocurrir debido a una compactación deficiente o al envejecimiento del asfalto. [38]

Figura 6 Desprendimiento de Partículas



Fuente: MIRANDA Javier, Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos

Fisuras y grietas longitudinales. - Las fisuras o grietas se producen debido a las cargas generadas por el tráfico. Las fisuras son aberturas de menor tamaño y superficiales, mientras que las grietas son aberturas más grandes y profundas. [38]

Figura 7 Fisuras y grietas longitudinales



Fuente: MIRANDA Javier, Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos

Falta de adherencia. - Este problema se produce cuando la cantidad de aglutinante entre el asfalto y el agregado es insuficiente en presencia de humedad, lo que provoca una falla temprana en la mezcla. Las mezclas que utilizan asfaltos de alta viscosidad son más estables que aquellas que utilizan aglutinantes de baja viscosidad. La pérdida de adherencia se produce debido a varios factores, incluyendo las propiedades del aglutinante, las propiedades del agregado, el clima, el tráfico y la presencia de agua.[38]

Figura 8 Falta de adherencia



Fuente: MIRANDA Javier, Deterioro en pavimentos flexibles y rígidos

1.1.4 Hipótesis

¿El uso y la adición de materiales como el Polímero termoplástico (Tapones de botellas plásticas triturada) y el Caucho de llanta reciclado en la mezcla asfáltica modificará las propiedades mecánicas mejorándolas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Analizar las Propiedades Mecánicas del asfalto modificado con la adición de polímeros termoplásticos, caucho de llanta reciclado, en relación a un asfalto tradicional para el proceso de mantenimiento vial en fallas piel de cocodrilo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar diferentes mezclas de asfalto con polímeros termoplásticos, con adición de caucho de llanta reciclado y pavimento tradicional.
- Identificar las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas mediante ensayos de laboratorio.
- Comparar el desempeño de las mezclas asfálticas con polímeros termoplásticos, la adición de caucho de llanta reciclado contra el asfalto convencional para el proceso de mantenimiento vial en fallas piel de cocodrilo.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Los materiales y equipos empleados durante el desarrollo del trabajo de titulación se dieron en base a la necesidad de los diferentes ensayos realizados, la Tabla 13 contiene información de los materiales y equipos empleados por cada ensayo.

Tabla 13 Materiales y equipos utilizados en los ensayos del proyecto

Ensayos	Materiales	Equipos
Análisis granulométrico	Agregados finos y gruesos	Juego de tamices
		Tamizadora eléctrica
		Recipientes de aluminio
		Balanza
		Brocha
		Mandil
		Mascarilla
Gravedad específica y absorción del agregado fino	Agregado Fino	Picnómetro
		Termómetro
		Pipeta
		Embudo
		Horno
		Paño limpio y seco
	Baño María	
Gravedad específica y absorción del agregado grueso	Agua	Balanza
	Agregado Grueso	Balanza
		Franela
	Agua	Recipientes
		Canastilla metálica
		Mandil
Resistencia al desgaste por abrasión	Agua	Máquina de los ángeles
	Material bituminoso grueso	Tamices
		Horno

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	Muestra de agregado grueso	Tamices de agregado grueso
		Balanza
		Recipientes
Recubrimiento y peladura	Agregado grueso	Recipiente de cristal
		Espátula
		Juego de tamices
		Horno
		Guantes
Método Marshall	Mezcla de agregados	Máquina Marshall
		Balanza con precisión de 0.1 gr
		Martillo de compactación (10 lb de peso y 18" de altura de caída)
		Pedestal de compactación
		Moldes de compactación de 4" de diámetro y 3" de altura con su collar
	Asfalto	Extractor de probetas
		Equipo de baño maría
		Recipientes
		Cucharon
		Termómetro
Análisis de la densidad y vacíos de las briquetas asfálticas convencionales y modificada. ENSAYO RICE	Muestra para el ensayo (briqueta disgregada)	Máquina de extracción de vacíos
		Frasco
		Balanza
		Mandil

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

Para los ensayos realizados a los agregados se empleó el siguiente equipo que se detalla en la Tabla 14.

Tabla 14 Materiales y equipos utilizados en los ensayos de los agregados


ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
<p>Juego de tamices</p> <p>Marca: Humboldt</p> 	<p>Tamizadora</p> <p>Marca: Controls Modelo: 15-d0407/BZ</p> 	<p>Recipientes de aluminio</p> <p>Marca: Sin Marca</p> 
<p>Balanza</p> <p>Marca: Matest</p> 	<p>Brocha</p> <p>Marca: Sin Marca</p> 	<p>Mandil</p> 
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DEL AGREGADO FINO		
<p>Picnómetro</p> <p>Marca: LMS.</p> 	<p>Termómetro</p> <p>Marca: SHX Modelo: SHX-WNG-01</p> 	<p>Embudo</p> <p>Marca: Sin Marca</p> 
<p>Horno</p> <p>Marca: Humboldt Potencia: 1920 W</p>	<p>Paño limpio y seco</p> <p>Marca: Sin Marca</p>	<p>Baño María</p> <p>Marca: Humboldt</p>

		
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO		
Recipientes	Canastilla metálica	Balanza
Marca: Sin Marca	Marca: Sin Marca	Marca: Matest
		

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

Para los ensayos realizados a las muestras de asfalto se emplearon los siguientes equipos que se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15 Materiales y equipos empleados en las muestras de asfalto convencional y modificadas

MATERIALES Y EQUIPOS DEL MÉTODO MARSHALL		
Máquina Marshall	Balanza con precisión de 0.1 gr	Martillo de compactación
Marca: Humboldt	Marca: Matest	Marca: Sin Marca
		

<p>Pedestal de compactación</p>	<p>Moldes de compactación</p>	<p>Extractor de probetas</p>
<p>Marca: Sin Marca</p> 	<p>Marca: Sin Marca</p> 	<p>Marca: Sin Marca</p> 
<p>Equipo de baño maría</p>	<p>Termómetro</p>	<p>Cucharon</p>
<p>Marca: Anvil</p> 	<p>Marca: Wika</p> 	<p>Marca: Sin Marca</p> 
<p>ENSAYO RICE (ANÁLISIS DE LA DENSIDAD Y VACIOS DE BRIQUETAS)</p>		
<p>Máquina de extracción de vacíos</p>	<p>Frasco</p>	<p>Balanza</p>
<p>Marca: Fischer</p> 	<p>Marca: Sin Marca</p> 	<p>Marca: Matest</p> 

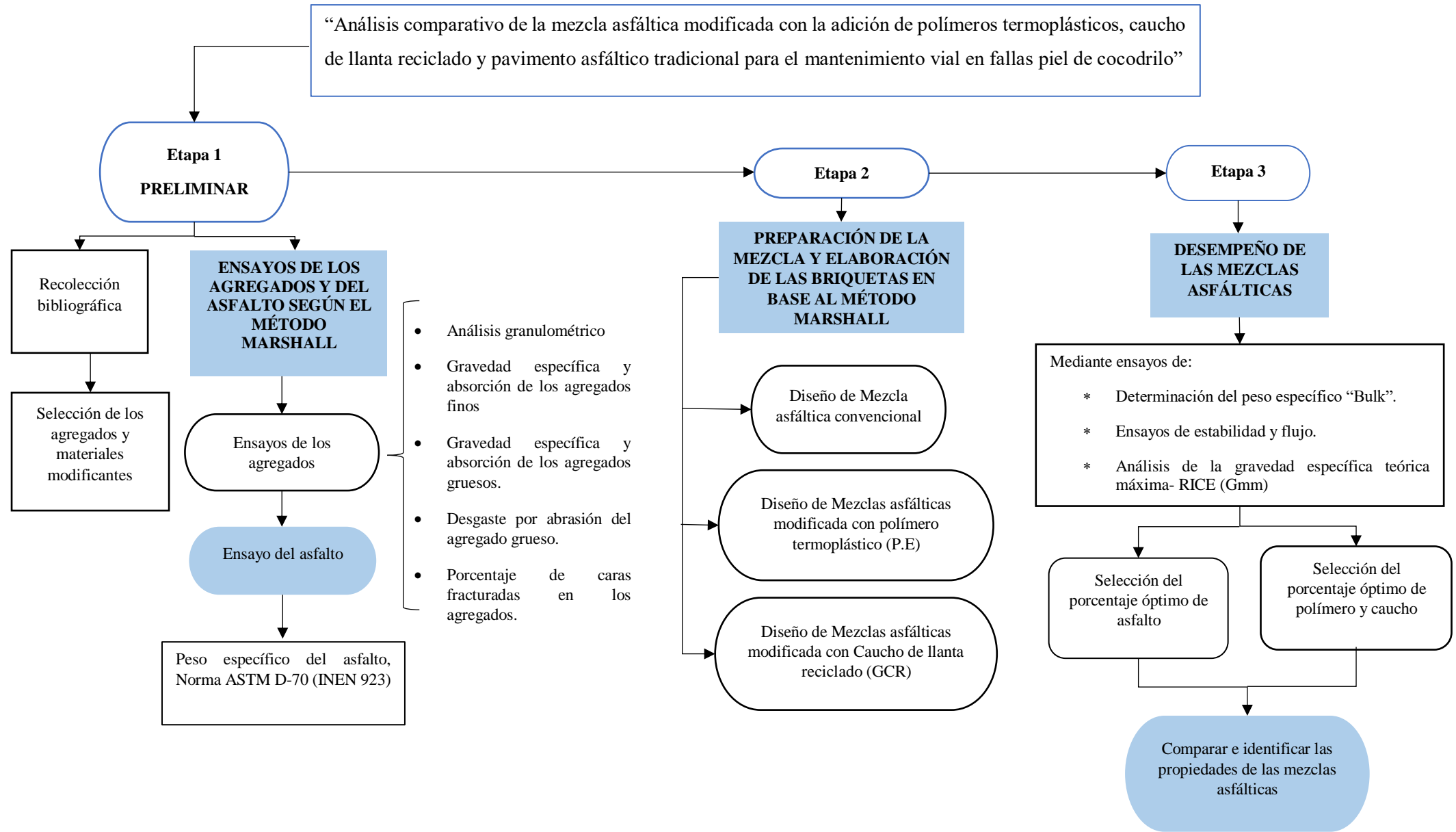
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

2.2 Métodos

A continuación, se describen los métodos de ensayo empleados en el presente trabajo y los procedimientos de revisión para evaluar los materiales y métodos correspondientes. En el Ecuador, las metodologías de ensayo para determinar las mezclas asfálticas y los materiales componentes básicos, se encuentran descritos en la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador (MOP).

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos del trabajo experimental, el desarrollo del mismo se ha dividido en tres etapas como se describen a continuación:

Figura 9 Etapas de trabajo



2.2.1 Etapa 1 Preliminar

Para el desarrollo del presente trabajo experimental se empezó con los estudios y ensayos preliminares aplicando la información bibliográfica y recolección de la materia prima para la preparación de muestras de mezclas asfálticas. A continuación, se describirá detalladamente el procedimiento utilizado.

2.2.1.1 Recolección bibliográfica

Dentro de este apartado se obtuvo toda la información necesaria sobre los diferentes criterios y conceptos que presentan las mezclas asfálticas convencionales y modificadas; y a su vez nos facilitan y sustentan una guía para el desarrollo de cálculos y ensayos.

Esta investigación es de tipo bibliográfica ya que se basa en la revisión de información a través de libros, artículos científicos, ensayos, guías de laboratorio que guarden relación con el tema a estudiar se lo considera fundamental debido a que aborda cierto tipo de fases como la indagación, interpretación y análisis para la obtención de bases necesarias para el progreso de cualquier estudio.

2.2.1.1.1 Selección de los agregados y materiales modificantes

- **Agregados pétreos**

Los agregados pétreos a utilizarse en la elaboración de la mezcla asfáltica fueron obtenidos de la Planta Asfáltica JEAL Construcciones situada en el sector de las Viñas, en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua; la misma que provee agregado triturado de diferentes tamaños, para la fabricación de hormigones y asfaltos.

Figura 10 Planta de asfalto JEAL Construcciones



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

- **Polímero Termoplástico (Tapas de botellas trituradas) (P.E)**

El polímero termoplástico, en este caso tapas de plástico trituradas utilizadas para la elaboración de las briquetas de asfalto se las obtuvo de la empresa ENKADOR S.A. ubicada en la ciudad de Sangolquí. Esta empresa se caracteriza por recolectar, clasificar, reciclar y triturar plástico como materia prima.

Se contactó con la empresa por los requerimientos para la fabricación de briquetas modificadas con partículas plásticas, se compró 5 kg de plástico limpio, lavado y triturado de origen solo de tapas de botella molidas.

Figura 11 Compra del Polímero



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

- **Caucho de llanta triturado (GCR)**

El caucho de llanta utilizado fue suministrado por la Importadora progreso sport, ubicada en la ciudad de Ambato.

Figura 12 Compra de caucho de llanta triturado



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

La siguiente imagen muestra el producto final entregado por la empresa mencionada:

Figura 13 Caucho de llanta triturado



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano.

2.2.1.2 Ensayos de los agregados y del asfalto según el Método Marshall

2.2.1.2.1 Ensayos de los agregados pétreos

Para este apartado se empleó la investigación experimental, la cual implica someter un objeto a condiciones o tratamientos específicos con el fin de observar las reacciones que ocurren. Esta metodología se destaca por la manipulación y control de variables que el investigador ejerce durante el experimento.

Gracias a este tipo de investigación se logró comprobar que los materiales pétreos obtenidos cumplen con los requisitos mínimos de las especificaciones de nuestro país, ya que el comportamiento de las mezclas asfálticas dependerá de la calidad del agregado que se utilice, por lo que la calidad de este material es el principal factor al momento de elegir los agregados que fueron utilizados en el diseño.

Entre las principales propiedades o características que deben cumplir los agregados a utilizar en una mezcla asfáltica en caliente son las siguientes:

2.2.1.2.2 Análisis granulométrico, Norma INEN 696

Los diferentes tipos de áridos, de acuerdo a su uso dentro de la mezcla en el pavimento, deben cumplir con la normativa especificada en el Capítulo 800, Sección 811 (Agregados para Mezclas Bituminosas) del Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012, para que desempeñen su función de manera correcta. [39]

Al ser una investigación orientada a la elaboración de mezclas asfálticas en caliente bajo la metodología Marshall para capas de rodadura, se deberán cumplir con los requisitos de graduación presentados en la Tabla 16.

Tabla 16 Requisitos granulométricos para mezclas asfálticas en planta según especificaciones del MTOP.

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	No 4
1"	100	---	---	---
3/4"	90-100	100	---	---
1/2"	----	90-100	100	---
3/8	56-80		90-100	100
No 4	35-65	44-74	55-85	80-100
No 8	23-49	28-58	32-67	65-100
No 16	---	---	---	40-80
No 30	---	---	----	25-65
No 50	5-19	5-21	7-23	7-40
No 100	---	---	---	3-20
No 200	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F2002. Tabla 405.5.1 [25]

2.2.1.2.3 Gravedad específica y absorción de los agregados finos, Norma ASTM C 128 (INEN 856)

Procedimiento.

La muestra para el ensayo debe ser cubierta totalmente por agua y se la deja sumergida por 24 ± 4 horas, luego de haber pasado este tiempo, se retira la muestra del agua y se extiende sobre una superficie lisa y se somete a una corriente de aire caliente para secar la superficie de las partículas mientras se frota con las manos para que el secado sea uniforme.

Luego de un tiempo se vierte la muestra en un molde cónico, mediante el uso de un embudo que permite verter una cantidad suficiente de la muestra hacia el interior del molde, y se compacta con la varilla dando 25 golpes en forma uniforme; se retira el molde verticalmente y se le da un golpe a la arena compactada, en caso de que la arena compactada se derrumbe, significa que la muestra está saturada superficialmente seca SSS. [40]

A continuación, se pesa el picnómetro vacío, se pesa 50 gr de muestra en el picnómetro y se vierte agua hasta la marca de aforo y se pesa el conjunto. Posteriormente se da vueltas al picnómetro con la muestra y el agua, con el propósito de liberar posibles burbujas que se encuentren atrapadas en la muestra, se toma la temperatura del conjunto, se vierte el contenido en un recipiente, se deja reposar unos minutos y se separa la muestra del agua.

Luego de haber tomado los respectivos pesos, se introduce la muestra en el horno durante 24 ± 4 horas, y finalmente se saca la muestra del horno y se pesa. [40]

Ecuaciones para el cálculo de la gravedad específica:

De acuerdo a la siguiente ecuación:

– Gravedad específica [40]:

$$G_s = \frac{A * K}{B + D - C} \quad (\text{Ec.2.1})$$

- Cálculo de la gravedad específica de las partículas saturadas superficialmente secas (SSS) [40], a continuación:

$$SSS = \frac{D * K}{B + D - C} \quad (\text{Ec.2.2})$$

- Cálculo de la gravedad específica aparente de las partículas secas [40] a continuación:

$$GsA = \frac{A * K}{B + A - C} \quad (\text{Ec.2.3})$$

- Cálculo del porcentaje de absorción [40] mediante la siguiente:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{D - A}{A} * 100 \quad (\text{Ec.2.4})$$

El factor de corrección K se obtiene mediante la Tabla 17

Tabla 17 Factor de corrección de constancia K (temperatura)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,9999	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999
10	0,9997	0,9996	0,9995	0,9994	0,9993	0,9991	0,9990	0,9988	0,9986	0,9984
20	0,9982	0,9980	0,9978	0,9976	0,9973	0,9971	0,9968	0,9965	0,9963	0,9960
30	0,9957	0,9954	0,9951	0,9947	0,9944	0,9941	0,9937	0,9934	0,9930	0,9926
40	0,9922	0,9919	0,9915	0,9911	0,9907	0,9902	0,9898	0,9894	0,9890	0,9885
50	0,9881	0,9876	0,9872	0,9867	0,9811	0,9806	0,9800	0,9795	0,9789	0,9784
60	0,9832	0,9827	0,9822	0,9817	0,9811	0,9806	0,9800	0,9795	0,9789	0,9784
70	0,9778	0,9772	0,9767	0,9761	0,9755	0,9749	0,9743	0,9737	0,9731	0,9724
80	0,9718	0,9712	0,9706	0,9699	0,9693	0,9693	0,9680	0,9673	0,9667	0,9660
90	0,9653	0,9647	0,9640	0,9633	0,9633	0,9616	0,9612	0,9605	0,9598	0,9591

Fuente: Norma ASTM C128

2.2.1.2.4 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos, Norma ASTM C 127 (INEN 857)

Procedimiento.

La muestra empleada para el ensayo debe ser cubierta totalmente por agua y se la deja sumergida por un periodo de 24 ± 4 horas, luego de haber pasado el tiempo requerido se procede a retirar la muestra del agua y se la coloca sobre un paño absorbente, seguidamente se elimina toda lámina visible de agua por frotamiento. [41]

Pesamos en la balanza la cantidad deseada de muestra en condición saturada superficialmente seca, luego colocamos la muestra (SSS) en la canastilla y pesamos su masa aparente en agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, agitamos el recipiente para remover todo el aire atrapado mientras se lo sumerge en el tanque de agua. [41]

Posteriormente secamos la muestra en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante un periodo de 24 ± 4 horas, finalmente se saca la muestra del horno y se pesa.[41]

Ecuaciones para el cálculo de la gravedad específica:

- Gravedad específica [41] :

$$Gs = \frac{A * K}{B - C} \quad (\text{Ec.2.5})$$

- Gravedad específica de las partículas saturadas superficialmente secas (SSS) [41], mediante la siguiente:

$$SSS = \frac{B * K}{B - C} \quad (\text{Ec.2.6})$$

- Gravedad específica aparente de las partículas secas [41] , mediante la siguiente:

$$GsA = \frac{A * K}{A - C} \quad (\text{Ec.2.7})$$

- Porcentaje de absorción [41], mediante la siguiente:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (\text{Ec.2.8})$$

2.2.1.2.5 Desgaste por abrasión del agregado grueso, Norma AASHTO T96 (ASTM C 131) (INEN 860)

Procedimiento.

La muestra para el ensayo debe ser previamente lavada y secada en horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, debe ser separada por fracciones de cada tamaño para posteriormente ser mezcladas con una de las granulometrías indicadas en la Tabla 18.

El tipo de abrasión que se realizará en este ensayo será de tipo A, esta muestra será pesada con una aproximación de ± 10 gr. La muestra y la carga abrasiva

correspondiente serán colocadas en la Máquina de los Ángeles, y se hace girar al cilindro de la máquina a una velocidad comprendida entre 30 a 33 r.p.m. [30], [42]

El número total de vueltas serán 500, la maquina debe girar de manera uniforme para mantener una velocidad constante, una vez cumplido el número de vueltas establecido, se procede a retirar el material del cilindro y las esferas. [30], [42]

El material más grueso será separado y pesado; el porcentaje fino será tamizado empleando el tamiz de 1.70 mm (N°12) para luego ser pesado y utilizado en los respectivos cálculos. La norma mide la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o la abrasión. El desgaste máximo permisible es de 35%. [30], [42]

Tabla 18 Valores estandarizados de ensayo granulométrico

Tamaño de malla – pulg	Tamaño de malla - mm
3”	76,2
2”	50,8
1,5”	38,1
1”	25,4
¾ “	19,1
3/8”	9,52
N°4	4,76
N°10	3,36
N°40	0,42
N°200	0,074

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN 154

Ecuación para el cálculo del porcentaje de desgaste:

– Porcentaje de desgaste. [42]

$$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Peso muestra antes}}{\text{Peso muestra pasa}} * 100 \quad (\text{Ec.2.9})$$

2.2.1.2.6 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, Norma ASTM D 5821-95

Procedimiento.

Separar por tamizado la muestra comprendida entre los tamaños de 25,4 mm y 19,0 mm (1" y ¾"), extienda la muestra en una superficie lisa para inspeccionar cada partícula del agregado, posteriormente separar las partículas que presenten una o más caras fracturadas.[43]

Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no será considerada como partícula fracturada. Una partícula será considerada como fracturada cuando el 25% o más de su superficie aparezca fracturada. Las fracturas deberán ser recientes y por procedimientos mecánicos (tritución). [43]

Ecuación para el cálculo del porcentaje de caras fracturadas:

$$P = \frac{F + \frac{Q}{2}}{(F + Q + N)} * 100 \quad (\text{Ec.2.10})$$

Donde:

P: porcentaje de partículas con el numero específico de caras fracturadas

F: peso/cantidad de partículas fracturadas con al menos el número específico de caras fracturadas

Q: peso/cantidad de partículas cuestionables

N: peso/cantidad de partículas en categoría de no fracturadas que no cumple con el índice de fractura.

2.2.1.2.7 Ensayo de recubrimiento y peladura, Norma ASTM D- 3625

Se usa para valorar de manera práctica el efecto producido por el agua en la película de asfalto que cubre al agregado, valorando así la afinidad asfalto agregado. Se denomina también Ensayo Stripping o de adhesividad pasiva. La valoración que se realiza es visual, de modo que depende del buen criterio del profesional que realiza la prueba. El ensayo está debidamente normado por la ASTM D – 3625, en la que se

detalla, entre otras cosas, el tamaño del agregado (pasa el tamiz 3/8 y retiene el N° 4), mismo que debe estar totalmente seco. [44]

2.2.1.3 Ensayo del asfalto

2.2.1.3.1 Peso específico del asfalto, Norma ASTM D-70 (INEN 923)

El peso específico del asfalto es un dato de gran importancia para realizar el estudio de mezclas asfálticas, debido a que es utilizado para establecer los vacíos que existen en los pavimentos. El peso específico es la correlación del peso de un volumen definido de material al peso igual de volumen de agua, los dos materiales deben mantener la misma temperatura. [45]

Normalmente dentro de las especificaciones de la obra no se muestra el peso específico del cemento asfáltico. Sin embargo, existen dos razones de gran importancia por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- Al estar expuesto a altas temperaturas el asfalto se expande y cuando este es enfriado se contrae, lo que nos da entender que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico sería mayor a altas temperaturas, las medidas de peso específico abastecen un patrón para efectuar correcciones de temperatura volumen.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado. [45]

El método que más se emplea para realizar este tipo de ensayo es el del picnómetro, regido por la norma ASTM D-70.

$$PE_{ASF} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)} \quad (\text{Ec.2.11})$$

Donde:

A Masa del picnómetro (más el tapón)

B Masa del picnómetro lleno de agua

C: Masa del picnómetro parcialmente lleno de asfalto

D Masa del picnómetro + asfalto + agua

2.2.2 Etapa 2. Preparación de la mezcla y elaboración de las briquetas en base al Método Marshall.

Para el desarrollo de este apartado se dio uso a la investigación de laboratorio para la obtener resultados y determinar las características importantes de las mezclas asfálticas elaborando briquetas de asfalto tradicional y briquetas con adición de polímero termoplástico y caucho de llanta en remplazo parcial del agregado 3/8", de tal manera que permita establecer la finalidad práctica y factible de su uso, considerándolo como un material alternativo en la elaboración de futuras obras de pavimentación.

Con la investigación antes mencionada se realizó el proceso de diseño de la mezcla asfáltica convencional y modificada.

Cabe mencionar que este tipo de mezclas se realizó con agregados de dos tipos, agregado fino y agregado grueso ambos provenientes de la Planta Asfáltica JEAL Construcciones del Cantón Ambato, para la cual se ha determinado que la faja granulométrica para la realización de la mezcla asfáltica es la de 1/2" (12,7 mm), esta faja es elegida en consideración de que los materiales que se dispone se ajustan a las exigencias del MOP mostrada en la Tabla 16.

2.2.2.1 Método Marshall de diseño para mezcla asfáltica en caliente, Norma ASTM D 1559-89

Este método consiste en la preparación de briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente, cada grupo de briquetas serán elaboradas con diferente porcentaje de asfalto.

El procedimiento explicado a continuación se encuentra normado por la norma ASTM 6926-10, la cual especifica la preparación y compactación de cilindros con mezclas asfálticas

2.2.2.2 Diseño de la mezcla asfáltica convencional.

Para establecer el contenido óptimo de asfalto se elaboraron tres grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de manera que las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido.

Se realizó con 4 porcentajes cercanos al porcentaje óptimo empezando con el siguiente orden 5,5%, 6%, 6,5% y 7%, para la obtención de buenos resultados y dadas las especificaciones se realizaron tres briquetas para cada contenido de cemento asfáltico.

2.2.2.3 Procedimiento de elaboración de las briquetas asfálticas convencionales basado en el método Marshall, Norma ASTM D 6929-16

- Primero se pesan en los recipientes las fracciones de agregado, calculando para un grupo de briquetas, después cada porcentaje es colocado en diferentes recipientes para calentar su contenido a una temperatura de 140 a 180 °C.
- Por otro lado, se calienta el asfalto a una temperatura de 120 a 150 °C. Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben ser mecidos para evitar sobrecalentamientos locales.
- Se pone la bandeja sobre la balanza con las diferentes fracciones de agregado caliente, de acuerdo con los pesos acumulativos, se mezclan perfectamente los agregados y con la espátula crear un cráter en la mezcla para verter sobre los agregados el asfalto caliente hasta completar el peso total de agregados más asfalto
- El tiempo de mezclado del asfalto con los agregados debe ser lo más breve posible, para lograr una completa y homogénea cubrición de todas las partículas, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 120 °C; ni en ningún caso someterse a recalentamiento.
- Posteriormente, se procedió a introducir la mezcla asfáltica en caliente al interior del molde y aplicamos 25 pinchazos con una espátula redondeada (15 alrededor y 10 al azar), para así obtener un compactado lo más homogéneo posible y eliminar la posibilidad de huecos.
- A continuación, el molde se coloca en el pedestal de compactación, se apoya sobre la mezcla la zapata del pistón y se aplican 75 golpes a caída libre y cuidando que el vástago del pistón se mantenga siempre vertical.
- Se retira el molde del pedestal, se quita el collar y la base y se deja enfriar a temperatura ambiente por un periodo de 2 horas, para luego extraer la biqueta del molde con la ayuda del extractor de probetas. [33]

2.2.2.4 Diseño de las mezclas asfálticas modificadas.

La elaboración de briquetas asfálticas modificadas se las realizó con porcentajes de 5 %, 10%, 15% y 20% de polímero termoplástico este caso proveniente de tapas de plásticos triturados y con el 2%, 3%, 4% y 5% de caucho de llanta reciclado; los polímeros fueron usados en reemplazo parcial del agregado 3/8” para la fabricación de dichas briquetas.

2.2.2.5 Procedimiento de elaboración de las briquetas asfálticas modificadas basado en el método Marshall, Norma ASTM D1559

- Primero se pesan en los recipientes las fracciones de agregado grueso y fino; del peso total del agregado 3/8” reemplazaremos un porcentaje del 5 %, 10%, 15% y 20% del peso total, el cual será reemplazado por el polímero termoplástico triturado y de igual manera con los porcentajes del caucho de llanta, después cada porcentaje es colocado en la bandeja de calentamiento, para calentar su contenido a una temperatura de 140 a 180 °C.
- Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico y se añade el porcentaje de polímero (P.E) triturado en reemplazo parcial del agregado 3/8” a una temperatura de 120 a 150 °C.
- Se coloca la bandeja sobre la balanza con las diversas fracciones de agregado caliente, de acuerdo con los pesos acumulativos, se mezclan perfectamente los agregados y con la espátula formar un cráter en la mezcla para verter sobre los agregados el asfalto caliente más el porcentaje de polímeros en reemplazo parcial del agregado 3/8”.
- El tiempo de mezclado del asfalto con los agregados y un porcentaje de polímeros en reemplazo parcial del agregado 3/8” debe ser lo más breve posible, para conseguir una completa y homogénea cubrición de todas las partículas, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 120 °C; ni en ningún caso someterse a recalentamiento.
- Posteriormente se introduce la mezcla asfáltica en caliente en el interior del molde y aplicamos 25 pinchazos con una espátula redondeada (15 alrededor y 10 al azar), para así obtener un compactado lo más homogéneo posible y eliminar la posibilidad de huecos.

- A continuación, el molde se coloca en el pedestal de compactación, se apoya sobre la mezcla la zapata del pistón y se aplican 75 golpes a caída libre y cuidando que el vástago del pistón se mantenga siempre vertical.
- Se retira el molde del pedestal, se quita el collar y la base y se deja enfriar a temperatura ambiente por un periodo de 2 horas, para luego extraer la briqueta del molde con la ayuda del extractor de probetas. [33]

Este procedimiento también se lo realiza con las briquetas modificadas con el 2%, 3%,4% y 5% de caucho de llanta reciclado.

2.2.3 Etapa 3. Desempeño de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas

En esta sección, se empleó la metodología de investigación experimental y de laboratorio para llevar a cabo pruebas Marshall con el propósito de evaluar la estabilidad y fluidez de muestras de asfalto compactadas cuidadosamente elaboradas en el laboratorio, para determinar las características importantes que presenta una mezcla asfáltica.

2.2.3.1 Ensayo de las muestras asfálticas

Cada muestra compactada y extraída del molde fue sometida a los siguientes ensayos, en el orden que se indica:

- Determinación del peso específico “Bulk”.
- Ensayos de estabilidad y flujo.
- Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE (Gmm)

2.2.3.1.1 Determinación de la Densidad Bulk (Gmb) de las mezclas compactadas

Norma ASTM D 2726.

El cálculo de la densidad general de las mezclas compactadas es un aspecto clave en el diseño, ya que su valor tiene un impacto significativo en la determinación del porcentaje de espacios vacíos en las briquetas. El objetivo principal de este experimento es determinar el volumen de cada briqueta, a partir del cual se puede calcular la densidad general.

La gravedad específica general se define como la relación entre la masa de un volumen específico de un material a 25 °C y la masa de un volumen equivalente de agua a la misma temperatura.[46]

Procedimiento

Una vez cumplido el período de enfriamiento, las briquetas son retiradas del molde mediante el extractor de muestras

Posteriormente de las briquetas con distintos porcentajes de asfalto se tomaron 3 pesos distintos, estos son:

Peso en el aire. – se realizó en caliente al momento en que se desmoldó la briketa con la finalidad de escribir sus respectivos pesos.

Peso saturado superficie seca. – para la toma de este peso, primero se sumergió la briketa en el agua durante 10 minutos, posteriormente se retiró del agua, se la secó con un paño y se tomó su peso.

Peso sumergido. – se realizó con el peso de las briquetas sumergidas en el agua hasta que se estabilizó la lectura, seguidamente se anotó la medición.[46]

Cálculos. -

Para determinar la densidad Bulk (Gmb) de las mezclas compactadas se utiliza las siguientes relaciones:

$$Gmb = \frac{Pa}{Vol} \quad (Ec.2.12)$$

$$Vol = P_{SSS} - P_{en\ agua} \quad (Ec.2.13)$$

Donde:

Gmb: Densidad Bulk de la mezcla compactada

Pa: Peso de la briketa en estado seco, gr

Vol.: Volumen de la briketa

P SSS: Peso de la briketa en estado superficie saturada

P en agua: Peso de la briqueta en agua

2.2.3.1.2 Ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall

Norma ASTM D 6927.

Este experimento se lleva a cabo tanto en briquetas elaboradas en laboratorio como en las obtenidas en un lugar de construcción. El objetivo principal es determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas, registrando la máxima estabilidad y la deformación de la muestra.

Procedimiento

Antes de realizar el ensayo de estabilidad Marshall, se llevó a cabo la inmersión de las briquetas en un baño maría a una temperatura de 60 °C durante un período de 30 a 40 minutos.

A continuación, se procedió a limpiar y lubricar las superficies internas de las mordazas con aceite. Es importante verificar que el indicador del dial de carga esté en cero antes de aplicar la carga. La briqueta se coloca en las mordazas y se aplica una carga a una velocidad de deformación constante hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se determina por la carga máxima obtenida y se registra como el valor de ESTABILIDAD MARSHALL, junto con el número total de libras necesarias para la rotura de la muestra a 60 °C. Al mismo tiempo, se registra la lectura de flujo de la briqueta en centésimas de pulgada.[47]

2.2.3.1.3 Ensayo Gravedad específica teórica máxima - RICE (Gmm)

Norma ASTM D 2041.

Este ensayo se utiliza para obtener el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados y el volumen real de los vacíos en las mezclas asfálticas no compactadas a una temperatura de 25 °C.

Procedimiento realizado

Antes de llevar a cabo el ensayo, se realizó la calibración del frasco para determinar con precisión el peso del frasco más el peso del agua a una temperatura de 25 °C.

Después, se prepararon muestras con diferentes porcentajes de asfalto, las cuales se dispersaron y enfriaron a temperatura ambiente. Luego, se pesaron y se colocaron en un frasco. A continuación, se agregó la cantidad suficiente de agua, aproximadamente a 25 °C, para cubrir completamente la muestra.

El frasco con la muestra dispersa y el agua se situó en un agitador y se encendió la bomba. El equipo permaneció encendido 10 minutos, tras los cuales se liberó lentamente la presión del frasco. Se desprendió el conjunto del dispositivo agitador y de inmediato se procedió a llenar el frasco con agua, asegurándose de eliminar el aire atrapado en el recipiente y de llenar completamente los contenidos. [48]

2.2.3.1.4 Selección del porcentaje óptimo de asfalto

Con el fin de alcanzar el porcentaje ideal de asfalto, se utiliza el formato de análisis del Manual MS-2 del Instituto del Asfalto (detallado en el Capítulo 7), el cual abarca los siguientes elementos:

1. **Densidad Bulk de la mezcla compactada (Gmb)**, antes descrita.
2. **Gravedad específica teórica máxima RICE (Gmm)**, antes descrita.
3. **Gravedad específica Bulk de la mezcla (Gsb)**, se considera el mismo valor tanto para la mezcla patrón como para las mezclas modificadas.

$$Gsb = \frac{P1 + P2 + P3}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3}} \quad (\text{Ec.2.14})$$

Donde:

Gsb: Gravedad específica bulk total de la mezcla

P1, P2, P3: Porcentaje individual del peso del agregado, %

G1, G2, G3: Gravedad específica bulk individual del agregado

Tabla 19 Porcentajes de cada tamaño de agregado que intervienen en la mezcla.

Agregado	Fino	3/4	3/8
%	P1	P2	P3
	56	12	32

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Las siguientes gravedades específicas presentadas a continuación son el producto de la caracterización previa realizada en los agregados finos y gruesos:

Tabla 20 Gravedades específicas Bulk de cada tamaño de agregado.

Gs individual de los agregados	Fino	3/4	3/8
	G1	G2	G3
	2,378	2,465	2,584

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Por lo tanto, el resultado de esta gravedad específica es:

$$Gsb = 2,451$$

4. **Gravedad específica aparente de la mezcla (Gsa)**, se considera el mismo valor tanto para la mezcla patrón como para las mezclas modificadas.

$$Gsa = \frac{P1 + P2 + P3}{\frac{P1}{Ga1} + \frac{P2}{Ga2} + \frac{P3}{Ga3}} \quad (\text{Ec.2.15})$$

Donde:

Gsa: Gravedad específica aparente del total de agregado

P1, P2, P3: Porcentaje individual del peso del agregado, %

G1, G2, G3: Gravedad específica aparente del agregado

Las gravedades aparentes específicas que se presentan a continuación son el resultado de la caracterización previa realizada en el agregado grueso y fino:

Tabla 21 Gravedades específicas aparentes de cada tamaño de agregado.

Gsa individual de los agregados	Fino	3/4	3/8
	Ga1	Ga2	Ga3
	2,603	2,653	2,780

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Dando como resultado de esta gravedad específica el siguiente valor:

$$Gsa = 2,663$$

5. **Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse)**, se calcula para cada porcentaje de asfalto.

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (\text{Ec.2.16})$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del total de agregado

Gmm: Gravedad específica teórica máxima RICE

Pmm: Porcentaje del peso total de la mezcla, %

Pb: Contenido de asfalto, en porcentaje del peso de la mezcla, %

Gb: Gravedad específica del asfalto

Para verificar la calidad de un diseño de mezclas asfálticas, es crucial cumplir con una condición fundamental relacionada con los tres tipos de gravedades específicas mencionados anteriormente: $Gsa > Gse > Gsb$

6. **Vacíos de aire (Va)**

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (\text{Ec.2.17})$$

Donde:

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, %

Gmm: Gravedad específica teórica máxima RICE

Gmb: Densidad Bulk de la mezcla compactada

7. **Vacíos en el agregado mineral (VAM)**

$$VAM = \frac{Gmb * Ps}{Gsb} \quad (\text{Ec.2.18})$$

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral, %

Gmb: Densidad Bulk de la mezcla compactada

Gsb: Gravedad específica bulk total de la mezcla

Ps: Contenido de agregado en la mezcla, %

8. Vacíos llenos de asfalto (VAF)

$$VAF = 100 * \frac{VAM - Va}{VAM} \quad (\text{Ec.2.19})$$

Donde:

VAF: Vacíos llenos de asfalto, %

VAM: Vacíos en el agregado mineral, %

Va: Vacíos de aire en la mezcla compactada, %

9. Asfalto absorbido (Pba)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb \quad (\text{Ec.2.20})$$

Donde:

Pba: Asfalto absorbido, %

Gse: Gravedad específica efectiva del total de agregado

Gsb: Gravedad específica bulk total de la mezcla

Gb: Gravedad específica del asfalto

10. Contenido de asfalto efectivo en la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps \quad (\text{Ec.2.21})$$

Donde:

Pbe: Contenido de asfalto efectivo en la mezcla, %

Pba: Asfalto absorbido, %

Ps: Contenido de agregado en la mezcla, %

Pb: Contenido de asfalto, en porcentaje del peso de la mezcla, %.

Una vez que todos estos elementos se han establecido, se lleva a cabo la generación de seis curvas fundamentales para analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica.

- 1.- % Asfalto vs Va
- 2.- % Asfalto vs Densidad Bulk
- 3.- % Asfalto vs Estabilidad
- 4.- % Asfalto vs Flujo
- 5.- % Asfalto vs VAM
- 6.- % Asfalto vs VAF

2.2.4 Población y muestra

Al realizar un experimento de esta naturaleza, es posible obtener un número considerable de probetas para realizar pruebas y recopilar información para la investigación. Sin embargo, una desventaja es la inversión necesaria para llevar a cabo dichos ensayos, ya que una medida que aumenta la cantidad de muestras a producir, también aumenta la inversión requerida.

Por esta razón, es importante limitar el número de ensayos y seleccionar una muestra que cumpla con los requisitos de la investigación, brinde resultados confiables y no represente una inversión excesiva.

Tanto la norma ASTM D-1559, así como la norma AASHTO T-245 determinan la elaboración y posterior ensayo de tres briquetas por cada porcentaje de asfalto y polímero, por lo que, en el presente trabajo experimental, los ensayos se realizarán de la siguiente manera:

- Tres briquetas para cada porcentaje de asfalto en la mezcla con agregado convencional.
- Tres briquetas para cada porcentaje de asfalto con la adición de Polímero Termoplástico.
- Tres briquetas para cada porcentaje de asfalto con adición de caucho de llanta reciclado.

2.2.5 Plan de recolección de información

Tabla 22 Plan de recolección de información

Preguntas Básicas	Explicación
¿Para qué?	Estudiar las propiedades de estabilidad, flujo, densidad, vacíos de la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con la adición de diferentes polímeros.
¿De qué persona u objetos?	De briquetas de mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con polímeros como los termoplásticos y el caucho de llanta reciclado.
¿Sobre qué aspectos?	El comportamiento que presentan las mezclas asfálticas al adicionar los diferentes polímeros en su composición.
¿Quién?	Tesista: Karen Nicole Sarabia Lescano Tutor: Ing. Alex Frías
¿Dónde?	En los Laboratorios de Ensayos de Materiales y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, y en el Laboratorio de Suelos del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ambato.
¿Cómo?	Mediante la realización de pruebas y ensayos de laboratorio, así como la realización de investigación bibliográfica en libros, normas, tesis y artículos científicos correspondientes al tema de investigación.

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

2.2.6 Plan para análisis de resultados

Con la finalidad de obtener un punto de comparación se realizaron tablas comparativas de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas halladas en la elaboración de briquetas de asfalto tradicional y asfalto modificado donde se evidencie cual es la proporción indicada para que el pavimento conserve su resistencia y dichas propiedades.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

En la elaboración y dosificación de la cantidad de materiales necesarios para fabricar las briquetas de asfalto, se utilizaron agregados obtenidos de la cantera ubicada en la Provincia de Tungurahua. Posteriormente, se llevaron a cabo los ensayos correspondientes de acuerdo con las normas establecidas para las briquetas convencionales y las modificadas con contenido de plástico y caucho para determinar los resultados idóneos.



3.1.1 Ensayos realizados a los agregados pétreos

3.1.1.1 Análisis granulométrico

Este tipo de ensayos se realiza para obtener resultados que admitan el desempeño de la distribución granulométrica de las partículas de áridos gruesos y finos de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones adaptadas para el punto de control de mezcla.

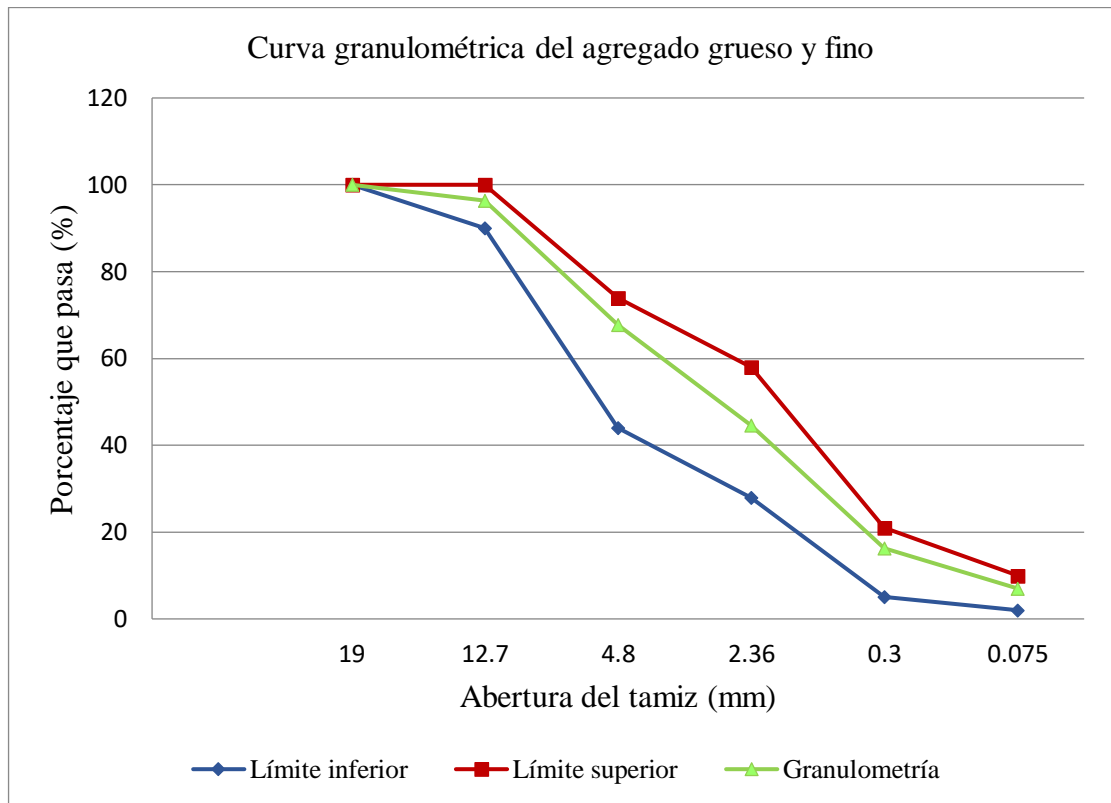
Los resultados del ensayo se representan en porcentajes del peso total del material ensayado que retiene cada tamiz, por lo cual se pesan las cantidades retenidas y se suman en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor. La Tabla 23 contiene los resultados del ensayo.

Tabla 23 Granulometría del agregado grueso y fino

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO 							
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
“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”							
“ GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO Y FINO ”							
Origen:		"JEAL Construcciones", Sector las Viñas, Ciudad de Ambato					
Ensayado por:		Karen Nicole Sarabia Lescano					
Norma:		INEN 696					
Masa del Agregado (gr):		1018,4					
# TAMIZ	ABERTURA (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	Peso Retenido Acumulado %	% Que pasa	PORCENTAJE EN PESO QUE PASA A TRAVÉS DE LOS TAMICES DE MALLA CUADRADA 1/2"	
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1/2"	12,70	37,00	37,00	3,63	96,37	90	100
#4	4,80	292,00	329,00	32,31	67,69	44	74
#8	2,36	235,00	564,00	55,38	44,62	28	58
#50	0,30	289,00	853,00	83,76	16,24	5	21
#200	0,075	94,00	947,00	92,99	7,01	2	10
Fuente		71,4	1018,40	100,00			
	Σ=	1018,40					

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 14 Curva granulométrica del agregado grueso y fino



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano



Interpretación: Realizando el ensayo de granulometría de los agregados pétreos, obtenidos en la Planta Asfáltica JEAL CONSTRUCCIONES del cantón Ambato, se puede observar en la gráfica que la curva granulométrica se encuentra dentro de los requisitos de graduación que establece el MTOP 2002 en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, por lo tanto, es un material apto para la preparación de la mezcla asfáltica.

3.1.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados finos, se empleó la norma ASTM C 128 (INEN 856).

El ensayo fue empleado para la determinar la gravedad específica y absorción de agua del agregado fino cuando este ha sido sumergido por un periodo de 24 horas, se lo realiza en estado saturado superficialmente seca (SSS) y se usó el método del picnómetro.

La Tabla 24 presentan los datos y resultados obtenidos en el cálculo del ensayo.

Tabla 24 Gravedad específica del agregado fino (Arena)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“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”			
"GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO"			
Origen:	"JEAL Construcciones", Sector las Viñas, Ciudad de Ambato		
Ensayado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano		
Norma:	INEN 856		
DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
Temperatura del agua + suelo en °C		21,00	°C
Peso del recipiente		120,00	gr
Peso del recipiente+ peso del suelo seco		620,00	gr
Peso del picnómetro + agua	B	649,90	gr
Peso del suelo seco al horno	A	482,50	gr
Peso del pic + agua +Peso del suelo seco		1132,40	gr
Peso suelo SSS al aire	D	500,00	gr
Peso del pic + agua +Peso del suelo	C	947,40	gr
Desplazamiento del agua		185,00	gr
Factor de corrección por temperatura	K	0,9980	
Gravedad Específica bulk de las partículas secas (Gs)	$(A * K) / (B + D - C)$	2,378	gr/cm ³
Gravedad Específica aparente de las partículas secas (Gsa)	$(A * K) / (A + B - C)$	2,603	gr/cm ³
Gravedad Específica de las partículas saturadas con superficie seca (SSS)	$(D * K) / (B + D - C)$	2,464	gr/cm ³
Porcentaje de absorción	$((D - A) / A) * 100$	3,627	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Cálculos:

Para el cálculo de gravedad específica, se utilizó la (Ec. 2.1), alcanzando el siguiente resultado:

$$G_s = \frac{482,5 * 0.9980}{649.9 + 500 - 947.40}$$

$$G_s = 2,378 \frac{g}{cm^3}$$

Para realizar el cálculo de la gravedad específica de las partículas saturadas superficialmente secas (SSS), se dio uso a la ecuación (Ec.2.2):

$$SSS = \frac{500 * 0.9980}{649.9 + 500 - 947.40}$$

$$SSS = 2.464 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo de la gravedad específica aparente de las partículas secas, se utilizó la ecuación (Ec.2.3):

$$G_{sa} = \frac{482.5 * 0.9980}{649.9 + 482.5 - 947.40}$$

$$G_{sa} = 2.603 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo del porcentaje de absorción, se utilizó la ecuación (Ec.2.4), alcanzando el siguiente resultado:

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - 482.5}{500} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = 3.6\%$$

Los resultados obtenidos mediante el uso de la Norma INEN 856, indica que el valor de densidad relativa es de 2,378gr/cm³, y el valor del porcentaje de absorción es de 3.6%. Mostrándonos que los valores cumplen con dicha especificación.

3.1.1.3 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos, ASTM C127 (INEN 857)

Se estableció la gravedad específica y absorción de los agregados gruesos 3/4" y 3/8" establecida en la Norma INEN 857 desarrollada en la Tabla 25 y en la Tabla 26 aplicando el siguiente cálculo:

- **Cálculo de la gravedad específica del agregado 3/4"**

Para el cálculo de gravedad específica, se utilizó la ecuación (Ec.2.5):

$$G_s = \frac{1981,5 * 0.9982}{2038,30 - 1235,70}$$

$$G_s = 2,465 \frac{g}{cm^3}$$

Para realizar el cálculo de la gravedad específica de las partículas saturadas superficialmente secas (SSS), se dio uso a la ecuación (Ec.2.6):

$$SSS = \frac{2038,30 * 0.9982}{2038,30 - 1235,70}$$

$$SSS = 2,536 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo de la gravedad específica aparente de las partículas secas, se utilizó la ecuación (Ec.2.7):

$$G_{sa} = \frac{1981,5 * 0.9982}{1981,5 - 1235,70}$$



$$G_{sa} = 2,653 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo del porcentaje de absorción, se utilizó la ecuación (Ec.2.8), obteniendo el siguiente resultado:

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{2038,30 - 1981,5}{1981,5} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = 2,86\%$$

Tabla 25 Gravedad específica del agregado grueso 3/4"

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
“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”				
"GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO 3/4"				
Origen: JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato				
Ensayado por: Karen Nicole Sarabia Lescano				
Norma: INEN 857				
	DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
AIRE	Peso canastilla + suelo SSS		3284,12	gr
	Peso canastilla		1245,82	gr
	Peso suelo SSS	B	2038,30	gr
AGUA	Peso canastilla + suelo sumergido		2281,40	gr
	Peso canastilla sumergida		1045,70	gr
	Peso suelo sumergido	C	1235,70	gr
SECO	Peso canastilla + suelo seco		3678,30	gr
	Peso canastilla en el aire		1696,80	gr
	Peso suelo seco	A	1981,50	gr
	Temperatura de agua y suelo		19,00	°C
	Factor de corrección por temperatura	K	0,9984	gr/cm ³
	Gravedad Específica bulk de las partículas secas (Gs)	(A*K)/(B-C)	2,465	gr/cm ³
	Gravedad específica aparente (Gsa)	(A*K)/(A-C)	2,653	gr/cm ³
	Gravedad Específica de las partículas saturadas con superficie seca (SSS)	(B*K)/(B-C)	2,536	gr/cm ³
	Porcentaje de absorción	(B-A) / A *100	2,867	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Mediante el uso de la Norma INEN 857, se obtuvo una densidad relativa del agregado 3/4" es de 2,465 gr/cm³, y el valor de absorción de 2,86%. Indicándonos que los valores cumplen con dicha especificación.

- **Cálculo de la gravedad específica del agregado 3/8”**

Para el cálculo de gravedad específica, se utilizó la ecuación (Ec.2.5):

$$G_s = \frac{1895,70 * 0.9982}{1947,3 - 1215,00}$$

$$G_s = 2,584 \frac{g}{cm^3}$$

Para realizar el cálculo de la gravedad específica de las partículas saturadas superficialmente secas (SSS), se dio uso a la ecuación (Ec.2.6):

$$SSS = \frac{1947,3 * 0.9982}{1947,3 - 1215,00}$$

$$SSS = 2,654 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo de la gravedad específica aparente de las partículas secas, se utilizó la ecuación (Ec.2.7):

$$G_{sa} = \frac{1895,7 * 0.9982}{1895,7 - 1215,00}$$

$$G_{sa} = 2,780 \frac{gr}{cm^3}$$

Para el cálculo del porcentaje de absorción, se utilizó la ecuación (Ec.2.8), logrando el siguiente resultado:

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{1947,3 - 1895,7}{1895,7} * 100$$

$$\% \text{ de Absorción} = 2,72\%$$

Tabla 26 Gravedad específica del agregado grueso 3/8"

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
“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”				
"GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO 3/8"				
Origen: JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato				
Ensayado por: Karen Nicole Sarabia Lescano				
Norma: INEN 857				
	DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
AIRE	Peso canastilla + suelo SSS		3184,12	gr
	Peso canastilla		1236,82	gr
	Peso suelo SSS	B	1947,30	gr
AGUA	Peso canastilla + suelo sumergido		2256,20	gr
	Peso canastilla sumergida		1041,20	gr
	Peso suelo sumergido	C	1215,00	gr
SECO	Peso canastilla + suelo seco		3778,30	gr
	Peso canastilla en el aire		1882,60	gr
	Peso suelo seco	A	1895,70	gr
	Temperatura de agua y suelo		20,00	°C
	Factor de corrección por temperatura	K	0,9982	gr/cm ³
	Gravedad Específica bulk de las partículas secas (Gs)	(A*K) / (B-C)	2,584	gr/cm ³
	Gravedad específica aparente (Gsa)	(A*K) / (A-C)	2,780	gr/cm ³
	Gravedad Específica de las partículas saturadas con superficie seca (SSS)	(B*K) / (B-C)	2,654	gr/cm ³
	Porcentaje de absorción	(B-A) / A *100	2,722	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano



Mediante el uso de la Norma INEN 857, se obtuvo una densidad relativa del agregado 3/8" es de 2,584 gr/cm³, y el valor de absorción de 2,72%. Indicándonos que los valores cumplen con dicha especificación.

3.1.1.4 Desgaste por abrasión del agregado grueso, Norma AASHTO T96 (ASTM C131) (INEN 860)

Se determinó la resistencia por desgaste de abrasión mediante la máquina de los Ángeles con carga abrasiva, los orígenes del material pétreo fueron de la planta

asfáltica de la Constructora Alvarado proveniente de la cantera de las viñas de la ciudad de Ambato.

Tabla 27 Resistencia al desgaste por abrasión

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“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”			
“RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN”			
Origen:	"JEAL Construcciones", Sector las Viñas, Ciudad de Ambato		
Elaborado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano		
Norma:	INEN 0860		
NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
A	Peso del agregado antes del ensayo	gr	5000
B	Peso del agregado no desgastado después del ensayo	gr	3782,5
C= A-B	Pérdida por desgaste	gr	1217,5
$D = (C/A) * 100$	Desgaste del agregado	(%)	24,4

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Según los resultados obtenidos de acuerdo a la Norma INEN 860, el valor de desgaste determinado mediante la máquina de los Ángeles es del 24,4%, tal como se indica en la Tabla 27. Este valor se encuentra dentro del rango permitido de pérdida de masa por desgaste, que va desde el 10% hasta el 45%.



3.1.1.5 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, Norma ASTM D5821-

95

Mediante el ensayo se determinó el porcentaje de caras fracturadas en los agregados gruesos con respecto a la forma y textura de la superficie del mismo, obteniendo en porcentaje de la fractura de las caras de la partícula para poder realizar la clasificación general del material.

Las fracturas deberán ser recientes y por procedimientos mecánicos (trituration).

Tabla 28 Porcentaje de caras fracturadas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		
“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”			
“PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS”			
Origen:	"JEAL Construcciones", Sector las Viñas, Ciudad de Ambato		
Elaborado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano		
Norma:	ASTM 5821-95		
Masa del Agregado:	1500 gr		
DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
Peso de partículas fracturadas	F	980	gr
Peso de partículas cuestionables	Q	509	gr
Peso partículas no fracturadas	N	6	gr
% de caras fracturadas	$P = \frac{F + \left(\frac{Q}{2}\right)}{F + Q + N} * 100$	82,6	%


Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Los resultados obtenidos en el cálculo se llevaron a cabo siguiendo la Norma ASTM D5821-95 para determinar el porcentaje de caras fracturadas en los agregados pétreos. Según esta norma, para calificar la calidad de los agregados para bases granulares de clase C, se requiere un mínimo del 50%. En este caso, el resultado obtenido es del 82,6% (consultar Tabla 28), lo que indica que no cumple con la condición para la base granular clase C, pero supera el requisito del 70% para la base granular clase B. Por lo tanto, se puede utilizar como base granular de clase A con un 100% de cumplimiento.

3.1.1.6 Recubrimiento y peladura

En este ensayo se ejecutó una evaluación visual empírica de la acción del agua sobre la película asfáltica, logrando como resultado los siguientes valores presentados en la Tabla 29.

Tabla 29 Recubrimiento y peladura

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL</p> 		
<p>“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”</p>		
<p>“RECUBRIMIENTO Y PELADURA”</p>		
<p>Origen: "JEAL Construcciones", Sector las Viñas, Ciudad de Ambato Ensayado por: Karen Nicole Sarabia Lescano Norma: ASTM -3625</p>		
DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Recubrimiento	95	%
Peladura	5	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

La adherencia entre el asfalto y el agregado es buena ya que se retiene más del 95% del recubrimiento de asfalto en el área visible total del agregado.

3.1.2 Ensayo realizado al asfalto

3.1.2.1 Peso específico del asfalto

Como resultado del ensayo para el PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO se obtuvo el valor de 1.016 gr/cm³ mostrado en la (Tabla 30), valor que está dentro del rango admisible de la especificación.

Tabla 30 Gravedad específica del asfalto.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
“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”		
"PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO"		
Origen:	“JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”	
Ensayado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano	
Norma:	ASTM D 70	
DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALOR
Masa del frasco (picnómetro) + agua	M1	68,4
Masa del frasco (picnómetro)	M2	38,45
M1-M2	M3	29,95
Peso del picnómetro + cemento asfáltico	M4	49,35
Masa del frasco (picnómetro)	M5	27,02
M4-M5	M6	22,5
Peso del picnómetro + Asfalto + Agua para llenar el picnómetro	M7	76,16
Peso del picnómetro + cemento asfáltico	M8	68,35
M7-M8	M9	7,81
M3-M9	M10	22,14
Gravedad Específica (gr/cm ³)	M6/M10	1,016

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3 Método Marshall (ASTM D 1559-89)

3.1.3.1 Diseño de la mezcla asfáltica convencional

Con la combinación de agregados resultante de la mezcla de los áridos se confeccionan 4 grupos de briquetas en juegos de 3, adicionando 5,5%; 6,0%; 6,5% y 7,0% en porcentaje de cemento asfáltico con respecto al peso de agregado seco.

En la Tabla 31 que se indica a continuación, se detallan los pesos de cada uno de los materiales con los porcentajes de las mezclas propuestas y las cantidades de cemento asfáltico que se adicionarán a cada uno.

3.1.3.1.1 Dosificación de la mezcla convencional

Tabla 31 Dosificación de agregados para la mezcla convencional.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
“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”					
<i>"DOSIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS MEZCLA CONVENCIONAL"</i>					
Origen:	“JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”				
Realizado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano				
Peso muestra (gr):	5000				
Lugar:	Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.				
MATERIAL	Formula Maestra (%)	PUNTO 1 (gr)	PUNTO 2 (gr)	PUNTO 3 (gr)	PUNTO 4 (gr)
% AC 20		5,5	6	6,5	7,00
Peso del AC 20		275	300	325	350
Arena	56	2800	2800	2800	2800
3/8"	32	1325	1300	1275	1250
3/4"	12	600	600	600	600
TOTAL	100	5000	5000	5000	5000

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Mediante el uso del Criterio Marshall se detalla que el 56% es material fino, el 32% de material 3/8" y un 12% es material 3/4" de acuerdo a la granulometría. Esta graduación del material nos permite realizar la elaboración de briquetas asfálticas

tradicionales cumpliendo las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F2002. Tala 405.5.1.

3.1.3.1.2 Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE para mezcla asfáltica modificada con polímero

Con la mezcla asfáltica de cada uno de los porcentajes se realizó el ensayo de gravedad específica Rice, indicado en el siguiente cuadro:

Tabla 32 Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
“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”						
"DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA- RICE"						
Origen:	“JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”					
Ensayado por:	Karen Nicole Sarabia Lescano					
Norma:	ASTM 2041					
Lugar:	Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.					
% de Cemento asfáltico	Peso frasco+ agua a 25 °C en gr (D)	Peso de frasco (gr)	Peso muestra+ frasco (gr)	Peso muestra gr (A)	Peso muestra+ frasco + agua 25° gr (E)	RICE Gmm= A/A-(E-D)
5,5%	7396,5	2160,3	3370,5	1210,2	8098,6	2,382
6%	7396,5	2160,3	3372,2	1211,9	8096,0	2,365
6,50%	7396,5	2160,3	3369,7	1209,4	8087,9	2,335
7%	7396,5	2160,3	3352,8	1192,5	8070,8	2,301

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.1.3 Diseño del cálculo de método Marshall para la mezcla asfáltica convencional

Los datos obtenidos de las mezclas asfálticas convencionales se los representa mediante las siguientes relaciones explicadas anteriormente en el apartado de métodos numeral 2.2.3.1.4 los mismos se detallan en la Tabla 33:

Tabla 33 Diseño de mezcla asfáltica convencional por el método de Marshall.

“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL POR EL MÉTODO MARSHALL”																
Realizado por: Karen Nicole Sarabia Lescano																
Procedencia de los agregados: Planta de asfalto "JEAL Construcciones"																
No de Golpes: 75																
Gsb: 2,451																
Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso en Agua	Peso Saturado Sup seca	Volumen de la briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	RICE	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
													Media	Fac.C	Corregida	
#	Pmm (%)	Pb (%)	Ps (%)	Pa (g)	Psum (g)	Psss (g)	Vol (cm3)	Gmb (g/cm3)	Gmm --	Va (%)	VAM (%)	VAF (%)	Em (lb)	Fc --	Ec (lb)	F (0,01")
1	100	5,5	94,5	1139,4	631,8	1145,1	513,3	2,220					2255,8	1	2255,8	10,6
2	100	5,5	94,5	1180,3	651,7	1188,7	537	2,198					3008,5	0,93	2797,9	9,54
3	100	5,5	94,5	1120,6	628,8	1135,8	507	2,210					3516,5	1	3516,5	12,3
								2,209	2,382	7,25	14,818	51,078	2926,9		2856,7	10,8
1	100	6,0	94,0	1197,9	664,1	1200,5	536,4	2,233					3173,84	0,93	2951,7	8,24
2	100	6,0	94,0	1171,1	646,3	1173,6	527,3	2,221					3500,70	0,96	3360,7	10,16
3	100	6,0	94,0	1240,4	687,7	1244,1	556,4	2,229					3248,29	0,89	2891,0	9,35
Promedio								2,228	2,365	5,80	14,559	60,162	3307,6		3067,8	9,3
1	100	6,5	93,5	1246,1	689,8	1248,1	558,3	2,232					3487,95	0,89	3104,3	10,14
2	100	6,5	93,5	1234,8	681,8	1238	556,2	2,220					3507,13	0,89	3121,3	12,4
3	100	6,5	93,5	1229,4	680,1	1231,4	551,3	2,230					3320,20	0,89	2955,0	11,25
Promedio								2,227	2,335	4,61	15,032	69,328	3438,4		3060,2	11,3
1	100	7,0	93,0	1234,1	685,8	1236	550,2	2,243					3187,90	0,89	2837,2	13,55
2	100	7,0	93,0	1255	698,8	1257,3	558,5	2,247					3027,97	0,89	2694,9	14,02
3	100	7,0	93,0	1205,8	658,8	1211,9	553,1	2,180					3278,80	0,89	2918,1	15,10
Promedio								2,223	2,301	3,37	15,636	78,429	3164,9		2816,8	14,2

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Tabla 34 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla convencional

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de la mezcla	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla
Pb	Gse	Pba	Pbe
(%)	--	(%)	(%)
5,5	2,584	2,14	3,48
5,5	2,584	2,14	3,48
5,5	2,584	2,14	3,48
6	2,584	2,13	3,99
6	2,584	2,13	3,99
6	2,584	2,13	3,99
6,5	2,567	1,87	4,75
6,5	2,567	1,87	4,75
6,5	2,567	1,87	4,75
7	2,543	1,50	5,60
7	2,543	1,50	5,60
7	2,543	1,50	5,60
Promedio Total	2,569	1,910	4,458

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

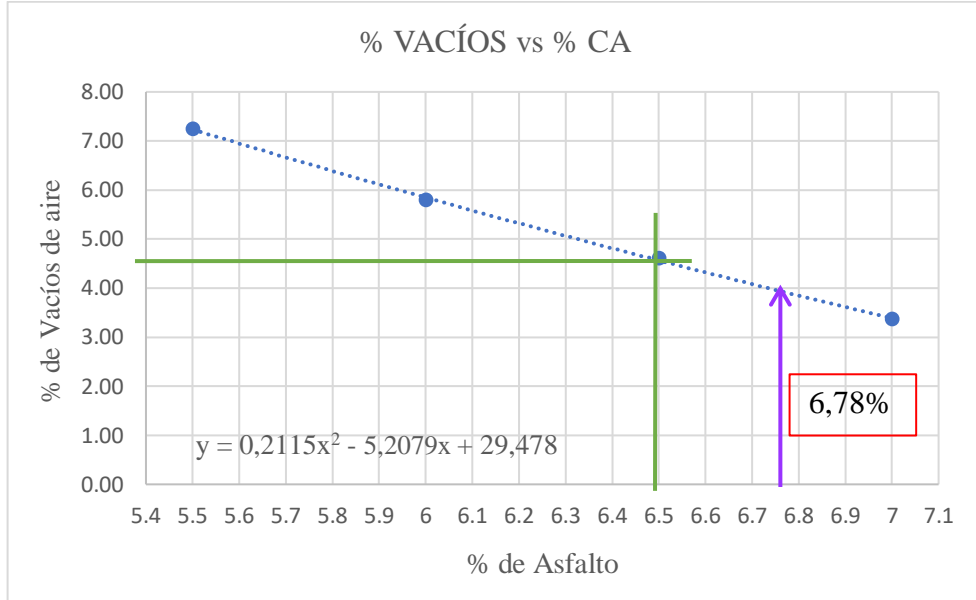
Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica en relación a las gravedades específicas:

Tabla 35 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.

Gsa	>	Gse	>	Gsb
2,663	>	2,569	>	2,451

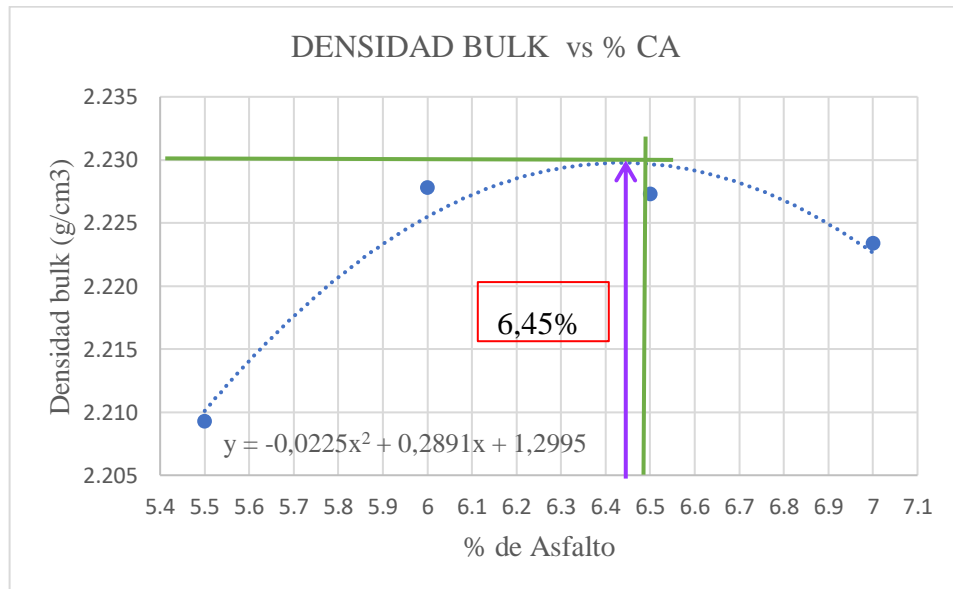
3.1.3.1.4 Curvas de diseño de la mezcla convencional

Figura 15 Curva de Vacíos con Aire vs Porcentaje de Asfalto



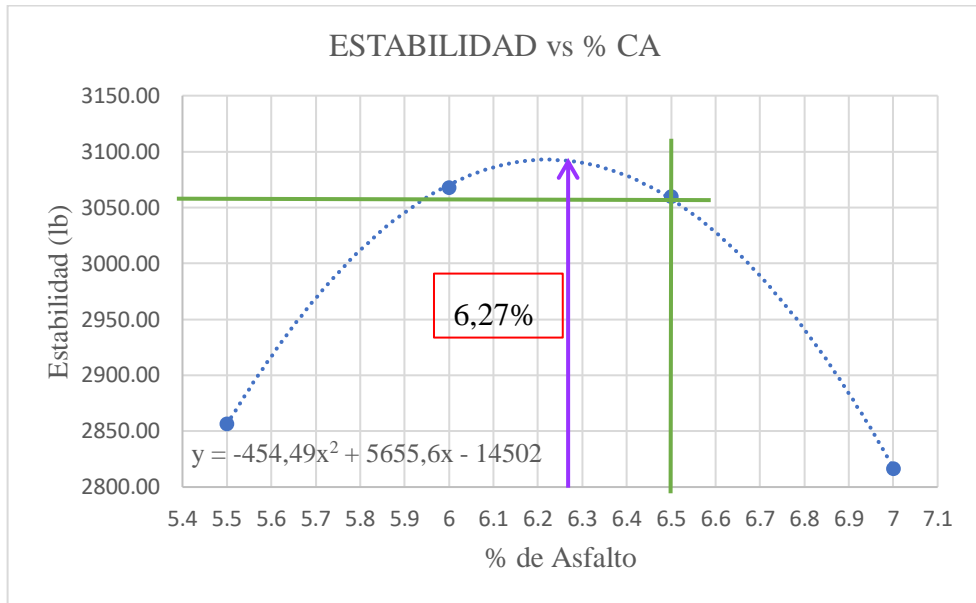
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 16 Curva de Densidad bulk vs Porcentaje de Asfalto



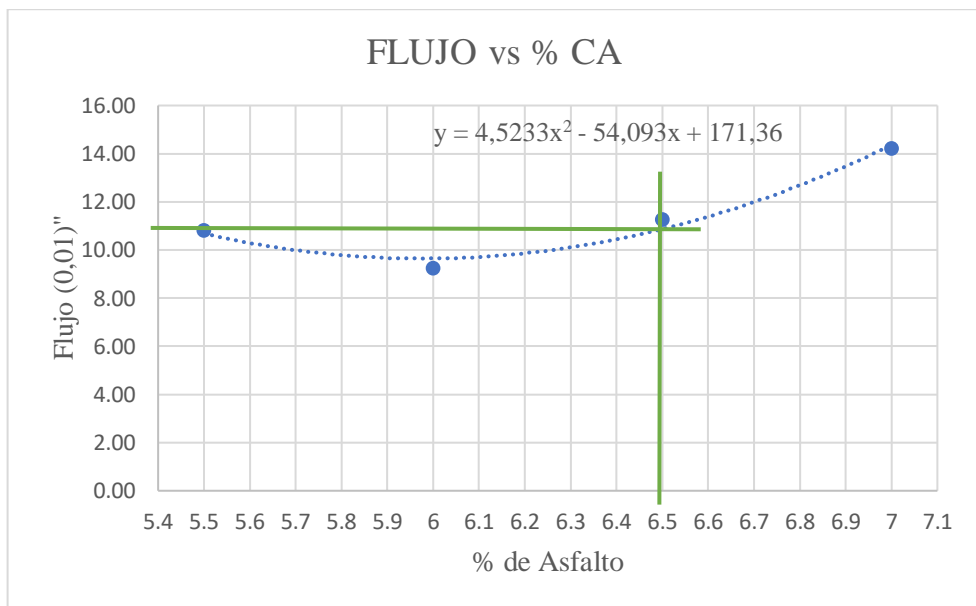
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 17 Curva de Estabilidad vs Porcentaje de Asfalto.



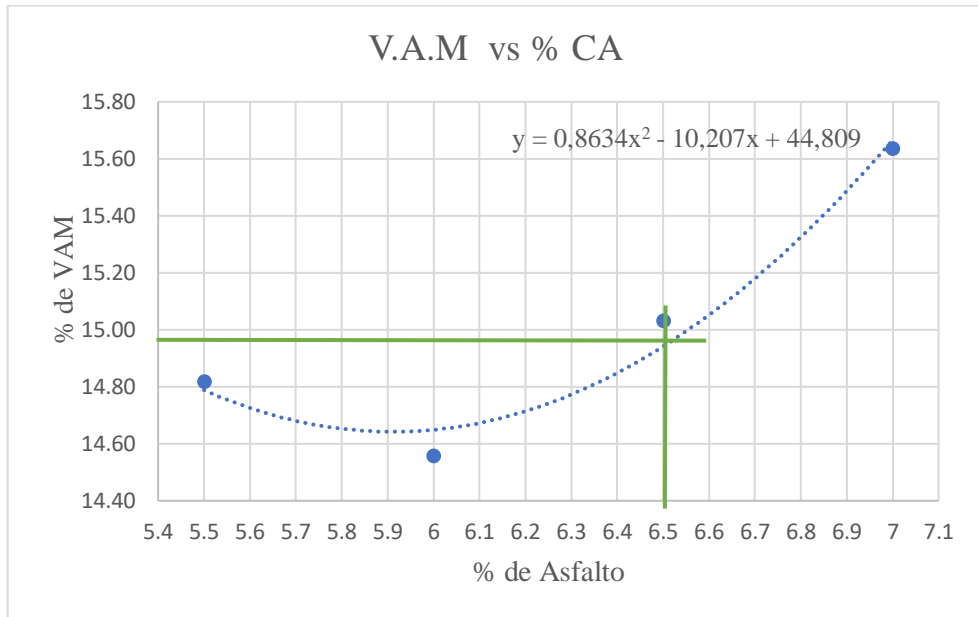
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 18 Curva de Flujo vs Porcentaje de Asfalto



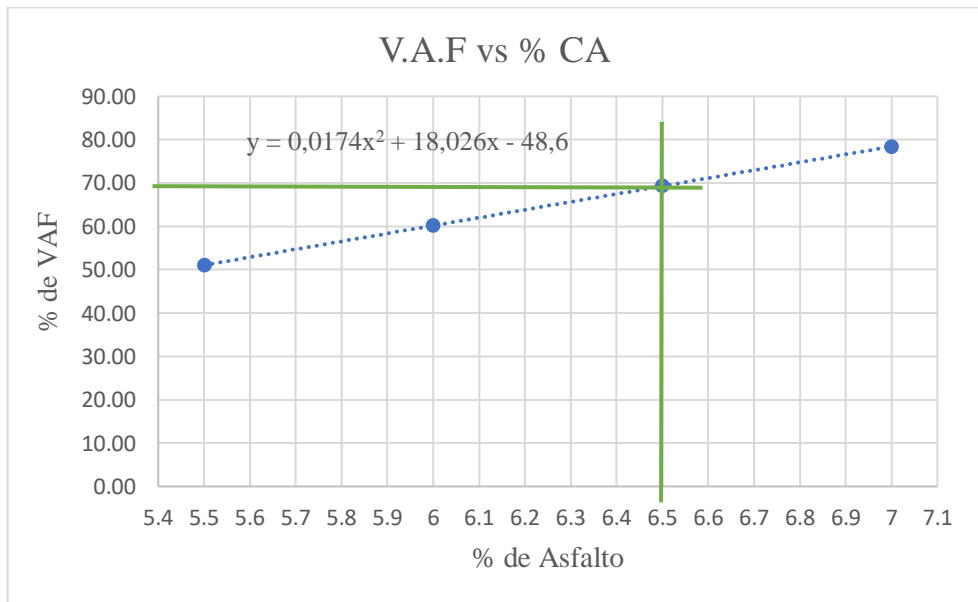
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 19 Curva de Vacíos en Agregado Minerales vs Porcentaje de Asfalto



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 20 Curva de Vacíos Llenos de Asfalto vs Porcentaje de Asfalto



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.1.5 Selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla

Con base a las curvas de diseño realizadas, el contenido óptimo de asfalto se calcula promediando los valores representados en las curvas de las figuras 15, 16 y 17 que corresponden a:

- La máxima densidad
- La máxima estabilidad
- Y el valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido por las especificaciones.

El promedio de los tres porcentajes de asfalto equivale a su porcentaje óptimo como se lo indica en la Tabla 36:

Tabla 36 Porcentaje óptimo de asfalto.

Densidad máxima Bulk	6,45	%
Vacíos	6,78	%
Estabilidad	6,27	%
Contenido Óptimo de Asfalto	6,50	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Para esta mezcla, se obtuvo que el máximo porcentaje por densidad se encuentra con 6,45% de cemento asfáltico y el máximo por estabilidad con 6,27%. Con relación al índice de vacíos, el mínimo que se obtuvo con los distintos porcentajes de cemento asfáltico fue de 6,78%.

Tabla 37 Comprobación del porcentaje óptimo de asfalto

DESCRIPCIÓN		VALOR	ESPECIFICACIÓN		Condición
Asalto	%	6,5	Min	Max	
Densidad Bulk	(gr/cm ³)	2,228	--	--	--
Estabilidad	lb	3053,30	1800		Cumple
Flujo	0,01"	10,860	8	14	Cumple
Vacíos con aire	%	4,560	3	5	Cumple
Vacíos de agregado mineral	%	14,990	15	--	Aceptable
Vacíos llenos de asfalto	%	69,300	65	75	Cumple

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano



3.1.3.2 Diseño de la mezcla asfáltica modificada con polímero termoplástico

En este diseño se elaboraron briquetas asfálticas modificadas con el 5%,10%, 15% y 20% de polímero (P.E); el polímero termoplástico en este caso proveniente de tapas plásticas trituradas usadas en reemplazo parcial del agregado 3/8" para la fabricación de dichas briquetas.

El porcentaje de cemento asfáltico con los que se trabajará para los diferentes grupos de briquetas modificadas con polímero es: 6,5%

3.1.3.2.1 Dosificación de la mezcla modificada

Tabla 38 Dosificación de agregados para la mezcla modificada con polímero



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
“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”						
<i>"DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS MEZCLA MODIFICADA CON POLÍMERO"</i>						
Origen:		“JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”				
Realizado por:		Karen Nicole Sarabia Lescano				
Peso muestra (gr):		5000				
Lugar:		Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.				
MATERIAL	Formul a Maestra (%)	Formul a de trabajo (%)	PUNT O 1 (gr)	PUNT O 2 (gr)	PUNT O 3 (gr)	PUNT O 4 (gr)
% de polímero			5,00	10,00	15,00	20,00
Peso en gramos del polímero			16,25	32,5	48,75	65
Arena	56	52,36	2618	2618	2618	2618
3/8"	32	29,92	1479,75	1463,50	1447,25	1431
3/4"	12	11,22	561	561	561	561
Peso del %AC 20		6,5	325	325	325	325
TOTAL	100	100	5000	5000	5000	5000

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.2.2 Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE para mezcla asfáltica modificada con polímero

Se aplicó para este análisis el ensayo Rice a fin de determinar la densidad y vacíos en las briquetas modificadas con polímero.

Tabla 39 Determinación de la gravedad específica teórica máxima- RICE

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
“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”						
<i>"DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA-RICE"</i>						
Origen: “JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”						
Ensayado por: Karen Nicole Sarabia Lescano						
Norma: ASTM 2041						
Lugar: Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.						
% de Cemento asfáltico	Peso frasco+ agua a 25 °C en gr (D)	Peso de frasco (gr)	Peso muestra+ frasco (gr)	Peso muestra gr (A)	Peso muestra+ frasco + agua 25° gr (E)	RICE Gmm= A/A-(E-D)
5% de Polímero						
6,5%	7396,5	2160,3	3368,8	1208,5	8084,3	2,321
10% de Polímero						
6,50%	7396,5	2160,3	3374,3	1214	8093,3	2,347
15% de Polímero						
6,50%	7396,5	2160,3	3367,3	1207	8089,1	2,346
20% de Polímero						
6,50%	7396,5	2160,3	3396,4	1236,1	8100,4	2,323

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.2.3 Diseño del cálculo de método Marshall modificada con polímero (P.E)

Los datos obtenidos de las mezclas asfálticas modificadas de partículas de plástico mediante las siguientes relaciones que se detallan a continuación:

Tabla 40 Diseño de mezcla asfáltica modificada con polímero termoplástico por el método de Marshall

"DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO TERMOPLÁSTICO POR EL MÉTODO DE MARSHAL"																		
Realizado por: Karen Nicole Sarabia Lescano																		
Procedencia de los agregados: "JEAL Construcciones"																		
N° de Golpes: 75																		
Gsb: 2,451																		
Porcentaje de polímero	Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de %P.E+ %AC 20	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Sumergido	Peso Saturado Sup seca	Volumen de la briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	RICE	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
															Media	Fac.C	Corregida	
	#	Pmm	Pb	--	Ps	Pa	Psum	Psss	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F
(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm3)	(g/cm3)	--	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0,01")
5	1	100	6,5	6,83	93,2	1206,6	669,9	1208,5	538,6	2,240					4024,3	0,93	3742,62	13,720
	2	100	6,5	6,83	93,2	1106,8	611,9	1109,1	497,2	2,226					3876,8	1,04	4031,87	12,583
	3	100	6,5	6,83	93,2	1240,3	683,2	1247,6	564,4	2,198					3986,6	0,86	3428,48	12,087
Promedio										2,221	2,321	4,30	15,562	72,395	3962,58		3734,32	12,80
10	1	100	6,5	7,15	92,9	1057,8	582,34	1060,4	478,06	2,213					3612,114	1,14	4117,81	11,051
	2	100	6,5	7,15	92,9	1150,4	630,34	1156,3	525,96	2,187					3701,214	0,96	3553,17	9,685
	3	100	6,5	7,15	92,9	1201,5	668,23	1206,3	538,07	2,233					4675,968	0,93	4348,65	10,551
Promedio										2,211	2,347	5,80	16,243	64,317	3996,43		4006,54	10,43
15	1	100	6,5	7,475	92,5	1215,7	667,23	1221,1	553,87	2,195					4011,282	0,86	3449,70	10,220
	2	100	6,5	7,475	92,5	1171,4	634,2	1176,6	542,4	2,160					3275,316	0,89	2915,03	8,898
	3	100	6,5	7,475	92,5	1209,5	670,21	1214,9	544,69	2,221					4136,022	0,89	3681,06	9,043
Promedio										2,192	2,346	6,58	17,263	61,902	3807,54		3348,60	9,39
20	1	100	6,5	7,8	92,2	1207,6	663,23	1212,8	549,57	2,197					3736,854	0,89	3325,80	9,150
	2	100	6,5	7,8	92,2	1211,6	656,23	1217,8	561,57	2,158					3875,85	0,86	3333,23	8,720
	3	100	6,5	7,8	92,2	1078,1	571,34	1091,3	520,0	2,073					1664,388	0,96	1597,81	8,350
Promedio										2,143	2,323	7,76	19,395	59,997	3092,36		2752,28	8,74

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Tabla 41 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla modificada con polímero

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de la mezcla	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla
Pb	Gse	Pba	Pbe
(%)	--	(%)	(%)
6,5	2,549	1,59	5,02
6,5	2,549	1,59	5,02
6,5	2,549	1,59	5,02
6,5	2,582	2,11	4,53
6,5	2,582	2,11	4,53
6,5	2,582	2,11	4,53
6,5	2,581	2,09	4,55
6,5	2,581	2,09	4,55
6,5	2,581	2,09	4,55
6,5	2,551	1,63	4,98
6,5	2,551	1,63	4,98
6,5	2,551	1,63	4,98
Promedio Total	2,566	1,851	4,769

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

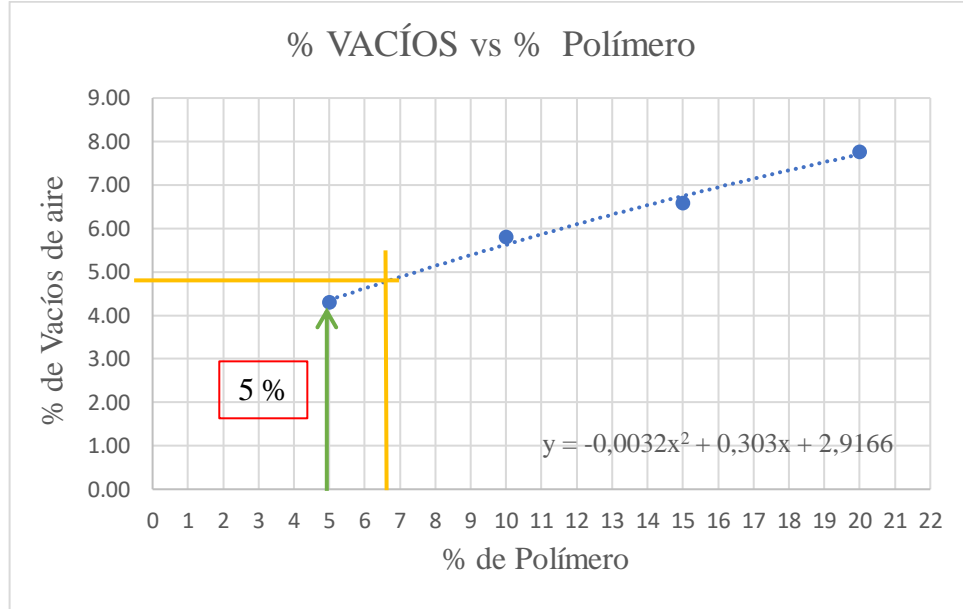
Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica en relación a las gravedades específicas:

Tabla 42 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.

Gsa	>	Gse	>	Gsb
2,663	>	2,566	>	2,451

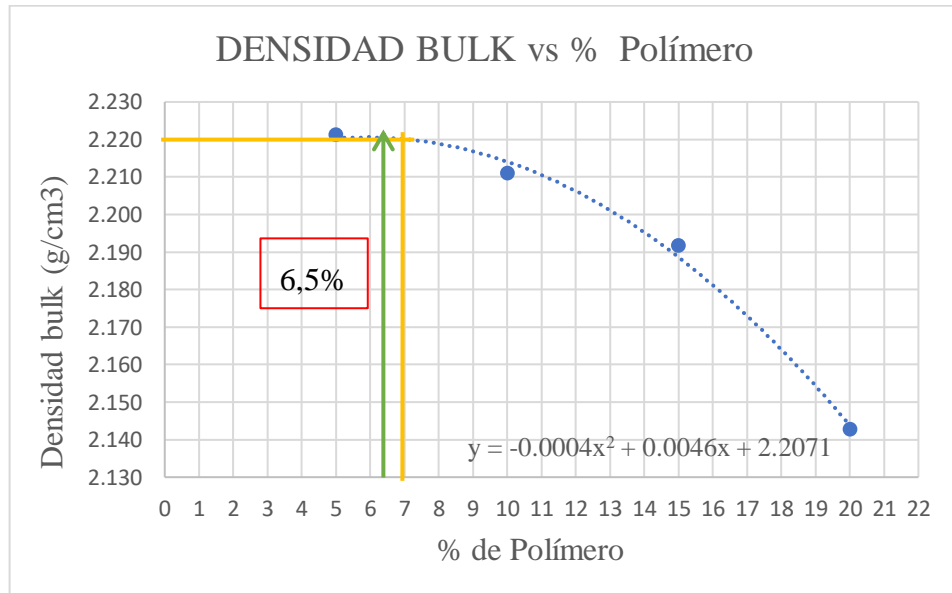
3.1.3.2.4 Curvas de diseño de la mezcla asfáltica modificadas con polímero.

Figura 21 Curva de Vacíos en aire vs. porcentaje de polímero



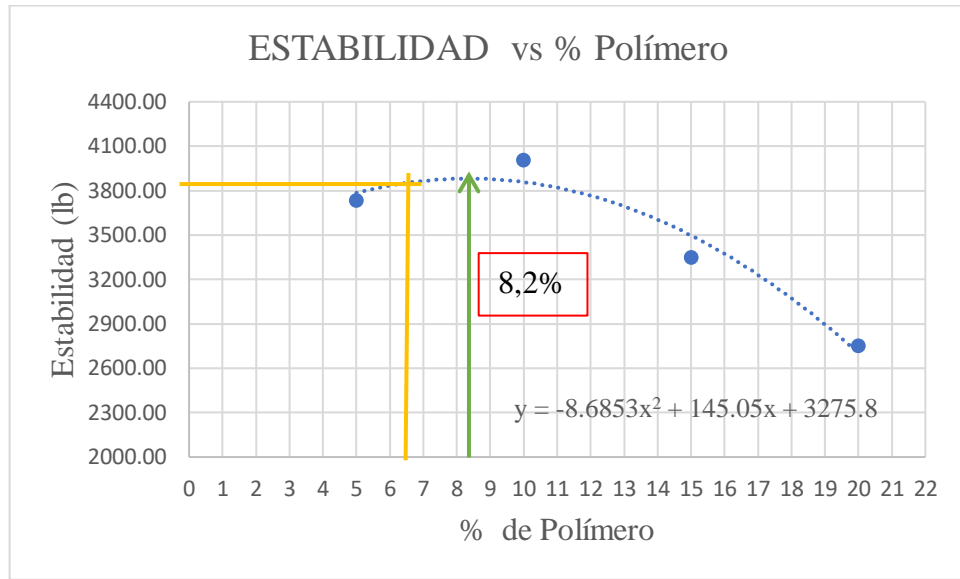
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 22 Curvas de Densidad bulk vs. porcentaje de polímero



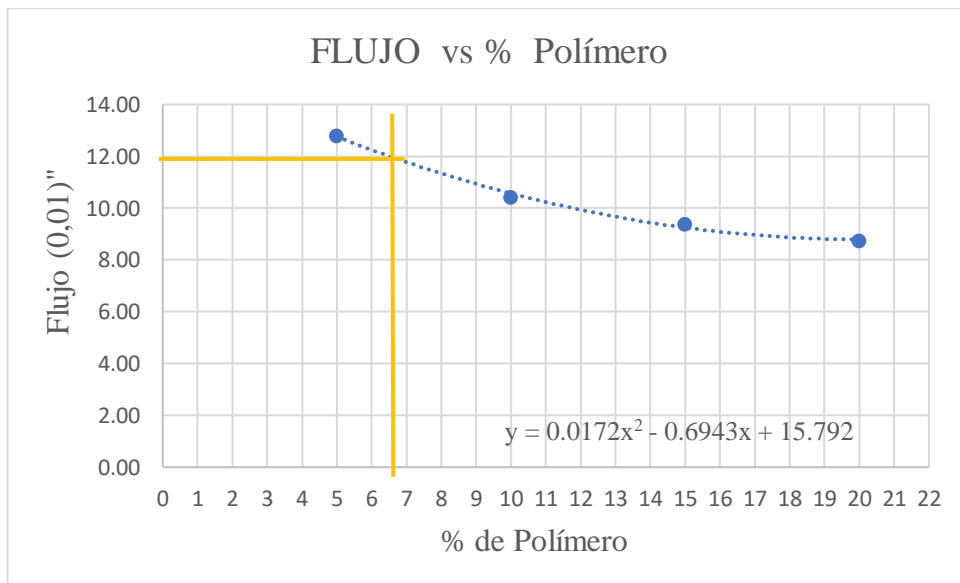
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 23 Curvas de Estabilidad vs. porcentaje de polímero



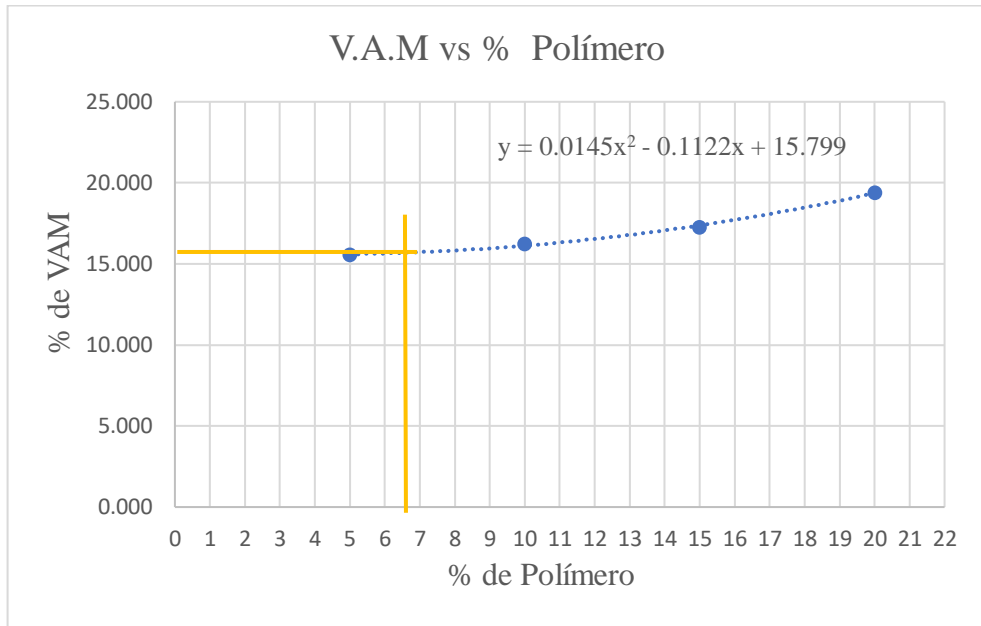
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 24 Flujo o deformación vs. porcentaje de polímero



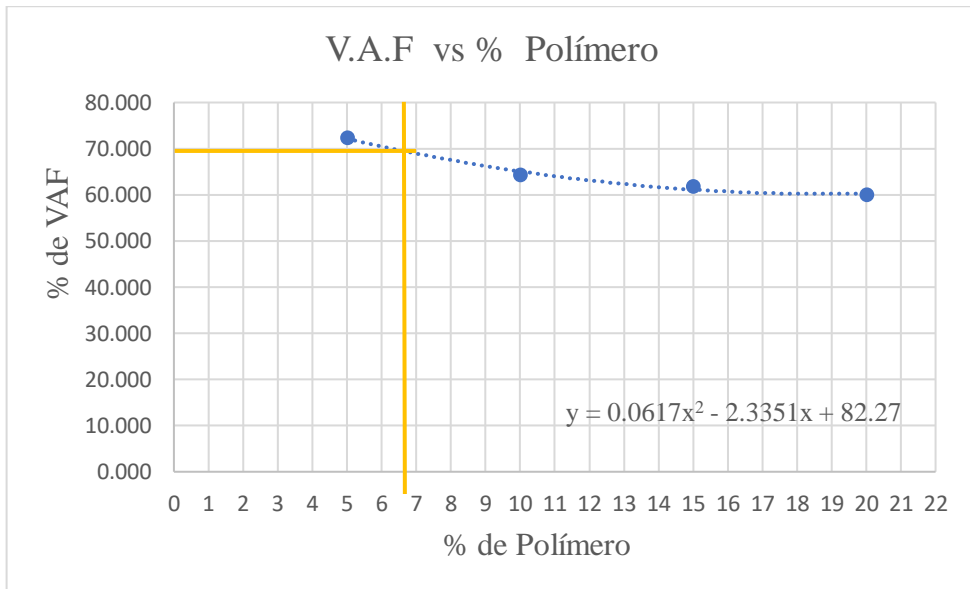
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 25 Vacíos en agregados minerales vs. porcentaje de polímero



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 26 Porcentaje de Vacíos llenos de asfalto vs. porcentaje de polímero



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.2.5 Selección del contenido óptimo de polímero en la mezcla

Con base a lo establecido en la norma del método Marshall, el contenido óptimo de asfalto se calcula promediando los valores obtenidos en las curvas de las figuras 21, 22 y 23 que corresponden a:

- La máxima densidad
- La máxima estabilidad
- Y el valor 4,30% considerándolo el mínimo valor que cumple con el porcentaje de vacíos con aire.

El promedio de los tres porcentajes de polímero equivale a su porcentaje óptimo como se lo indica en la Tabla 43:

Tabla 43 Porcentaje óptimo de asfalto.

Densidad máxima Bulk	6,5	%
Vacíos	5,0	%
Estabilidad	8,2	%
Contenido Óptimo de Polímero	6,60	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Para esta mezcla, se obtuvo que el máximo porcentaje por densidad se encuentra con 6,5% de polímero termoplástico y el máximo por estabilidad con 8,2%. Con relación al índice de vacíos, el mínimo que se obtuvo con los distintos porcentajes de polímero fue de 5%.

Tabla 44 Resumen de resultados – mezcla modificada con polímero

DESCRIPCIÓN		VALOR	ESPECIFICACIÓN		Condición
Asalto	%	6,5	Min	Max	
Densidad Bulk	(gr/cm ³)	2,220	--	--	--
Estabilidad	lb	3853,78	1800		Cumple
Flujo	0,01"	11,974	8	14	Cumple
Vacíos con aire	%	4,768	3	5	Cumple
Vacíos de agregado mineral	%	15,687	15	--	Cumple
Vacíos llenos de asfalto	%	69,597	65	75	Cumple

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.3 Diseño de la mezcla asfáltica modificada con Caucho de llanta reciclado

Este método experimental consiste en la elaboración de briquetas asfálticas modificadas con el 2%,3%, 4% y 5% de caucho (GCR) el cual fue utilizado en reemplazo parcial del agregado 3/8”.

El porcentaje de cemento asfáltico con los que se trabajará para los diferentes grupos de briquetas modificadas con caucho es: 6,5%

3.1.3.3.1 Dosificación de la mezcla modificada

Tabla 45 Dosificación de agregados para la mezcla modificada con Caucho



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
“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”						
<i>"DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS MEZCLA MODIFICADA CON CAUCHO "</i>						
Origen: “JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato” Realizado por: Karen Nicole Sarabia Lescano Peso muestra (gr): 5000 Lugar: Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.						
MATERIAL	Formula Maestra (%)	Formula de trabajo (%)	PUNTO 1 (gr)	PUNTO 2 (gr)	PUNTO 3 (gr)	PUNTO 4 (gr)
% de Caucho			2,00	3,00	4,00	5,00
Peso del Caucho			6,5	9,75	13	16,25
Arena	56	52,36	2618	2618	2618	2618
3/8"	32	29,92	1489,5	1486,25	1483	1479,75
3/4"	12	11,22	561	561	561	561
Peso del % AC 20		6,5	325	325	325	325
TOTAL	100	100	5000	5000	5000	5000

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.3.2 Análisis de la gravedad específica teórica máxima- RICE para mezcla asfáltica modificada con Caucho de llanta

Se aplicó para este análisis el ensayo Rice a fin de determinar la densidad y vacíos en las briquetas modificadas con caucho.

Tabla 46 Determinación de la gravedad específica teórica máxima- RICE

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
“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”						
“DETERMINACIÓN DE RICE Gmm CON CAUCHO”						
Origen: “JEAL Construcciones, Sector las Viñas, Ciudad de Ambato”						
Ensayado por: Karen Nicole Sarabia Lescano						
Norma: ASTM 2041						
Lugar: Laboratorio de la Planta de Asfalto JEAL.						
% de Cemento asfáltico	Peso frasco+ agua a 25 °C en gr (D)	Peso de frasco (gr)	Peso muestra+ frasco (gr)	Peso muestra gr (A)	Peso muestra+ frasco + agua 25° gr (E)	RICE Gmm= A/A-(E-D)
2% de Caucho						
6,5%	7396,5	2160,3	3470,8	1310,5	8151,7	2,360
3% de Caucho						
6,50%	7396,5	2160,3	3363,9	1203,6	8084,9	2,336
4% de Caucho						
6,50%	7396,5	2160,3	3396,8	1236,5	8102,9	2,333
5% de Caucho						
6,50%	7396,5	2160,3	3451,9	1291,6	8135	2,335

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.3.3 Diseño del cálculo de método Marshall modificada con caucho (GCR)

Los datos obtenidos de las mezclas asfálticas modificadas con caucho de llanta se detallan a continuación:

Tabla 47 Diseño de mezcla asfáltica modificada con caucho de llanta por el método de Marshall

"DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON CUACHO DE LLANTA POR EL MÉTODO DE MARSHAL"																		
Realizado por: Karen Nicole Sarabia Lescano																		
Procedencia de los agregados: "JEAL Construcciones"																		
No de Golpes: 75																		
Gsb: 2,451																		
Porcentaje de caucho	Briqueta	Mezcla total	Contenido de asfalto en la mezcla	Contenido de % CRLL+ % AC 20	Contenido de agregado en la mezcla	Peso en el aire	Peso Sumergido	Peso Saturado Sup seca	Volumen de la briqueta	Densidad Bulk de la mezcla	RICE	Vacíos de aire	Vacíos en el agregado mineral	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad			Flujo
															Media	Fac.C	Corregida	
	#	Pmm	Pb	--	Ps	Pa	Psum	Psss	Vol	Gmb	Gmm	Va	VAM	VAF	Em	Fc	Ec	F
(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(cm3)	(g/cm3)	--	(%)	(%)	(%)	(lb)	--	(lb)	(0,01")
2	1	100	6,5	6,630	93,4	1163,8	631,5	1165,3	533,8	2,180					4212,75	0,96	4044,24	5,94
	2	100	6,5	6,630	93,4	1112,8	615,7	1117,1	501,4	2,219					3186,76	1,04	3314,24	6,06
	3	100	6,5	6,630	93,4	1139,2	631,5	1142,5	511	2,229					3664,46	1	3664,46	7,36
Promedio										2,210	2,360	6,37	15,824	59,74	3687,99		3674,31	6,45
3	1	100	6,5	6,695	93,3	1157,8	635,8	1159,8	524	2,210					4219,27	0,96	4050,50	11,45
	2	100	6,5	6,695	93,3	1166,7	645,8	1168,9	523,1	2,230					4156,33	0,96	3990,074112	6,89
	3	100	6,5	6,695	93,3	1247,8	686,8	1253,2	566,4	2,203					4058,09	0,86	3489,957056	5,93
Promedio										2,214	2,336	5,21	15,705	66,83	4144,56		3843,51	8,09
4	1	100	6,5	6,760	93,2	1243,5	684,3	1247,2	562,9	2,209					4004,59	0,86	3443,94	12,59
	2	100	6,5	6,760	93,2	1206,4	669,6	1212,3	542,7	2,223					3876,90	0,93	3605,52	11,77
	3	100	6,5	6,760	93,2	1232,1	685,8	1239,6	553,8	2,225					3908,80	0,89	3478,83	10,52
Promedio										2,219	2,333	4,89	15,587	68,64	3930,10		3509,43	11,62
5	1	100	6,5	6,825	93,2	1114,2	620,5	1116,6	496,1	2,246					3642,66	1,04	3788,37	13,11
	2	100	6,5	6,825	93,2	1245,4	690,5	1248,9	558,4	2,230					4455,54	0,89	3965,43	13,72
	3	100	6,5	6,825	93,2	1203,8	670,6	1208,9	538,3	2,236					4151,38	0,93	3860,78	12,38
Promedio										2,238	2,335	4,18	14,941	72,05	4083,19		3871,53	13,07

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Tabla 48 Características de una mezcla asfáltica compactada, mezcla modificada con caucho.

Contenido de asfalto en la mezcla	Gravedad específica efectiva de la mezcla	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla
Pb	Gse	Pba	Pbe
(%)	--	(%)	(%)
6,5	2,599	2,36	4,29
6,5	2,599	2,36	4,29
6,5	2,599	2,36	4,29
6,5	2,568	1,89	4,74
6,5	2,568	1,89	4,74
6,5	2,568	1,89	4,74
6,5	2,564	1,83	4,79
6,5	2,564	1,83	4,79
6,5	2,564	1,83	4,79
6,5	2,567	1,87	4,75
6,5	2,567	1,87	4,75
6,5	2,567	1,87	4,75
Promedio Total	2,574	1,986	4,643

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

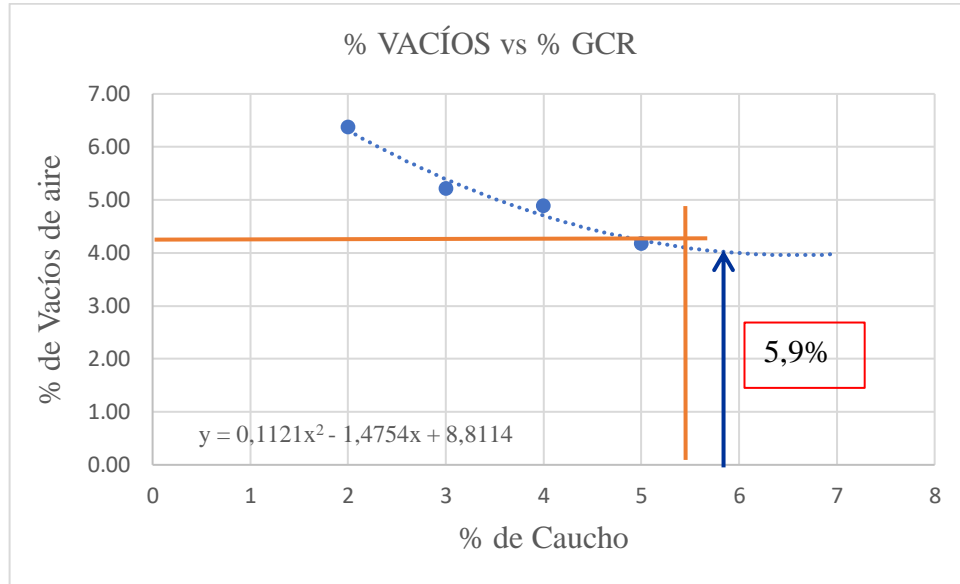
Se presenta la condición para aceptar el diseño de la mezcla asfáltica en relación a las gravedades específicas:

Tabla 49 Condición de aceptación en base a gravedades específicas.

Gsa	>	Gse	>	Gsb
2,663	>	2,574	>	2,451

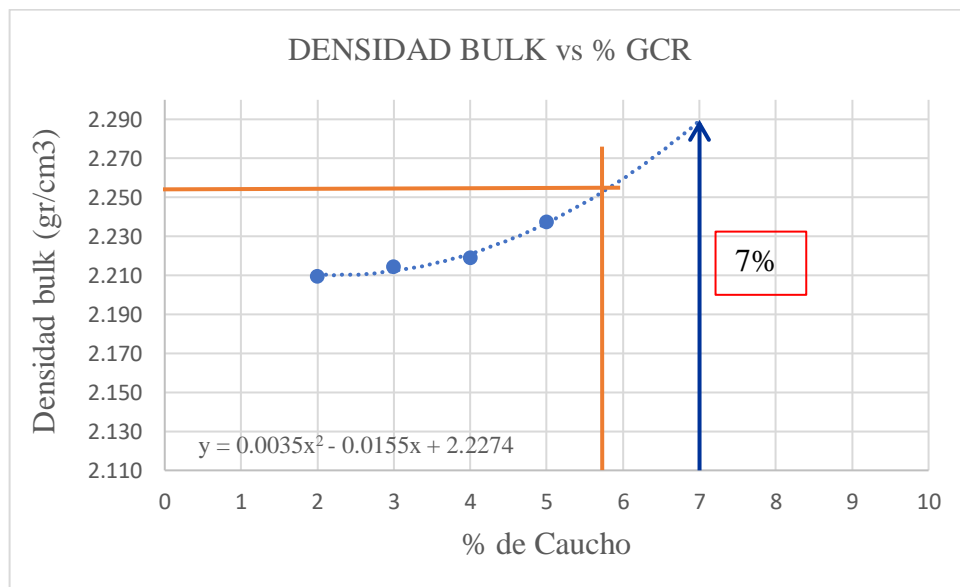
3.1.3.3.4 Curvas de diseño de la mezcla asfáltica modificadas con Caucho.

Figura 27 Curva de Vacíos con Aire vs Porcentaje de Caucho



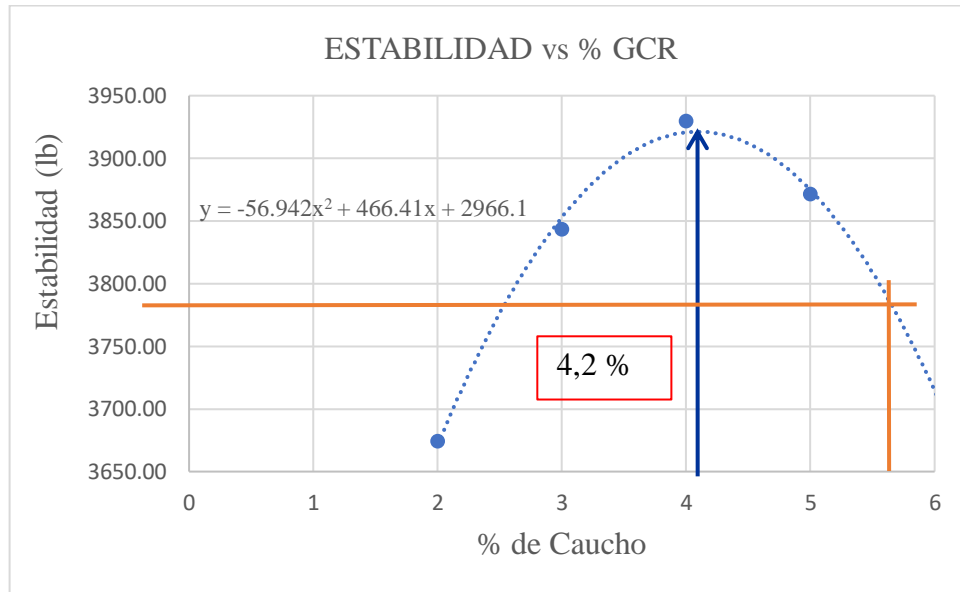
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 28 Curva de Densidad bulk vs Porcentaje de Caucho



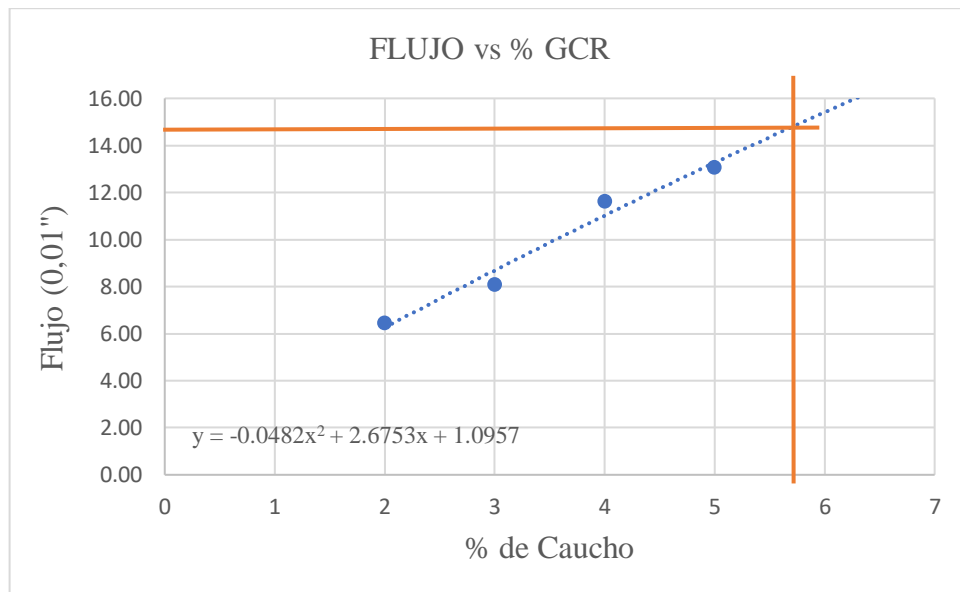
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 29 Curva de Estabilidad vs Porcentaje de Caucho



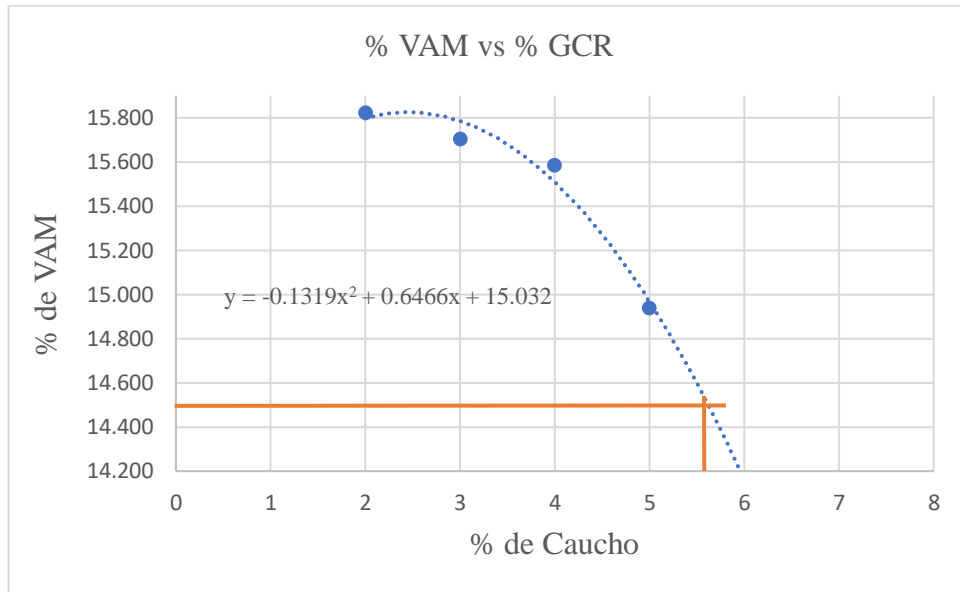
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 30 Curva de Flujo vs Porcentaje de Caucho



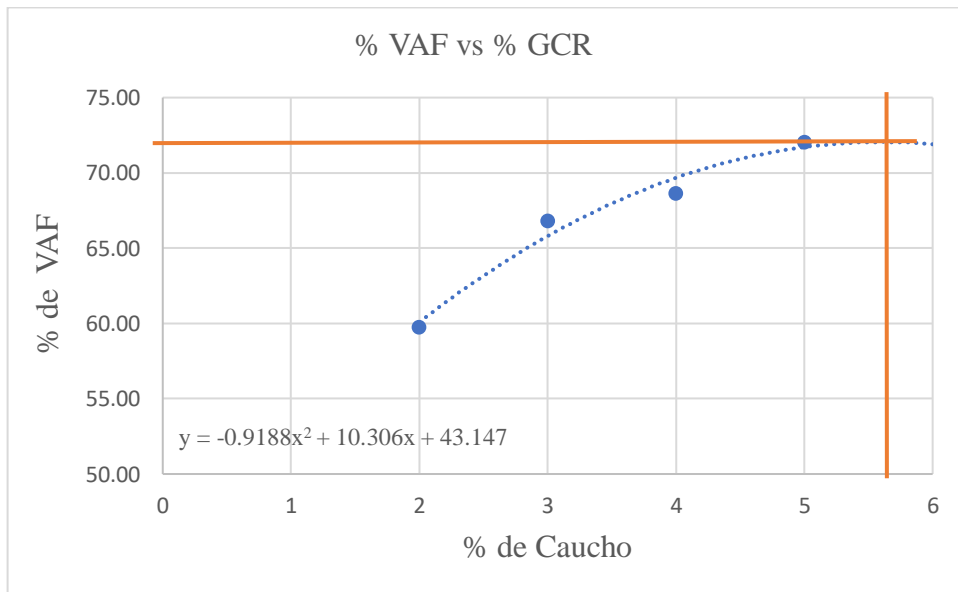
Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 31 Curva de Vacíos en Agregado Minerales vs Porcentaje de Caucho



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Figura 32 Curva de Vacíos Llenos de asfalto vs Porcentaje de Caucho



Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.3.3.5 Selección del contenido óptimo de polímero en la mezcla

Este proceso lo realizamos similar al de la mezcla convencional tomando en cuenta a las curvas de diseño realizadas anteriormente, para hallar el contenido óptimo de caucho se calcula promediando los valores representados en las curvas de las figuras 27, 28 y 29 que corresponden a:

- La máxima densidad
- La máxima estabilidad
- Y el valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido por las especificaciones.

El promedio de los tres porcentajes de caucho equivale a su porcentaje óptimo como se lo indica en la Tabla 50:

Tabla 50 Porcentaje óptimo de caucho.

Densidad máxima Bulk	7,00	%
Vacíos	5,90	%
Estabilidad	4,20	%
Contenido Óptimo de Caucho	5,70	%

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

Para esta mezcla, se obtuvo que el máximo por densidad se encuentra con 7% de caucho de llanta y el máximo por estabilidad con 4,20%. Con relación al índice de vacíos, el mínimo que se obtuvo con los distintos porcentajes de cemento asfáltico fue de 5,90%.

El porcentaje óptimo de caucho para esta mezcla es un 5,70%, es decir, la estabilidad y el índice de vacíos se encuentran dentro de las especificaciones del método utilizado.

Tabla 51 Resumen de resultados – mezcla modificada con caucho de llanta

DESCRIPCIÓN		VALOR	ESPECIFICACIÓN		Condición
			Min	Max	
Asalto	%	6,5	Min	Max	
Densidad Bulk (gr/cm ³)	(gr/cm ³)	2,253	--	--	--
Estabilidad	lb	3774,59	1800		Cumple
Flujo	0,01"	14,8	8	14	No cumple
Vacíos con aire	%	4,04	3	5	Cumple
Vacíos de agregado mineral	%	14,4	15	--	No cumple
Vacíos llenos de asfalto	%	72,04	65	75	Cumple

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

3.1.4 Análisis comparativo de resultados entre los porcentajes óptimos de los materiales modificadores y la mezcla convencional.

La información presentada se fundamenta en la recolección de datos acerca de las propiedades de una mezcla asfáltica normal (conocida como mezcla convencional), junto con datos sobre las propiedades de las mezclas modificadas, que se obtienen al determinar el porcentaje óptimo del material modificador. De esta manera, se logra obtener la siguiente información:

Tabla 52 Propiedades de los tres tipos de mezclas asfálticas

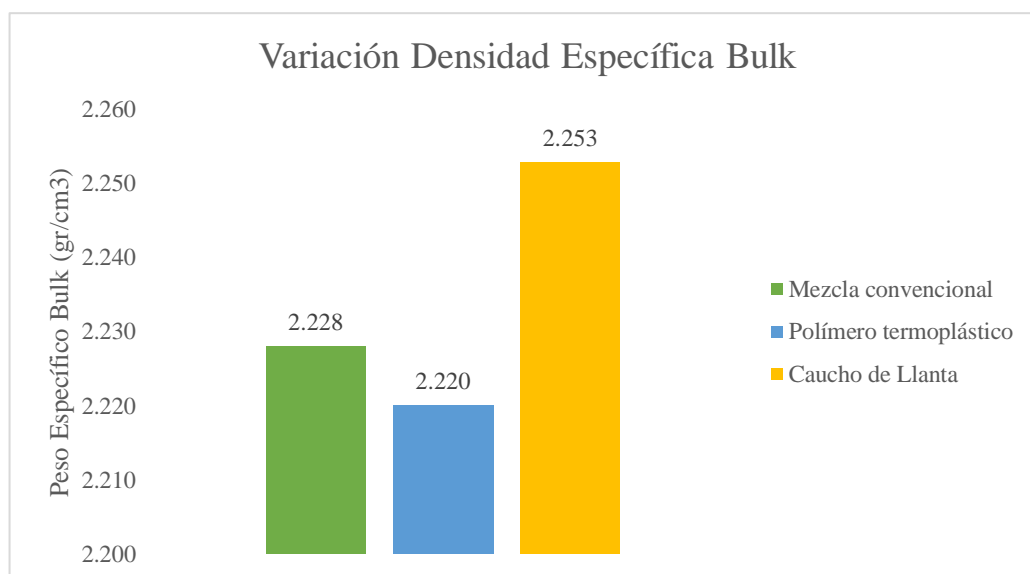
Tipo de mezcla	% óptimo de Asfalto	% óptimo de Modificador	Bulk	Vacíos	Estabilidad	Flujo	VAM	VAF
--	(%)	(%)	(gr/cm ³)	(%)	(lb)	(0,01")	(%)	(%)
Mezcla convencional	6,5	0	2,228	4,560	3053,300	10,860	14,990	69,300
Polímero termoplástico	6,5	6,6	2,220	4,768	3853,78	11,974	15,687	69,597
Caucho de Llanta	6,5	5,7	2,253	4,044	3774,591	14,779	14,432	72,039

Fuente: Karen Nicole Sarabia Lescano

A continuación, se presentan los diagramas de barras para observar la variación de cada una de las propiedades de la mezcla asfáltica.

- **Variación del Peso Específico Bulk**

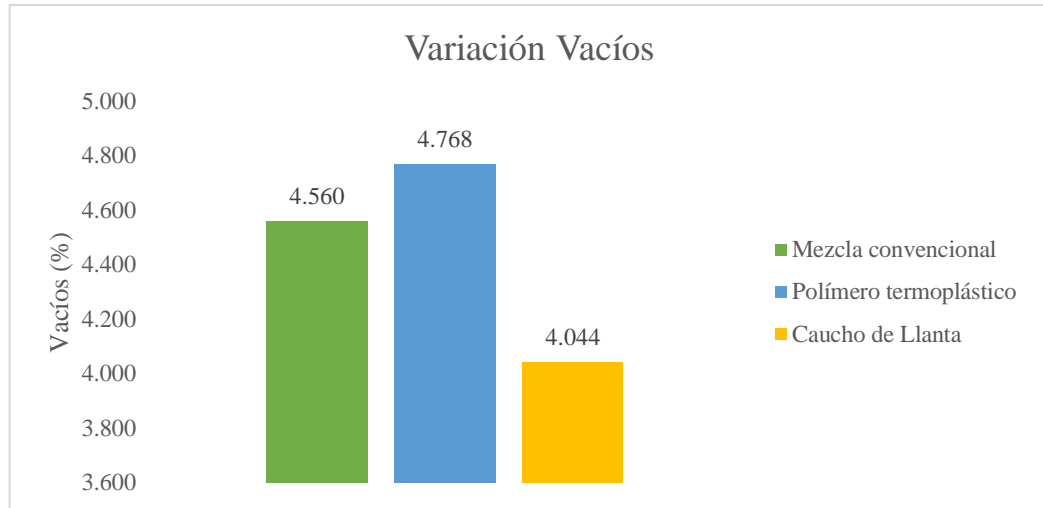
Figura 33 Variación del Peso Específico Bulk.



Interpretación: Al comparar las variaciones en la densidad Bulk, podemos observar que la mezcla modificada con caucho muestra el valor más alto. Esto se debe al aumento en el volumen de las briquetas utilizadas en esta mezcla.

- **Variación de Vacíos en Aire**

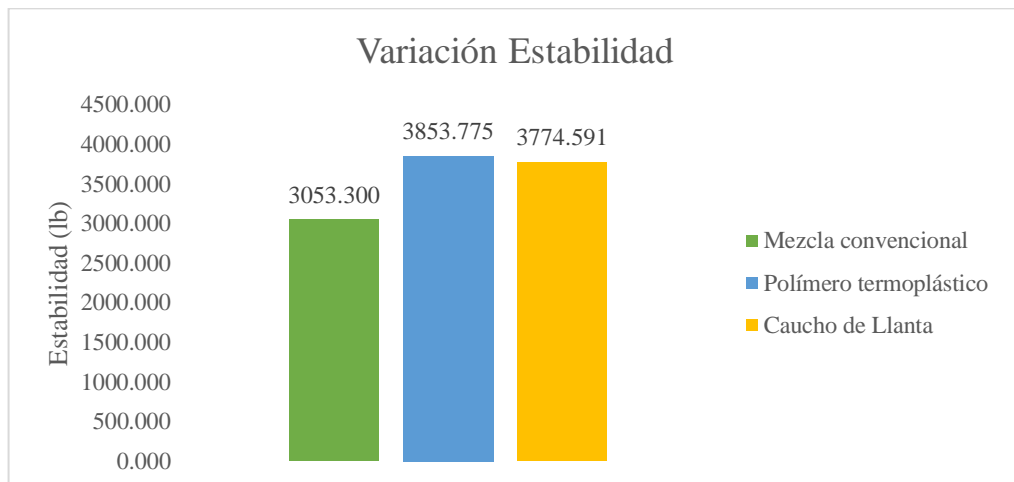
Figura 34 Variación de Vacíos.



Interpretación: Tanto la mezcla asfáltica convencional como la mezcla que ha sido modificada con un polímero termoplástico muestran un aumento en los espacios vacíos. No obstante, es la mezcla que ha sido modificada con caucho de neumático la que presenta el menor incremento en los espacios vacíos.

- **Variación de la Estabilidad**

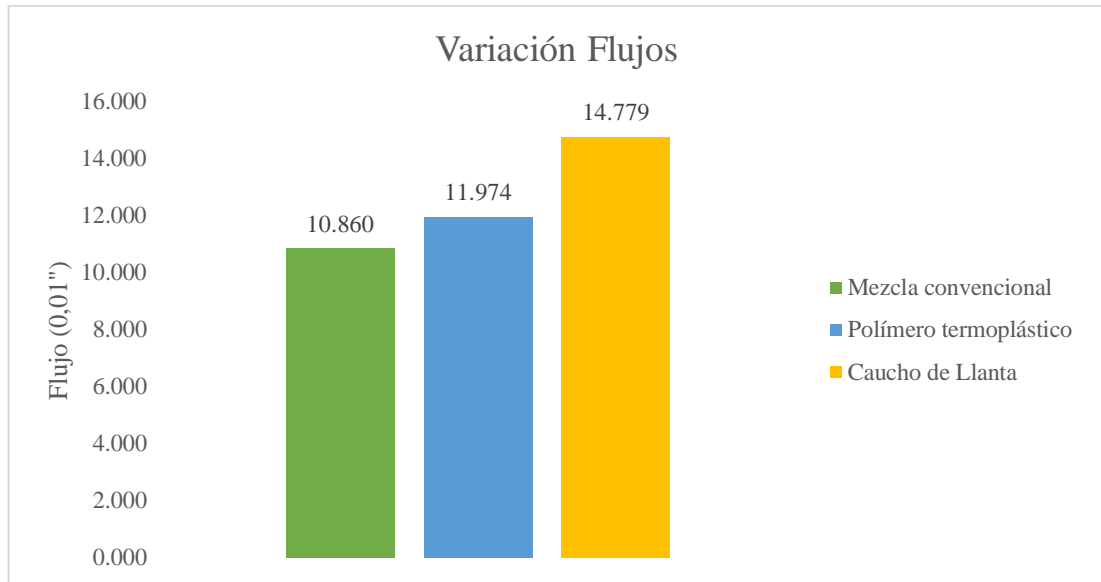
Figura 35 Variación de Estabilidad.



Interpretación: Mediante el diagrama comparativo el mayor incremento de Estabilidad se da en la mezcla modificada con polímero termoplástico.

- **Variación del Flujo**

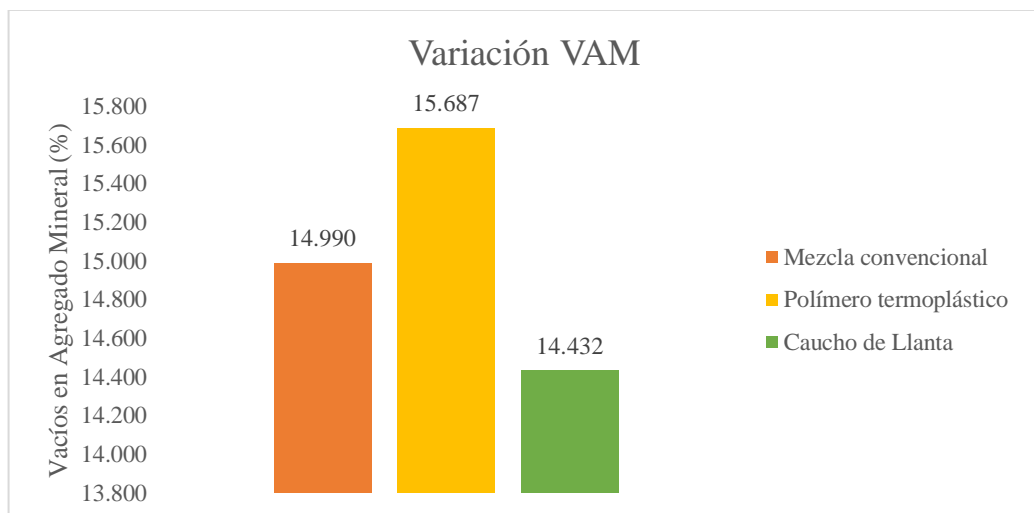
Figura 36 Variación del Flujo.



Interpretación: El incremento de flujo en las mezclas modificada con polímero es mínimo con respecto a la mezcla convencional, pero con respecto a la mezcla modificada con caucho el incremento es bastante mayor.

- **Variación de los Vacíos en Agregado Mineral**

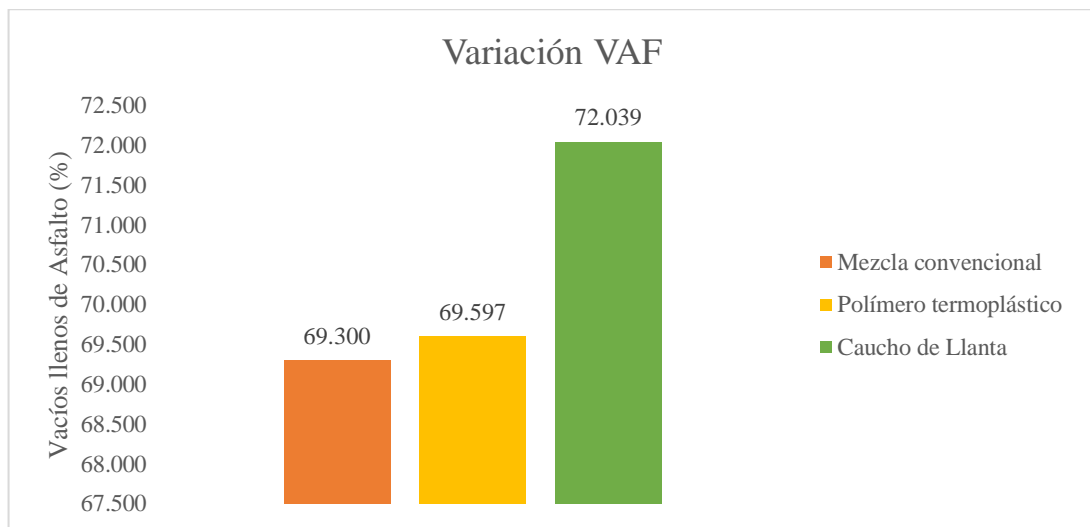
Figura 37 Variación del VAM.



Interpretación: En cuanto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral, se puede observar que solo la mezcla convencional cumple con el mínimo requerido del 15%. Sin embargo, la mezcla modificada con caucho de llanta muestra menos vacíos en el agregado mineral, lo cual es muy favorable para el comportamiento de la mezcla.

- **Variación de los Vacíos Llenos de Asfalto**

Figura 38 Variación del VAF



Interpretación: Gracias a la comparación realizada de la variación del porcentaje de vacíos llenos de asfalto, los tres tipos de mezclas se encuentran dentro del rango de 65% - 75%, teniendo en cuenta que la mezcla convencional representa el valor más bajo de VAF. La mezcla que presenta los mejores resultados es la mezcla modificada con caucho de llanta ya que representa el más alto porcentaje de VAF.

Finalmente, al analizar los datos, podemos observar que la mezcla con caucho de llanta presenta la mayor estabilidad (3774,591 lb) el mayor VAF (72,039%). Esto indica una mayor resistencia y capacidad para soportar cargas. Además, tiene un bajo porcentaje de vacíos (4.044%), lo que implica una mayor densidad. Sin embargo, también muestra el mayor flujo (14,779%), lo que indica una mayor susceptibilidad a la deformación.

La mezcla convencional y la mezcla con polímero termoplástico tienen valores similares en términos de estabilidad, VAM y VAF. Sin embargo, la mezcla con polímero termoplástico tiene un mayor porcentaje de modificador (6,6%), lo que

podría mejorar aún más las propiedades físicas de la mezcla en comparación con la mezcla convencional.

Ahora bien, para establecer si el tipo de modificación de las mezclas de asfalto analizadas es recomendable para una propuesta de mantenimiento en fallas piel de cocodrilo, es importante considerar las propiedades específicas de la mezcla y cómo se relacionan con las necesidades de reparación de las fallas piel de cocodrilo.

Las fallas de piel de cocodrilo son grietas en el pavimento que se asemejan a la textura de la piel de un cocodrilo, y generalmente se deben a fatiga estructural y deformaciones del pavimento. El mantenimiento de estas fallas implica reparar y fortalecer la zona afectada para prevenir futuros deterioros.

Al analizar los datos anteriores sobre los diferentes tipos de mezcla de asfalto, podemos identificar algunas consideraciones relevantes:

- Mezcla convencional: Esta mezcla no contiene ningún modificador. Si las fallas piel de cocodrilo son el resultado de fatiga estructural y deformaciones, es posible que una mezcla convencional no sea la opción más adecuada para el mantenimiento de estas fallas, ya que no se incluyen aditivos específicos para mejorar la resistencia y durabilidad del pavimento.
- Polímero termoplástico: Esta mezcla incluye un modificador de 6,6%. Los polímeros termoplásticos pueden mejorar la estabilidad y la resistencia de la mezcla de asfalto. Si las fallas de piel de cocodrilo están relacionadas con la falta de estabilidad del pavimento, la inclusión de polímeros termoplásticos podría ser beneficiosa para fortalecer la zona afectada y prevenir futuros daños.
- Caucho de llanta: Esta mezcla incluye un modificador de 5,7%. El caucho de llanta reciclado puede proporcionar propiedades mejoradas de resistencia y durabilidad a la mezcla de asfalto. Si las fallas piel de cocodrilo están relacionadas con la falta de resistencia y la presencia de grietas, la inclusión de caucho de llanta podría ser recomendable para mejorar la calidad del pavimento en estas áreas.

En general, la modificación de las mezclas de asfalto con polímeros termoplásticos o caucho de llanta reciclada puede ser beneficiosa para mejorar la resistencia y

durabilidad del pavimento. Sin embargo, es importante considerar otros factores, como la magnitud y la extensión de las fallas piel de cocodrilo, las condiciones ambientales, el presupuesto y las restricciones específicas del proyecto.

3.2 Verificación de hipótesis

Al haber analizado el impacto de las partículas de polímero y caucho en las mezclas asfálticas, se comprobó la veracidad de la hipótesis planteada. Demostrando que la incorporación de estos polímeros utilizados como reemplazo parcial del agregado 3/8", permite mejorar varias de las propiedades mecánicas planteadas por los criterios de diseño Marshall, en comparación con la mezcla asfáltica convencional. Específicamente, se observó una mejora significativa en la mezcla modificada con caucho de llanta aumentando la resistencia y la capacidad de carga, se determinó que esta mezcla presenta un mejor desempeño cuando se dosifica con un 6.5% de contenido de asfalto y un 5.7 % de caucho de llanta, en comparación con la mezcla modificada con polímero termoplástico.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se analizaron las propiedades mecánicas del asfalto modificado con polímeros termoplásticos y caucho de llanta reciclado en comparación con el asfalto tradicional, mostrando resultados prometedores. Los resultados obtenidos demostraron que la incorporación de estos materiales en el asfalto proporciona mejoras significativas en términos de resistencia, durabilidad y flexibilidad del pavimento. El asfalto modificado con caucho de llanta exhibe una mejora en las propiedades mecánicas en comparación a la mezcla asfáltica convencional, lo que contribuye a una vida útil prolongada de aproximadamente 15 a 25 años en comparación con el asfalto convencional, que tiene una duración de 10 a 20 años dependiendo de diferentes factores, como el tipo de tráfico al que está expuesto, el clima, el mantenimiento adecuado, entre otros. Además, el uso de materiales reciclados en el asfalto también tiene beneficios ambientales al promover la reutilización de llantas desechadas y reducir la dependencia de los recursos naturales.
- Se elaboró briquetas asfálticas convencionales de acuerdo al criterio Marshall, con distintos porcentajes de asfalto: 5.5%, 6%, 6.5% y 7% , por medio de este proceso se determinó el porcentaje óptimo de asfalto, que fue del 6.5%. Posteriormente, con este resultado se elaboró tres briquetas de asfalto modificado con polímero termoplástico en porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20% y tres briquetas con porcentajes de 2%, 3%, 4% y 5% de caucho de llanta como reemplazo parcial del agregado 3/8" teniendo un total de 36 briquetas para el desarrollo de esta investigación. Estas muestras de asfalto presentaron dimensiones estandarizadas, con un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 2.5 pulgadas, conforme a lo establecido en la norma ASTM D 1559. Es importante tener en cuenta que las dimensiones de las briquetas pueden variar dependiendo a las especificaciones y a la compactación aplicada en cada proyecto. Además de determinar el porcentaje óptimo de asfalto, también se estableció el porcentaje óptimo de polímero termoplástico (P.E), que fue del 6.6%, y para la mezcla con caucho de llanta (GCR), fue del 5.7%.

- Se identificó las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas aplicando ensayos de Densidad Bulk, estabilidad y flujo y el ensayo de gravedad específica teórica máxima (RICE), dando como resultado los siguientes valores: Briquetas convencionales: estabilidad de 3053.3 lb, flujo de 10.86 (0.01 in) de flujo, porcentaje de vacíos con aire 4.56%, vacíos en el agregado mineral 14.9%, y en el porcentaje de vacíos llenos de asfalto 69.30%. Briquetas con polímero termoplástico: estabilidad de 3853.78 lb, flujo de 11,974 (0.01 in) de flujo, porcentaje de vacíos con aire 4.768%, Vacíos en el agregado mineral 15.69%, porcentaje de vacíos llenos de asfalto 69,6%. Briquetas con caucho de llanta: estabilidad de 3774.6 lb, flujo de 14.8 (0.01 in) de flujo, Porcentaje de vacíos con aire 4.04%, Vacíos en el agregado mineral 14.78%, porcentaje de vacíos llenos de asfalto 72.04%.
- Se comparó el desempeño de las mezclas asfálticas en base a los datos obtenidos mostrándonos que la mezcla que presenta mejores resultados es la modificada con caucho de llanta. Esta modificación ha demostrado mejoras significativas en varios aspectos clave que contribuyen a la calidad y durabilidad del pavimento. En primer lugar, se observó una mejora de 1.12% en la densidad bulk lo que garantiza una mayor resistencia, además, se registró una reducción del 11.33% en el porcentaje de vacíos, en cuanto a la estabilidad de la mezcla, se observó una mejora del 23.3% representando una mayor capacidad de la mezcla para resistir deformaciones, en términos de flujo se observa una mejora del 36.05% lo que indica una mayor facilidad de compactación y una distribución más uniforme de los materiales, adicionalmente, se apreció una reducción de 3.72% en el valor del VAM, lo que indica una menor susceptibilidad a la formación de grietas en la mezcla y finalmente, el valor del VAF mostró una mejora de aproximadamente 3.9% indicando una mayor resistencia a la deformación permanente de la mezcla, lo cual beneficia a la durabilidad y estabilidad del pavimento.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda mantener la temperatura controlada durante la elaboración de las briquetas asfálticas tradicionales y modificadas con polímero termoplástico. Se debe evitar temperaturas por debajo de 120 °C para obtener resultados confiables y favorables. Esto se debe a que el polímero, al estar expuesto a la temperatura ambiente, tiende a enfriarse rápidamente.
- Es recomendable llevar a cabo una selección y dosificación adecuada de materiales pétreos, así como también de los agregados adicionales al elaborar las briquetas, asegurándose de que cumplan con los estándares de la norma.
- Es recomendable emplear materiales disponibles localmente, ya que estos recursos naturales son abundantes en el país y representan una alternativa sostenible y económicamente viable para diferentes proyectos de pavimentación.
- Se recomienda utilizar los instrumentos e implementos necesarios para poder realizar la mezcla modificada, ya que los materiales con los que trabajamos son tóxicos al contacto con el calor.
- La modificación de asfalto con polímero termoplástico o caucho de llanta puede ser una opción a considerar para el mantenimiento de fallas de piel de cocodrilo. Se recomienda evaluar cuidadosamente las características específicas de las fallas, los beneficios y desventajas de las modificaciones para tomar una decisión informada y apropiada para el proyecto de mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. S. Figueroa Infante and E. Fonseca Santanilla, “Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá,” *Épsilon*, vol. 1, no. 24, pp. 89–121, Oct. 2015.
- [2] Rondón Quintana Hugo Alexander, Moreno Anselmi Luís Ángel, Rodríguez Urrego Daniella, and Lee Mariño Jennifer, “Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos.,” *Revista Ingeniería*, vol. 14.
- [3] Figueroa Infante Ana Sofía, Reyes Lizcano Fredy Alberto, Hernández Barrera Diana, Jiménez Christian, and Bohórquez Natalia, “Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente.,” *Revista Ingeniería e investigación*, vol. 27, pp. 5–15, Dec. 2007.
- [4] A. Felipe and V. Navarro, “Resultados de investigaciones acerca del comportamiento físico mecánica y geológico de las mezclas mdc-19 modificadas con polipropileno reciclado,” *REVISTA FORMACIÓN ESTRATÉGICA*, 2020, [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002->
- [5] B. Kaa, R. Mogoruzza, and I. Anguizola, “ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS EN PANAMÁ,” Jun. 2016.
- [6] R. Villegas, J. Aguiar, and L. Loria, “Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho,” 2018.
- [7] C. V. Palma, J. Carlos, O. Cisneros, F. Ávalos Belmonte, and A. C. Facio, “Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos,” 2016.
- [8] W. A. Castro López, H. A. Rondón Quintana, and J. C. Barrero Calixto, “Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD,” *Revista Ingeniería*, vol. 21, pp. 7–18, oct. 2015.
- [9] Arciniegas Benítez Danny Damián and Ríos Intriago Efraín Leoncio, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DEFORMACIÓN Y RESISTENCIA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON TOBA VOLCÁNICA Y MEZCLA

- ASFÁLTICA TRADICIONAL.,” Apr. 2021. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0003-4377-6987>
- [10] Jaramillo Soto Washington Patricio and Places Jácome Jordy Alexis, “Análisis comparativo del desempeño de mezclas asfálticas en frío con material reciclado (RAP) utilizando emulsión asfáltica y emulsión asfáltica modificada con aceite de motor desechado de vehículos.,” Quito, 2022.
- [11] López Caiza Danilo Ramiro, “MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (MEZCLA ASFÁLTICA),” Quito, Aug. 2017.
- [12] Alfonso. Montejo Fonseca, *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia, 1998.
- [13] Campaña Klever, Galeas Salome, and Guerrero Víctor, “Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores,” *Revista Politécnica* , vol. 36, Sep. 2015.
- [14] López Caiza Danilo Ramiro, “MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (MEZCLA ASFÁLTICA),” Aug. 2017.
- [15] “Propiedades y estudios de los materiales asfálticos y pétreos”.
- [16] Salazar Delgado Jorge, “Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano.,” *Dialnet*, vol. 1, Sep. 2011.
- [17] Instituto Ecuatoriano de Normalización and Norma Técnica Ecuatoriana, “PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD). REQUISITOS.,” Quito, 2010.
- [18] H. A. Rondón Quintana and F. A. Reyes Lizcano, “Pavimentos Materiales, construcción y diseño,” 2015.

- [19] Páez García Antonio Israel and Valarezo Vargas Alberto Enrique, “Diseño de mezclas asfálticas en caliente con adición de caucho pulverizado por vía húmeda,” Quito, 2015.
- [20] Ing. Augusto Jugo B, “PROPUESTA DE NORMA PARA ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA ALMACENABLE, PARA BACHEOS Y REPARACIONES DE EMERGENCIA,” 2013.
- [21] López Sabogal Juan Carlos, “COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS PROVENIENTES DE BOTELLAS PET RECICLADAS.,” Bogotá, Dec. 2020.
- [22] S. Chávez- Romero, Sh. Aulestia-Viscarra, W. Cando, J. Bucheli, and L. Fernández, “Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente modificada por vía seca con tapas plásticas de polipropileno,” *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, vol. 42, no. 3, pp. 126–134, Aug. 2019, doi: 10.22209/rt.v42n3a04.
- [23] A. F. Mosos Aragón, C. A. Mosos Guzmán, and J. H. Gómez Martínez, “Estudio de asfaltos y mezclas asfálticas modificadas con aceite residual de motor,” Bogotá, 2018.
- [24] Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización, *Productos derivados del petróleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspección. NTE INEN 2680:2013*. Quito - Ecuador, 2013.
- [25] Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, *MOP - 001 -F 2002. Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Quito - Ecuador, 2002.
- [26] CUTIPA CHAMBI JOEL JENS, “PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS ASTM D 5821”.
- [27] AASHTO, *Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing*. 2013.







- [28] Norma Técnica Ecuatoriana, P. Revisión, and P. Edición, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5 mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.,” Quito, Jun. 2011.
- [29] Norma Técnica Ecuatoriana and P. Edición, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO,” Quito, Oct. 2010.
- [30] A. J. Vargas Guevara, “Efecto de adición de partículas de plástico reciclado en las propiedades físico-mecánicas de pavimento,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2022.
- [31] ASTM C128-12, “Método de prueba estándar para Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y Absorción del agregado fino.”
- [32] P. G. Anguas, H. Delgado, A. Carlos, and D. S. Sandoval, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE PARA COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS,” México, 2005.
- [33] ASTM D 6926-10, “Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall”, doi: 10.1520/D6926-10.
- [34] Asphalt Institute., *Asphalt mix design methods*.
- [35] H. A. Rondón Quintana, Reyes Lizcano Fredy Alberto, A. S. Figueroa Infante, Rodríguez Rincón Edgar, C. M. Real Triana, and T. A. Montealegre Elizalde, “Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia,” 2007.
- [36] M. E. Maila Paucar, “Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA),” Universidad Central del Ecuador, Quito - Ecuador, 2013.
- [37] J. C. Aimacaña Iza, “Estudio comparativo del comportamiento a compresión de pavimentos asfálticos a base de polímeros y pavimentos flexibles tradicionales,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2017.

- [38] D. R. López Caiza and N. E. Álvarez Sánchez, “Mejoramiento de la carpeta asfáltica a base de escoria siderúrgica para pavimentos flexibles (mezcla asfáltica),” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito - Ecuador, 2017.
- [39] Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización, *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. NTE INEN 696:2011*. Quito - Ecuador, 2011.
- [40] Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización, *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción árido fino. NTE INEN 856:2010*. Quito - Ecuador, 2010.
- [41] Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización, *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. NTE INEN 857:2010*. Quito - Ecuador, 2010.
- [42] Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización, *Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de Los Ángeles. NTE INEN 860:2011*. Quito - Ecuador, 2011.
- [43] ASTM D 5821 and The American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.”
- [44] ASTM D 3625, “Standard Practice for Effect of Water on Bituminous Coated Aggregate Using Boiling Water.”
- [45] NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, “MATERIALES BITUMINOSOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD POR EL MÉTODO DEL PICNÓMETRO,” 2013. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/mercury/faq.htm>.
- [46] ASTM D 2726 and The American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures 1.”

- [47] ASTM D 6927 and The American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures”.
- [48] ASTM D 2041 and The American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.” [Online]. Available: www.astm.org,

ANEXOS

A1. Anexos fotográficos

<p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</p> <p style="text-align: center;">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</p> <p style="text-align: center;">INGENIERÍA CIVIL</p>	
  <p style="text-align: center;">PLANTA DE ASFALTO Y MATERIAL PÉTREO</p>	
	
<p>Descripción: Planta de Asfalto JEAL Construcciones.</p>	<p>Descripción: Agregado Fino – Arena de Mulalo</p>
	
<p>Descripción: Agregado grueso (3/4")</p>	<p>Descripción: Agregado triturado (chispa 3/8")</p>

	
<p>Descripción: Almacenamiento de AC-20 (Asfalto)</p>	<p>Descripción: Producción de Asfalto</p>
<p>ENSAYO DE GRANULOMETRÍA</p>	
	
<p>Descripción: Elaboración de la granulometría por agregado.</p>	<p>Descripción: Tamices en el Pedestal Vibratorio.</p>
<p>DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS ÁRIDOS</p>	
<p>AGREGADO FINO</p>	
	
<p>Descripción: Recipiente más el suelo seco</p>	<p>Descripción: Picnómetro, agua y muestra de suelo</p>



Descripción: Temperatura de la mezcla de suelo y agua



Descripción: Toma de pesos del picnómetro con agua y el suelo



Descripción: Peso muestra después de 24 horas en aire

AGREGADO GRUESO



Descripción: Peso de la canastilla vacía al aire



Descripción: Toma de temperatura de suelo sumergido.



Descripción: Muestra del agregado grueso colocada en el horno

ELABORACIÓN DE BRIQUETAS



Descripción: Calentado de los materiales pétreos y asfalto a una temperatura de 140 °C.







Descripción: Pesaje real de los agregados.



Descripción: Mezcla de materiales pétreos con el asfalto.



Descripción: Tomada de temperatura de la mezcla.

	
<p>Descripción: Moldeo de la briqueta.</p>	<p>Descripción: Briquetas ya compactadas</p>
	
<p>Descripción: Desmolde de las briquetas.</p>	<p>Descripción: Resultado final de la elaboración de las briquetas .</p>
<p align="center">DETERMINACIÓN PESO ESPECÍFICO “BULK”</p>	
	
<p>Descripción: Briquetas elaboradas.</p>	<p>Descripción: Peso en gramos seco en aire.</p>

	
<p>Descripción: Peso en gramos en agua de las briquetas</p>	<p>Descripción: Saturación de la briqueta durante 5 min para tomar el peso SSS.</p>
<p>DISEÑO MARSHALL</p>	
	
<p>Descripción: Baño maría a 60°C para briquetas previo a la realización del ensayo Marshall.</p>	<p>Descripción: Ensayo de estabilidad y flujo Marshall en las briquetas convencionales y modificadas</p>
<p>DETERMINACIÓN PESO ESPECÍFICO MÉTODO RICE</p>	
	
<p>Descripción: Preparación de la mezcla</p>	<p>Descripción: Peso del recipiente</p>



Descripción: Expulsión de aire manual del agregado



Descripción: Succión de aire



Descripción: Secado y toma de peso final

A2. Factor de Corrección de la Estabilidad Marshall

Tabla 53 Factor de Corrección de la Estabilidad Marshall de acuerdo al Volumen de la probeta (cm³)

Volumen de probeta (cm ³)		Espesor aprox. (mm)	Factor de corrección de Estabilidad
200	213	25,40	5,56
214	225	27,00	5,00
226	237	28,60	4,55
238	250	30,20	4,17
251	264	31,80	3,85
265	276	33,30	3,57
277	289	34,90	3,33
290	301	36,50	3,03
302	316	38,10	2,78
317	328	39,70	2,50
329	340	41,30	2,27
341	353	42,90	2,08
354	367	44,40	1,92
368	379	46,00	1,79
380	392	47,60	1,67
393	405	49,20	1,56
406	420	50,80	1,47
421	431	52,40	1,39
432	443	54,00	1,32
444	456	55,60	1,25
457	470	57,20	1,19
471	482	58,70	1,14
483	495	60,30	1,09
496	508	61,90	1,04
509	522	63,50	1,00
523	535	65,10	0,96
536	546	66,70	0,93
547	559	68,30	0,89
560	573	69,80	0,86
574	585	71,40	0,83
586	598	73,00	0,81
599	610	74,60	0,78
611	625	76,20	0,76

Fuente: INV-E-748-07 Resistencia de Mezclas Asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.

A3. Formato de Informe de prueba de laboratorio para el diseño del Método Marshall

Figura 39 Informe de prueba que muestra datos típicos de laboratorio para el diseño mediante el Método Marshall.

% AC by wt. of mix, Spec. No.	Spec. Height in. (mm)	Mass, grams										Stability, lbs. (N)		Flow 0.01 in. (0.25 mm)
		In Air	In Water	Sat. Surface Dry In Air	Bulk Volume, cc	Bulk S.G. Specimen	Max. S.G. (Loose Mix)	Unit Weight, pcf (Mg/m ³)	% Air Voids	%VMA	%VFA	Measured	Adjusted	
3.5 - A		1240.6	726.4	1246.3	519.9	2.386		148.9				2440	2440	8
3.5 - B		1238.7	723.3	1242.6	519.3	2.385		148.8				2420	2420	7
3.5 - C		1240.1	724.1	1245.9	521.8	2.377		148.3				2510	2510	6
Average						2.383	2.570	148.7	7.3	14.0	48.0		2457	7
4.0 - A		1244.3	727.2	1246.6	519.4	2.396		149.5				2180	2180	7
4.0 - B		1244.6	727.0	1247.6	520.6	2.391		149.2				2260	2260	8
4.0 - C		1242.6	727.9	1244.0	516.1	2.408		150.2				2310	2310	8
Average						2.398	2.550	149.6	6.0	13.9	57.1		2250	7.7
4.5 - A		1249.3	735.8	1250.2	514.4	2.429		151.2				2420	2420	9
4.5 - B		1250.8	728.1	1251.6	523.5	2.389		149.1				2310	2314	9
4.5 - C		1251.6	735.3	1253.1	517.8	2.417		150.8				2340	2340	9
Average						2.412	2.531	150.5	4.7	13.9	66.1		2358	9
5.0 - A		1256.7	739.8	1257.6	517.8	2.427		151.4				2290	2290	10
5.0 - B		1258.7	742.7	1259.3	516.6	2.437		152.0				2190	2190	10
5.0 - C		1258.4	737.5	1259.1	521.6	2.418		150.5				2240	2240	9
Average						2.425	2.511	151.3	3.4	13.8	75.2		2240	9.7
5.5 - A		1263.8	742.6	1264.3	521.7	2.422		151.2				2210	2210	11
5.5 - B		1258.8	741.4	1259.4	518.0	2.430		151.6				2300	2300	10
5.5 - C			742.5	1259.5	517.0	2.435		152.0				2210	2240	10
Average						2.429	2.493	151.6	2.5	14.1	82.1		2240	10.3

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto (7ma Edición)