

INGENIERÍA CIVIL

Tesis previa a la obtención de título de

Ingeniero Civil

AUTOR: Madeline Jamiley Castillo Ambuludi

Bryan Fabricio Abrajan Cóndor

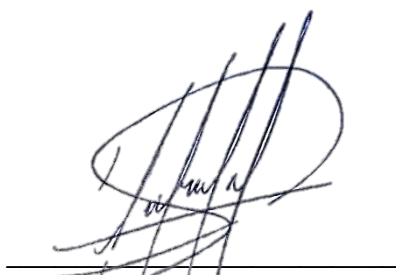
TUTOR: Ing. Franco Hernán Rojas Rúales, MSc

Análisis comparativo de mezclas asfálticas en frío,
diseñadas con emulsión asfáltica no polimerizadas y
polimerizadas con SBS y SBR

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Madeline Jamiley Castillo Ambuludi y Bryan Fabricio Abrajan Cóndor declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en Internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, Reglamento y Leyes.



FIRMA AUTOR

Madeline Jamiley Castillo Ambuludi

CC. 210095439-1

madejamicastillo2001@gmail.com



FIRMA AUTOR

Bryan Fabricio Abrajan Cóndor

CC. 172246579-4

bryanabrajan1026dominick@gmail.com

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Franco Hernán Rojas Ruales, certifico que conozco a los autores del presente trabajo de titulación denominado “Análisis comparativo de mezclas asfálticas en frío, diseñadas con emulsión asfáltica no polimerizadas y polimerizadas con SBS y SBR”, Madeline Jamiley Castillo Ambuludi y Bryan Fabricio Abrajan Cóndor siendo ellos responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Franco Hernán Rojas Ruales

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, cuya guía y fortaleza me sostuvieron en cada paso de este camino. Su luz fue mi esperanza y su amor, mi fuerza.

A mis padres, por ser el pilar que me sostuvo. Gracias por su inspiración constante, por su amor incondicional y por los innumerables sacrificios que hicieron posibles mis sueños. Este logro también les pertenece: es el reflejo de todo lo que me han enseñado.

A mis hermanas, por ser mi refugio y mi voz de aliento cuando más lo necesité a mi cuñado Javier, quien fue la chispa que encendió mi vocación. Gracias por impulsarme a seguir esta carrera tan maravillosa y por ser mi guía en este camino, incluso en la distancia. Aunque no pudo estar físicamente presente para ver esta meta cumplida, su influencia y apoyo han estado conmigo en cada paso.

Esta dedicatoria es también para él, con profunda gratitud y cariño y como no a mis hermosos sobrinos, por la alegría y el cariño con que iluminan mi vida, recordándome siempre el poder de la familia.

A todos ustedes, mi red de amor, paciencia y fuerza: cada palabra escrita en esta tesis lleva su huella. Este logro no es solo mío, es nuestro. Es la prueba de lo que juntos somos capaces de alcanzar.

Castillo Madeline

A ti mi Dios, fuente de toda sabiduría y fortaleza, por darme claridad en la incertidumbre, levantarme en las caídas y guiarme con tu luz en este camino lleno de desafíos, por darme la oportunidad de crecer y cumplir este sueño. Sin ti, nada sería posible.

A mis padres, quien con su ejemplo de esfuerzo y perseverancia y amor me enseñaron que los sueños se construyen con trabajo, disciplina y dedicación. Gracias por cada consejo, y por impulsarme a ser la mejor versión de mí mismo.

A mi hermano, Jhonny mi compañero de vida y de batallas, con quien compartí risas, aprendizajes y desafíos, gracias por tu apoyo incondicional, por creer en mi aun cuando yo dudaba de mí mismo, Sin ti, el camino habría sido más difícil.

A mi esposa e hijas J.D.B.M, mi mayor inspiración y razón de vida. Ustedes son la luz en mis días más oscuros y la fuerza que me impulsa a superar cualquier obstáculo. Cada esfuerzo y sacrificio llevan su nombre y con fe, esfuerzo y determinación, todo lo es posible.

Abrajan Bryan

AGRADECIMIENTO

Primeramente, queremos agradecer a Dios por habernos dado todas las fuerzas y obstáculos que hemos atravesado ya que con esas pruebas han sido parte fundamental de este proyecto de tesis y de nuestra formación como profesionales.

Agradecemos a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional y motivación constante han sido nuestra mayor fuente de fuerza. Gracias por creer en nosotros y por ser el pilar sobre el que hemos construido nuestros logros.

También agradecer sinceramente a nuestros tutores y amigos, quienes con su compañía y palabras de aliento hicieron de este trayecto una experiencia enriquecedora. Su solidaridad y consejos fueron invaluable.

De igual modo, nuestro reconocimiento al apoyo del personal técnico de la empresa EMULDEC quienes, con su experiencia, han sabido orientarnos profesionalmente en cada etapa de este trabajo y, lograr los resultados esperados.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA	3
ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD	4
APROBACIÓN DEL TUTOR	5
DEDICATORIA	6
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE TABLAS	14
INDICE DE GRAFICOS	16
ÍNDICE DE ANEXOS	16
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN.	14
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
JUSTIFICACIÓN	16
JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	16
JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	17

JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	17
HIPÓTESIS	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
ESTADO DEL ARTE:.....	20
MARCO TEÓRICO.....	20
ANTECEDENTES	20
EMULSIONES ASFÁLTICAS	21
POLÍMEROS MODIFICADORES: SBS Y SBR	22
MARCO CONCEPTUAL.....	22
MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO:	22
EMULSIÓN ASFÁLTICA:	22
POLÍMERO MODIFICADOR:	22
MÉTODO MARSHALL MODIFICADO:	22
RESISTENCIA A LA HUMEDAD:.....	23
MARCO LEGAL	23
NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE) INEN 22002-MEZCLAS ASFÁLTICAS:	23

NORMA ASTM D6373 – STANDARD SPECIFICATION FOR PERFORMANCE GRADED ASPHALT BINDER:.....	23
MS-19 MANUAL BÁSICO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS:.....	23
MOP-001-F 2002:.....	24
METODOLOGÍA	24
DISEÑO EXPERIMENTAL	24
• Emulsión de curado lento no polimerizada:.....	24
• Emulsión polimerizada con SBS:	24
• Emulsión polimerizada con SBR:.....	24
PRUEBAS DE LABORATORIO	25
Prueba de Estabilidad y Flujo Marshall:	25
Prueba de Resistencia a la Humedad (ensayo de tracción indirecta):	25
ANÁLISIS DE DATOS.....	25
CAPÍTULO I.....	26
CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS SELECCIONADOS	26
ANTECEDENTES	26
PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS.....	27

METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN.....	27
PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	27
Ensayos realizados:.....	28
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136):	28
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN (ASTM C127 y C128):	29
CONTENIDO DE FINOS (MATERIAL PASANTE DEL TAMIZ N° 200):.....	29
CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	29
CUMPLIMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA OBJETIVO:	29
COMPATIBILIDAD ENTRE EL AGREGADO Y LA EMULSIÓN:	31
CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS:.....	31
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
PRIMERAS CONCLUSIONES	12
CAPÍTULO II	13
EMULSIÓN ASFÁLTICA	13
INTRODUCCIÓN	13
ELABORACIÓN DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA	14
CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	14

Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros	15
Objetivo de la Elaboración.....	15
Estireno-Butadieno-Estireno (SBS):	16
Estireno-Butadieno-Rubber (SBR):	17
ENSAYOS DE LABORATORIO.....	18
ENSAYOS DE LABORATORIO.....	22
CAPÍTULO 3	24
ELABORACIÓN Y ENSAYO DE BRIQUETAS ASFÁLTICAS EN FRÍO MEDIANTE MARTILLO CAMPACTADOR MARSHAL AUTOMÁTICO.....	24
INTRODUCCIÓN	24
PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO.....	24
SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN DE MATERIALES.....	24
ELABORACIÓN DE BRIQUETAS.....	25
EQUIPAMIENTO EMPLEADO	25
DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE AGREGADOS:.....	25
FUNDAMENTO TÉCNICO DEL PROCEDIMIENTO.....	26
PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN	27

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EMULSIONES MODIFICADAS Y NO MODIFICADAS	31
VTM (Vacíos Totales en la Mezcla):	31
VMA (Vacíos en el Agregado Mineral):	31
VFA (Vacíos Llenos con Asfalto):	31
CAPÍTULO 4:	35
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO	35
INTRODUCCIÓN	35
PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA LA COMPARACIÓN	35
Flujo (0.01 mm):	36
GLOSARIO	42
NORMAS UTILIZADAS:	43
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	47

ÍNDICE DE TABLAS

INDICE DE TABLAS	14
------------------------	----

TABLA 3: Elaboración propia a partir de datos técnicos proporcionados por el laboratorio de EMULDEC Cía. Ltda. (2024).	
TABLA 4: Elaborado por el autor con base en normas ASTM (2023) y especificaciones técnicas del MS-19 (Asphalt Institute, 2009).	
TABLA 5: Cantidad de agregados para la mezcla.....	
TABLA 6: Comparación de propiedades reológicas entre emulsiones.....	
TABLA 7: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
TABLA 8: Comparación de Resultados de Briquetas con Mezclas Óptimas	
TABLA 9: Resultados obtenidos del ensayo de Abrasión de los Ángeles.....	
TABLA 10: Comparación de resultados-Método Marshal	
REFERENCIAS:.....	44
APÉNDICE A. Fichas técnicas de materiales utilizados	
APÉNDICE B. Normas técnicas utilizadas	
Normas utilizadas:.....	43
APÉNDICE C. Resultados completos de laboratorio	
APÉNDICE E. Cálculos realizados.....	
APÉNDICE F. Curvas granulométricas y combinaciones	

INDICE DE GRAFICOS

GRAFICO 1.	Resultados del Análisis Granulométrico	
------------	--	--

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS 1.	SRI; HOLCIN S.A 1.....	47
ANEXOS 2.	FAJA DE TAMIZAJE.....	47
ANEXOS 3.	AGREGADOS SUMERGIDOS 24 H EN AGUA.....	48

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad comparar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en frío elaboradas con emulsiones asfálticas no polimerizadas y emulsiones modificadas con polímeros SBS y SBR. Para ello, se emplearon agregados seleccionados de la cantera HOLCIM (Pífo), los cuales fueron previamente caracterizados según normativas vigentes (ASTM C136, C131, C117). Se elaboraron briquetas mediante compactación Marshall automática, utilizando diferentes porcentajes de emulsión y contenido de agua, hasta determinar la dosificación óptima (6 % de emulsión y 5 % de agua).

Los ensayos Marshall permitieron evaluar parámetros como estabilidad, flujo, vacíos totales (VTM), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA) y el índice de resistencia a la humedad (TSR). Los resultados demostraron que las mezclas con emulsiones polimerizadas presentaron una mayor estabilidad Marshall (+20 %), menor flujo, mejores relaciones volumétricas y una resistencia a la humedad superior al 80 %, cumpliendo con los criterios establecidos por la norma AASHTO T283.

Se concluye que el uso de emulsiones modificadas con SBS/SBR mejora significativamente la resistencia estructural, durabilidad y desempeño de las mezclas en frío, siendo una alternativa viable y sostenible para la rehabilitación vial en zonas de tráfico medio y alto, especialmente en condiciones climáticas variables.

Palabras clave: emulsión asfáltica, mezclas en frío, polímeros SBS/SBR, estabilidad Marshall, TSR, pavimentación vial.

ABSTRACT

This thesis aims to compare the mechanical performance of cold asphalt mixtures made with non-polymerized emulsions and emulsions modified with SBS and SBR polymers. Aggregates from the HOLCIM quarry in Pifo were selected and characterized according to current standards (ASTM C136, C131, C117). Briquettes were prepared using an automatic Marshall compactor with varying emulsion and water contents until the optimal dosage was determined (6 % emulsion and 5 % water).

Marshall tests were conducted to evaluate stability, flow, voids in total mix (VTM), voids in mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA), and the tensile strength ratio (TSR). Results showed that mixtures with polymer-modified emulsions achieved higher Marshall stability (over 20 %), reduced flow, improved volumetric properties, and a TSR above 80 %, meeting the AASHTO T283 requirements.

It is concluded that emulsions modified with SBS and SBR significantly improve the structural strength, durability, and long-term performance of cold asphalt mixtures, offering a sustainable and technically sound solution for road rehabilitation projects under variable traffic and environmental conditions.

Términos relevantes: Diseño de mezclas con polímeros SBS y SBR / Propiedades mecánicas: resistencia, deformación y humedad / Comparación de emulsiones polimerizadas y no polimerizadas / Infraestructura vial sostenible en Ecuador.

INTRODUCCIÓN.

Las carreteras constituyen un elemento esencial para el progreso de una nación y para el fortalecimiento de la calidad de vida de su población. Representan un reflejo del nivel de desarrollo alcanzado por un país, así como de las condiciones de vida de sus habitantes. En el caso de Ecuador, se observa una demanda creciente por vías que presenten mayor durabilidad, resulten más rentables y favorezcan la protección ambiental. Este fenómeno se relaciona con el incremento de la población, de la producción interna y del parque automotor en circulación (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020). Ante este escenario, se torna imprescindible la incorporación de propuestas innovadoras que permitan la construcción de carreteras capaces de responder a las necesidades nacionales y, de manera simultánea, resguardar de forma responsable los recursos del país.

El asfalto que se hace mezclando en frío se ha convertido en una opción posible en este caso. Este método tiene varios beneficios, como usar menos energía, costar menos dinero y soltar menos contaminantes al aire si se compara con el asfalto que se mezcla en caliente (Peterson, 2015). Sin embargo, cómo funcionan estas mezclas depende mucho de las características de los materiales que se usan, sobre todo de las emulsiones asfálticas que se usan en el proceso.

Este trabajo compara las emulsiones asfálticas normales con las que llevan polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno) y SBR (estireno-butadieno). Busca analizar cómo se comportan estas emulsiones, revisar cómo funcionan y ver qué ventajas tienen en temas de resistencia, flexibilidad y durabilidad.

Gracias a los cambios químicos que se les agregan, las emulsiones con polímeros han mostrado que pueden soportar las exigencias del clima y del tráfico en lugares como

Ecuador. En este país, las distintas condiciones de clima y geografía hacen que mantener las carreteras sea un reto grande (Ramírez et al., 2021).

Este estudio tiene entre sus objetivos identificar formas de utilizar recursos locales, tales como la piedra de cantera y las emulsiones fabricadas en Ecuador. Se pretende encontrar alternativas que puedan ser aplicadas de manera efectiva y que contribuyan al desarrollo de la ingeniería civil en el país. Al articular la investigación científica sobre materiales con las necesidades concretas del territorio, este análisis busca constituirse en una herramienta de utilidad para constructores y responsables de la toma de decisiones en el ámbito del diseño y la construcción de pavimentos que resulten más sostenibles y adecuados a las condiciones específicas del Ecuador.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo entre mezclas asfálticas en frío diseñadas con: emulsión asfáltica no polimerizada y emulsión asfáltica polimerizada con estireno-butadieno-estireno / estireno-butadieno (SBS / SBR por sus siglas en inglés).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar agregados seleccionados, tomando como muestra los provenientes de la cantera de HOLCIM en Pifo, a fin de comparar su comportamiento en los ensayos establecidos en la normativa vigente.

Diseñar y elaborar en base a la formula desarrollada en el presente estudio, la emulsión asfáltica no polimerizada y la emulsión asfálticas polimerizada con SBR y SBS o híbrida, a fin de proceder con los respectivos ensayos.

Elaborar briquetas de asfalto en frío para determinar mediante el ensayo de Marshall Modificado, las diferencias entre la emulsión no polimerizada y polimerizada.

Realizar el análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos, para determinar cuál de los dos tipos de emulsiones presenta mejores características para el diseño de vías.

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En la actualidad, en la mayoría de autopistas, carreteras y caminos de Ecuador, las capas de rodadura de los pavimentos flexibles presentan un deterioro progresivo, siendo este fenómeno más notorio en las zonas urbanas. Esta situación se explica por la alta concentración poblacional en estos sectores, lo que conlleva un aumento en la carga vehicular.

El diseño y el comportamiento de las mezclas asfálticas han recibido una atención significativa dentro de la ingeniería civil, particularmente en el campo de la pavimentación. Las mezclas asfálticas en frío surgen como una opción sostenible frente a las mezclas en caliente, aunque su rendimiento continúa representando un reto técnico.

El uso de emulsiones asfálticas con polímeros SBS y SBR ha mostrado en varios estudios que mejora la resistencia y la durabilidad del asfalto. Sin embargo, es necesario evaluar de forma específica cómo funcionan en mezclas en frío para ver si realmente son mejores que las emulsiones normales. Este estudio se apoya en teorías sobre el comportamiento mecánico de los materiales asfálticos, las interacciones entre el asfalto y el agregado, y la modificación de asfaltos con polímeros, dando un marco sólido para hacer un análisis comparativo.

JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Este estudio usa una metodología experimental para obtener resultados medibles sobre cómo funcionan las mezclas asfálticas en frío usando distintos tipos de emulsiones. Se van a diseñar y preparar mezclas en el laboratorio con emulsiones sin polimerizar y con emulsiones modificadas con polímeros SBS y SBR. Después, se harán pruebas mecánicas para medir la estabilidad, el flujo y cómo se comportan las mezclas frente a la humedad.

Los datos que se obtengan permitirán hacer un análisis comparativo para encontrar diferencias importantes en el desempeño, ver las ventajas y limitaciones de cada tipo de mezcla y dar recomendaciones para su uso en proyectos viales.

JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Hoy en día, muchas entidades que se encargan de mantener las carreteras siguen usando mezclas asfálticas en frío con emulsiones normales, sin tener información clara sobre cómo se comparan con las opciones modificadas con polímeros. Este trabajo dará datos técnicos confiables que ayuden a tomar decisiones con base al momento de escoger emulsiones asfálticas para mezclas en frío.

Los resultados del análisis comparativo se podrán usar en la planificación y diseño de proyectos de infraestructura vial, ayudando a aprovechar mejor los recursos disponibles y a mejorar la calidad de las carreteras. Además, usar emulsiones con polímeros puede alargar la vida útil de los pavimentos, bajar los costos de mantenimiento y ofrecer opciones más sostenibles para construir y rehabilitar carreteras.

HIPÓTESIS

Se plantea que al usar emulsiones asfálticas con polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno) y SBR (estireno-butadieno) para hacer mezclas asfálticas en frío, se logra un gran avance en sus propiedades mecánicas, su estabilidad y su durabilidad, si se comparan con las mezclas hechas con emulsiones normales. Esta mejora se ve en una mayor resistencia a las deformaciones, mejor unión entre el asfalto y los agregados, y un mejor comportamiento frente a la humedad y las grietas.

Las emulsiones con SBS y SBR aumentan la elasticidad y la flexibilidad del asfalto, haciendo que resista mejor las cargas repetidas y los cambios de clima (Polacco et al., 2015). Por esto, las mezclas asfálticas en frío pueden mantener su estructura incluso con tránsito pesado y cambios fuertes de temperatura, algo que no se logra con las emulsiones convencionales.

Como resultado, las mezclas modificadas duran más, resisten mejor el desgaste y alargan la vida del pavimento, lo que reduce la frecuencia de mantenimiento y ayuda a usar mejor los recursos para rehabilitar carreteras.

Este mejor desempeño también trae beneficios económicos y ambientales, ya que se reducen las reparaciones y se aprovechan los efectos positivos de modificar los materiales, como la disminución de emisiones y un uso más eficiente de insumos. Por esto, las emulsiones con SBS y SBR se presentan como una opción técnica y económicamente viable para mejorar la calidad y la sostenibilidad de las carreteras.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mantenimiento y la rehabilitación de pavimentos necesitan soluciones que sean eficientes y sostenibles, asegurando resistencia y durabilidad. En este sentido, las mezclas

asfálticas en frío aparecen como una opción viable frente a las mezclas en caliente, ya que se pueden aplicar a temperatura ambiente y no requieren calentar los agregados ni el asfalto. Esto ayuda a reducir mucho el consumo de energía y, por lo tanto, baja las emisiones de gases contaminantes relacionadas con el calentamiento del material (AASHTO, 2021).

Sin embargo, según el estudio de (Xie, 2019), las mezclas en frío que se hacen con emulsiones sin polimerizar tienen limitaciones en resistencia, estabilidad y durabilidad, lo que provoca fallas tempranas como grietas, desprendimiento de agregados y deformaciones bajo tráfico y cambios de clima. Según investigaciones previas (Ministerio de Transporte y obras Publicas, 2022), esto afecta negativamente la calidad y seguridad de las vías, hace que se necesiten reparaciones más frecuentes y aumenta los costos a largo plazo.

Para enfrentar este problema, en los últimos años se han creado emulsiones asfálticas con polímeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS) y el estireno-butadieno-rubber (SBR) para mejorar las propiedades de las mezclas en frío, dándoles más resistencia a la deformación, flexibilidad y mejor unión entre el asfalto y los agregados (Polacco, 2015). Sin embargo, en la práctica, todavía no se tiene suficiente información para saber con exactitud si estas emulsiones con polímeros funcionan mejor que las convencionales (Manabí, 2020).

Por esto, se ve la necesidad de hacer un análisis comparativo entre las mezclas en frío hechas con emulsiones normales y las modificadas con SBS y SBR, con el fin de evaluar cómo se comportan en resistencia, estabilidad, durabilidad y desempeño estructural. Este estudio permitirá ver si el uso de emulsiones con polímeros es una solución

técnicamente viable y económicamente justificable para mejorar pavimentos en diferentes condiciones de uso y clima.

ESTADO DEL ARTE:

Las emulsiones asfálticas en frío se usan mucho en pavimentación porque ofrecen soluciones efectivas y duraderas. Este trabajo se centra en hacer un análisis comparativo de las emulsiones con polímeros SBS y SBR, revisando sus propiedades mecánicas principales como la resistencia, la deformación y cómo responden a la humedad. Investigaciones como las de Xie et al. (2019) y López y Pérez (2020) han mostrado que las emulsiones con polímeros tienen un mejor desempeño bajo tráfico intenso y climas cambiantes, algo clave para mejorar la infraestructura vial.

Este estudio busca establecer parámetros claros sobre el comportamiento técnico de las mezclas en frío, entregando información útil para mejorar la calidad y alargar la vida de los pavimentos en Ecuador, poniendo atención a cómo estas tecnologías modernas se adaptan a las exigencias del tráfico y al clima del país.

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

En los últimos años, varios estudios, como los de Xie et al. (2019) y González & Herrera (2021), han analizado cómo se comportan las mezclas asfálticas en frío, en especial al usar emulsiones con polímeros como SBS y SBR. Estos estudios han mostrado que agregar polímeros mejora mucho las propiedades mecánicas de las mezclas, como la resistencia al tráfico, la durabilidad y la estabilidad en climas difíciles.

Martínez et al. (2018): Analizaron cómo mejorar las propiedades de las mezclas en frío usando SBS y SBR. Encontraron que las mezclas modificadas resistieron mejor las deformaciones, tuvieron mejor comportamiento frente a la humedad y lograron una mejor unión entre los agregados.

López y Pérez (2020): Hicieron pruebas de estabilidad Marshall y de resistencia a la humedad en mezclas en frío con emulsiones con polímeros. Sus resultados mostraron que el uso de SBS y SBR aumentó de forma notable la estabilidad Marshall, la flexibilidad y la durabilidad de las mezclas en comparación con las emulsiones sin modificar.

García (2019): Analizó el uso de emulsiones asfálticas modificadas para rehabilitar carreteras urbanas. Los resultados mostraron que las emulsiones con SBS y SBR mejoraron de forma notable la resistencia estructural y redujeron las grietas en condiciones de tráfico pesado y cambios de temperatura.

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Las mezclas asfálticas en frío son clave para proyectos de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, sobre todo en lugares donde no se puede usar mezclas en caliente por temas de costo, tiempo o clima. Estas mezclas, que llevan agregados, emulsión asfáltica y agua, deben diseñarse de forma que aseguren resistencia, durabilidad y estabilidad bajo diferentes condiciones de tráfico y clima.

EMULSIONES ASFÁLTICAS

Una emulsión asfáltica es una mezcla de asfalto, agua y un agente emulsificante que ayuda a dispersar el asfalto en pequeñas partículas dentro del agua. Esto permite aplicarla a temperaturas más bajas, algo clave para hacer mezclas en frío (INECYC, 2018). Las emulsiones asfálticas se usan mucho en pavimentación porque mejoran la trabajabilidad del

material y bajan los costos de energía. La diferencia entre las emulsiones normales y las que llevan polímeros está en que estas últimas tienen SBS o SBR, lo que mejora la elasticidad, la flexibilidad y la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica (Mora et al., 2020).

POLÍMEROS MODIFICADORES: SBS Y SBR

Los polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) y SBR (Estireno-Butadieno-Rubber) se usan mucho para modificar emulsiones asfálticas, mejorando su resistencia y durabilidad. El SBS da alta elasticidad, resiste la fatiga y mejora la unión entre el asfalto y el agregado. El SBR ayuda a reducir la oxidación y aumenta la resistencia al envejecimiento (Jiménez del Barco-Carrión et al., 2016).

MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual define los términos clave del estudio y su relación con la tesis:

MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO: Es la combinación de agregados y emulsión asfáltica que se usa para construir y rehabilitar pavimentos, aplicada a temperatura ambiente.

EMULSIÓN ASFÁLTICA: Es la dispersión de asfalto en agua con un emulsionante. Permite trabajar a bajas temperaturas en mezclas en frío, facilitando su uso en distintas condiciones.

POLÍMERO MODIFICADOR: Es un material que se agrega a la emulsión asfáltica para mejorar su elasticidad, resistencia y durabilidad. Los más usados son el SBS y el SBR.

MÉTODO MARSHALL MODIFICADO: Es un método muy usado para diseñar y evaluar mezclas asfálticas, en especial mezclas en frío con polímeros. Se preparan muestras cilíndricas compactadas con diferentes contenidos de asfalto y se prueban para

medir estabilidad (resistencia a deformarse bajo carga), flujo (cuánto se deforma durante la prueba), densidad, vacíos y la relación vacíos-agregado-asfalto.

En este método modificado se agregan aditivos o polímeros como SBS o SBR para evaluar su efecto en las propiedades de la mezcla. La mezcla óptima se elige según resultados que cumplan con normas como AASHTO T245 o ASTM D6927, buscando equilibrio entre estabilidad, durabilidad y facilidad de trabajo (Asphalt Institute, 2014).

RESISTENCIA A LA HUMEDAD: Es la capacidad de la mezcla asfáltica para soportar los efectos negativos del agua, que puede causar grietas y pérdida de cohesión.

MARCO LEGAL

El marco legal regula los aspectos técnicos, de seguridad y ambientales en la construcción y rehabilitación de pavimentos, incluyendo el uso de mezclas en frío y la modificación de emulsiones asfálticas. Entre las normas más importantes están:

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE) INEN 22002-MEZCLAS ASFÁLTICAS:

Establece las especificaciones para fabricar y aplicar mezclas asfálticas en Ecuador, indicando la calidad que deben tener las emulsiones y los agregados.

NORMA ASTM D6373 – STANDARD SPECIFICATION FOR PERFORMANCE

GRADED ASPHALT BINDER: Da las especificaciones para modificar emulsiones asfálticas con polímeros, explicando los procedimientos y propiedades necesarias para asegurar el buen rendimiento de las mezclas.

MS-19 MANUAL BÁSICO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS: Es una guía completa sobre el uso de emulsiones asfálticas, desde su fabricación hasta su aplicación. Incluye información sobre sus propiedades, su comportamiento en diferentes condiciones y recomendaciones para usarlas en pavimentación.

MOP-001-F 2002: El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de Ecuador establece aquí las especificaciones para construir caminos y puentes, abarcando disposiciones generales, control ambiental y movimiento de tierras. Es clave para asegurar que las obras viales cumplan con los estándares técnicos y ambientales requeridos.

METODOLOGÍA

La metodología de este estudio usa un enfoque cuantitativo y experimental, ya que busca evaluar las propiedades de mezclas asfálticas en frío hechas con emulsiones normales y con emulsiones modificadas con SBS y SBR.

Para esto, se harán pruebas de laboratorio como el ensayo Marshall modificado (para medir estabilidad, flujo, vacíos y densidad), el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (para evaluar cohesión y resistencia a la humedad) y análisis de deformación plástica. Estos datos servirán para comparar las diferentes mezclas asfálticas y ver cómo se comportan en resistencia y durabilidad.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se basa en preparar muestras de mezclas asfálticas en frío usando distintos tipos de emulsiones:

- **Emulsión de curado lento no polimerizada:** Es una emulsión básica sin polímeros.
- **Emulsión polimerizada con SBS:** Emulsión modificada con el polímero SBS.
- **Emulsión polimerizada con SBR:** Emulsión modificada con el polímero SBR.

Cada emulsión se usará para preparar mezclas con agregados seleccionados y con humedad controlada. Luego, las mezclas se someterán a ensayos de estabilidad y flujo

Marshall, y pruebas de resistencia a la humedad para evaluar su comportamiento en distintas condiciones.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Se harán las siguientes pruebas a las mezclas asfálticas de cada tipo de emulsión:

Prueba de Estabilidad y Flujo Marshall:

En esta prueba, se compactan muestras cilíndricas de la mezcla en un molde estándar usando un martillo de compactación. Luego, las muestras se colocan en un baño de agua a 60 °C por 30 a 40 minutos para su acondicionamiento. Después, se aplica carga axial en una prensa Marshall a una velocidad constante de 50.8 mm/min. La carga máxima que soporta la muestra antes de romperse se registra como estabilidad, y la deformación que ocurre en ese momento se registra como flujo. Estos datos permiten evaluar la resistencia de la mezcla a las cargas y su capacidad de deformarse.

Prueba de Resistencia a la Humedad (ensayo de tracción indirecta):

Esta prueba mide la resistencia a la tracción de muestras compactadas, tanto en seco como después de sumergirlas en agua. Se forman dos grupos: uno se ensaya en seco y el otro se sumerge en agua a 60 °C por 24 horas. Luego, ambos grupos se cargan en una prensa de forma diametral hasta que se rompen. Al comparar los resultados se obtiene el Índice de Retención de Resistencia (TSR), que muestra qué tan sensible es la mezcla a la humedad y cuánta durabilidad tiene en ambientes húmedos.

ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio serán analizados mediante herramientas estadísticas para identificar las diferencias significativas entre las mezclas formuladas con emulsiones no polimerizadas y las modificadas con SBS y SBR.

Análisis comparativo: Los resultados obtenidos fueron evaluados en relación con los valores establecidos en las especificaciones técnicas aplicables.

CAPÍTULO I

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS SELECCIONADOS

ANTECEDENTES

Los agregados minerales son la parte estructural principal de las mezclas asfálticas y representan entre el 90 % y el 95 % del peso total del material. Por esta gran proporción, su buena selección, caracterización y control de calidad son claves para la resistencia y la durabilidad de los pavimentos.

Los agregados no solo dan resistencia estructural, también influyen en propiedades importantes como la estabilidad, la resistencia al desgaste, la reacción frente a la humedad y el comportamiento ante cargas repetidas.

En este estudio se usaron agregados de la cantera HOLCIM, ubicada en Pifo, al nororiente de Quito. Se eligió esta fuente por su disponibilidad local, la calidad constante del material y porque cumple con los requisitos para mezclas asfálticas con emulsiones (HOLCIM Ecuador S.A) (ver ANEXO 1). Se usaron agregados gruesos y finos, que pasaron por un proceso riguroso de caracterización físico-mecánica.

Este proceso incluyó ensayos normalizados para medir propiedades como la granulometría, el índice de forma, la absorción, la resistencia al desgaste y la adherencia con el asfalto, entre otras. Estos ensayos se realizaron conforme a lo estipulado en el Manual MS-19 del Asphalt Institute (2009), así como bajo los procedimientos y especificaciones establecidos por normas ASTM vigentes. La información obtenida permitió verificar el cumplimiento de los agregados con los parámetros de calidad requeridos para su

uso en mezclas en frío con emulsiones asfálticas, ya sean convencionales o modificadas con polímeros.

Este capítulo detalla la procedencia del material, los métodos de ensayo empleados, los resultados obtenidos y los criterios utilizados para la aceptación de los agregados dentro del diseño de mezcla. Todo ello con el objetivo de asegurar que las características del material pétreo contribuyan favorablemente al desempeño global del pavimento durante su vida útil.

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS

Los materiales pétreos empleados fueron extraídos de la cantera HOLCIM, una de las fuentes más importantes en el sector de la construcción en Ecuador. Esta cantera se caracteriza por ofrecer agregados con buena estabilidad física, control granulométrico y cumplimiento de parámetros técnicos que permiten su aplicación tanto en mezclas en caliente como en mezclas en frío con emulsión, (HOLCIM Ecuador S.A). (ver ANEXO 1.)

El proceso de muestreo se llevó a cabo de manera representativa, seleccionando distintas fracciones de agregados gruesos (3/4" y 1/2") y finos (Arena Slurry Tipo 2 natural). La cantera trabaja con rocas de origen ígneo y metamórfico, predominantemente basálticas, lo que les otorga una elevada resistencia al desgaste y buena adhesividad con ligantes asfálticos. Las muestras fueron extraídas directamente de pilas de almacenamiento, asegurando que reflejen las condiciones reales de producción.

METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras fueron inicialmente secadas al ambiente para eliminar la humedad superficial y luego acondicionadas en horno a una temperatura controlada de hasta 110 °C,

con el fin de remover completamente la humedad interna sin comprometer la integridad físico-química de los agregados. Este proceso garantiza condiciones uniformes en los ensayos posteriores. Una vez estabilizadas, se procedió a su fraccionamiento por tamaños y pesaje, de acuerdo con los procedimientos técnicos establecidos por normas ASTM y especificaciones del MS-19, permitiendo asegurar la representatividad y confiabilidad de los resultados experimentales.

Este proceso se realizó en las instalaciones de la empresa EMULDEC Cía. Ltda., en la parroquia de Calacalí (Quito), donde cuentan con la infraestructura técnica necesaria para analizar agregados y preparar mezclas asfálticas. La colaboración con EMULDEC, que se especializa en producir y evaluar emulsiones asfálticas, permitió trabajar en condiciones controladas durante la caracterización inicial de los materiales, asegurando resultados confiables y que reflejen cómo se comportarán en el campo (EMULDEC, 2024).

Ensayos realizados:

A continuación, se describen los principales ensayos que se aplicaron a las fracciones de agregados seleccionadas:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C136):

Este ensayo se usó para conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas, usando una columna de tamices estándar. Se analizó cuánto material quedaba en cada malla y se calculó el porcentaje acumulado, lo que permitió trazar la curva granulométrica de cada tipo de agregado y de la mezcla total.

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN (ASTM C127 y C128):

Se midieron el peso específico aparente, seco y saturado, y la absorción de agua en los agregados gruesos y finos. Estos datos son importantes porque influyen en la cantidad de emulsión que se debe usar y en la estabilidad de la mezcla.

CONTENIDO DE FINOS (MATERIAL PASANTE DEL TAMIZ N° 200):

Se controló el porcentaje de partículas más pequeñas de 0,075 mm, ya que si hay demasiado material fino puede afectar la cohesión interna de la mezcla y aumentar el riesgo de exudación o pérdida de estabilidad.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Para escoger los agregados más adecuados en el diseño de la mezcla, se usaron estos criterios:

CUMPLIMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA OBJETIVO:

La mezcla debe estar dentro de los rangos granulométricos recomendados por el Manual MS-19 del Asphalt Institute, que da guías técnicas para diseñar mezclas asfálticas en frío. Este manual establece curvas ideales para mezclas de tipo abierto o cerrado, según el tránsito y el uso que tendrá el pavimento.

Las mezclas abiertas tienen más vacíos interconectados, lo que mejora el drenaje, pero reduce su resistencia estructural, por lo que se usan en capas superficiales o de rodadura. En cambio, las mezclas cerradas tienen una distribución más continua de tamaños de partículas, lo que aumenta la densidad y resistencia, haciéndolas mejores para capas que soportarán tráfico pesado.

La curva granulométrica elegida influye de forma directa en la trabajabilidad, la compactación, el contenido de vacíos y la durabilidad del pavimento final (Asphalt Institute, 2009).

Tabla 1
MANUAL MS-19 1 (Tabla 7.2)

Tamaño del Tamiz	Tipo D
50 mm (2")	—
37.5 mm (1 ½")	—
25.0 mm (1")	—
19.0 mm (¾")	—
12.5 mm (½")	100
9.5 mm (3/8")	90–100
4.75 mm (N° 4)	60–80
2.36 mm (N° 8)	25–55
1.18 mm (N° 16)	—
600 µm (N° 30)	—
300 µm (N° 50)	5–20
150 µm (N° 100)	—
75 µm (N° 200)	2–9

COMPATIBILIDAD ENTRE EL AGREGADO Y LA EMULSIÓN:

Se consideró la naturaleza mineralógica del agregado para favorecer la adhesión con la emulsión. Las superficies rugosas, angulosas y con carga superficial favorable mejoran la interacción entre ambos componentes.

CONTENIDO DE FINOS NO PLÁSTICOS:

Se verificó que los finos presentes en el agregado no sean de origen arcilloso o plástico, ya que esto puede generar problemas de cohesión y sensibilidad al agua.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los datos obtenidos se sistematizaron en una tabla resumen que incluye:

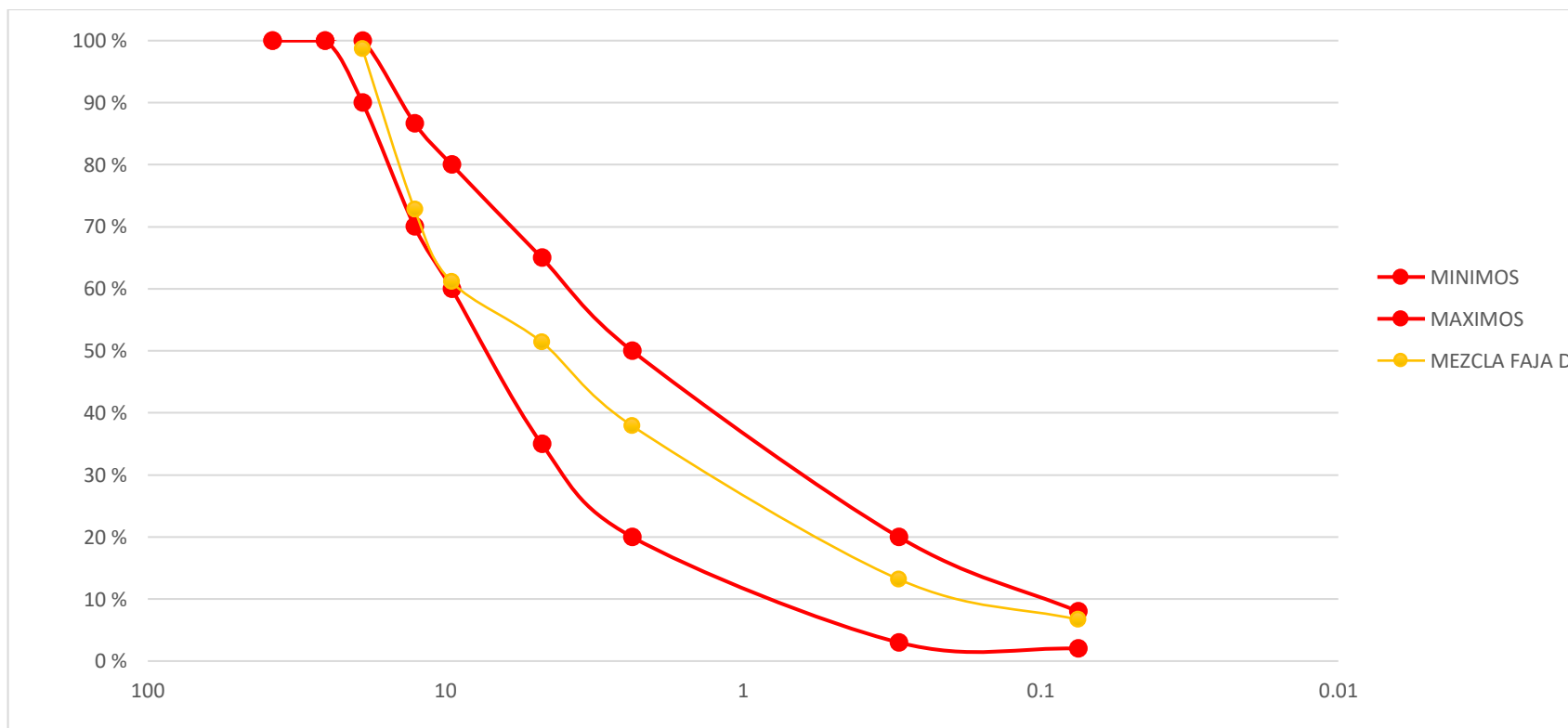
- Resultados del análisis granulométrico de cada fracción (3/4", 1/2", Arena Slurry Tipo 2).
- Curvas de porcentaje retenido y acumulado.
- Mezcla final ponderada con proporciones de 15% (3/4"), 55% (1/2") y 30% (arena).
- Propiedades físicas como peso específico seco, saturado, absorción y pérdida por abrasión.

La curva granulométrica combinada de la mezcla se encuentra dentro de los rangos recomendados para mezclas en frío de tipo denso (mezcla cerrada), garantizando una distribución continua y adecuada de partículas. La figura correspondiente (ver gráfico 1) muestra que la mezcla se ajusta bien al área sombreada establecida por el MS-19.

Tabla 2

Resultados del Análisis Granulométrico de los Agregados Provenientes de la Cantera Holcim

AGREGADO		FAJA		(3 / 4)			(1 / 2)			(Arena)			
ABERTURA DE TAMIZ		D		Masa	%	PASANTE	Masa	%	PASANTE	Masa	%	PASANTE	Mezcla
In	mm	MIN	MAX	Retenida	Retenido		Retenida	Retenido		Retenida	Retenido		
1 (1/2)"	38,1	100	100	0	0	100,00	0	0	100,00	0	0	100,00	
1"	25,4	100	100	14,615	0,79	99,21	0	0	100,00	0	0	100,00	
3/4"	19	90	100	377,425	20,34	78,87	23	0,91	99,09	0	0	100,00	98,66
1/2"	12,7	70	87	990,87	53,41	25,46	1093,58	43,11	55,99	0	0	100,00	72,81
3/8"	9,53	60	80	140,295	7,56	17,90	526,02	20,73	35,25	0	0	100,00	61,11
#4	4,75	35	65	217,09	11,70	6,20	415,97	16,40	18,86	6,53	0,48	99,52	51,42
#8	2,36	20	50	56,665	3,05	3,15	131,33	5,18	13,68	347,44	25,69	73,82	37,92
	0,3	3	20	10,73	0,58	2,57	162,45	6,40	7,28	698,80	51,68	22,15	13,19
#200	0,075	2	8	6,32	0,34	2,23	103,84	4,09	3,19	139,94	10,35	11,80	6,68
Pasante				41,345	2,23	0,00	80,81	3,19	0,00	159,57	11,80	0,00	0
				1855,355	100		2537	100		1352,3			

Tabla 3*Resultados del Análisis Granulométrico*

PRIMERAS CONCLUSIONES

La caracterización de los agregados provenientes de la cantera HOLCIM permitió comprobar que estos cumplen con los requisitos técnicos establecidos para su uso en mezclas asfálticas en frío (HOLCIM Ecuador S.A). (ver ANEXO 1.).

En particular, se destaca lo siguiente:

- La curva granulométrica de la mezcla está bien balanceada, con una distribución adecuada de tamaños que favorece la compactación y reduce vacíos excesivos.
- Los agregados tienen un contenido de finos dentro de los límites recomendados, lo que evita problemas de estabilidad y drenaje.
- Se obtuvieron valores adecuados de peso específico y absorción, que son clave para definir la cantidad de emulsión que se debe usar.
- La resistencia al desgaste medida con la Máquina de Los Ángeles mostró un buen comportamiento mecánico de los agregados.

Con estos resultados, los agregados elegidos se consideran aptos para usarse con emulsiones normales y modificadas. En los próximos capítulos, se analizará cómo se comportan las mezclas hechas con estos agregados bajo distintas pruebas.

CAPÍTULO II

EMULSIÓN ASFÁLTICA

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones asfálticas en frío son sistemas dispersos que han cambiado las técnicas de pavimentación, ya que se pueden aplicar a temperatura ambiente y ofrecen ventajas en seguridad y sostenibilidad. Estas emulsiones están hechas de asfalto, agua y un agente emulsificante, lo que permite usarlas sin calentarlas antes.

La guía MS-19 de la Asphalt Emulsion Manufacturers Association da directrices para producir y usar emulsiones asfálticas, sobre todo en tratamientos superficiales. Este documento resalta la importancia de propiedades como la viscosidad, la estabilidad en almacenamiento y el tiempo de rompimiento, que se definen y evalúan según los estándares de la ASTM.

En general, hay tres tipos básicos de emulsiones según la velocidad de rompimiento (separación del asfalto y el agua), que depende del tipo y cantidad de emulsificante: Ruptura rápida (RS), Ruptura media (MS) y Ruptura lenta (SS). Para cada tipo, se indica un grado de viscosidad con un número entre uno (1) y cuatro (4). Las emulsiones de curado rápido no se usan con agregados húmedos porque se rompen antes de que el asfalto cubra bien los agregados (Asphalt Institute, 2009).

EMULSIONES DE ROTURA LENTA.

Los grados de rotura lenta se diseñan para lograr mezclas estables. Se emplean con granulometrías cerradas, con alto porcentaje de finos. A los grados de rotura lenta corresponden prolongados períodos de trabajabilidad para asegurar una buena mezcla con agregados de granulometría cerrada. Estas mezclas no se diseñan para ser acopiadas.

Todos los grados de rotura lenta tienen baja viscosidad, que puede ser aún más reducida con la incorporación de agua. Diluidos, estos grados pueden también ser usados para riegos de liga (tack coat) y riego pulverizado (fog seal) y como paliativos de polvo.

La coalescencia de las partículas de asfalto de las emulsiones de rotura lenta depende básicamente de la evaporación del agua. Las emulsiones de rotura lenta en aplicaciones de mezcla son empleadas en estabilización de suelos, carpetas asfálticas y algunos reciclados y sellados con lechadas asfálticas (slurry seal).

Las emulsiones de rotura lenta modificadas con polímeros pueden ser utilizadas cuando se requieren una estabilidad adicional de la mezcla o una mayor ligazón, esto último en el caso de riegos de liga o riego pulverizado. (Asphalt Institute, 2009).

ELABORACIÓN DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto, agua y un agente emulsificante que permite la dispersión del asfalto en forma de pequeñas partículas dentro del agua. Estas emulsiones son ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento de pavimentos debido a sus ventajas ambientales, económicas y de seguridad. Su aplicación no requiere calentamiento extremo del material, lo que reduce la emisión de gases y el riesgo de incendio.

CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones asfálticas se clasifican según la velocidad de rompimiento y el tipo de carga eléctrica de las partículas de asfalto. La nomenclatura estándar, como CSS-1h, significa lo siguiente:

C: Es una emulsión catiónica, es decir, las partículas de asfalto tienen carga positiva.

SS: Significa Slow Setting (rompimiento lento), lo que quiere decir que tarda más en romperse y permite mejor recubrimiento y penetración en agregados finos o polvo.

1: Indica la viscosidad de la emulsión, siendo “1” una viscosidad más baja que “2”.

h: Significa que se usa un asfalto de alta dureza (hard en inglés).

Por lo tanto, CSS-1h es una emulsión catiónica de rompimiento lento, con baja viscosidad y hecha con un asfalto duro.

Emulsiones Asfálticas Modificadas con Polímeros

Para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las emulsiones, se emplean **modificadores poliméricos**. Dos de los polímeros más comunes son:

- **SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)**: Es un copolímero tipo bloque que proporciona **mayor elasticidad y resistencia a deformaciones permanentes** como el ahuellamiento. Ideal para climas extremos y cargas pesadas.
- **SBR (Estireno-Butadieno en emulsión)**: Es un copolímero tipo aleatorio que mejora la adherencia, flexibilidad y resistencia al envejecimiento de la emulsión. Tiene buena compatibilidad con el cemento asfáltico y es económico.

Ambos polímeros se pueden incorporar durante la fase de elaboración de la emulsión, ya sea en el cemento asfáltico antes de emulsificar o en la emulsión terminada mediante métodos de post-mezcla.

Objetivo de la Elaboración

El objetivo principal es desarrollar dos emulsiones asfálticas:

1. **Emulsión CSS-1h tradicional**, que servirá como referencia base.

2. **Emulsión modificada con polímeros SBS y SBR**, con el fin de comparar propiedades como la estabilidad, viscosidad, tiempo de rompimiento, resistencia al agua y desempeño mecánico en mezclas en frío.

Proceso de Elaboración de las Emulsiones

El proceso general para la elaboración de una emulsión asfáltica consta de las siguientes etapas:

1. **Preparación del cemento asfáltico**: Calentamiento del asfalto base hasta alcanzar la temperatura adecuada (130–150 °C).
2. **Preparación de la fase acuosa**: Mezcla de agua con el agente emulsificante y aditivos.
3. **Mezclado en molino coloidal**: El asfalto caliente se mezcla con la fase acuosa en un molino coloidal, formando partículas finas dispersas en el agua.
4. **Post-tratamiento (en emulsiones modificadas)**: Se agregan los polímeros SBS y SBR, ya sea en la fase asfáltica o mediante post-mezclado.

Dentro de esta categoría, encontramos emulsiones asfálticas en frío formuladas sin polímeros (CSS-1H) y aquellas que incorporan polímeros como el Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y el Estireno-Butadieno-Caucho (SBR). La modificación con estos polímeros mejora significativamente las propiedades mecánicas de la capa asfáltica resultante.

Estireno-Butadieno-Estireno (SBS): Es un copolímero termoplástico en bloque que incrementa significativamente la elasticidad y la resistencia a la deformación permanente del asfalto, cualidades esenciales para pavimentos sometidos a cargas pesadas y temperaturas elevadas. Estas propiedades pueden ser evaluadas mediante el ensayo ASTM D7175,

usando el Dynamic Shear Rheometer (DSR), que permite analizar el comportamiento viscoelástico del ligante (Polacco et al., 2015).

Estireno-Butadieno-Rubber (SBR): Es un copolímero aleatorio que mejora la flexibilidad y la resistencia al agrietamiento térmico del ligante, lo cual es crítico en climas fríos. Su desempeño se evalúa a través del ensayo ASTM D7405, usando el Bending Beam Rheometer (BBR), que mide la rigidez del ligante a bajas temperaturas (Jiménez del Barco-Carrión et al., 2016).

La elección entre una emulsión asfáltica en frío sin polímeros y una modificada con SBS y SBR depende de un análisis detallado de las exigencias del proyecto. Las especificaciones del MS-19 y los métodos de ensayo de la ASTM dan el marco técnico necesario para asegurar la calidad y el buen rendimiento de estas emulsiones en diferentes trabajos de pavimentación.

Tabla 4

Elaboración propia a partir de datos técnicos proporcionados por el laboratorio de EMULDEC Cía. Ltda. (2024).

ASFALTO AME		
	%	g
ACIDO 20	100	2000
ZYCOTHERM	0,05	1
ASFALPLUS	1,25	25
POLIMERO SBS	0,45	9

Tabla 5

Elaboración propia a partir de datos técnicos proporcionados por el laboratorio de EMULDEC Cía. Ltda. (2024).

EMULSIÓN MODIFICADA CSS-1h-P (HÍBRIDA)		
	%	g
ASFALTO AME	62	800
SULFRAL C-60	1,2	15,48
POLIMERO SBR	0,62	8
ACIDO HCl	0,12	1,55
AGUA	36,06	465,29

ENSAYOS DE LABORATORIO

VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL - NORMA ASTM D244

La viscosidad Saybolt Furol mide qué tan fácil se aplica la emulsión y cómo cubre los agregados. Este ensayo calcula el tiempo que tarda un volumen de emulsión en pasar por un orificio calibrado, dando un valor en segundos Saybolt Furol (SSF).

Controlar bien la viscosidad es clave para que la emulsión se maneje bien y funcione correctamente. Si la viscosidad es muy baja, la emulsión queda muy líquida, puede escurrirse al aplicarla y no cubrir bien los agregados. Si es muy alta, se vuelve difícil de manejar, no se dispersa de forma pareja y complica la mezcla con los agregados.

La norma ASTM D244 indica valores óptimos de viscosidad según la temperatura del ensayo, que suele ser 25°C o 50°C. Se elige la temperatura de medición según el tipo de emulsión y las condiciones de obra. Por ejemplo, en climas cálidos, una emulsión con más viscosidad ayuda a evitar pérdidas de material, mientras que en climas fríos, una emulsión con menor viscosidad facilita la aplicación sin calentarla antes.

Al interpretar los resultados, se deben considerar las necesidades del proyecto, el tipo de emulsión y el clima. Una emulsión bien formulada asegura buena trabajabilidad, buena adhesión a los agregados y ayuda a la durabilidad del pavimento.

TIEMPO DE ROTURA - NORMA ASTM D244 – DEMULSIBILITY TEST

El Tiempo de Rotura o Demulsificación, según la norma ASTM D244, es una prueba clave para saber cuán estable es una emulsión asfáltica y qué tan bien libera el asfalto cuando toca los agregados. Este proceso es importante para asegurar una buena adhesión y un buen desempeño del material en pavimentación.

El ensayo de demulsibilidad mide qué tan rápido una emulsión pierde el agua y permite que el asfalto se una. Se hace agregando un químico, normalmente cloruro de calcio, que acelera la separación del agua y el asfalto. La emulsión se prueba en condiciones controladas, y el tiempo que tarda en romperse se anota como indicador de su estabilidad.

Emulsiones con tiempo de rotura rápido:

Son ideales cuando se necesita que se adhiera rápido al agregado, como en sellos de pavimento y tratamientos superficiales. Permiten abrir la vía al tráfico rápidamente.

Emulsiones con tiempo de rotura lento:

Se usan en mezclas en frío y cuando se necesita más tiempo de trabajabilidad antes de que se rompa. Son útiles en proyectos donde se necesita más tiempo para manipular antes de compactar.

El tiempo de rotura influye en la compatibilidad con los agregados, en el clima y en el tipo de aplicación. En climas cálidos, una emulsión con rotura rápida puede ayudar a evitar

que el material se desplace, mientras que en climas fríos, una emulsión con rotura lenta facilita la aplicación sin afectar la cohesión del pavimento.

DUCTILIDAD - NORMA ASTM D113

La ductilidad es una prueba clave para saber cuánto puede estirarse un material asfáltico sin romperse. Este dato es importante para medir la flexibilidad y la resistencia a las grietas de los asfaltos usados en pavimentación.

El ensayo se hace estirando una muestra de asfalto a velocidad constante dentro de un baño de agua a una temperatura específica, generalmente 25°C. Se mide en centímetros la distancia máxima que alcanza antes de romperse, lo que indica su capacidad de deformarse.

ALTA DUCTILIDAD:

Muestra que el asfalto puede deformarse bien sin romperse, lo que es bueno para pavimentos que enfrentan cambios de temperatura y cargas dinámicas.

BAJA DUCTILIDAD:

Puede indicar que el material es frágil y puede agrietarse, afectando la durabilidad del pavimento.

La ductilidad es un criterio importante al formular emulsiones asfálticas con polímeros como SBS y SBR, ya que estos mejoran la capacidad de deformación del asfalto y reducen el riesgo de grietas en condiciones extremas. Este ensayo también ayuda a evaluar la calidad de asfaltos reciclados y modificados.

PENETRACIÓN DEL RESIDUO ASFÁLTICO - NORMA ASTM D5

La penetración del residuo asfáltico es una prueba importante para medir la consistencia y dureza del asfalto. Este ensayo mide cuántas décimas de milímetro penetra una aguja estándar en una muestra de asfalto bajo condiciones controladas de carga y temperatura.

Se realiza aplicando una carga de 100 gramos sobre la aguja durante 5 segundos, normalmente a 25°C. La profundidad de penetración muestra la plasticidad del asfalto:

ALTA PENETRACIÓN:

Indica que el material es más blando, lo que es bueno en climas fríos donde se necesita mayor flexibilidad.

BAJA PENETRACIÓN:

Indica que el asfalto es más rígido, ideal para climas cálidos y pavimentos con cargas pesadas.

Este ensayo es clave para verificar si el asfalto es compatible con el clima y el tipo de tráfico del proyecto. Además, en emulsiones modificadas con SBS y SBR, la penetración puede cambiar por la presencia de polímeros, mejorando la resistencia a la deformación y al envejecimiento del asfalto.

ENSAYOS DE LABORATORIO

Tabla 6

Elaborado por el autor con base en normas ASTM (2023) y especificaciones técnicas del MS-19 (Asphalt Institute, 2009).

Ensayo	Norma	Parámetro Evaluado	Requerimientos Generales	Resultado Esperado en las Mezclas
Viscosidad Saybolt Furol	ASTM D244	Viscosidad (SSF)	Rango óptimo depende del tipo de emulsión (CSS-1h aprox. 100–400 SSF a 50°C)	Viscosidad media adecuada para trabajabilidad y recubrimiento homogéneo.
Tiempo de Rotura (Demulsibilidad)	ASTM D244	Tiempo de separación del asfalto y agua	Mayor tiempo de rotura en emulsiones de curado lento; compatibilidad con agregados húmedos.	Se requiere rotura controlada para permitir mezcla y compactación eficaces.
Ductilidad	ASTM D113	Longitud de elongación antes de fractura (cm)	Mínimo aceptable 100 cm (para ligantes convencionales)	Mezclas modificadas con SBS y SBR presentan mayor ductilidad (>120 cm).

Penetración del residuo asfáltico		Consistencia	60–100 décimas para	Emulsiones modificadas
	ASTM	del asfalto	asfaltos	tienen penetración
	D5	(décimas de mm)	convencionales; menor penetración implica mayor rigidez	reducida (mayor rigidez y resistencia).

Con los ensayos realizados para analizar el comportamiento de las emulsiones asfálticas en este estudio, se hizo una tabla resumen que muestra las normas aplicadas, los parámetros evaluados, los criterios de aceptación y el desempeño observado en laboratorio. Esta síntesis permite comparar de forma clara el comportamiento de las mezclas convencionales y las modificadas con polímeros, ayudando a tomar decisiones sobre su uso en proyectos viales.

Resumen de Ensayos de Laboratorio - Mezclas Asfálticas en Frío

Los resultados muestran que las emulsiones con SBS y SBR tienen un mejor comportamiento en trabajabilidad, flexibilidad y resistencia estructural, por lo que se recomienda su uso en obras de pavimentación que estarán sometidas a tráfico pesado y condiciones de clima exigentes.

CAPÍTULO 3

ELABORACIÓN Y ENSAYO DE BRIQUETAS ASFÁLTICAS EN FRÍO MEDIANTE MARTILLO COMPACTADOR MARSHAL AUTOMÁTICO

INTRODUCCIÓN

Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en frío es clave para validar los materiales usados en pavimentación. Como estas mezclas no necesitan calentarse para colocarse ni para compactarse, su desempeño estructural debe comprobarse con métodos que simulen las cargas reales que soportarán en el uso.

En este capítulo se describe el proceso de elaboración de briquetas con tres tipos de emulsión asfáltica —una convencional y dos modificadas con polímeros (SBS y SBR)—, y su posterior evaluación a través del ensayo Marshall Modificado, el cual permite determinar parámetros clave como la estabilidad y el flujo de las muestras. Este procedimiento se desarrolla conforme a lo estipulado en el Manual MS-19 del Asphalt Institute (2009) y las recomendaciones de la norma ASTM D6927.

PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

Para la elaboración de las briquetas se utilizaron agregados minerales seleccionados y caracterizados previamente en el Capítulo 1, provenientes de la cantera HOLCIM, ubicada en la parroquia de Pifo. Estos agregados, con propiedades granulométricas controladas, fueron combinados con dos tipos de emulsión asfáltica:

Emulsión asfáltica polimerizada.

- Emulsión asfáltica modificada con estireno-butadieno-estireno (SBS) y con estireno-

butadieno-rubber (SBR). (Híbrida)

Las proporciones de cada mezcla se determinaron con base en estudios previos de trabajabilidad, contenido óptimo de emulsión, humedad, y relación aire/vacío en briquetas, según criterios del Asphalt Institute (2009) y experiencias locales adaptadas al contexto ecuatoriano.

ELABORACIÓN DE BRIQUETAS

EQUIPAMIENTO EMPLEADO

- Moldes cilíndricos estándar Marshall (10.2 cm Ø x 6.4 cm altura).
- Martillo Marshall de compactación manual de 4.5 kg.
- Balanza digital de precisión.
- Placas de acero para compactación.
- Espátulas, bandejas de mezclado, termómetro.
- Estufa de curado a temperatura ambiente controlada.

DOSIFICACIÓN Y MEZCLA DE AGREGADOS:

La tabla de dosificación fue elaborada a partir del análisis de la curva granulométrica obtenida en los ensayos previos, ajustándose a la faja establecida para mezclas densas tipo I, según el Manual MS-2 del Asphalt Institute. Para el diseño de la mezcla asfáltica, se seleccionaron las proporciones más adecuadas para una muestra de 1000 g, considerando como óptimo el porcentaje que mejor se alineó con la curva granulométrica objetivo, así como la trabajabilidad y continuidad de la mezcla. Esta selección se realizó siguiendo las recomendaciones del Asphalt Institute (2009) y con base en la experiencia práctica del laboratorio.

Tabla 7*Cantidad de agregados para la mezcla*

Fracción de Agregado	Porcentaje	Cantidad (g)
Agregado 3/4"	4%	40
Agregado 1/2"	55%	550
Arena	41%	410
Total	100%	1000

Las emulsiones asfálticas (base y modificadas) se formulan siguiendo especificaciones técnicas y procedimientos estandarizados, asegurando propiedades de estabilidad, viscosidad, ductilidad y adherencia, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D2397 para emulsiones catiónicas y el Manual MS-19 del Asphalt Institute para mezclas en frío (ASTM, 2020; Asphalt Institute, 2009).

FUNDAMENTO TÉCNICO DEL PROCEDIMIENTO

La evaluación mecánica de las mezclas asfálticas en frío requiere de un proceso estandarizado que permita analizar su comportamiento bajo condiciones controladas de carga. En este estudio se usó el método Marshall con un compactador automático que aplica de forma uniforme la energía al formar las briquetas cilíndricas. Esta metodología sigue las recomendaciones de la norma ASTM D6926-20, que indica cómo compactar muestras bituminosas en laboratorio con impacto controlado (ASTM, 2020).

El uso de equipos automáticos tiene ventajas importantes, como mayor repetibilidad, precisión y uniformidad en la energía de compactación. Esto asegura que los resultados del ensayo de estabilidad y flujo no se vean afectados por errores humanos o variaciones en el

proceso, mejorando la confiabilidad en la evaluación mecánica de las mezclas asfálticas (Asphalt Institute, 2009).

PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

El proceso de elaboración de las briquetas se realizó con un compactador Marshall automático, que aplica de forma constante y controlada la energía de compactación. Este equipo reduce errores humanos, como variaciones en la fuerza o en el número de golpes, asegurando la repetibilidad y confiabilidad de los resultados (ASTM D6926-20).

Preparación de la mezcla: Se colocó la mezcla en moldes cilíndricos estandarizados (10.2 cm de diámetro y 6.4 cm de altura). La máquina aplicó 50 golpes por cada cara de forma controlada y vertical, según el método Marshall Modificado. Usar el compactador automático garantizó que todas las muestras recibieran la misma energía de impacto.

Curado: Las briquetas fueron desmoldadas mediante un procedimiento estandarizado, minimizando errores atribuibles al factor humano, y luego almacenadas a temperatura ambiente controlada entre 20 °C y 25 °C durante 72 horas. Este período permitió la ruptura progresiva de la emulsión y la evaporación del contenido de agua. Posteriormente, las muestras fueron conservadas por 24 horas adicionales en condiciones ambientales estables antes de ser sometidas a los ensayos mecánicos, conforme a lo establecido por el Asphalt Institute (2009).

Ensayos reológicos a emulsiones:

Tabla 8*Comparación de propiedades reológicas entre emulsiones*

Propiedad	Emulsión sin polímeros	Emulsión con SBS/SBR
Ductilidad (ASTM D113, cm)	61.5	43.5
Penetración (ASTM D5, 0.1 mm)	60.5	47
Punto de ablandamiento (ASTM D36, °C)	48.5	52.5
Recuperación torsional (ASTM D6084, %)	18.75	48.75

Las emulsiones modificadas presentaron mayor recuperación torsional y un punto de ablandamiento superior, lo que evidencia una mayor capacidad de resistencia frente a cargas cíclicas. Además, su menor penetración, registrada en el ensayo correspondiente, refleja una rigidez incrementada del ligante, característica clave para mejorar el comportamiento estructural de la mezcla.

El análisis comparativo de las mezclas asfálticas elaboradas con emulsiones no polimerizadas y polimerizadas constituye una fase clave para determinar su aplicabilidad en proyectos de pavimentación. A través de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, específicamente mediante el método Marshall, se evaluaron los parámetros de estabilidad y flujo, que permiten establecer la capacidad estructural de las mezclas frente a cargas de tránsito, deformaciones y condiciones climáticas adversas (ASTM, 2015; Asphalt Institute, 2009).

Este capítulo expone de manera detallada la comparación entre tres tipos de mezclas ensayadas: una mezcla convencional, una modificada con SBS y otra modificada

con SBR. Se analizan sus implicaciones técnicas con base en los parámetros de desempeño evaluados en laboratorio, a fin de determinar cuál de ellas resulta más adecuada para el diseño de vías urbanas o rurales, considerando criterios de durabilidad, resistencia y comportamiento ante la humedad (Asphalt Institute, 2009)

PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA LA COMPARACIÓN

Los ensayos Marshall permiten obtener dos variables principales:

- **Estabilidad (lbs):** Carga máxima que puede soportar la briqueta antes de fallar por deformación. A mayor estabilidad, mayor capacidad estructural del pavimento.
- **Flujo (mm):** Medida de la deformación plástica sufrida por la briqueta al momento de alcanzar su carga máxima. Un valor controlado indica adecuada flexibilidad sin pérdida de forma.

Ambos parámetros, cuando son analizados de forma conjunta, ofrecen una visión integral del comportamiento de la mezcla asfáltica ante esfuerzos de tracción y compresión inducidos por el tránsito vehicular (Polacco et al., 2015).

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO MARSHALL

A continuación, se presentan los resultados promedio obtenidos para cada mezcla:

Tabla 9*Resultados del ensayo Marshall*

No.	% Emulsión	% Agua	G. Bulk	Estabilidad promedio (lbs)	Flujo (mm)	Relación Estabilidad / Flujo
1	4,5	5	0,212			
2	5	5	0,159	5,00	0,25	19,85
3	5	5	0,384			
4	5	5	0,164			
5	6	5	0,174	5,00	0,18	28,43
6	6	5	0,189			
7	7	5	0,164			
8	7	5	0,182	5,00	0,19	26,23
9	7	5	0,226			
10	4	6	0,172			
11	4	6	0,250	6,00	0,21	28,57
12	8	6	0,207			

Los resultados del ensayo Marshall modificado muestran que las mezclas con polímeros (SBS y SBR) tienen un mejor desempeño mecánico en estabilidad, resistiendo mejor las cargas repetitivas. Además, el flujo se mantuvo en valores aceptables, lo que indica que las mezclas pueden deformarse sin perder su estructura.

La emulsión con SBS tuvo la mayor estabilidad, mientras que la emulsión con SBR logró mantener un flujo más controlado. La mezcla convencional, aunque funciona, mostró los valores más bajos en desempeño estructural, lo que puede limitar su uso en vías con tráfico medio o alto.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MEZCLAS ASFALTICAS CON EMULSIONES MODIFICADAS Y NO MODIFICADAS

El análisis de los resultados del ensayo Marshall permite concluir que las mezclas con emulsiones polimerizadas tienen mejores características mecánicas que las mezclas convencionales.

En especial, las mezclas con SBS y SBR muestran una relación estabilidad/flujo más favorable, lo que las hace una opción recomendable para pavimentación en zonas urbanas y rurales.

En consecuencia, la mezcla con emulsión modificada con SBS se perfila como la alternativa más idónea para proyectos que demandan un elevado desempeño estructural y durabilidad.

Además de estos parámetros, se incluyeron los siguientes indicadores de calidad:

VTM (Vacíos Totales en la Mezcla): Reflejan el espacio de aire no ocupado por asfalto en la mezcla compactada.

VMA (Vacíos en el Agregado Mineral): Corresponde al volumen de vacíos en el agregado que debe llenarse con asfalto.

VFA (Vacíos Llenos con Asfalto): Porcentaje de vacíos en el agregado que han sido ocupados por el ligante.

Tabla 10*Comparación de resultados de briquetas con mezclas óptimas*

Emulsión	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	VTM (%)	VMA (%)	VFA (%)
Con Polímeros	4019.6	16.2	4.9	13.9	64.2
Sin Polímeros	3342.92	18.3	6.3	14.85	57.56

Las briquetas con emulsión modificada presentaron mayor estabilidad y menor flujo, lo que indica una mejor resistencia y menor deformación. Además, el menor contenido de vacíos totales y mayor porcentaje de vacíos llenos con asfalto reflejan un mejor grado de compactación y adherencia interna.

Justificación de la Mezcla Óptima:

Tras la evaluación de las 12 briquetas fabricadas con diferentes combinaciones de porcentaje de agua y emulsión, se determinó que la combinación de 6% de emulsión con 5% de agua (Tabla 7, Apéndice C) presentó los resultados más favorables en términos de comportamiento mecánico. Esta mezcla mostró una mayor estabilidad (4019.65 lbs), un flujo controlado (16.2 mm) y parámetros volumétricos adecuados, como:

VTM (Volumen de vacíos en la mezcla): 4.9 %

VMA (Vacíos en el agregado mineral): 13.9 %

VFA (Vacíos llenos con asfalto): 64.2 %

Estos valores reflejan una mezcla con buena cohesión interna, adecuada trabajabilidad y resistencia estructural, cumpliendo con los requisitos técnicos establecidos por el Asphalt Institute (2009) y la norma AASHTO T283 (2020) para mezclas asfálticas en frío de alto desempeño.

Resultados de Ensayos a Agregados

- **Abrasión Los Ángeles:**

Con el objetivo de evaluar la resistencia al desgaste de los agregados seleccionados, se realizó el ensayo de abrasión mediante la máquina de Los Ángeles, conforme a la norma ASTM C131. Este ensayo simula el desgaste que sufren los agregados por fricción e impacto, condición crítica para mezclas asfálticas sometidas a carga vehicular.

Se utilizaron dos tamaños de agregado provenientes de la cantera HOLCIM (Pifo): de 3/4" y 1/2", bajo un diseño de gradación tipo B. A cada muestra se le aplicaron 500 revoluciones en la máquina de Los Ángeles, midiendo la pérdida de masa a través del tamiz No. 12.

Tabla 11

Resultados obtenidos del ensayo de Abrasión de los Ángeles.

Diámetro del agregado	Masa inicial (A)	Masa retenida (B)	Masa que pasa (C)	% Desgaste [(C/A)*100]
3/4"	5005 g	3803 g	1202 g	24.00 %
1/2"	5003 g	3702 g	1301 g	26.00 %

Según el Manual MS-19 (Asphalt Institute, 2009) y los lineamientos del MTOP (2022), se establece que el porcentaje de desgaste no debe superar el 30 % para mezclas utilizadas en capas de rodadura. En este sentido, los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango aceptable, lo que respalda la aptitud estructural de estos agregados para su utilización en mezclas asfálticas en frío, tanto en carpetas como en bases estabilizadas.

- Desgaste a los Sulfatos.

El ensayo ASTM C88 evalúa la durabilidad de los agregados frente a la acción de sales (sulfato de magnesio) que simulan ambientes agresivos. Se mide la variación de masa en los agregados antes y después del ensayo, determinando así su resistencia al desgaste por ataque químico. Según la normativa, un porcentaje de desgaste menor al 12% para agregados gruesos y menor al 10% para agregados finos se considera aceptable para uso en capas estructurales de pavimentos.

Tabla resumen de resultados del ensayo ASTM C88

Tabla 12

Resultados del ensayo ASTM C88 – PUCE (2025)

Tipo de Agregado	Porcentaje de Desgaste Total (%)	Requisito Máximo (%)	Cumple Norma
Agregado grueso $\frac{3}{4}$ "	1.0	12	Sí
Agregado grueso $\frac{1}{2}$ "	0.6	12	Sí
Agregado fino (arena)	0.8	10	Sí

Los resultados muestran que los agregados tienen un excelente comportamiento frente al ataque químico, lo que indica que tienen alta estabilidad estructural en entornos agresivos. Esto es valioso en Ecuador, donde algunas zonas tienen suelos con cierta agresividad química o alta humedad. La baja pérdida de masa sugiere que estos agregados mantendrán su integridad durante la vida útil del pavimento, reduciendo el

riesgo de degradación temprana como la disgregación o el desmoronamiento bajo cargas y condiciones ambientales.

CAPÍTULO 4:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

INTRODUCCIÓN

El análisis comparativo de las mezclas asfálticas con emulsiones normales y con emulsiones polimerizadas es clave para ver si se pueden usar en proyectos de pavimentación. Con los resultados de los ensayos de laboratorio, usando el método Marshall, se evaluaron la estabilidad y el flujo, lo que permite ver la capacidad estructural de las mezclas frente al tráfico, las deformaciones y el clima (ASTM, 2015; Asphalt Institute, 2009).

Este capítulo presenta de forma detallada la comparación entre las mezclas convencionales y las modificadas con SBS y SBR, interpretando sus implicaciones técnicas y proponiendo cuál mezcla es más adecuada para diseñar vías urbanas o rurales, según su desempeño y durabilidad.

PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA LA COMPARACIÓN

Los ensayos Marshall permiten obtener dos variables principales:

Estabilidad (lbs): Carga máxima que puede soportar la briqueta antes de fallar por deformación. A mayor estabilidad, mayor capacidad estructural del pavimento.

Flujo (0.01 mm): Medida de la deformación plástica sufrida por la briqueta al momento de alcanzar su carga máxima. Un valor controlado indica adecuada flexibilidad sin pérdida de forma.

TSR (Índice de Resistencia a la Humedad): Evalúa la pérdida de resistencia cuando la muestra ha sido condicionada a humedad (AASHTO T283).

Tabla 13

Comparación de resultados-Método Marshall

Emulsión	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	VTM (%)	VMA (%)	VFA (%)	TSR (%)
Con Polímeros	4019.60	16.2	4.90	13.90	64.20	86.9
Sin Polímeros	3342.92	18.3	6.30	14.85	57.56	78.9

La mezcla con emulsiones polimerizadas (SBS/SBR) presenta ventajas técnicas claras:

- La estabilidad Marshall en mezclas con polímeros fue superior en más del 20 % respecto a la mezcla convencional, lo cual implica una mayor resistencia estructural ante cargas vehiculares.
- Se obtuvo un flujo menor, reduciendo el riesgo de deformaciones permanentes.
- Los valores de VTM y VFA indican una compactación más eficiente y mejor desempeño a largo plazo.
- En el ensayo TSR, las mezclas con polímeros alcanzaron un 86.9 %, superando el umbral mínimo del 80 % exigido para mezclas resistentes al daño por humedad. En

contraste, las mezclas sin polímeros apenas lograron el 78.9 %, como también se muestra en la Tabla 10.

Tabla 14

Ensayo TSR

<i>Ensayo TSR</i>			
Briquetas	Nº	Fuerza (kN)	Flujo (mm)
Sin polímeros	1	2.54	8
	2	2.48	9
	3	2.59	9
Con polímeros	1	2.93	6
	2	2.79	6
	3	2.95	6

Tabla 15

Ensayo Marshall

<i>Ensayo Marshall</i>			
Briquetas	Nº	Fuerza (kN)	Flujo (mm)
Con Polímeros	1	24.61	7.46
	2	27.11	7.69
	3	26.17	8.09
	4	29.54	7.91
	5	26.23	6.71
	6	32.05	6.56
	7	29.97	8.52
	8	25.46	9.52
Sin polímeros	1	21.06	8.16
	2	25.65	7.88
	3	15.33	7.66
	4	22.65	7.31
	5	18.4	6.84
	6	23.45	8.31
	7	19.17	7.86
	8	21	6.88

Estos resultados confirman que las emulsiones modificadas con SBS y SBR permiten desarrollar mezclas con mayor resistencia, durabilidad y flexibilidad, adaptables a condiciones variables de tráfico y clima, como las existentes en el contexto vial ecuatoriano (Polacco et al., 2015; Asphalt Institute, 2009).

Conclusiones

A partir del desarrollo de los cuatro capítulos, se establecen las siguientes conclusiones integrales del estudio:

- Los agregados provenientes de la cantera HOLCIM de Pifo cumplen con los parámetros establecidos en las normas ASTM C136, C127 y C131, demostrando una granulometría adecuada, densidad y resistencia al desgaste que los hacen técnicamente aptos para su uso en mezclas asfálticas en frío de aplicación estructural.
- El diseño y elaboración de emulsiones asfálticas —tanto no polimerizadas como modificadas con polímeros SBS/SBR— permitieron establecer formulaciones estables, con propiedades físico-químicas óptimas de viscosidad, adhesión y curado, cumpliendo con las directrices del Manual MS-19 (Asphalt Institute, 2009), y demostrando su potencial para mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas.
- Los resultados obtenidos en el desarrollo experimental del Capítulo III (ver Tabla 8), evidencian que la combinación de 6 % de emulsión asfáltica y 5 % de agua fue la más eficiente entre las 12 briquetas evaluadas, al presentar una estabilidad Marshall superior a 4000 lb, flujo dentro del rango óptimo y mejores relaciones VTM, VMA y VFA. Esta dosificación se estableció como mezcla óptima según los criterios de desempeño técnico del Asphalt Institute (2009) y los lineamientos de AASHTO T245.

- El análisis comparativo detallado (ver Tabla 10) confirmó que las mezclas asfálticas elaboradas con emulsiones modificadas con SBS/SBR presentaron una estabilidad 20 % mayor, flujo reducido (16.2 mm vs. 18.3 mm) y una mejor relación de vacíos (VTM = 4.9 %, VFA = 64.2 %), en comparación con las mezclas convencionales. Además, alcanzaron un TSR del 86.9 %, superando el umbral del 80 % recomendado por AASHTO T283 para resistencia a la humedad, lo que respalda su uso en zonas de alta demanda estructural y exposición climática variable.
- Los resultados obtenidos en el ensayo de estabilidad Marshall, flujo, y resistencia a la humedad (TSR), particularmente en las mezclas con emulsiones polimerizadas, cumplen con los requisitos técnicos establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP, 2022) y las directrices del Asphalt Institute (2009), garantizando así su idoneidad para aplicaciones estructurales en la infraestructura vial ecuatoriana.
- Los resultados del ensayo de durabilidad frente a la acción de sulfatos para agregados de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y finos muestran porcentajes de desgaste del 1 %, 0.6 % y 0.8 % respectivamente. Estos valores se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido del 12 % establecido por la norma ASTM C88 para agregados sometidos a ambientes agresivos. Por tanto, se concluye que los agregados provenientes de la cantera HOLCIM - Pifo poseen una alta resistencia a la desintegración química por sulfatos, lo cual valida su idoneidad para ser utilizados en mezclas asfálticas en frío, incluso en zonas con alta exposición a humedad o materiales agresivos.

Con base en los resultados obtenidos, se comprobó que las mezclas elaboradas con emulsiones modificadas con polímeros SBS y SBR presentaron una mayor elasticidad,

cohesión interna y resistencia a la humedad (TSR > 86.9 %) en comparación con las emulsiones no polimerizadas (TSR = 78.9 %). Estas características se traducen en una mejor respuesta ante esfuerzos repetitivos de carga y en una mayor durabilidad del pavimento, reduciendo los requerimientos de mantenimiento a largo plazo.

Recomendaciones Técnicas

- Se debe emplear los agregados caracterizados en esta investigación en mezclas asfálticas en frío para vías de bajo y medio tránsito. Aunque no se ejecutó el ensayo de resistencia a sulfatos (ASTM C88), se sugiere considerarlo en futuras investigaciones. El ensayo de congelamiento-deshielo no aplica en Ecuador por su clima estable. Se propone implementar controles periódicos en cantera que verifiquen granulometría y resistencia al desgaste, asegurando calidad y desempeño constante del material.
- Se deberá adoptar emulsiones modificadas con SBS/SBR en proyectos viales, particularmente en zonas de alta humedad, ya que los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la humedad (TSR) demostraron que las mezclas polimerizadas alcanzaron un valor del 86.9%, superando el umbral mínimo del 80% establecido por la norma AASHTO T283. Este desempeño garantiza una mayor durabilidad y adhesión del ligante, reduciendo el riesgo de deterioro prematuro por acción del agua en zonas con condiciones climáticas adversas.
- Incluir el uso de emulsiones asfálticas polimerizadas (modificadas con SBS y SBR) y agregados pétreos debidamente caracterizados en las especificaciones técnicas del MTOP, y promover su implementación mediante normativas actualizadas sustentadas en ensayos de desempeño, tales como estabilidad Marshall, flujo, VTM, VFA y resistencia a la humedad (AASHTO T283; Asphalt Institute, 2009).

- Realizar capacitaciones y transferencia de tecnología a los entes ejecutores y técnicos municipales sobre el diseño y aplicación de mezclas en frío polimerizadas.
- Complementar este estudio con ensayos de desempeño a largo plazo, como pruebas de fatiga, módulos dinámicos y rutting, para reforzar el diseño estructural de la mezcla.
- Incluir el uso de emulsiones asfálticas polimerizadas (modificadas con SBS y SBR) y agregados pétreos debidamente caracterizados en las especificaciones técnicas del MTOP, y promover su implementación mediante normativas actualizadas sustentadas en ensayos de desempeño, tales como estabilidad Marshall, flujo, VTM, VFA y resistencia a la humedad (AASHTO T283; Asphalt Institute, 2009)
- Aplicar esta metodología comparativa en otras regiones del Ecuador permitiría evaluar cómo variables como la altitud, temperatura, intensidad de tráfico y características del suelo inciden en el desempeño de mezclas asfálticas en frío. En el presente estudio, estos factores se mantuvieron relativamente constantes al trabajar en condiciones controladas de laboratorio; sin embargo, su influencia futura podría ser significativa en la respuesta mecánica de las mezclas, especialmente en zonas de clima húmedo o de tráfico pesado, donde la elección adecuada del tipo de emulsión es crucial para garantizar la durabilidad y estabilidad del pavimento.
- Se recomienda priorizar el uso de estos agregados en proyectos de pavimentación que requieran alta durabilidad, especialmente en áreas expuestas a ambientes húmedos, zonas costeras o suelos con presencia de sulfatos, ya que su bajo porcentaje de desgaste indica un comportamiento estable frente a ciclos de degradación química. Además, es aconsejable que este ensayo se mantenga como parte del control de calidad periódico en futuras producciones, garantizando así la

durabilidad a largo plazo de las mezclas asfálticas utilizadas en la red vial ecuatoriana (ASTM C88, 2020; Asphalt Institute, 2009).

GLOSARIO

Agregado: Material granular inerte (arena, grava, piedra triturada) que, junto con el ligante asfáltico, conforma la mezcla asfáltica.

ASTM:(American Society for Testing and Materials) Organización internacional que desarrolla y publica normas técnicas para materiales y métodos de ensayo.

Asfalto: Material bituminoso de color negro, compuesto por hidrocarburos, que se emplea como ligante en pavimentación.

Compactador Marshall Automático: Equipo que aplica golpes verticales de forma controlada para fabricar briquetas cilíndricas usadas en ensayos de laboratorio.

Durabilidad: Capacidad de una mezcla asfáltica para mantener sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo bajo condiciones climáticas y de carga variables.

Emulsión Asfáltica: Dispersión estable de asfalto en agua con la ayuda de agentes emulsificantes. Puede ser de ruptura lenta (SS), media (MS) o rápida (RS).

Emulsión Polimerizada: Emulsión asfáltica modificada con polímeros como SBS o SBR, que mejora la elasticidad, cohesión y resistencia al agua.

Estabilidad Marshall: Resistencia máxima a la carga que puede soportar una biqueta de mezcla asfáltica antes de deformarse.

Flujo Marshall: Medida de la deformación plástica (en 0.01 pulgadas) sufrida por una biqueta al momento de alcanzar la carga máxima.

MTOP: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, entidad que regula las normas y especificaciones para construcción vial.

Polímeros SBS/SBR: (SBS) Estireno-Butadieno-Estireno, y (SBR) Estireno-Butadieno-Rubber. Compuestos sintéticos usados para mejorar las propiedades del asfalto.

TSR (Tensile Strength Ratio): Índice que mide la resistencia de una mezcla asfáltica ante la presencia de humedad. Un valor mayor al 80 % indica buena resistencia al daño por agua.

VFA (Vacíos llenos de Asfalto): Porcentaje del volumen de vacíos en el agregado mineral que está ocupado por el ligante asfáltico.

VMA (Vacíos del Agregado Mineral): Volumen total de vacíos entre partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los ocupados por asfalto.

VTM (Vacíos Totales de la Mezcla): Porcentaje de volumen de aire presente en una mezcla asfáltica compactada.

NORMAS UTILIZADAS:

ASTM D6926 – Standard Practice for Preparation of Asphalt Specimens Using Marshall Apparatus.

ASTM D6927 – Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures.

ASTM C131 – Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

ASTM C117 – Standard Test Method for Material Finer than 75- μm (No. 200).

NTE INEN 2200 – Mezclas asfálticas en caliente. Requisitos.

AASHTO T283 – Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.

MS-19 – Asphalt Institute: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas.

BIBLIOGRAFÍA

TRABAJOS CITADOS:

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *Guide for the Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: AASHTO.

Manabí, U. T. (2020). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas en frío con emulsiones polimerizadas*. Ecuador.

Ministerio de Transporte y obras Públicas. (2022).

Polacco, G. F. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility., (pp. 72-91).

Xie, J. (2019). Performance Evaluation of cold mix asphalt with polymer-modified emulsions. *Construction and Building Materials*, (pp. 1051-1062).

REFERENCIAS:

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *T 283 - Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. AASHTO.

American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C127-15: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C131-06: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2009). *ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM D6927-15: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. ASTM International.

Asphalt Institute. (2009). *MS-19: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas* (7.^a ed.). Lexington, KY: Asphalt Institute.

García, M. (2019). *Evaluación del uso de emulsiones asfálticas modificadas en la rehabilitación de vías urbanas*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca].

López, A., & Pérez, J. (2020). Comportamiento mecánico de mezclas en frío con polímeros SBS y SBR. *Revista Ingeniería Civil Latinoamericana*, 12(3), 55–63.

Lugo, C., Méndez, R., & Torres, V. (2021). Evaluación de mezclas asfálticas modificadas con aditivos reciclados. *Revista Internacional de Ingeniería de Carreteras*, 18(1), 47–60.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (MTOPE). (2022). *Normas técnicas para diseño y construcción de pavimentos flexibles*. Quito, Ecuador.

Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, J. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of stability. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72–112.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>

Xie, X., Shen, S., & Amirkhanian, S. (2019). Performance evaluation of cold mix asphalt with emulsions modified by polymers. *Construction and Building Materials*, 202, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.037>

EMULDEC Cía. Ltda. (2024). *Servicios de laboratorio y producción de emulsiones asfálticas*. <https://www.emuldec.com.ec>

ANEXOS

Consulta de RUC

RUC
0990293244001

Razón social
HOLCIM ECUADOR S.A.

Estado contribuyente en el RUC
ACTIVO

Representante legal

Nombre/Razón Social: PRADO MARENCO DOLORES DEL CARMEN

Identificación: 0965106719

Contribuyente fantasma
NO

Contribuyente con transacciones inexistentes
NO

Actividad económica principal

FABRICACIÓN DE CEMENTOS HIDRÁULICOS, INCLUIDO CEMENTO DE PÓRTLAND, CEMENTO ALUMINOSO, CEMENTO DE ESCORIAS Y CEMENTO HIPERSULFATADO.

Tipo contribuyente	Régimen	Categoría
SOCIEDAD	GENERAL	

Obligado a llevar contabilidad	Agente de retención	Contribuyente especial
SI	SI	SI

Fecha inicio actividades	Fecha actualización	Fecha cese actividades	Fecha reinicio actividades
1934-03-09	2024-11-27		

ANEXOS 1. SRI; HOLCIN S.A 1



ANEXOS 2. FAJA DE TAMIZAJE



ANEXOS 3. AGREGADOS SUMERGIDOS 24 H EN AGUA



ANEXOS 4. ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE MORTERO O CEMENTO



ANEXOS 5. REALIZACIÓN DEL AME**ANEXOS 6. ENSAYO DE RECUPERACIÓN POR EL DUCTILÓMETRO****ANEXOS 7.****ANEXOS 8. ENSAYO DE DUCTILIDAD**

ANEXOS 9. ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS



ANEXOS 10. BRIQUETAS



ANEXOS 11. RETIRO DEL MOLDE**ANEXOS 12. ENSAYO MARSHALL**