



INGENIERÍA CIVIL

Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero Civil

AUTOR:

ANDRAMUNIO OLMEDO BRYAN RICARDO
BOADA ROSERO PABLO ANDRÉS

TUTOR:

Ing. Karina Román

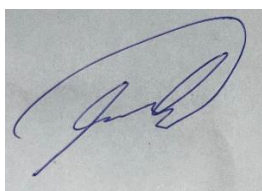
Análisis comparativo del comportamiento mecánico y el desempeño de mezclas
asfálticas en frío elaboradas con: emulsión asfáltica no polimerizada y
polimerizada con SBS.

Quito – Ecuador
Febrero - 2026

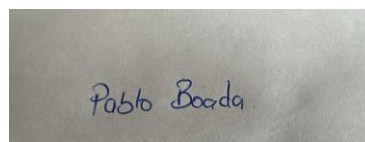
CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Andramunio Olmedo Bryan Ricardo y Boada Rosero Pablo Andrés 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
Andramunio Olmedo Bryan Ricardo



FIRMA AUTOR
Boada Rosero Pablo Andrés

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, Karina Román, certifico que conozco a los autores del presente trabajo de titulación denominado “Análisis comparativo del comportamiento mecánico y el desempeño de mezclas asfálticas en frío elaboradas con emulsión asfáltica no polimerizada y polimerizada con SBS”, Andramunio Olmedo Bryan Ricardo y Boada Rosero Pablo Andrés siendo ellos responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Karina Román

DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA

Agradezco en primera instancia a Dios, que ha permitido que pueda alcanzar este logro tan anhelado.

A mis padres, que gracias a ellos estoy aquí, que cada día tuve que comer, en que transportarme, incluso hasta para poder pasarla bien, gracias infinitas a ellos que siempre fui su prioridad y el yo estar aquí, es logro también de ellos.

A mis abuelos, mi hermana, mis tíos, cada integrante de mi familia que en todo este largo camino pudo ayudarme con algo, gracias por siempre estar.

Bryan Andramunio

Para mi abuelita y para mi tío por haber hecho esto posible a través de su amor, su paciencia y su conocimiento. Nada de esto habrá sido posible sin su fe en mis capacidades; o, lo más importante, en mí. Ustedes han sido la base de todo aquello que soy hoy en día.

Para mi madre, gracias por su amor sin principio ni fin; por su apoyo incondicional, por sus palabras siempre de aliento y por ser mi fuente inagotable de inspiración.

Para mi perro, pues es y siempre será el reflejo de una inestimable conexión que me ha dado; así como por acompañarme lealmente y con una alegría infinita durante esta travesía.

Este logro es tan mío como de ustedes.

Pablo Boada

AGRADECIMIENTO

Al comenzar, elevamos nuestra gratitud a Dios, el cual se ha vuelto nuestra fuerza y fuente de luz en cada dificultad que encontramos. Cada problema superado constituyó un elemento importante en el desarrollo de nuestro trabajo de tesis y nos ayudó a crecer tanto académicamente como personalmente. Nuestra más sincera gratitud está destinada a nuestras familias, quienes han sido el soporte emocional y moral más importante. Su fe en nosotros y su incondicional apoyo fueron esenciales para alcanzar nuestras metas. Pero también queremos agradecer a nuestros asesores y compañeros, cuya compañía y estado de ánimo estimularon y enriquecieron este proceso. Sus ideas, sus palabras de aliento dejaron una marca muy importante en nuestra travesía. No podemos dejar de lado al equipo técnico de la empresa EMULDEC, cuya colaboración y consejo profesional fueron relevantes para la consecución de este proyecto. Gracias a su experiencia fuimos capaces de avanzar con claridad y obtener los resultados propuestos.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD	iii
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1.....	1
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. Objetivo General	2
B. Objetivos Específicos.....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	2
A. Justificación Teórica	2
B. Justificación Metodológica	3
IV. HIPÓTESIS.....	4
V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
VI. ESTADO DEL ARTE	5
VII. MARCO TEÓRICO	5
A. Emulsión.....	6
B. Clasificación en base a su proceso de ruptura.....	7
1) Emulsión CSS-1h:	8
2) Requisitos y pruebas sobre la emulsión:	8
C. Mezclas asfálticas.....	9
1) Mezcla asfáltica en frío:	10
2) Mezclas asfálticas en caliente:	10
3) Mezclas densas en frío:	10
4) Arena – Asfalto:	11
D. Asfaltos modificados con polímero.....	11
1) Polímeros modificadores de asfalto:	11

2) Polímero SBS:	12
3) Modificación de la emulsión asfáltica:.....	12
4) Diseño de mezclas:	14
5) Propiedades consideradas en el diseño de mezclas:.....	15
2) Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS-19:.....	17
E. Marco Técnico.....	17
1) Manual MOP001F-2002:.....	17
3) Norma ASTM D6373 – Especificación estándar para ligante asfáltico de alto rendimiento:.....	17
4) Norma ASTM C702 (Reducción) y ASTM C136 (Granulometría) -preparación y granulometría del agregado fino (Arena):	18
5) Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2060 Cementos Asfálticos:.....	20
CAPÍTULO 2.....	21
ENSAYOS DE LABORATORIO	21
A. Antecedentes del estudio.....	21
B. Metodología de diseño.....	22
1) Ensayos aplicados al material:	22
2) Emulsión asfáltica:	41
CAPÍTULO 3.....	54
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
A. Elaboración de briquetas por medio del martillo compactador automático Marshall	54
1) Introducción:	54
2) Dosificación de agregados para la mezcla:	54
3) Contenido óptimo de humedad:	55
4) Contenido tentativo de emulsión:.....	57
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DATOS.....	59
B. Comparación de propiedades reológicas entre emulsiones.....	59
1) Viscosidad Furol SSF (ASTM D88):	60
2) Ensayo de penetración ASTM D5:.....	62
3) Ensayo de ductilidad ASTM D113-07:	63

4) Punto de Ablandamiento (ASTM D36) (ASTM D5973):.....	64
C. Ensayo Marshall.....	64
1) Ensayo de briquetas con emulsión CSS-1h:.....	65
2) Ensayo de briquetas con emulsión CSS-1hP:.....	67
CAPÍTULO 4.....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	71
D. Conclusiones	71
E. Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS	74
GLOSARIO	76
ANEXOS	79
Anexo 1. Ensayos de laboratorio abrasión mediante máquina de los ángeles en el agregado de 3/4".	79
Anexo 2. Ensayos de laboratorio abrasión mediante máquina de los ángeles en el agregado 1/2".	80
Anexo 3. Ensayos de laboratorio durabilidad de los agregados a la acción de los sulfatos.	81

RESUMEN

El propósito central de este estudio consiste en contrastar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en frío, con una distinción entre aquellas elaboradas con emulsión convencional y las modificadas mediante Estireno-Butadieno-Estireno (SBS). El análisis abarca la funcionalidad y la durabilidad de estos materiales en pavimentos flexibles ante condiciones climáticas cambiantes. Para asegurar la aplicabilidad de los resultados, el procedimiento se alineó rigurosamente con los criterios del Manual de Especificaciones MOP 001F-2002, lo cual garantiza el cumplimiento normativo nacional. La validación de la calidad de los insumos incluyó la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los agregados pétreos extraídos en Pifo (Pichincha). Mediante pruebas de laboratorio, se verificó la aptitud de estos materiales para la optimización de la resistencia, la capacidad de deformación y la respuesta ante la humedad. De forma paralela, se efectuó una caracterización técnica de ambos tipos de emulsión para aislar las variables críticas que definen el comportamiento de la capa de rodadura. La estrategia experimental para la dosificación se basó en el método Marshall modificado, con un enfoque en la estabilidad, el flujo y la resistencia a la deformación. Los datos obtenidos demuestran que las emulsiones tratadas con SBS superan el rendimiento estándar, pues ofrecen una mayor vida útil y una integridad superior frente al deterioro por agua. Esta investigación valida el uso de recursos locales y tecnologías mejoradas como una vía efectiva para el desarrollo de infraestructura vial sostenible.

TÉRMINOS CLAVES: Emulsión asfáltica, polímeros, asfalto, red vial, SBS

ABSTRACT

The central purpose of this study is to compare the mechanical performance of cold asphalt mixtures, distinguishing between those produced with conventional emulsions and those modified with Styrene Butadiene Styrene (SBS). The analysis addresses the functionality and durability of these materials in flexible pavements under changing climatic conditions. To ensure the applicability of the results, the methodology was rigorously aligned with the criteria established in the MOP 001F-2002 Specifications Manual, thereby guaranteeing compliance with national regulations. Quality validation of the inputs included the characterization of the physical and mechanical properties of the stone aggregates sourced from Pifo (Pichincha). Laboratory testing confirmed the suitability of these materials for optimizing strength, deformation capacity, and moisture resistance. In parallel, a technical characterization of both types of emulsion was conducted in order to isolate the critical variables that govern the behavior of the wearing course. The experimental strategy for mixture design was based on the modified Marshall method, with emphasis on stability, flow, and resistance to deformation. The results demonstrate that SBS-modified emulsions outperform standard formulations, providing longer service life and superior integrity against moisture-induced deterioration. This research validates the use of local resources and enhanced technologies as an effective pathway toward the development of sustainable road infrastructure.

KEY TERMS: asphalt emulsion, polymers, asphalt, road network, SBS

CAPÍTULO 1

I. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se desarrolla a través de un análisis comparativo, que examina las diferencias entre las emulsiones asfálticas tradicionales y aquellas que incorporan polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno). La finalidad es aislar y evaluar las ventajas de esta modificación, al contemplar tres parámetros esenciales de desempeño: resistencia mecánica, flexibilidad y durabilidad [1]. Gracias a sus propiedades químicas mejoradas, las emulsiones polimerizadas logran resistir el doble impacto del clima y el tráfico vehicular. Esta capacidad resulta determinante en entornos como el ecuatoriano, pues su accidentada geografía somete a la infraestructura vial a condiciones de servicio particularmente exigentes [2].

En este sentido, el diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión modificada mediante polímeros SBS se justifica por las ventajas que ofrece en cuanto a prestaciones, durabilidad y sostenibilidad. Esta modificación optimiza las propiedades de flujo del asfalto y permite la obtención de una mayor elasticidad y resistencia ante la deformación plástica. De este modo, se limitan las fisuras y el ahuellamiento en el pavimento. Asimismo, esta tecnología fortalece la unión entre los áridos y el ligante, lo cual incrementa la resistencia a la humedad y extiende la vida útil de la estructura vial [3].

Se aplica un enfoque experimental que comprende la caracterización de los materiales, el diseño de las mezclas asfálticas y la evaluación del desempeño de las probetas mediante ensayos de laboratorio. El proceso inicia con la selección y el análisis de los agregados y del ligante asfáltico modificado y amparado en las normativas técnicas vigentes. Posteriormente, se ejecutan diseños de mezclas con diversas proporciones de emulsión para establecer la formulación óptima. En el análisis de los agregados se evalúan parámetros como: granulometría, forma, resistencia al desgaste y afinidad química con el ligante.

La experimentación tiene como finalidad el perfeccionamiento de las propiedades mecánicas y reológicas del material bituminoso. En este sentido, los asfaltos modificados con polímeros presentan una capacidad elástica superior, la cual facilita la recuperación de la forma original una vez que cesa el esfuerzo de tensión. Además, debido a su elevada estabilidad, el asfalto modificado con polímero soporta cargas de mayor magnitud en comparación con el asfalto tradicional [4].

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo General*

Realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico y el desempeño de mezclas asfálticas en frío, elaboradas tanto con emulsión asfáltica no polimerizada y polimerizada con SBS.

B. *Objetivos Específicos*

- Evaluar el cumplimiento de las propiedades físico-mecánicas de los agregados provenientes de la cantera de Pifo, mediante las especificaciones técnicas establecidas en el Manual para la Especificación de Caminos y Puentes MOP 001F-2002.
- Determinar las propiedades físicas de la emulsión asfáltica sin polímero y de la emulsión con polímero SBS, mediante los ensayos de laboratorio: viscosidad, tiempo de rotura, ductilidad, penetración.
- Ensayar probetas con mezcla asfáltica no polimerizada y polimerizada con SBS mediante el Método Marshall para realizar un análisis comparativo de estabilidad, flujo y relación estabilidad-flujo.
- Formular conclusiones y recomendaciones técnicas mediante el análisis comparativo de resultados para sustentar los hallazgos de la investigación.

III. JUSTIFICACIÓN

A. *Justificación Teórica*

Los polímeros SBS demuestran una mejora sustancial en las propiedades reológicas del asfalto, debido a que incrementan su elasticidad, la resistencia al envejecimiento y el desempeño ante cargas cíclicas [5]. El empleo de mezclas asfálticas en frío con emulsiones modificadas mediante polímeros SBS adquiere mayor relevancia gracias a los beneficios que aportan a la evolución del desempeño estructural y funcional del pavimento a lo largo de su vida útil. La incorporación de este elastómero otorga al ligante asfáltico una mayor flexibilidad y capacidad de recuperación elástica [6]. Esta propiedad facilita el control de las deformaciones permanentes, como el ahuellamiento, y reduce de manera simultánea la formación de grietas.

De igual manera, la naturaleza del polímero fortalece la unión química entre el ligante y los agregados, lo cual deriva en una resistencia superior ante la acción de la humedad y una estabilidad mayor bajo las cargas de tráfico. Estas cualidades permiten que las mezclas modificadas con SBS presenten una vida útil extendida y un rendimiento más fiable frente a las formulaciones convencionales [3].

Las mezclas asfálticas en frío combinadas con emulsión modificada mediante polímeros SBS ofrecen múltiples ventajas, entre las que destacan la optimización del comportamiento mecánico, la durabilidad y la sostenibilidad [7]. La modificación con polímero SBS mejora las características reológicas del asfalto mediante el aporte de una mayor capacidad elástica y resistencia ante la deformación plástica; por consiguiente, disminuye el agrietamiento y el ahuellamiento en las superficies de rodadura. Esta tecnología también promueve una adhesividad superior entre los agregados y el ligante, permite así prolongar la durabilidad operativa del firme [3].

En los proyectos de ingeniería civil, la selección de materiales de alta calidad resulta fundamental. En este contexto, el empleo de mezclas asfálticas modificadas con polímeros SBS representa una evolución técnica significativa frente a las mezclas convencionales, que asegura infraestructuras viales más resilientes y eficientes.

B. Justificación Metodológica

El desarrollo de mezclas asfálticas en frío mediante emulsión con polímeros se articula, en este caso, a través de una metodología netamente experimental. Esta secuencia operativa abarca desde la caracterización inicial de los materiales y el diseño de la emulsión, hasta la fase de manufactura de la mezcla, la compactación de briquetas y su evaluación final mediante pruebas de laboratorio. Para asegurar la idoneidad técnica de los componentes: ligante modificado y agregados extraídos de la cantera de Pifo, tanto la selección como el análisis se fundamentan en las directrices del Manual para la Especificación de Caminos y Puentes MOP 001F-2002. Posteriormente, se diseñan mezclas asfálticas con diversas proporciones de emulsión modificada con polímero, fijadas en 5%, 6%, 7% y 8%, con el fin de establecer la formulación óptima. En la fase final, se comprueba la resistencia mecánica de las briquetas fabricadas con los porcentajes óptimos de emulsión y agua mediante la aplicación de cargas controladas

IV. HIPÓTESIS

La incorporación del polímero SBS en la emulsión asfáltica utilizada para la fabricación de mezclas asfálticas en frío permite mejorar significativamente la resistencia del pavimento.

V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La desintegración temprana de los pavimentos constituye un problema recurrente en la infraestructura vial, lo cual deriva en una movilidad reducida y en reparaciones onerosas. La optimización del rendimiento y la durabilidad de la estructura se alcanza mediante el empleo de emulsiones de asfalto modificadas con polímeros como el SBS, el cual se presenta como un método alternativo eficaz [3].

En Ecuador, las constantes variaciones climáticas aceleran el deterioro de la capa de rodadura y provocan fallas extremas. Bajo condiciones de alternancia entre lluvia y sequedad, sumadas a una radiación intensa, las mezclas en frío presentan sensibilidad a la humedad, un curado insuficiente y la pérdida de adhesión. Estos factores conducen a una degradación prematura de la superficie de rodamiento [8].

En este contexto, países como Canadá y diversos estados de EE. UU. han implementado las mezclas en frío perfilándose como una alternativa de demanda energética reducida para la conservación de caminos rurales y secundarios. Asimismo, existen experiencias documentadas con emulsiones poliméricas diseñadas para elevar el desempeño ante condiciones de tráfico severo [9].

Según los datos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) de Ecuador, la Red Vial Estatal posee una longitud total de 10.264,17 km. De esta cifra, el 11,35% (1.164,74 km) se encuentra en mal estado, mientras que el 28,43%, (2.917,66 km) presenta un estado regular. Estos valores implican que, al evaluar el estado de la red vial nacional, se identifica que un segmento considerable (aproximadamente el 40%) opera con deficiencias marcadas. En consecuencia, la intervención inmediata, mediante planes de mantenimiento o conservación se convierte en una prioridad ineludible para revertir dicho deterioro, con el fin de garantizar la seguridad vial y una transitabilidad adecuada [10].

VI. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el uso de las emulsiones asfálticas aplicadas en frío ha adquirido relevancia en los procesos constructivos y de rehabilitación de pavimentos. La fabricación en frío permite la ejecución de obras sin la necesidad de emplear altas temperaturas, lo cual contribuye a la mitigación de la demanda energética y de la huella ecológica asociada.

En una investigación sobre el uso de polímeros tipo SBS para la optimización de mezclas asfálticas en climas cálidos, se observa que la incorporación de dichos aditivos altera de forma sustancial el comportamiento físico y reológico del ligante. Se explica que, mediante el empleo de asfaltos con mayor viscosidad, las capas de rodadura experimentan menores deformaciones permanentes y se registra un incremento en la rigidez del material. Asimismo, se menciona que, aunque las mezclas modificadas presentan inicialmente un costo más elevado frente a las convencionales, los análisis de desempeño a largo plazo evidencian que la inversión resulta favorable, debido a que disminuyen las intervenciones tempranas y se extiende la vida útil del pavimento [5].

Según lo expuesto por Wulf [11] las mezclas asfálticas modificadas, la incorporación de polímeros desencadena una acción iónica superficial que resulta determinante: optimiza la interfaz entre los agregados minerales y el ligante, y asegura la cohesión incluso ante la presencia de agua. Esta mejora no es aislada; el uso de tales aditivos refuerza la capacidad del material para resistir deformaciones y soportar cargas de tensión repetitivas, lo que deriva en una notable disminución de la fatiga estructural. De igual forma, al reducir la susceptibilidad térmica frente a variaciones drásticas de temperatura, el polímero limita eficazmente la formación de fisuras en las capas del pavimento.

VII. MARCO TEÓRICO

Diversas investigaciones abordan las cualidades de los polímeros SBS y sostienen que este modificador brinda capacidades potenciadoras en la estabilidad y vida útil del material asfáltico. Las mezclas asfálticas modificadas son aquellas en las que se incorpora un aditivo (como polímeros, caucho o resinas) con el fin de optimizar las características del asfalto convencional. Esta modificación facilita el desarrollo de formulaciones que presenten una flexibilidad mejorada, durabilidad y resistencia ante el envejecimiento y el tráfico pesado [11].

La calidad de las dinámicas de afinidad e interfaz en el sistema asfalto-polímero depende

de la estructura química del modificador, la cual debe permitir una dispersión adecuada dentro de la matriz bituminosa. Este proceso favorece la formación de una red interna que perfecciona el comportamiento mecánico del material. La configuración de dicha red se encuentra influenciada por la concentración de fracción aromática constitutiva del ligante asfáltico original [11].

Mediante la modificación con polímeros, el asfalto adquiere una elasticidad superior, lo cual le permite recuperar su forma original en cuanto cesan las tensiones que provocan su deformación. Asimismo, la estabilidad adicional que aportan los polímeros permite que este tipo de ligante soporte cargas de mayor magnitud frente a un asfalto convencional. La técnica consiste en la adición de materiales como el SBS, caucho modificado o polietileno para robustecer las propiedades del ligante. En particular, los polímeros SBS destacan por su aporte a la elasticidad, resistencia ante la deformación y estabilidad térmica superior; cualidades ideales para pavimentos expuestos a temperaturas extremas o tránsito pesado.

En mezclas con baja presencia de modificador, el asfalto actúa como matriz continua acoge al polímero disperso. Esta configuración, sin embargo, sufre una inversión de fases si se incrementa la proporción en el ligante; bajo estas condiciones, es el polímero hinchado el que conforma la fase continua, relega al asfalto a una distribución discontinua. Tal micromorfología bifásica, unida a las interacciones moleculares internas es el factor determinante tras la evolución de las propiedades físicas en los asfaltos modificados. En términos prácticos, el beneficio central radica en cómo se redefine la relación viscosidad-temperatura: esto optimiza la respuesta del material dentro de su rango de servicio, y garantiza estabilidad tanto en climas gélidos como en escenarios de alto calor [10].

A. Emulsión

La dispersión de asfalto en un medio acuoso da lugar a las emulsiones, cuya viabilidad depende de la incorporación de agentes tensoactivos, comúnmente llamados emulsificantes. Estos aditivos resultan esenciales para conservar la estabilidad del sistema, y permite que la mezcla se mantenga íntegra a temperaturas inferiores a los 100 °C. [12]. Para garantizar la estabilidad inicial en la producción de emulsiones asfálticas, la mezcla integra una fase acuosa, este componente es el encargado de mantener dispersas las partículas de asfalto, a la vez que bloquea cualquier posibilidad de aglutinamiento prematuro.

Una carga eléctrica iónica, aportada por el emulsificante, envuelve estas partículas. El éxito de su unión o coalescencia queda subordinado a la transferencia térmica dentro del sistema: al evaporarse el agua presente en la fase acuosa, se elimina la barrera y se posibilita el contacto físico directo entre las partículas de asfalto. Sin embargo, este mecanismo no es inmediato; conlleva transitar etapas previas de floculación y precipitación antes de que la emulsión logre su cohesión definitiva [9]. La Figura 1 muestra las etapas de rotura de una emulsión asfáltica.

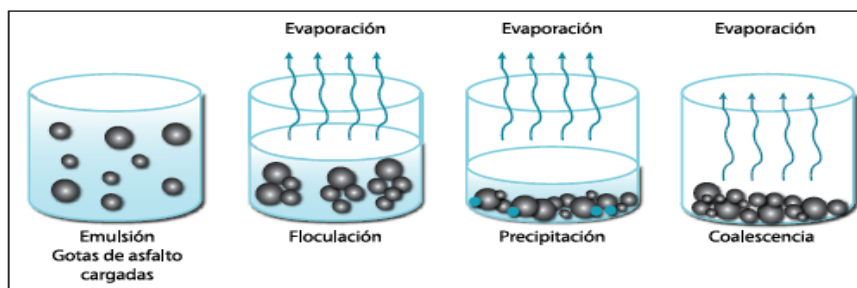


Fig. 1. Etapas de rotura de una emulsión asfáltica
Nota: fuente: Gallardo [9].

B. Clasificación en base a su proceso de ruptura

Las emulsiones se pueden clasificar por su uso o afinidad con la carga con la que se van a mezclar. Existen cuatro tipos de emulsiones: ruptura rápida, ruptura media, ruptura lenta y ruptura controlada [12].

- Ruptura rápida: Este tipo de emulsión se utiliza principalmente en carpetas de sistemas de riego.
- Ruptura media: En aquellas configuraciones donde la proporción de partículas finas es marginal (igual o inferior al 2% de la masa total), su empleo se orienta mayoritariamente hacia las mezclas en frío. Estas soluciones resultan claves para el mantenimiento correctivo como la reparación de baches y la nivelación, así como para diversos tratamientos de superficie.
- Ruptura lenta: Estas soluciones lideran el ámbito de las mezclas en frío gracias a su facilidad de manejo, aunque su versatilidad técnica permite emplearlas en un espectro mucho más amplio: desde la estabilización y recuperación de pavimentos, hasta procesos de riego o impregnación de soportes.
- Ruptura controlada: Considerada una nueva alternativa a las emulsiones que ayudan a que la lechada asfáltica se endurezca más rápido [9].

1) Emulsión CSS-1h:

En su estado líquido, esta emulsión se constituye mediante una dispersión de asfalto en base acuosa, potenciada por el uso de emulsificantes y aditivos específicos. Al no ser contaminante, el material combina sostenibilidad con un alto desempeño técnico, lo cual se evidencia tanto en su larga durabilidad como en su excelente capacidad de adherencia frente a una amplia gama de áridos [13]. Sus siglas:

- C: Corresponde a una emulsión de tipo catiónico, lo que implica que las partículas de asfalto presentes en la mezcla poseen una carga eléctrica positiva.
- SS: Proviene de Slow Setting (Emulsiones de Rotura Lenta), se refiere a una emulsión de rompimiento lento. Este tipo de comportamiento permite un mayor tiempo de manipulación y facilita que el asfalto recubra adecuadamente los agregados finos y el material pulverulento.
- 1: Representa el nivel de viscosidad. En esta clasificación, el número “1” indica una viscosidad relativamente baja en comparación con el grado “2”.
- h: Señala que la emulsión se elabora con un asfalto de elevada dureza (hard), lo que proporciona mejores características estructurales y resistencia en el producto final.

2) Requisitos y pruebas sobre la emulsión:

Las características que ha de cumplir una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta (Cationic Slow Setting “CSS”) se indican en la norma del MOP-001-F-2002, y se clasifican en la siguiente tabla:

TABLA I
REQUISITOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS SEGÚN MOP 001-F-2002.

Parámetro	Rotura lenta			
	CSS-1		CSS-1h	
	mín.	máx.	mín.	máx.
Viscosidad:				
Furol,a 25 gC, s.	20	100	20	100
Furol,a 50 gC, s.	-	-	-	-
Estabilidad al almacenaje 24 h, %	-	1	-	1
Desmasificación: 35 ml .8% sds, %	-	-	-	-
Cubrimiento				
Agregado seco	-	-	-	-
Luego rociado	-	-	-	-
Agregado húmedo	-	-	-	-
Luego rociado	-	-	-	-
Carga de partícula	+		+	
Mezcla con cemento	-	2.0	-	2.0
Ens. Del tamiz	-	0.1	-	0.1
Destilación: aceite destilado %				
Residuo, %	57	-	57	-
Ensayos en el residuo:				
Penetración, a 25 grados 100 g 5 s.	100	250	40	90
Ductilidad, a 25 grados, 5 cm/m, cm.	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno %	97.5	-	97.5	-
Temperatura de empleo:				
Almacenamiento	10	60	10	60
Mezcla en planta	10	70	10	70
Mezcla en sitio	20	70	20	70
Tratamiento superficial	-	-	-	-

Nota: Fuente: [14].

C. Mezclas asfálticas

“Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y emulsión asfáltica. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse in situ” [15]. Algunas mezclas asfálticas son:

- Mezclas bituminosas elaboradas en frío.
- Aglomerados asfálticos producidos en caliente.

- Mezclas de graduación densa en frío.
- Sistemas tipo arena-asfalto.

1) Mezcla asfáltica en frío:

La configuración de las mezclas asfálticas en frío depende de la unión entre agregados pétreos y emulsión, permite incluso la adición de cemento, como agente regulador para controlar la velocidad del curado. No obstante, la realidad geológica de Ecuador condiciona este proceso: el predominio de sílice en los agregados locales genera cargas de polaridad negativa, circunstancia que técnicamente obliga a utilizar de forma generalizada emulsiones asfálticas de tipo catiónico [16]. La Figura 2 muestra una imagen del hormigón asfáltico en frío.



Fig. 2. Hormigón asfáltico en frío
Nota: fuente constructoraferco.com.ar.

2) Mezclas asfálticas en caliente:

Las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) son materiales de pavimentación vial que combinan áridos (piedra, arena) y cemento asfáltico (ligante) calentados y mezclados a altas temperaturas (135-180°C) para lograr flexibilidad y facilitar su colocación y compactación. Estas mezclas ofrecen durabilidad y resistencia para carreteras y calles, con diseños que varían en granulometría (densa, abierta) y se elaboran mediante procesos controlados en plantas especiales, para usar métodos como Marshall [17].

3) Mezclas densas en frío:

Las Mezclas Densas en Frío (MDF) son materiales asfálticos premezclados, listos para usar sin calentamiento, compuestos por agregados pétreos, emulsiones asfálticas y agua, diseñados para obtener una textura cerrada con pocos vacíos (3-8%) y alta compactación, y son ideales para

reparaciones y capas de rodadura de bajo tránsito. Además, ofrecen una solución práctica, eficiente y sostenible para el mantenimiento de pavimentos [18].

4) Arena – Asfalto:

La mezcla arena-asfalto es la base de los pavimentos flexibles, se debe combinar agregados pétreos (arena, grava) con asfalto (ligante bituminoso) para crear una masa resistente y duradera para carreteras, aceras y bacheos. Estas mezclas pueden presentarse en caliente (plantas) o en frío (emulsiones), y presentan proporciones exactas para optimizar la resistencia, adhesión y confort de la superficie final.

D. Asfaltos modificados con polímero

Básicamente, este producto resulta de la incorporación o disolución de un polímero dentro del asfalto. Se trata de una sustancia estable ante las fluctuaciones del clima que, al integrarse en el material asfáltico, transforma sus capacidades físicas y reológicas. El objetivo es claro: reducir la oxidación y minimizar la sensibilidad del compuesto frente a la humedad y los cambios de temperatura [19]. En la figura 3 se muestra una imagen de la maquinaria pesada hace reparaciones viales con asfalto modificado con polímeros SBS.



Fig. 3. Maquinaria pesada en reparación vial con asfalto modificado con polímeros SBS.
Nota: fuente Chem Fluid.com.

1) Polímeros modificadores de asfalto:

La validación técnica de los polímeros sintéticos con formulaciones especiales ha demostrado ser altamente competitiva tras su evaluación en estructuras de pavimento. Dentro de este contexto, los modificadores se categorizan según su composición y función específica en obra:

- Polímero tipo I: Surgen de modificar cementos asfálticos convencionales mediante la

adición de polietileno; su aplicación principal se centra en el desarrollo de mezclas con capacidad drenante.

- Tipos II, III y IV: Esta familia comparte una base química común el uso de copolímeros de bloque estirénico, tal como el SBS integrados al ligante tradicional.
- Polímero tipo III: Se destina a escenarios de altas exigencias de carga, para mezclas calientes que varían desde discontinuas y densas, hasta semidensas o gruesas.
- Polímero tipo IV: Su nicho es la mitigación de fallas; se utiliza para crear membranas que absorben esfuerzos (riegos en caliente) o en sistemas de arena-asfalto diseñados para frenar la reflexión de grietas.
- Polímeros tipo V: Es un asfalto modificado que destaca por su elevada consistencia, y es la opción idónea para la manufactura de mezclas asfálticas de alto módulo [19].

2) Polímero SBS:

Los polímeros SBS se utilizan como modificador de emulsión asfáltica, ya que el SBS mejora la flexibilidad, elasticidad y resistencia al envejecimiento del ligante, que aumentan la durabilidad del pavimento.

3) Modificación de la emulsión asfáltica:

Si bien el asfalto constituye la base tradicional de la infraestructura vial, el incremento sostenido del parque automotor obliga a replantear sus prestaciones. Hoy se requieren ligantes con un comportamiento reológico y mecánico superior. Para responder a este desafío en las mezclas en caliente, se suele optar por la modificación del asfalto convencional mediante polímeros SBS, elastómeros tribloque de estructura lineal o radial procesados en planta.

Esta adición transforma el desempeño del material, y garantiza estabilidad tanto en temperaturas altas como bajas; gracias a ello, disminuye drásticamente la incidencia de fallas críticas, como el ahuellamiento o el agrietamiento térmico y por rigidez. No obstante, el uso de esta tecnología implica desafíos logísticos: requiere adquisiciones en volúmenes estratégicos y protocolos de almacenamiento muy precisos [9].

a) Beneficios de la modificación de la emulsión asfáltica:

Aunque los asfaltos convencionales suelen comportarse adecuadamente en términos de mecánica y adhesión bajo condiciones estándar, el escenario actual presenta retos que a menudo

exceden sus prestaciones. El incremento sustancial en el volumen de tránsito y la severidad de las cargas, aunado a la presión por optimizar los recursos de inversión hacen que el material tradicional resulte insuficiente en muchos proyectos. En este contexto, la modificación con polímeros se plantea como una solución técnica necesaria más que opcional. Si bien esta tecnología puede elevar el costo de la mezcla asfáltica hasta un 25%, la inversión se justifica plenamente al extender la vida útil del pavimento entre dos y tres veces, depende del caso específico de aplicación [20].

La integración de polímeros en la matriz asfáltica responde, esencialmente, a la necesidad de elevar los estándares de calidad y satisfacer las exigencias técnicas de proyectos que requieren un betún de alto desempeño. Esta modificación no solo busca cumplir con normativas más estrictas, sino que optimiza el comportamiento físico del material. A continuación, se detalla cómo esta adición transforma y potencia las propiedades de la mezcla:

- Lograr formulaciones que mantengan una mayor flexibilidad a bajas temperaturas operativas, para reducir así la rigidez del material.
- Mitigar la propagación de fisuras o grietas exacerbadas por las condiciones del cambio climático.
- Rectificar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas ante cargas cíclicas.
- Potenciar la afinidad fisicoquímica en la interfaz ligante-agregado pétreo para limitar riesgos de cohesión.
- Prevenir fenómenos de desprendimiento (técnicamente conocidos como stripping).
- Maximizar la resistencia al desgaste superficial en el diseño de las mezclas.

b) Técnicas para modificar asfaltos:

La adición de componentes poliméricos transforma la naturaleza del asfalto; sin embargo, las características específicas que desarrolla este material modificado están condicionadas por los siguientes parámetros:

- Categoría específica del polímero (distinguiéndose entre elastómeros y plastómeros).
- Propiedades intrínsecas y la calidad del asfalto base.
- Tecnología del equipo de manufactura.
- Control riguroso de las variables operativas: temperatura y tiempos de residencia.
- Grado de afinidad química o compatibilidad entre el ligante y el polímero.

No existe una metodología única de incorporación; la técnica operativa se subordina

directamente a las características del aditivo. Por ejemplo, mientras que materiales como el EVA (Etileno–Vinil–Acetato) permiten una integración relativamente directa mediante mezclado, el uso de SBS es más complejo, y exige una trituración o molienda previa del material.

En el caso del SBS, la secuencia crítica de modificación se estructura en las siguientes etapas:

- Caracterización del ligante base. El procedimiento inicia con una evaluación del asfalto original para establecer sus propiedades de partida.
- Acondicionamiento térmico. Una vez validado el material, se procede a elevar su temperatura; este paso es vital para reducir la viscosidad y facilitar la incorporación de aditivos.
- Homogeneización mecánica (alto corte). La integración del sistema asfalto-polímero no es pasiva; requiere un proceso activo de molienda que emplea equipos de alto corte, lo cual asegura una dispersión fina y estable de las partículas.
- Monitoreo morfológico. Para garantizar que la mezcla sea uniforme, se controla la calidad mediante observación directa con microscopía óptica durante la producción.
- Consolidación y validación. La etapa final implica cerrar la reacción química. Es importante notar que, aunque el mezclado se opera en un rango de 180°C a 190°C con tiempos que fluctuarán según la facilidad de dispersión del polímero, las pruebas físicas definitivas para certificar el asfalto modificado solo se ejecutan tras un periodo de reposo de 24 horas [9].

4) Diseño de mezclas:

El diseño se fundamenta en el cumplimiento de los parámetros de estabilidad, flujo y vacíos. Este proceso sigue la metodología Marshall que es adaptada para emulsiones. El proceso para alcanzar la dosificación óptima se estructura en las siguientes etapas [2]:

- Selección de la graduación granulométrica: Definir la combinación de agregados (grava y arena) que cumpla con las bandas granulométricas especificadas para una mezcla densa o abierta, según sea el caso.
- Determinación del contenido óptimo de humedad (Preadición): El agua de pre-humedecimiento es crítica para la trabajabilidad. Este porcentaje se obtuvo mediante el ensayo de recubrimiento visual, donde se varió el contenido de agua entre el 2% y 5%. El valor óptimo es aquel que permite que la emulsión se disperse sin formar grumos y cubra

más del 95% del agregado, y evita el escurrimiento de la fase acuosa.

- Variación del contenido de emulsión: Elaborar series de briquetas Marshall varía el porcentaje de ligante.
- Proceso de curado: A diferencia de las mezclas en caliente, las briquetas en frío requieren un periodo de curado (típicamente 24 horas a 60 °C) para asegurar la evaporación del agua antes del ensayo de rotura.

5) Propiedades consideradas en el diseño de mezclas:

Lograr que una mezcla asfáltica en caliente rinda al máximo nivel requiere alinear con precisión tres fases críticas: diseño, fabricación y puesta en obra. La calidad final del recubrimiento no es un atributo genérico, sino el resultado de equilibrar propiedades mecánicas y funcionales específicas. Entre estas se destacan: estabilidad y resistencia estructural, que deben coexistir con la flexibilidad necesaria para soportar la fatiga del material. Asimismo, la vida útil y la seguridad del pavimento dependen de factores como la impermeabilidad, una adecuada trabajabilidad durante la extensión y fundamentalmente la resistencia al deslizamiento.

a) Estabilidad:

En ingeniería vial, la estabilidad del asfalto se define por su competencia para resistir deformaciones o desplazamientos bajo la presión del tráfico. Si el pavimento es estable, conservará su forma y regularidad superficial a pesar de las cargas cíclicas; sin embargo, si esta capacidad falla, la estructura revela su inestabilidad mediante signos claros como el ahuellamiento o las corrugaciones que alertan sobre alteraciones en la mezcla [22].

La capacidad de la mezcla para mantener su estabilidad se rige por dos mecanismos complementarios: fricción interna y cohesión. En lo que respecta a la fricción intergranular, esta deriva de las propiedades físicas de los agregados principalmente su textura superficial y angularidad, mientras que la cohesión es el producto directo de la acción ligante del asfalto. Solamente si existe una magnitud suficiente de esta trabazón mecánica y adhesión interna es posible restringir el movimiento relativo de las partículas ante los esfuerzos deformantes del tránsito [22].

b) Durabilidad:

La durabilidad, en el contexto de la ingeniería de pavimentos, se manifiesta como la

competencia estructural para soportar procesos degenerativos críticos como: degradación de los áridos, desprendimiento de la película bituminosa o alteración de las propiedades del ligante por oxidación y polimerización. Estos fenómenos no son espontáneos; responden directamente a la severidad del clima, intensidad del tráfico o, con frecuencia, a la sinergia destructiva entre ambos agentes [22].

c) Caracterización de materiales granulares:

Para que los materiales granulares puedan integrarse eficazmente en la mezcla asfáltica, resulta imprescindible verificar primero que sus propiedades se ajusten a los estándares de calidad exigidos. Esta caracterización técnica se lleva a cabo mediante la ejecución de una serie de pruebas específicas detalladas a continuación que permiten validar su idoneidad:

- Abrasión del agregado grueso en la máquina de los Ángeles.
- Ensayo de azul metileno.
- Determinar la gravedad específica del agregado grueso y fino.
- Determinar el análisis granulométrico.

Todos estos ensayos se deben realizar en base a la normativa INEN vigente y su referencia en normas internacionales como ASTM.

d) Requerimientos volumétricos de la mezcla:

Resulta imposible dissociar el desempeño de la mezcla asfáltica de sus proporciones volumétricas, pues el equilibrio entre el asfalto y los componentes pétreos es determinante. Se debe considerar que el agregado mineral actúa como una estructura porosa capaz de retener en grados muy variables, tanto agua como betún. Dado que este coeficiente de absorción fluctúa significativamente depende del tipo de árido, esto no es una constante universal, es indispensable atender a los conceptos técnicos que se desglosan a continuación para garantizar un diseño preciso:

- Vacíos en el agregado mineral (VMA): Este parámetro representa el espacio intergranular que existe dentro de una mezcla asfáltica tras su compactación. No se trata de huecos vacíos en su totalidad, ya que el VMA calculado como un porcentaje del volumen total de la muestra engloba tanto las bolsas de aire como el espacio ocupado por el asfalto efectivo.
- Vacíos de aire (Va): Corresponden específicamente a las cavidades gaseosas que quedan atrapadas entre las partículas del agregado ya recubiertas por el ligante. En términos de medición, este valor refleja qué porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada es,

puramente, aire.

- Vacíos llenados con asfalto (VFA): Se definen como la fracción del espacio disponible entre los agregados que ha sido saturada por el asfalto efectivo. Es decir, representa la proporción de los huecos intergranulares que, en lugar de aire, contienen material asfáltico.

2) *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS-19:*

Sirve como referencia en la ingeniería vial para el uso de emulsiones asfálticas en mezclas en frío. Estas mezclas son aplicadas en la construcción y mantenimiento de carreteras, por lo que este manual proporciona una comprensión detallada de las propiedades, aplicaciones y beneficios de las emulsiones asfálticas en este tipo de mezclas. El MS-19 describe los distintos tipos de emulsiones asfálticas, sus propiedades físicas y químicas, así como las metodologías para su correcta aplicación. Además, establece los siguientes ensayos que deben cumplirse para garantizar la calidad de los materiales, entre ellos [21]:

- Ensayos en los agregados: granulometría, densidad y peso específico, sulfatos y abrasión.
- Ensayos en la emulsión asfáltica: viscosidad Saybolt-Furol, residuo por destilación.
- Ensayos en la mezcla tratada con emulsión: ensayo Marshall, resistencia a la tracción indirecta.

E. *Marco Técnico*

Dicho marco técnico-normativo funge como la base sustancial de nuestro trabajo: establece las directrices tanto para el diseño de pavimentos mediante emulsión asfáltica modificada con polímeros SBS como para la validación de la calidad del agregado.

1) *Manual MOP001F-2002:*

Define los parámetros técnicos que regirán el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos en el Ecuador. Este manual es fundamental para garantizar que el diseño de pavimento con emulsión asfáltica modificada con polímeros SBS y los agregados que se utilizarán cumpla con las normativas vigentes en el país [14].

3) *Norma ASTM D6373 – Especificación estándar para ligante asfáltico de alto rendimiento:*

Se definen las directrices esenciales para incorporar polímeros en emulsiones asfálticas, al

abordar los protocolos de actuación y los parámetros de calidad que deben cumplirse sin excepción para garantizar la funcionalidad óptima de las mezclas [23].

4) Norma ASTM C702 (Reducción) y ASTM C136 (Granulometría) -preparación y granulometría del agregado fino (Arena):

La validez de los resultados en los ensayos de laboratorio depende directamente de la representatividad de las muestras. Por ello, el tratamiento del material pétreo se rige por procesos normados de reducción y análisis granulométrico.

a) Reducción de muestras de agregados a tamaño de ensayo (ASTM C702):

Este estándar establece las metodologías para reducir las muestras de agregados obtenidas en campo al tamaño mínimo requerido para las pruebas, de modo que se minimice la variación en las características de la muestra reducida respecto a la original [24].

- **Fundamento del Método B (Cuarteo):** emplear si el material posee humedad en su superficie. El proceso consiste en la formación de una pila cónica sobre una superficie plana, limpia y no absorbente. Mediante la mezcla repetida, se asegura la homogeneidad de la distribución de partículas.
- **Ejecución del Cuarteo:** una vez que la pila se aplanan a un espesor y diámetro uniformes, el material se divide en cuatro partes iguales mediante una cruceta o líneas de división transversales. Retirar dos partes diametralmente opuestas, incluidos los finos, y se conservan las dos partes restantes para conformar la muestra de ensayo. Este ciclo se repite hasta obtener la masa necesaria.

b) Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos (ASTM C136):

La normativa ASTM C136 describe el procedimiento para determinar la distribución de los tamaños de las partículas en una muestra de agregado mediante el tamizado.

- **Para establecer la masa de ensayo,** el factor determinante es siempre el tamaño máximo nominal del agregado. En el contexto específico de los finos como la arena, la norma estipula el uso de al menos 300 g de muestra seca. Este volumen es indispensable para garantizar la validez estadística del análisis, y asegura que el número de partículas sea suficiente para representar fielmente la gradación del material [25].
- **Acondicionamiento Térmico:** Es imperativo que la muestra se someta a un proceso de secado en horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que se alcance una masa

constante. Este procedimiento garantiza la eliminación total de la humedad superficial, factor que impide la aglomeración de las partículas finas y permite su libre paso a través de las aberturas de los tamices durante la vibración mecánica.

c) Importancia de la granulometría en mezclas en frío:

La distribución granulométrica influye en la demanda de ligante asfáltico y en la estabilidad mecánica de la mezcla. Una gradación adecuada permite que el asfalto recubra uniformemente cada partícula y que el esqueleto mineral posea una trabazón interna suficiente para resistir las deformaciones bajo cargas de servicio.

d) Tamices establecidos y gradación:

El análisis granulométrico constituye el método fundamental para determinar la distribución porcentual de los diversos tamaños de partículas que integran el agregado. Este proceso se rige por especificaciones dimensionales estrictas para garantizar la uniformidad de los resultados.

La normativa ASTM E11 establece los requisitos técnicos para los tamices de ensayo, los cuales consisten en una malla de alambre tejido montada sobre un bastidor rígido. La selección de la serie de tamices para una mezcla asfáltica en frío (Faja D) cumple funciones específicas dentro del esqueleto mineral:

- Tamiz N° 4 (4.75 mm): Define el límite para separar el agregado grueso del fino.
- Tamiz N° 8 (2.36 mm): Evalúa la fracción de arenas gruesas.
- Tamiz N° 16, 30, 50 y 100: Permiten determinar la distribución de las arenas medias y finas.
- Tamiz N° 200 (0.075 mm): Es el tamiz crítico para medir el contenido de polvo mineral y limos (filler), asegura que el material no exceda los límites de plasticidad o suciedad.

e) Fundamento del procedimiento de tamizado (ASTM C136):

La norma describe el proceso mecánico necesario para asegurar que cada partícula tenga la oportunidad de pasar por las aberturas del tamiz correspondiente [25].

Operación de Tamizado: Una vez que se completa el secado de la muestra, el material se deposita en el tamiz superior del juego organizado de forma descendente. El conjunto se somete a una acción de vibración mecánica.

- Tiempo y suficiencia: El lapso de agitación se sitúa habitualmente entre 10 y 15 minutos.

La norma establece que el tamizado se considera completo si no más del 1% del peso del material retenido en cualquier tamiz pasa por dicho tamiz durante un minuto de tamizado manual adicional.

- **Prevención de errores:** La limitación del tiempo y la intensidad de la vibración evita la degradación mecánica de las partículas blandas. De igual forma, el control de la carga sobre la malla impide la saturación de las aberturas, lo cual asegura que cada partícula alcance el nivel de retención que le corresponde por su geometría real.

f) Análisis de la Faja Granulométrica:

El resultado de este procedimiento se traduce en una curva granulométrica. En el caso de las mezclas en frío, la gradación debe ajustarse a la Faja D, la cual garantiza una estructura densa. Una distribución adecuada dentro de estos límites asegura que los vacíos entre las partículas gruesas se llenen de forma eficiente con las arenas y el filler, lo que maximiza la densidad y la resistencia de la briqueta compactada.

5) Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2060 Cementos Asfálticos:

Esta norma establece los lineamientos técnicos fundamentales para la elaboración, control de calidad y puesta en obra de las mezclas asfálticas empleadas en el Ecuador. En su contenido se definen los requisitos que deben cumplir los materiales constitutivos del pavimento, con especial énfasis en las propiedades físico-químicas y mecánicas de los cementos asfálticos, las emulsiones asfálticas y los agregados pétreos.

Asimismo, la NTE INEN 2060 fija los procedimientos de ensayo, los criterios de aceptación y los límites permisibles de desempeño, con el fin de garantizar durabilidad, estabilidad y comportamiento adecuado de las mezclas frente a las condiciones de carga y ambientales propias del país. Cumplir esta normativa asegura la homogeneidad de los materiales, compatibilidad entre sus componentes y calidad estructural de las capas asfálticas, y contribuye de manera directa a la seguridad vial; así como, a la vida útil de la infraestructura pavimentada [26].

CAPÍTULO 2

ENSAYOS DE LABORATORIO

A. *Antecedentes del estudio*

En el Distrito Metropolitano de Quito existen varias canteras que suministran materiales pétreos para obras civiles; bajo este contexto, para el desarrollo de la investigación, se optó por trabajar con los materiales de la cantera Holcim ubicada en la parroquia de Pifo, provincia de Pichincha.



Fig. 4. Visita a la planta Emuldec con objetivo de realizar los procesos experimentales en aquellas instalaciones

Esta planta se destaca como una de las más reconocidas a nivel nacional en la producción y formulación de emulsiones asfálticas y diseño de mezclas, convirtiéndola en el suministrador de asfalto a diferentes empresas públicas y privadas en una amplia variedad de proyectos viales.

Como primer paso, se aborda la caracterización integral de los agregados con el fin de dimensionar sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso implicó la ejecución rigurosa de los ensayos marcados por la normativa técnica; validar así los materiales resultaba indispensable para asegurar su idoneidad en el análisis comparativo y su integración efectiva en el resto de la investigación.

Los ensayos de laboratorio de pavimentos y granulometría se realizaron en la empresa Emuldec. Por otra parte, en el Laboratorio de Suelos y Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad de Católica del Ecuador (PUCE), se realizaron los ensayos de abrasión por impacto de máquina de los ángulos ASTM C131 y de durabilidad de los agregados a la acción de sulfatos

ASTM C88; los resultados de estos se indican en el Anexo 1 y Anexo 2.

Es pertinente mencionar que la presente investigación integra dentro del análisis comparativo, los resultados experimentales correspondientes a las briquetas elaboradas con emulsión asfáltica no polimerizada (CSS-1h). Dichos datos técnicos han sido adoptados de la tesis titulada: Mezclas asfálticas en frío: estudio comparativo entre emulsiones no polimerizadas y aquellas modificadas con SBS y SBR [2].

Específicamente, de la citada fuente se han acogido los siguientes componentes para conformar la línea base del estudio:

- Ensayos de Caracterización de Probetas sin Polímero: Tomar los valores de Estabilidad y Flujo Marshall obtenidos de las series de briquetas patrón elaboradas con emulsión convencional.

B. Metodología de diseño

1) Ensayos aplicados al material:

a) Caracterización del material:

Utilizar agregado de tamaño máximo nominal (TMN) de 1/2", 3/4" y arena para el desarrollo experimental. El material requiere un acondicionamiento previo mediante secado en horno a 110 °C para asegurar condiciones uniformes antes de la ejecución de los ensayos. Una vez completada esta etapa, los agregados se separan por rangos granulométricos para registrar las masas correspondientes según los lineamientos de las normas ASTM y el manual MS-19.

b) Procedimiento para Agregado Grueso (ASTM C136):

Este procedimiento se aplica a las fracciones de mayor tamaño (3/4" y 1/2") para determinar su distribución granulométrica.

TABLA II
MASA MÍNIMA PARA MUESTRA DE AGREGADO GRUESO

Tamaño Nominal Máximo (mm)	Abertura (pulgadas)	Masa Mínima (kg)
19,0	3/4"	5
12,5	1/2"	2
9,5	3/8"	1

Nota: Fuente adaptada de ASTM C136.

Pasos del proceso:

- Seleccionar la cantidad de material conforme al tamaño nominal máximo indicado en la Tabla IV.
- Secar la muestra en el horno a una temperatura de $110 \pm ^\circ\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante.
- Limpiar las mallas de los tamices con herramientas adecuadas para evitar obstrucciones.
- Organizar los tamices en orden descendente de abertura sobre el agitador mecánico.
- Verter la muestra seca en el tamiz superior y asegurar la tapa del equipo.
- Accionar la vibración mecánica por un lapso de 12 minutos.
- Registrar el peso del material retenido en cada malla con una precisión de 0,1 g.

c) Procedimiento para Agregado Fino / Arena (ASTM C702 y C136)

El análisis de la arena requiere una etapa previa de reducción y un juego de tamices específico debido a la finura de sus partículas.

Pasos del proceso de reducción (Método de Cuarteo - ASTM C702):

- Homogeneizar la arena sobre una superficie limpia hasta formar una pila cónica.
- Aplanar la masa de material hasta lograr un espesor uniforme de 5 cm.
- Dividir el círculo resultante en cuatro cuartos iguales mediante una paleta.
- Eliminar dos de los cuartos situados en posición diagonal.
- Repetir el ciclo de reducción hasta obtener una muestra representativa de 500 g.

Pasos del proceso de tamizado (ASTM C136):

- Introducir la muestra de 500 g en el horno a $110 \pm 5 ^\circ\text{C}$ para eliminar la humedad.
- Disponer la serie de tamices específicos (N° 4, N° 8, N° 50, N° 200 y fondo) de forma

decreciente.

- Cargar el material seco en el tamiz superior del juego organizado.
- Someter los tamices a agitación mecánica durante 12 minutos.
- Pesarse la fracción retenida en cada tamiz y en el fondo receptor.
- Validar que la pérdida de material durante el ensayo no supere el 0,3% de la masa inicial.

d) Referencia de Diseño (Manual MS-19)

Los resultados obtenidos en ambos procedimientos deben contrastarse con los límites de la Faja Tipo D para asegurar la calidad de la mezcla asfáltica en frío.

TABLA III
LÍMITES DE LA FAJA TIPO D

Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa (%)
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	80 – 100
N° 4	4,75	60 – 80
N° 8	2,36	25 – 55
N° 50	0,300	5 – 20
N° 200	0,075	2 – 9

Nota: Fuente Manual MS-19 (Tabla 7.2).

e) Granulometría de Agregado Fino (Arena)

Cantidad de masa requerida: La norma ASTM C136 establece que para una arena donde el 85% pasa el tamiz N° 4 y más del 5% es retenido en el tamiz N° 8, la masa mínima de ensayo debe ser de 500 g (0,5 kg) de material seco.

Serie de tamices establecida: Según la norma y el diseño para la Faja Tipo D del Manual MS-19, se deben utilizar los siguientes tamices:

TABLA IV
 ESPECIFICACIONES DE LA SERIE DE TAMICES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA EN
 MEZCLAS ASFÁLTICAS (FAJA TIPO D).

Designación del Tamiz	Abertura (mm)	Función en el ensayo
Tamiz N° 4	4,75 mm	Determinar el límite superior de la arena.
Tamiz N° 8	2,36 mm	Evaluar la fracción más gruesa de la arena.
Tamiz N° 50	0,300 mm	Controlar las partículas medias-finas.
Tamiz N° 200	0,075 mm	Cuantificar el contenido de polvo mineral y arcillas.
Fondo	-	Recolectar el material pasante final.

Nota. Fuente: Adaptado de ASTM C136 y Manual MS-19 del Asphalt Institute.

f) Requisitos de Tamizado para Agregado Fino (ASTM C33)

El agregado fino debe consistir en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas. Según lo estipulado en la sección 6.1 de la norma, la gradación del material debe ajustarse a los siguientes límites de control [27]:

TABLA V
 LÍMITES DE GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO (ASTM C33)

Tamiz (Especificación E 11)	Abertura Métrica	Porcentaje Pasante (%)
9.5 mm (3/8 in)	9.5 mm	100
No. 4	4.75 mm	95 a 100
No. 8	2.36 mm	80 a 100
No. 16	1.18 mm	50 a 85
No. 30	600 µm	25 a 60
No. 50	300 µm	5 a 30
No. 100	150 µm	0 a 10

Nota: Fuente: ASTM [27].



Fig. 5. Colocación de material ($3/4$, $1/2$ y polvo de piedra) de la cantera de Holcim



Fig. 6. Homogenización de materiales, previo al ensayo granulométrico

Los resultados obtenidos para los agregados de $3/4$ " y de $1/2$ " se muestran en la tabla VI a continuación:

TABLA VI
RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS MATERIALES.

Agregado		Faja D		Tamaño del agregado (3/4")			Pasante
Abertura de tamiz		Min	Max	Masa Retenida	% Retenido		
In	mm				Masa Retenida	% Retenido	% Retenido
1 (1/2)"	38.1	100	100	0	0	0	100.00
1"	25.4	100	100	14.615	1.69	1.69	98.31
3/4"	19	90	100	377.425	43.66	45.35	54.65
3/8"	9.53	60	80	140.295	16.23	61.58	38.42
#4	4.75	35	65	217.09	25.11	86.69	13.31
#8	2.36	20	50	56.665	6.55	93.25	6.75
#50	0.3	3	20	10.73	1.24	94.49	5.51
#200	0.075	2	8	6.32	0.73	95.22	4.78
Pasante				41.345	4.78	100.00	0.00
				864.485	100		

Agregado		Faja D		Tamaño del agregado (1/2")			Pasante
Abertura de tamiz		Min	Max	Masa Retenida	% Retenido		
In	mm				Masa Retenida	% Retenido	% Retenido
1 (1/2)"	38.1	100	100	0	0	0	100.00
1"	25.4	100	100	0	0	0	100.00
3/4"	19	90	100	23	1.59	1.59	98.41
3/8"	9.53	60	80	526.02	36.44	38.04	61.96
#4	4.75	35	65	415.97	28.82	66.85	33.15
#8	2.36	20	50	131.33	9.10	75.95	24.05
#50	0.3	3	20	162.45	11.25	87.21	12.79
#200	0.075	2	8	103.84	7.19	94.40	5.60
Pasante				80.81	5.60	100.00	0.00
				1443.42	100		

Evaluar el porcentaje de partículas menores a 0,075mm. Un exceso de este material puede disminuir la cohesión interna, afectar la estabilidad del compuesto y generar problemas como exudación o pérdida de resistencia.



Fig. 7. Colocación del respectivo material en las fajas de tamices y se pesa el material previo a realizar la granulometría por lavado

TABLA VII
RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS MATERIALES (CONTINUACIÓN)

Agregado		Faja		(Arena)				
Abertura de tamiz		D		Masa Retenida	% Retenido	Pasante	Mezcla	
In	mm	Min	Max					
1 (1/2)"	38.1	100	100	0	0	0	100.00	100
1"	25.4	100	100	0	0	0	100.00	100
3/4"	19	90	100	0	0	0	100.00	97.31
3/8"	9.53	60	80	0	0	0	100.00	76.62
#4	4.75	35	65	6.53	0.48	0.482526	99.52	59.56
#8	2.36	20	50	347.44	25.69	26.17544	73.82	43.76
#50	0.3	3	20	698.80	51.68	77.85189	22.15	16.34
#200	0.075	2	8	139.94	10.35	88.20012	11.80	8.11
Pasante				159.57	11.80	100	0.00	0
				1352.26				

A continuación, se presenta la curva granulométrica típica, la misma que está representada en la figura 8, muestra los resultados de las tablas VI y VII.

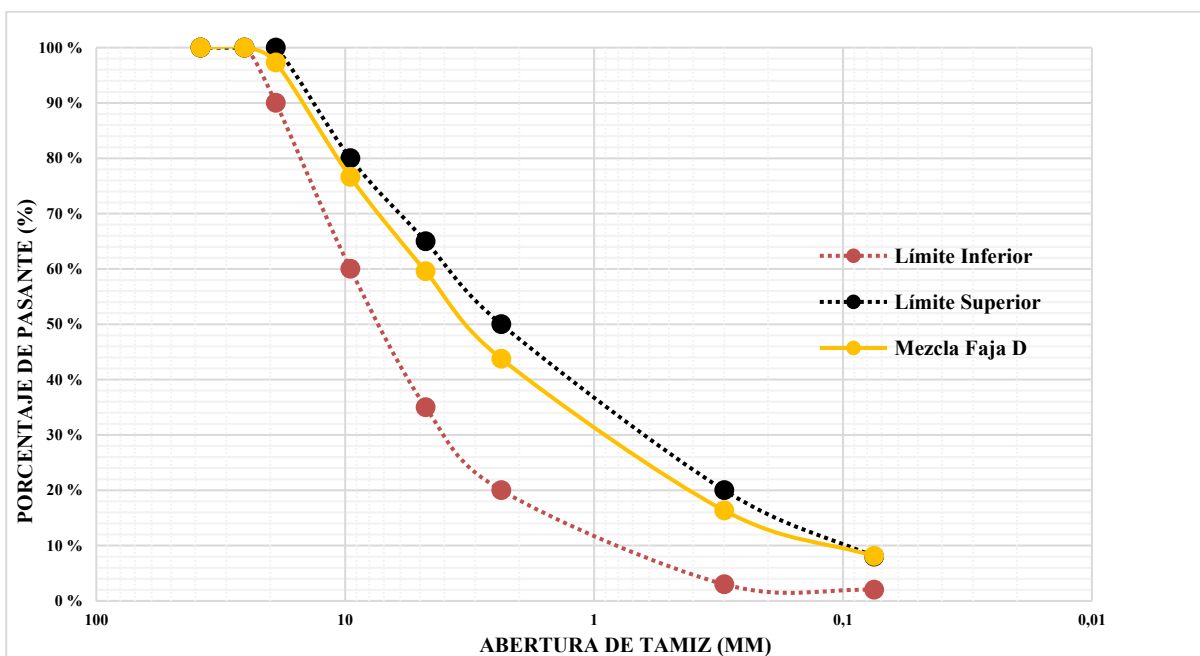


Fig. 8. Curva Granulométrica

g) *Peso específico de los agregados ASTM C 127:*

- **Determinar la densidad y absorción de los agregados**

Estas propiedades son fundamentales, ya que influyen directamente en el contenido óptimo de emulsión y en el comportamiento estructural de la mezcla asfáltica. El peso utilizado para el diseño es el Peso Específico Bulk (Seco), el cual considera el volumen real del agregado incluyendo los poros permeables.

- **Densidad y absorción del agregado grueso (ASTM C127)**

Para el árido grueso, se requiere una masa mínima de ensayo de 3 kg, basada en un tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4"), bajo el siguiente proceso:

- Secar y enfriar: introducir la muestra en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar masa constante y permitir el enfriamiento a temperatura ambiente por un periodo de 1 a 3 horas.
 - Saturar: sumergir el árido en agua por un periodo de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$ para asegurar el llenado de los poros permeables.
 - Alcanzar la condición SSS: retirar la muestra del agua y frotar con un paño absorbente hasta eliminar la lámina visible de líquido; secar las partículas grandes individualmente para lograr el estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).
 - Determinar la masa sumergida: colocar inmediatamente la muestra en la canastilla de malla de alambre y registrar su masa sumergida en agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - Eliminar el aire atrapado: agitar el recipiente o la canastilla durante la inmersión para remover las burbujas de aire adheridas a la superficie del agregado.
 - Registrar la masa seca final: secar nuevamente la muestra en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, enfriar a temperatura ambiente y determinar su masa seca definitiva.
- **Densidad del agregado fino / arena (ASTM C128)**

Debido a la capilaridad de la arena, el procedimiento difiere del agregado grueso, se utiliza un picnómetro de 500 ml:

- Preparación: Utilizar una muestra de aproximadamente 1 kg de arena, la cual fue saturada en agua por $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.
- Determinación de la Condición SSS: Extender la muestra y se aplicó aire caliente suavemente. Utilizar el Ensayo del Cono: se llena un molde cónico, apisonar suavemente 25 veces y se levanta. La condición SSS se alcanza si el cono de arena se desploma levemente al retirar el molde.
- Para el ensayo con picnómetro, disponer 500 g de arena en condición SSS dentro del

recipiente, se agrega agua hasta cubrir cerca del 90 % de su capacidad. En esta etapa fue necesario agitar la mezcla con el objetivo de expulsar el aire atrapado antes de completar el llenado hasta la marca de calibración y registrar la masa final del conjunto.

- Masa Seca: Retirar la arena del picnómetro y se secó en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtener la masa seca final.

- **Densidad Aparente de los Agregados (ASTM C29)**

Este ensayo determina el peso de la unidad de volumen del agregado (suelto o compactado).

- Masa de ensayo: Utilizar un recipiente de volumen conocido (aproximadamente 3 a 7 litros depende del tamaño del agregado).
 - Agregado de 1/2" (12.5 mm): Para este material, se empleó un molde con una capacidad volumétrica de 2.8 litros. Este volumen es el estándar mínimo requerido para agregados con un TMN de hasta 12.5 mm, lo que permite una distribución uniforme de las partículas durante el ensayo.
 - Agregado de 3/4" (19.0 mm): Debido al incremento en el tamaño de la partícula, se utilizó un recipiente de 9.3 litros. Según la normativa, este volumen asegura que el diámetro del molde sea al menos tres veces mayor que el tamaño máximo del agregado, y asegura los requisitos de precisión para el cálculo de densidades y vacíos.
- Ejecución de ensayo de densidad aparente en agregados (Fig. 9): para la condición compactada, el recipiente se llenó en tres capas iguales. Cada capa fue compactada con 25 golpes de una varilla de acero de punta semiesférica, distribuidos uniformemente sobre la superficie.
- Resultado: Enrazar el nivel superior y se determinó la masa del agregado contenido, se calcula la densidad mediante la relación masa/volumen del recipiente.



Fig. 9. Ejecución de ensayo de densidad aparente en agregados

El peso utilizado para el diseño de las mezclas es el peso específico bulk (seco). Este valor considera el volumen real del agregado incluyendo los poros permeables, y representa de mejor manera su comportamiento dentro de la mezcla asfáltica.

TABLA VIII
PESOS ESPECÍFICOS DE LOS AGREGADOS

Tamaño	Masa Seca (g)	Masa SSD (g)	Masa Bajo		GSeco	GSSD	GAP
			Agua (g)	(F+Agua) (g)			
3/4"	2450	2590	1520	-	2,290	2,42	2,63
1/2"	2480	2630	1535	-	2,265	2,402	2,624
Arena	505,08	523,52	1523,52	1200	2,525	2,618	2,782

Descripción de Nomenclaturas

- SSD (Saturated Surface Dry): Condición del agregado en la que sus poros internos están saturados de agua, pero sin presencia de humedad en la superficie de las partículas.
- F + Agua: Masa del material fino saturado sumergido en agua, expresada en gramos.
- GSeco: Peso específico en estado seco del agregado.
- GSSD: Peso específico del agregado en condición saturado superficialmente seco (Saturated Surface Dry).
- GAP: Peso específico aparente del agregado.

Al abordar el diseño de las mezclas, la tabla VIII se vuelve un recurso indispensable. Los valores de peso específico que aporta son los que modulan de forma directa tanto el cálculo del contenido óptimo de emulsión como el desempeño estructural futuro del pavimento.

TABLA IX
PESO ESPECÍFICO PROMEDIO DE LOS AGREGADOS

Material	Tamaño del Agregado	Peso Específico Seco (Kg/m ³)
Agregado grueso de 3/4"	19.0 mm	2,290
Agregado grueso de 1/2"	12.5 mm	2,265
Arena	Agregado Fino	2,525
Valor Promedio Global		2.360

Nota. Adaptado de Castillo et al. [2].

h) Abrasión e impacto por máquina de los ángeles – ASTM C131:

Si bien este ensayo funciona como un indicador eficaz de la calidad relativa entre áridos de composición mineralógica similar, sus resultados no legitiman comparaciones automáticas entre fuentes de origen o estructura divergentes. Por tanto, la definición de los límites de especificación debe basarse necesariamente en el historial de comportamiento del material [28].

Según el Manual MOP 001F-2002, los agregados gruesos tienen un límite de tolerancia al desgaste del 40% tras someterse a 500 revoluciones en la máquina de Los Ángeles; este parámetro técnico se encuentra, a su vez, fundamentado en la norma ASTM C131 [28]. El procedimiento detallado es el siguiente:

1. Selección y preparación de la muestra (ASTM C131 / ASTM C702)

Antes de iniciar el ensayo, se debe asegurar que la muestra sea representativa mediante los siguientes pasos técnicos:

- Muestreo inicial: Recolectar material en función del Tamaño Máximo Nominal (TMN); para un diámetro de 1/2" se requieren 50 kg y para 3/4" se requieren 25 kg.
- Reducción por cuarteo: La muestra original se coloca en una superficie firme, limpia y nivelada para aplicar el método de cuarteo (según ASTM C702), y se obtiene una muestra de ensayo con un peso mayor a los 5 kg.
- Clasificación y lavado: El material se separa por tamaños mediante tamizado, se lava para

eliminar el polvo superficial y se seca en horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

- Determinación de la gradación: Según la norma ASTM C131, para una masa de ensayo de 5000 g, se utiliza la Gradación A, la cual requiere una carga abrasiva de 12 esferas de acero.

2. Método de ensayo y carga abrasiva

Se coloca la muestra y la carga para el ensayo en la máquina de Los Ángeles, se sigue lo indicado en la tabla IX. La carga y el número de revoluciones se determinan en función de la gradación elegida según el tamaño de las partículas:

- Ejecución: colocar la muestra y la carga en la máquina de Los Ángeles.
- Velocidad: girar el cilindro a una velocidad de 30 a 33 r/min hasta completar las 500 revoluciones indicadas para agregados con diámetro menor a 1.5".
- Tamizado Final: tras el ensayo, se retira el material y se realiza una separación preliminar en una malla de mayor abertura, seguida del tamizado final por el Tamiz N° 12 (1.70 mm). La porción retenida se pesa para calcular el porcentaje de desgaste final.

TABLA IX
GRADACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm)	Masa por tamaños indicada (g)	Gradación A (Carga Abrasiva)	Número de Revoluciones
Pasante de	Retenido en		
37.5	25.0	1250 /pm 25	12 esferas
25.0	19.0	1250 /pm 25	
19.0	12.5	1250 /pm 10	
12.5	9.5	1250 /pm 10	
Total		5000 /pm 10	

Nota. Adaptado de la norma ASTM C 131.

Para cumplir con los estándares técnicos internacionales el procedimiento de ejecución del ensayo de abrasión se desarrolla bajo la normativa ASTM C131:

- Operación del equipo: girar el cilindro de la máquina a una velocidad constante de 30 a 33 r/min hasta completar un total de 500 revoluciones. Este parámetro es el estándar establecido para agregados con un diámetro nominal menor a 37.5 mm (1.5").
- Descarga y separación: tras finalizar el ciclo de revoluciones, descargar el material de la máquina y realizar una separación preliminar con un tamiz de mayor abertura que el de 1.70 mm (Tamiz N° 12) para facilitar el proceso de limpieza y pesaje.

- Tamizado y lavado (ASTM C131): Posteriormente, tamizar la porción fina a través del Tamiz N° 12 (1.70 mm) y se sigue los lineamientos de la norma ASTM C131.
- Acondicionamiento final: El material retenido en el tamiz requiere un lavado profundo con el fin de remover el polvo fino antes de pasar a la fase de secado. Este proceso se realizará en horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y deberá extenderse hasta que se logre una masa constante.
- Cálculo de pérdida: este procedimiento es indispensable para determinar con precisión el porcentaje de pérdida por desgaste del agregado, al comparar la masa inicial con la masa retenida final.

Este ensayo se realizó para los agregados con diámetro promedio de “ $\frac{3}{4}$ ” y de “ $\frac{1}{2}$ ”; los valores se muestran en las siguientes tablas XI y XII.

TABLA XI
RESULTADOS DEL ENSAYO ASTM C 131 PARA AGREGADO DE $\frac{3}{4}$ ”

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa inicial	As	5005	g
Masa retenida posterior a las 500 revoluciones	B	3903	g
Masa que pasa el tamiz N°12	C	1202	g
Porcentaje de desgaste	D	24	%

Al evaluar los datos derivados del ensayo con la máquina de Los Ángeles para el agregado de $\frac{3}{4}$ ", y sigue la normativa ASTM C131, demuestra una alta resistencia mecánica del material pétreo proveniente de la cantera de Pifo. Con una masa inicial de 5005g y una masa retenida tras las 500 revoluciones de 3903g, se determinó que la cantidad de material degradado que pasó el tamiz N° 12 fue de 1202g, lo que resulta en un porcentaje de desgaste del 24%.

Al contrastar este valor con las especificaciones técnicas del Manual MOP 001F-2002, el cual establece un límite máximo permitido de 40% para agregados gruesos, se concluye que el material cumple satisfactoriamente con los requerimientos de calidad. Por lo tanto, el agregado de $\frac{3}{4}$ " posee la competencia estructural necesaria para soportar los esfuerzos de fricción e impacto, con el objeto de asegurar la vida útil de las mezclas asfálticas en frío formuladas en este trabajo.

TABLA XII
RESULTADOS DEL ENSAYO ASTM C 131 PARA AGREGADO DE ½"

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa inicial	As	5003	g
Masa retenida posterior a las 500 revoluciones	B	3702	g
Masa que pasa el tamiz N° 12	C	1301	g
Porcentaje de desgaste	D	26	%

El análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de abrasión e impacto para el agregado de 1/2", realizado bajo la normativa ASTM C131, refleja un comportamiento mecánico óptimo del material pétreo. Con una masa inicial de 5003g y una masa retenida de 3702g tras el proceso en la Máquina de los Ángeles, se determinó que 1301g de la muestra se degradó al tamaño de finos (pasante del tamiz N° 12), para resultar en un porcentaje de desgaste del 26%. Al contrastar este valor con el límite máximo del 40% establecido por el Manual MOP 001F-2002 para agregados gruesos, se confirma que el árido de la cantera de Pifo cumple satisfactoriamente con los requisitos de dureza y resistencia.

i) Preparación de la muestra y solución para la resistencia a los sulfatos (ASTM C88):

TABLA XIII
PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LA INMERSIÓN Y PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN (ASTM C88).

Fase del Proceso	Parámetro Técnico	Requisito de la Norma
Preparación de la Solución	Agente Químico	Sulfato de Sodio (Na ₂ SO ₄)
	Temperatura de Mezclado	21 °C ± 1 °C
	Tiempo de Reposo (Estabilización)	Mínimo 48 horas antes del uso
Fase de Inmersión	Nivel de la Solución sobre la Muestra	Mínimo 12.5 mm de profundidad
	Tiempo de Inmersión por Ciclo	16 a 18 horas
	Temperatura de Inmersión	21 °C ± 1 °C
Ciclos de Ensayo	Número de Ciclos Totales	5 ciclos de inmersión y secado
	Especificación de Referencia	Manual MOP 001-F-2002

Nota. Adaptado de la norma ASTM C88.

De acuerdo con la normativa ASTM C88 y el Manual MOP 001-F-2002, el procedimiento

evalúa la resistencia de los agregados ante la desintegración por cristalización de sales:

Preparación de la Muestra y Solución

- Separar los agregados en fracciones específicas conforme a la granulometría de la tabla XIII.
- Eliminar todo el material pasante del tamiz N° 4 (4,75 mm) para iniciar el ensayo únicamente con la fracción gruesa.
- Lavar las muestras con agua destilada para retirar finos adheridos.
- Secar el material en el horno 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante.
- Preparar la solución saturada y se disuelve en sulfato de sodio (Na_2SO_4) en agua a 21 ± 1 °C.
- Dejar reposar la solución al menos 48 horas antes de su uso para estabilizar la densidad y asegurar la saturación.

Ciclos de Inmersión y Secado

El ensayo requiere completar cinco ciclos consecutivos de ataque químico y térmico:

- Sumergir las muestras en la solución saturada, se asegura que el nivel del líquido cubra al menos 12,5 mm por encima del agregado.
- Mantener el periodo de inmersión entre 16 y 18 horas a una temperatura constante de 21 ± 1 °C.
- Extraer las muestras y drenar el exceso de solución durante 15 minutos.
- Trasladar el material al horno a 110 ± 5 °C para iniciar la fase de secado.
- Verificar la masa constante y realizar pesajes a intervalos de 2 a 4 horas hasta que la variación sea inferior al 0,1%.

Lavado Final y Verificación de Remoción de Sales

Para finalizar el quinto ciclo, se procede a limpiar el material para evitar errores en el pesaje final:

- Lavar el agregado con agua tibia a 43 ± 6 °C para disolver y remover la sal cristalizada en los poros.
- Adicionar Cloruro de Bario (BaCl_2) a una muestra del agua de lavado para detectar la presencia de sulfatos residuales.
- Observar la reacción química; la ausencia de turbidez confirma que el material está libre de sales.

Secar las muestras por última vez y realizar el pesaje definitivo para calcular la degradación física.

j) Resistencia de los agregados a la acción de los sulfatos (ASTM C88):

Este método de ensayo proporciona un procedimiento para realizar una estimación preliminar de la solidez de los áridos para su uso en hormigón y otros fines. Los valores obtenidos pueden compararse con la necesidad que se tiene para el presente estudio [29].

El procedimiento utilizado para realizar el ensayo es el siguiente:

- El muestreo utilizado debe estar compuesto por material del cual se han eliminado los tamaños más finos que 4,75 mm.
- La muestra debe ser de un tamaño tal que se obtengan las cantidades de acuerdo con los tamaños indicadas en la tabla XIV.

TABLA XIV
FRACCIONES DE LA MUESTRA DE ÁRIDO GRUESO SEGÚN SU COMPOSICIÓN

Fracción N°	Rango de Tamaño del Agregado (mm)	Tamices (Pasa - Retiene)	Masa de la Fracción (g)
1	37.5 a 19.0	1 1/2" a 3/4"	1500 ±50
2	25.0 a 19.0	1" a 3/4"	500 ±30
3	19.0 a 12.5	3/4" a 1/2"	670 ± 10
4	12.5 a 9.5	1/2" a 3/8"	330±5

Nota. Adaptado de la norma ASTM C88.

- Inicialmente, las muestras se introducen en la solución de sulfato de sodio, y se cuida que el líquido las cubra por completo hasta alcanzar una profundidad mínima de 12,5 mm sobre el material. Esta inmersión debe sostenerse por un periodo estricto entre 16 y 18 horas y mantiene una temperatura constante de $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; asimismo, resulta fundamental tapar los recipientes durante esta etapa. De este modo, no solo se mitiga la evaporación, sino que se bloquea el ingreso accidental de cualquier sustancia extraña que pudiera alterar el ensayo.
- Una vez retirada la muestra de árido de la solución, se permite que drene naturalmente durante 15 minutos para, acto seguido, introducirla en el horno de secado (configurado a $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Se pesan los especímenes sin esperar a que se enfríen, se repite la medición en intervalos de 2 a 4 horas. Solamente si se logra una masa constante, y se verifica que la pérdida sea inferior al 0,1% se deja que el material recupere la temperatura ambiente antes de sumergirlo nuevamente en la solución preparada.

- Al completar el ciclo final y tras el enfriamiento respectivo, se inicia el lavado de la muestra para purgar los residuos de sulfato de sodio. Este proceso se realiza al emplear agua tibia a $43\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se aplica el flujo con extrema delicadeza dentro de los recipientes para evitar que la abrasión o el impacto fracturen las partículas. La validación del procedimiento depende de la química: para ello se considera que la muestra está libre de sales únicamente si, al aplicar cloruro de bario (BaCl_2) al agua de lavado, no se observa reacción alguna.

Los valores encontrados se especifican en las siguientes tablas, con la consideración de que el agregado no debe experimentar una desintegración ni pérdida total mayor del 12%, si se les somete a 5 ciclos de inmersión de acuerdo con el MOP – 2002. Como se puede observar, los resultados muestran un valor de desgaste menor:

TABLA XIII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS (ASTM C88) $\frac{3}{4}$ "

Fracción Nº	Nº de Tamiz		Porcentaje retenido parcial (%)	Masa de Ensayo Inicial (g)	Masa de Ensayo Final (g)	Porcentaje que pasa después del ensayo (%)	Porcentaje de desgaste parcial (%)
	Pasa	Retiene					
1	1"	$\frac{3}{4}$ "	11.70	500	497.0	0.60	0.07
2	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	53.30	670	666.0	0.60	0.32
3	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	21.03	330	328.	0.61	0.13
4	$\frac{3}{8}$ "	Nº 4	13.97	300	299	0.33	0.05
Total							1%

Este ensayo simula la expansión interna que sufren los agregados debido a la cristalización de sales en sus poros, y se evalúa su resistencia a la desintegración climática.

- Preparación de fracciones: seleccionar cuatro fracciones granulométricas del agregado de $\frac{3}{4}$ " (como se observa en la columna "Tamiz"). Inicialmente, lavar y secar cada fracción a una temperatura controlada de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; este paso es fundamental para registrar su peso exacto y determinar la masa previa al ensayo.
- A continuación, proceder con los ciclos de inmersión: las muestras deben permanecer sumergidas en una solución saturada de Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) durante un intervalo de 16 a 18 horas, siempre que el nivel del fluido cubra los agregados con un espesor no inferior a 12.5 mm.

- Ciclos de secado: extraer las muestras y secar en el horno hasta alcanzar masa constante. Este proceso de inmersión y secado se repite durante 5 ciclos (según el Manual MOP 001-F-2002).
- Lavado y pesaje final: al terminar los ciclos, las muestras se lavan con agua tibia para eliminar las sales remanentes. se secan por última vez y se pesan para registrar la Masa después del ensayo.
- Cálculo de la pérdida ponderada: calcular el porcentaje de pérdida de cada fracción y se multiplica por su Porcentaje Retenido Parcial (su representatividad en la muestra original) para obtener el porcentaje de desgaste (pérdida) parcial.

El análisis de la Tabla XV, revela que el agregado grueso presenta una pérdida total ponderada de apenas el 0.57 % tras los ciclos de inmersión y secado en sulfato de sodio. Este valor es significativamente inferior al límite máximo permitido por la mayoría de las especificaciones técnicas (que suele rondar el 12% para sulfato de sodio), lo cual garantiza que el material posee una excelente durabilidad y estabilidad química. Es importante señalar que la columna de "Granulometría Original" representa el porcentaje retenido parcial de cada fracción evaluada. Se observa que la mayor pérdida absoluta (0.61%) ocurre en la fracción comprendida entre los tamices de 1/2" y 3/8", sin embargo, debido a su baja participación en la mezcla total, su impacto en la pérdida ponderada es mínimo. En conclusión, el agregado de 3/4" es altamente apto para su uso en mezclas asfálticas en frío, ya que no muestra susceptibilidad a la degradación por expansión de sales.

TABLA XVI
RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS (ASTM C88) 1/2"

Fracción N°	N° de Tamiz		Porcentaje retenido parcial (%)	Masa de Ensayo Inicial (g)	Masa de Ensayo Final (g)	Porcentaje que pasa después del ensayo (%)	Porcentaje de desgaste parcial (%)
	Pasa	Retiene					
1	3/4"	1/2"	31.19	670	669	0.15	0.05
2	1/2"	3/8"	31.78	330	328	0.61	0.19
3	3/8"	N° 4	35.85	300	298	0.67	0.24
Total							0%

Los resultados obtenidos para el agregado de 1/2" de la cantera de Pifo tabla XVI, siguen

los lineamientos de la normativa ASTM C88, demuestra un desempeño sobresaliente en términos de estabilidad física y química. Tras someter las fracciones del material a cinco ciclos de inmersión en sulfato de sodio y secado, los registros de masa final se mantuvieron prácticamente idénticos a los iniciales, y resulta en un porcentaje de pérdida total del 0%.

Este valor, al ser nulo, supera con amplio margen la exigencia del Manual MOP 001-F-2002, que permite un máximo del 12%. Por lo tanto, se confirma que el agregado de 1/2" es un material altamente inerte y resistente a la meteorización, lo que asegura que la mezcla asfáltica en frío no presentará fallas estructurales por degradación del árido ante condiciones ambientales severas.

TABLA XVI

RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LOS SULFATOS (ASTM C88) PARA ARENA FINA

Fracción N°	N° de Tamiz		Porcentaje retenido parcial (%)	Masa de Ensayo Inicial (g)	Masa de Ensayo Final (g)	Porcentaje que pasa después del ensayo (%)	Porcentaje de desgaste parcial (%)
	Pasa	Retiene					
1	3/8"	N° 4	2.40	100	--	9	0.22
2	N° 4	N° 8	24.34	100	91	9	2.19
3	N° 8	N° 16	23.21	100	98	2	0.46
4	N° 16	N° 30	16.19	100	97	3	0.49
5	N° 30	N° 50	12.11	100	96	4	0.48
Total							4%

k) Azul de Metileno (MBV) (ASTM C1777):

Diseñado para ofrecer resultados rápidos, este ensayo evalúa la adsorción de azul de metileno en muestras compuestas por agregado fino o relleno mineral. El dato obtenido conocido técnicamente como valor de azul de metileno define la cantidad exacta de reactivo (en mg) que queda fijada por cada gramo de material analizado. El valor de azul de metileno depende de la cantidad y las características de los minerales arcillosos presentes en la muestra. Valores altos de azul de metileno indican un mayor potencial de disminución del rendimiento del agregado fino o relleno mineral en una mezcla cementosa debido a la presencia de arcillas [30].

El procedimiento de trabajo utilizado ha sido el siguiente:

- La muestra del material para el ensayo es de 10 gramos.
- Para dar comienzo al ensayo, se vierte la solución de azul de metileno en la bureta - tubo

de vidrio graduado hasta que esta quede completamente llena.

- Colocar el papel filtro sobre una superficie lisa y seca.
- Una vez obtenida la muestra, se mezcla con un volumen mínimo de 100 ml de agua. Es fundamental agitarla vigorosamente durante al menos un minuto para conseguir una homogeneidad total en la suspensión.
- Tomar la bureta y lentamente colocar 5cm^3 en la mezcla del material y volver a mezclar por otro minuto.
- Depositar una gota de la mezcla sobre el papel filtro, con cuidado que su diámetro se mantenga en el intervalo de 8 a 12 mm.
- La positividad del ensayo queda determinada por la formación de una aureola anular de color azul claro, siempre que esta sea persistente.

Se obtiene un color de azul de metileno adecuado de 3 mg/g; el material utilizado es volcánico lo que representa que tiene una alta concentración de arcillas activas como se observa en la figura 10.

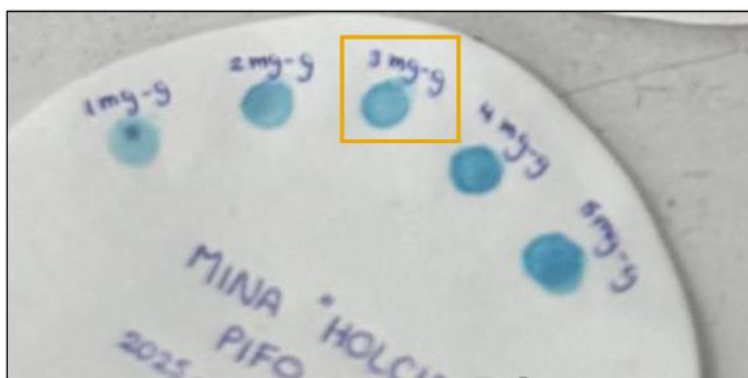


Fig. 10. Resultados del ensayo azul de metileno

2) Emulsión asfáltica:

En el desarrollo de la investigación se preparó dos tipos de emulsiones: emulsión no polimerizada (CSS-1h) y una emulsión polimerizada (CSS-1hP), diseñada para evaluar mejoras en parámetros como: estabilidad, ductilidad, penetración, viscosidad y punto de ablandamiento.

a) Procedimiento:

La fabricación de una emulsión asfáltica se desarrolla a través de varias etapas sucesivas:

1. Acondicionamiento del cemento asfáltico: el asfalto base se calienta hasta alcanzar un rango térmico aproximado de 130 a 150 °C, necesario para su adecuada

manipulación.

2. Preparación de la fase acuosa: formular una solución de agua junto con el agente emulsificante y otros aditivos requeridos:
 - Agente emulsificante catiónico: generalmente una amina grasa que otorga la carga positiva a las partículas (especificación CSS - Cationic Slow Setting).
 - Ácido clorhídrico (HCl): utilizado para ajustar el pH de la solución (usualmente entre 1.5 y 2.5g), para activar el emulsificante y garantizar la estabilidad química de la emulsión.
 - Estabilizantes: aditivos opcionales para controlar el tiempo de rotura y mejorar el almacenamiento como: ácidos o bases minerales; cloruro de calcio o cloruro de sodio; polímeros modificadores (SBS).
3. Mezclado en equipo coloidal: el asfalto caliente se une con la fase acuosa dentro de un molino coloidal, donde se reduce a partículas muy finas que quedan dispersas dentro del medio acuoso.
4. Etapa adicional para emulsiones modificadas: en el caso de las emulsiones con polímeros, los modificadores SBS se incorporan ya sea en la fase asfáltica previa al mezclado o mediante un proceso de post-mezclado, según la formulación buscada.

La elaboración de la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, modificada con polímero (CSS-1HP), requiere una dosificación precisa de sus componentes para garantizar la estabilidad coloidal y las propiedades reológicas del residuo asfáltico. La formulación se basa en la interacción química entre el ligante, la fase acuosa y el agente modificador. En la tabla XVII (continuación de la numeración técnica), se detallan las proporciones porcentuales de los compuestos utilizados para la obtención del asfalto emulsionado:

TABLA XVI
DATOS PARA ELABORACIÓN DE AME

Compuesto	Masa (g)	Porcentaje (%)
Zycotherm	2000	98,28
Acido 20	1	0,05
Asfalplus	25	1,23
Polímero SBS	9	0,44

La tabla XVII detalla la composición técnica para la elaboración del Asfalto Modificado con Elastómero (AME), donde se observa un predominio del Zycotherm como componente base

con un 98,28% de la masa total. La mezcla se complementa con aditivos específicos diseñados para optimizar el desempeño del ligante: el Ácido 20 y el Asfalplus actúan como agentes mejoradores de adherencia y modificadores químicos, mientras que el Polímero SBS (0,44%) aporta la estructura elastomérica necesaria para incrementar la resiliencia y la estabilidad térmica del asfalto. Esta dosificación precisa garantiza una matriz bituminosa con propiedades reológicas superiores, ideal para enfrentar las exigencias mecánicas y climáticas de la infraestructura vial.

En cambio, para la emulsión polimerizada los componentes se muestran en la tabla XVIII.

TABLA XVII
DATOS PARA ELABORACIÓN EMULSIÓN POLIMERIZADA

Compuesto	Función Técnica	Masa (g)	Proporción (%)
Asfalto AME	Ligante modificado con polímero	620,0	62,00
Agua	Medio de dispersión	366,9	36,69
Súrfax C-60	Agente emulsificante catiónico	12,0	1,2
Ácido Clorhídrico (20Bé)	Activador de pH y estabilidad	1,1	0,11
Total		1000,0	100,00

La Tabla XVIII detalla la formulación técnica para la obtención de la emulsión asfáltica polimerizada, la cual se basa en un sistema bifásico estabilizado mediante agentes químicos. El asfalto modificado (AME) constituye la fase dispersa con un 62,00%, lo que garantiza un residuo sólido con propiedades elastoméricas superiores tras el curado. El agua, como medio de dispersión (36,69%), facilita la manejabilidad de la mezcla, mientras que la combinación del emulsificante Súrfax C-60 (1,20%) y el Ácido Clorhídrico (0,11%) asegura la estabilidad iónica del sistema. Esta configuración catiónica permite una adherencia óptima con los agregados pétreos, que promueve una rotura controlada y una mayor durabilidad de la carpeta asfáltica.

b) Ensayo de viscosidad Saybolt Furol – ASTM D244:

Para establecer la consistencia real que presenta una emulsión asfáltica, así como su potencial de cobertura sobre los agregados, se recurre a la viscosidad Saybolt Furol (SSF) como indicador esencial. El procedimiento se fundamenta en el registro temporal del flujo: se cronometra el lapso exacto que demora una muestra de 60 mL en atravesar un orificio calibrado a temperatura

constante a 25 °C [31].

Procedimiento:

- Preparación del equipo: inspeccionar el tubo y el orificio del viscosímetro para asegurar la ausencia de residuos. Se inserta el tapón de corcho en el fondo del tubo para evitar fugas previas al inicio del cronometraje.
- Acondicionamiento de la muestra: colocar aproximadamente medio litro de emulsión en un recipiente limpio. La muestra se calienta en un baño de agua o baño de aceite (hay que evitar el contacto directo con llamas o planchas calientes para no alterar sus propiedades) hasta alcanzar la temperatura de ensayo seleccionada (25 °C o 50 °C). Durante la fase final del calentamiento, se agita continuamente para asegurar la homogeneidad térmica.
- Llenado y filtrado: la emulsión precalentada se vierte en el tubo del viscosímetro a través de un tamiz N° 20 (850 µm) hasta que el nivel del fluido sobrepase el anillo de rebosadero (*gallery*).
- Estabilización térmica y tolerancia: introducir el termómetro en el fluido y agitar con movimientos circulares suaves. La temperatura de la muestra no debe diferir en más de ± 0.05 °C respecto a la temperatura objetivo del ensayo durante un minuto consecutivo. El baño del viscosímetro debe regularse entre 0.1 °C y 0.3 °C por encima de la temperatura de la prueba para compensar pérdidas térmicas.
- Ajuste del menisco: una vez estabilizada la temperatura, se retira el termómetro. Con una pipeta de succión, se extrae el exceso de material del anillo rebosadero hasta que el nivel del fluido quede exactamente en el borde superior del tubo.
- Recolección del fluido: colocar el matraz receptor de 60 mL de forma que el chorro de la emulsión impacte en el cuello del frasco para evitar la formación de espuma. La marca de aforo del frasco debe situarse a una distancia de entre 10 cm y 13 cm por debajo del fondo del tubo del viscosímetro.
- Medición y registro: retirar el tapón de forma rápida y simultáneamente iniciar el cronómetro. El tiempo se detiene en el instante en que el fondo del menisco del fluido alcanza la marca de graduación de 60 mL.

Los rangos de viscosidad aceptables dependen del tipo de emulsión (catiónica de rotura lenta, CSS) y las especificaciones del proyecto. La elección de la temperatura de ensayo (25°C o 50 °C) responde a las condiciones climáticas de la obra: en regiones cálidas se requieren emulsiones

con viscosidades más elevadas para prevenir el escurrimiento, mientras que en climas fríos se prefieren viscosidades menores para facilitar la trabajabilidad y el bombeo sin necesidad de sobrecalentamiento excesivo.



Fig. 11. Equipo de viscosímetro Saybolt Furol utilizado para la caracterización técnica de ligantes asfálticos



Fig. 12. Preparación de muestra para la ejecución del ensayo de Viscosidad

El control riguroso de la viscosidad garantiza un comportamiento óptimo del ligante durante las etapas de mezclado y puesta en obra. Una viscosidad excesivamente baja incrementa la fluidez de la emulsión asfáltica, lo cual favorece el escurrimiento del material y reduce la capacidad de recubrimiento uniforme sobre los áridos. Por el contrario, si la emulsión presenta una viscosidad demasiado elevada, la manejabilidad de la mezcla se ve comprometida, lo que dificulta la distribución homogénea del ligante y limita la interacción mecánica con las partículas pétreas. En consecuencia, mantener este parámetro dentro de los rangos normados es fundamental para asegurar la cohesión estructural y la durabilidad del pavimento [31].

c) Tiempo de rotura – ASTM D244 (de-mulsibility test):

Este ensayo cuantifica la estabilidad química de la emulsión asfáltica mediante la medición de su capacidad para separar el agua del asfalto al entrar en contacto con una solución electrolítica. En emulsiones catiónicas de rotura lenta (CSS), este valor permite predecir el tiempo de fraguado y la cohesión inicial de la mezcla [31].

Procedimiento del ensayo

1. Preparación de la muestra: pesar exactamente 100 g de emulsión asfáltica previamente homogenizada y colocar en un vaso de precipitados de acero inoxidable o vidrio de 600 mL.
2. Acondicionamiento térmico: la muestra se lleva a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante un baño de agua. Es imperativo mantener esta temperatura constante para asegurar la precisión de la reacción química.
3. Adición del agente reactivo: utilizar una solución de Cloruro de Calcio (CaCl_2) al 0.02 N para emulsiones aniónicas o un reactivo específico según el tipo de emulsión catiónica añadir 35 mL de la solución de manera continua a una velocidad de aproximadamente 1 mL/s.
4. Agitación continua: durante la adición del reactivo, agitar la mezcla de forma constante con una varilla de vidrio a una frecuencia de 60 revoluciones por minuto.
5. Separación y lavado: Una vez finalizada la adición del reactivo, continuar con la agitación por un periodo adicional de 2 minutos. Posteriormente, el contenido se vierte a través de un tamiz N° 14 (1.40 mm) y lavar con agua destilada hasta que el agua de lavado salga clara, para eliminar todo resto de fase acuosa.
6. Secado y pesaje: el residuo asfáltico retenido en el tamiz se seca en un horno a $163\text{ }^{\circ}\text{C}$

durante un periodo breve para eliminar la humedad remanente. Una vez frío, pesar para determinar la masa del asfalto que ha roto (separado).

El análisis de la demulsibilidad, expresado como el porcentaje de asfalto separado respecto al contenido total de la muestra original, constituye un indicador fundamental de la estabilidad química de la emulsión. De acuerdo con la relación matemática definida, donde la masa de asfalto retenido se pondera frente a la masa total de asfalto en 100 g de emulsión, se determinó que el material presenta un porcentaje de demulsibilidad bajo. Este resultado técnico confirma que se trata de una emulsión de rotura lenta, característica que resulta ideal para el diseño de mezclas asfálticas en frío, ya que garantiza tiempos prolongados de manipulación y una distribución homogénea del ligante sobre los agregados antes del fraguado final.

d) Ductilidad – ASTM D113:

Al analizar la flexibilidad del material y su oposición al agrietamiento, la ductilidad aparece como el parámetro determinante, pues mide la aptitud del residuo asfáltico para la elongación antes de la fractura.

- Verter la muestra asfáltica en tres moldes de bronce previamente preparados.
- Mantener las probetas en reposo a temperatura ambiente durante sesenta minutos antes de cualquier manipulación.
- Enrasar el material excedente para obtener una superficie plana y uniforme.
- Sumergir los moldes en el baño de agua del ductilómetro, estabilizado a 25 °C, por un lapso de noventa minutos para asegurar el equilibrio térmico.

Ejecución y Medición:

- Instalar las probetas en los soportes del ductilómetro dentro del medio acuoso isotérmico.
- Activar el mecanismo de tracción del equipo para estirar el ligante a una velocidad constante de 5 cm/s.
- Observar el comportamiento del hilo bituminoso durante la aplicación de la fuerza de tracción constante.
- Registrar la longitud extendida en el instante exacto en que la columna de material se rompa en su punto medio o se adelgace hasta una sección transversal imperceptible.

Reportar el resultado final como la distancia total de separación entre los dos extremos de la briqueta, expresada en centímetros (cm).



Fig. 13. Moldes previos al ensayo de ductilidad



Fig. 14. Post-ensayo de ductilidad

e) Penetración del residuo asfáltico – ASTM D5:

Procedimiento para la Penetración del Residuo Asfáltico (ASTM D5)

Este ensayo permite determinar la dureza y consistencia del residuo asfáltico mediante el registro de la profundidad que alcanza una aguja estandarizada bajo condiciones controladas [32].

Acondicionamiento de la Muestra:

- Verter el residuo asfáltico en un recipiente adecuado para el ensayo.
- Permitir el enfriamiento del material a temperatura ambiente durante una hora completa.

- Sumergir la probeta en un baño de agua (baño María) a 25 °C por un periodo de 90 minutos para asegurar la estabilidad térmica total.

Ejecución del Ensayo:

- Trasladar la muestra acondicionada al equipo penetrómetro.
- Ajustar la aguja estandarizada hasta conseguir el contacto superficial exacto con el asfalto.
- Encerar el dial o el indicador digital del instrumento para iniciar la medición.
- Liberar la caída del vástago con la carga aplicada durante un tiempo de cinco segundos exactos.

Anotar la lectura final indicada por el instrumento, la cual se expresa en décimas de milímetro.



Fig. 15. Ensayo de penetración

f) Estabilidad de la emulsión - ASTM D6930:

Este ensayo cuantifica la aptitud de la emulsión asfáltica para mantener sus partículas de asfalto en suspensión homogénea, para evitar la sedimentación o la separación de fases (asfalto y agua) durante el reposo.

Procedimiento del ensayo:

- Preparación del recipiente estandarizado: utilizar un cilindro graduado de vidrio de 500 mL de capacidad, equipado con un tapón hermético para evitar la evaporación de la fase acuosa.

- Llenado y reposo: colocar 500 mL de la muestra de emulsión homogenizada en el cilindro. El recipiente se sella y se deja reposar en una superficie libre de vibraciones a temperatura ambiente durante un periodo de 24 horas.
- Muestreo de la fase superior: transcurrido el tiempo de reposo, extraer cuidadosamente los primeros 50 mL de la parte superior del cilindro utiliza una pipeta, sin perturbar el resto del contenido. Esta muestra colocar en un vaso de precipitado previamente tarado.
- Muestreo de la fase inferior: extraer los 400 mL intermedios y se descartan. Posteriormente, recolectar los últimos 50 mL del fondo del cilindro, para recuperar cualquier sedimento acumulado, y colocar en un segundo vaso de precipitado tarado.
- Determinación del residuo: ambos vasos (superior e inferior) someter a un proceso de evaporación en un horno a 163 °C durante tres horas, o hasta alcanzar masa constante, para determinar el contenido de asfalto residual en cada sección [33].



Fig. 16. Ensayo de Estabilidad

g) Elaboración de briquetas:

Los materiales utilizados para conformar briquetas son los siguientes:

- Moldes cilíndricos estándar (10.2 cm diámetro y 6.4 cm altura).
- Martillo compactador Marshall automático.
- Bandejas, espátulas.
- Horno de curado.
- Termómetro.

Procedimiento de elaboración de briquetas Marshall (ASTM D6926):

Los materiales utilizados para conformar briquetas son los siguientes:

- Moldes cilíndricos estándar (10.2 cm diámetro y 6.4 cm altura).
- Martillo compactador Marshall automático
- Bandejas, espátulas
- Horno de curado
- Termómetro

Procedimiento de Elaboración de Briquetas Marshall (ASTM D6926)

El proceso de fabricación de las probetas exige un control estricto de temperaturas y tiempos para garantizar la repetibilidad de los ensayos de estabilidad y flujo.

Acondicionamiento de Equipos y Materiales:

- Con el objeto de impedir que la mezcla pierda temperatura antes de tiempo, es necesario acondicionar el conjunto de moldes, bases y collarines dentro del horno a 100 °C por un lapso no inferior a una hora.
- Corresponde determinar la masa de las fracciones fina y gruesa de los áridos de forma separada y con estricto apego a las cantidades estipuladas en el diseño.
- Los agregados requieren un paso por estufa en un rango térmico de 110 °C a 120 °C, proceso que garantiza la supresión total de humedad y la consecución de una masa constante.
- Se aplica calor suave a la emulsión asfáltica hasta situarla en 50 °C ± 5 °C para que adquiera la fluidez necesaria.
- El empleo de un recipiente graduado de acero inoxidable resulta idóneo para la transferencia y el pesaje riguroso del material bituminoso.

Mezclado y Moldeo:

- Establecer las temperaturas de mezcla entre 25 °C y 60 °C para simular condiciones reales de aplicación en frío.
- Verter los agregados precalentados en un recipiente de mezcla (bowl) también precalentado.
- Formar un cráter en el centro de los áridos y añadir la cantidad pesada de emulsión asfáltica.
- Iniciar el mezclado mecánico o manual de forma inmediata hasta lograr la impregnación completa de todas las partículas granulares.
- Verter la mezcla asfáltica en los moldes precalentados.
- Acomodar el material con una espátula o varilla metálica mediante 15 golpes en el perímetro y 10 en el centro para evitar vacíos o nidos de abeja.

Compactación:

- Someter la probeta al proceso de compactación mediante el martillo Marshall.
- Aplicar 50 golpes por cada cara de la briqueta, valor correspondiente a condiciones de tráfico medio.

Mantener el eje del martillo perpendicular a la base del molde durante todo el proceso para asegurar una densidad uniforme

h) Marshall (ASTMD6927 – ASTM D6926):

El método Marshall es un procedimiento estandarizado para determinar el contenido óptimo de ligante en una mezcla asfáltica, para evaluar su resistencia mecánica y su capacidad de deformación.

Estabilidad Marshall: La estabilidad se define como la resistencia máxima que ofrece la probeta a la deformación si se somete a una carga de compresión diametral (aplicada perpendicularmente al eje longitudinal del cilindro).

Ejecución del Ensayo de Estabilidad y Flujo

- Transferir la carga por medio de mordazas semicirculares a una velocidad de deformación fija de 50,8 mm/min (2 pulgadas/min).
- Aplicar el esfuerzo sobre la sección transversal de la briqueta para generar tensiones internas de tracción indirecta hasta producir la falla estructural del espécimen.

- Definir la estabilidad Marshall a través del valor máximo registrado en el anillo dinamométrico o celda de carga, expresado en Newtons (N) o libras-fuerza (lbf).
- Registrar de forma simultánea el flujo, el cual corresponde a la deformación total que experimenta la probeta desde la aplicación de la carga inicial hasta el instante de la rotura, medido en unidades de 0,25 mm.

Determinación del Flujo Marshall

El flujo representa la deformación total que experimenta la probeta desde el inicio de la aplicación de la carga hasta el instante exacto en que se alcanza la estabilidad máxima.

Procedimiento de Medición y Registro:

- Se acopla directamente a la prensa Marshall un instrumento de medición de deformación, el cual puede ser desde un dial analógico convencional hasta un transductor de desplazamiento.
- La toma de datos sobre el movimiento vertical de las mordazas requiere el apoyo de un sensor o un cronómetro de precisión.
- Acorde a los reglamentos técnicos actuales, la cifra representativa del flujo debe figurar en milímetros (mm).
- El corte de la lectura ocurre justo en el momento de carga pico o al lograrse la estabilidad máxima.

Interpretación Técnica:

- Analizar un flujo elevado como indicador de una mezcla plástica propensa a deformaciones permanentes o ahuellamiento.
- Identificar un flujo excesivamente bajo como señal de una mezcla rígida y frágil con tendencia al agrietamiento prematuro.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. *Elaboración de briquetas por medio del martillo compactador automático Marshall*

1) *Introducción:*

Corresponde al tercer capítulo el estudio sobre la fabricación y evaluación de las briquetas a través del método Marshall Modificado. Esta fase operativa se adhiere a los criterios del Manual MS-19 del Asphalt Institute (2009) y la norma ASTM D6927.

2) *Dosificación de agregados para la mezcla:*

La determinación de las proporciones de los agregados no es arbitraria; responde a la búsqueda de una curva granulométrica densa que optimice la fricción interna y la resistencia mecánica. Esta dosificación se estableció con base en los siguientes criterios técnicos:

- Análisis granulométrico (ASTM C136): se evaluaron las gradaciones de los materiales pétreos (grava de 3/4", grava de 1/2" y arena) para asegurar que la combinación resultante se mantenga dentro de las bandas granulométricas exigidas para mezclas asfálticas densas.
- Ensayo de peso específico y absorción (ASTM C127 / C128): Estos parámetros permitieron calcular el volumen real que ocupan los agregados dentro de la briqueta.
- Prueba de trabajabilidad y envasado: mediante ensayos de mezcla manual, se verificó que la proporción de finos (arena al 41%) era suficiente para llenar los intersticios de los agregados gruesos sin desplazar el contacto piedra-piedra, garantiza una mezcla estable y fácil de compactar.

TABLA XVIII
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

Tipo del agregado	Peso g	Porcentaje %
(3 / 4")	40	4
(1 / 2")	550	55
(Arena)	410	41
Total:	1000	100

La predominancia del agregado de 1/2" (55%) asegura una estructura de contacto firme, mientras que el 41% de arena actúa como matriz de soporte para el ligante bituminoso. Esta configuración busca minimizar el índice de vacíos con aire (Va) y maximizar la durabilidad ante

agentes climáticos. La inclusión de un 4% de material de 3/4" mejora la trabazón mecánica, especialmente necesaria para compensar la menor rigidez inicial característica de las mezclas en frío.

3) Contenido óptimo de humedad:

Este procedimiento permite establecer la cantidad de agua de pre-envuelto necesaria para facilitar la dispersión de la emulsión y garantizar un recubrimiento integral de las partículas del agregado, y evita fenómenos de "bola de asfalto" o falta de adherencia.

Procedimiento experimental:

- Preparar las muestras de agregado: pesar porciones representativas de la mezcla de agregado (grueso y fino) previamente secas, de acuerdo con la granulometría de diseño establecida para la investigación.
- Dosificar el agua de pre-humedecimiento: añadir agua destilada a las muestras de agregado en porcentajes incrementales (típicamente 2%, 3%, 4% y 5% con respecto a la masa seca del agregado).
- Homogenizar el agregado húmedo: mezclar manualmente el agregado con el agua durante un periodo de 30 a 60 segundos, asegurar que toda la superficie de las partículas presente una humedad uniforme.
- Integración de la emulsión asfáltica: sobre los agregados, previamente humectados, se vierte la dosis exacta de emulsión (tipos CSS-1h o CSS-1hP) que dicta el diseño preliminar.
- Proceso de mezclado: ya sea de forma manual o mecánica, se agita el compuesto de modo continuo por unos dos minutos, o bien hasta que la película asfáltica envuelva por completo a las partículas pétreas.
- Examen de cobertura: una inspección visual inmediata permite estimar el porcentaje de superficie del árido que el ligante logró cubrir.
- Punto de humedad óptima: el objetivo es fijar el contenido de agua capaz de garantizar un recubrimiento mínimo del 95%, pero sin que ello implique la acumulación de fase acuosa o escurrimientos en el fondo del envase.
- Verificación de la consistencia: la mezcla debe resultar manejable; una humedad correcta evita tanto el aspecto opaco por sequedad como el brillo excesivo, señal inequívoca de saturación.

Los resultados para cada una de las emulsiones fueron los siguientes:



Fig. 17. Definición del porcentaje óptimo de humedad mezcla CSS-1hP



Fig. 18. Definición del porcentaje óptimo de humedad mezcla CSS-1h

Tras realizar las pruebas de pre-envuelto con incrementos progresivos de agua, se determinaron los valores óptimos de humedad para garantizar la máxima adherencia de las emulsiones sobre el agregado. La determinación se basó en los siguientes hallazgos técnicos:

- En lo relativo a la Emulsión Convencional (CSS-1h), se fijó el contenido de humedad óptimo en un 5%, cifra que corresponde a la incorporación de 50 g de agua por kilogramo de agregado. Nótese que las proporciones inferiores (del 2% al 4%) daban lugar a una mezcla de aspecto mate con cobertura incompleta de los finos; solo al tocar el 5% el ligante

alcanzó una dispersión uniforme, capaz de tapar sobre el 95% de la superficie pétreo sin que existiera escurrimiento de la fase líquida.

- Para la Emulsión polimerizada (CSS-1hP), el material halló su punto de recubrimiento ideal con un 4% de humedad, lo cual implica el uso de 40 g de agua. El examen visual puso de manifiesto que el polímero SBS perfecciona la afinidad química y la tensión interfacial del ligante; gracias a ello, la emulsión se reparte con eficacia pese a la menor cantidad de agua de pre-humedecimiento. Este descenso del 1% frente a la mezcla normal resulta vital, pues es señal de una mayor eficiencia en la envuelta y recorta el tiempo necesario para la evaporación del agua durante el curado.

Interpretación técnica de la diferencia

La variación de 10 g (1%) entre ambos diseños responde a la modificación reológica del asfalto AME presente en la CSS-1hP. Mientras que la emulsión convencional CSS-1h requiere un mayor volumen de agua para vencer la fricción interna de los finos y permitir el flujo del asfalto, la versión polimerizada demuestra una capacidad superior de "mojado" sobre el agregado.

Este comportamiento es fundamental para la puesta en obra, puesto que una menor demanda de agua de pre-envuelto acelera el proceso de rotura y favorece una ganancia de estabilidad más rápida en la mezcla asfáltica en frío, que ayuda a minimizar el riesgo de daños por lluvias tempranas o desprendimientos por tráfico inicial.

4) Contenido tentativo de emulsión:

Para estimar el porcentaje de emulsión tentativo, se considera una ecuación empírica establecida en el Manual MS-19 del Asphalt Institute (2009). A partir del valor estimado de emulsión se establecen valores en un rango inferior y superior para combinarlos con el contenido de humedad óptimo.

Ecuación para determinar el contenido tentativo de emulsión de acuerdo con, el Manual MS-19 del Asphalt Institute.

$$\% \text{ de emulsión} = \frac{[(0,06 \times B) + (0,01 \times C)] \times 100}{A}$$

A: Porcentaje de residuo de emulsión por destilación

B: Porcentaje de agregado seco que pasa el tamiz N° 4 (4,75mm)

C: Porcentaje de agregado seco retenido en el tamiz N° 4 (4,75mm)

Los contenidos tentativos de emulsión para mezcla asfáltica no polimerizada y polimerizada tabla XX:

TABLA XIX
CONTENIDO TENTATIVO DE EMULSIÓN

Contenido tentativo de emulsión	
%	
CSS1-h	6,951
CSS1-hP	6,417

Según los resultados obtenidos en la tabla XX, se indica que el porcentaje óptimo de emulsión polimerizada es un valor de 6,417% (aproximadamente 6%); y para la emulsión no polimerizada 6,951% (aproximadamente 7%). Finalmente, con el contenido de humedad óptimo y los contenidos de emulsión para mezcla polimerizada y no polimerizada se conformarán las briquetas de acuerdo con la tabla XXI.

TABLA XX
PORCENTAJES DE HUMEDAD Y EMULSIÓN PARA LA CONFORMACIÓN DE BRIQUETAS

CSS-1H		CSS-1HP	
Humedad	Emulsión	Humedad	Emulsión
%	%	%	%
5	5	4	5
5	6	4	6
5	7	4	7
5	8	4	8

La tabla XXI establece la matriz de dosificación para la fabricación de las briquetas experimentales, donde se definen los parámetros de control para comparar el desempeño de ambos ligantes. Se observa que la humedad de pre-envuelto se mantiene constante en un 5% para la emulsión convencional (CSS-1H) y en un 4% para la polimerizada (CSS-1HP), lo cual responde a la mayor eficiencia de recubrimiento que ofrece el polímero SBS. Sobre estas bases de humedad, se aplica una variación progresiva del contenido de emulsión del 5% al 8% para ambas muestras, con el fin de determinar mediante el ensayo Marshall el punto exacto donde la mezcla alcanza su máxima estabilidad y el porcentaje de vacíos reglamentario.

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DATOS

B. Comparación de propiedades reológicas entre emulsiones

La interacción entre el polímero y el asfalto depende de la compatibilidad química entre el modificador y la base asfáltica. Una dispersión eficiente de los polímeros elastoméricos genera una red interna tridimensional que mejora la resistencia del ligante. En esta investigación, se evaluaron comparativamente dos tipos de emulsiones catiónicas de rotura lenta [7]:

- Emulsión CSS-1h (Convencional): Se manufactura a partir de un cemento asfáltico de alta dureza (h) y carece de modificadores externos; su rol en este estudio se limita a actuar como el estándar o punto de control para las comparaciones de rendimiento.
- Emulsión CSS-1hP (Polimerizada): Se distingue por la integración de polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), adición que busca otorgar al material una capacidad superior de recuperación elástica y robustez frente a la oscilación térmica.

Para verificar el efecto concreto del polímero sobre el residuo asfáltico, se seleccionaron y analizaron las siguientes variables reológicas:

- Viscosidad Saybolt Furol (ASTM D244): Indicador de la consistencia del fluido y de la viabilidad técnica para su aplicación en campo.
- Ductilidad (ASTM D113): Prueba que revela la magnitud de elongación tolerable por el ligante antes de llegar al punto de ruptura física.
- Punto de Ablandamiento (ASTM D36): Permite estimar la sensibilidad a la temperatura y la oposición del material a deformarse bajo calor.
- Recuperación Torsional (ASTM D6084): Dato necesario para identificar la ganancia elástica atribuible específicamente a la presencia del SBS.
- Penetración (ASTM D5): Establece la dureza o grado de consistencia del residuo asfáltico bajo condiciones térmicas estándar de 25°C.

La tabla XXII compara los resultados reológicos en la emulsión no polimerizada y polimerizada.

TABLA XXI
RESULTADOS REOLÓGICOS DE EMULSIONES

Parámetro	Unidad	Emulsión sin polímero	Emulsión con polímero SBS
Viscosidad	(s)	21	25
Penetración	mm	71,5	70,5
Punto de ablandamiento	°C	50,5	57
Ductilidad	cm	70,75	78,33
Recuperación Torsional	%	18,75	17

La tabla XXII presenta una comparativa de las propiedades reológicas de los ligantes, donde se evidencia el impacto positivo del modificador elastomérico en el desempeño del asfalto. Se observa en la emulsión modificada con SBS una consistencia superior, reflejada en el aumento de la viscosidad a 25 s y una cota de penetración que desciende a 70.5 mm. Tal rigidez física conlleva beneficios directos. Es notorio el salto en el punto de ablandamiento, el cual pasa de 50.5°C a 57°C; esta modificación optimiza la respuesta térmica del ligante e impide deformaciones bajo condiciones de calor extremo. Por su parte, el valor de ductilidad de 78.33 cm ratifica el aporte de cohesión de la red polimérica, propiedad indispensable para que el pavimento logre disipar las tensiones de las cargas de tráfico sin sufrir agrietamientos tempranos.

1) Viscosidad Furol SSF (ASTM D88):

Para completar la sección sobre la Viscosidad Saybolt Furol (SSF) bajo la normativa ASTM D88, es necesario definir el propósito técnico del ensayo y analizar la relevancia de los tiempos obtenidos en relación con la aplicabilidad de la emulsión.

El objetivo fundamental de este ensayo es determinar la consistencia y fluidez de la emulsión asfáltica a una temperatura específica (50 °C en este caso). Esta propiedad es crítica por las siguientes razones:

- Bombeabilidad y manejo: garantiza que la emulsión pueda ser bombeada desde los tanques de almacenamiento hacia el equipo mezclador o distribuidor sin obstrucciones.
- Capacidad de recubrimiento: una viscosidad adecuada asegura que el ligante rodee completamente las partículas del agregado. Si es muy baja, el asfalto escurre; si es muy alta, la mezcla se vuelve inmanejable.
- Estabilidad del riego: en aplicaciones superficiales, determina la uniformidad con la que el

material se distribuye sobre la superficie de la vía.

De acuerdo con la normativa, un tiempo de flujo comprendido entre 20 y 100 segundos se considera óptimo para asegurar un desempeño adecuado en campo. Un valor por debajo de 20 segundos indicaría una emulsión excesivamente fluida, mientras que uno superior a 100 segundos dificultaría el mezclado en frío.

Los resultados obtenidos para las muestras analizadas se detallan en la tabla XXIII:

TABLA XXII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE VISCOSIDAD

Emulsión	Viscosidad (SSF)	Variación Absoluta (SSF)	Variación Porcentual (%)
CSS-1h	21		
CSS-1hP	25	4	19.5

El análisis de la tabla XXIII permite cuantificar el impacto técnico de la modificación del ligante mediante el uso de polímeros. A continuación, se detalla la interpretación de los resultados en función de la variación porcentual observada:

Análisis de la variación de viscosidad

El incremento registrado del 19.05% en la viscosidad de la emulsión CSS-1hP respecto a la CSS-1h evidencia una alteración significativa en las propiedades reológicas del material. Este aumento de 4 SSF en términos absolutos se atribuye a los siguientes factores técnicos:

- Interacción polímero-asfalto: la incorporación del polímero SBS en la emulsión polimerizada genera una red tridimensional que aumenta la fricción interna del fluido. Este fenómeno eleva la resistencia al flujo, lo que se traduce en una mayor viscosidad Saybolt Furol.
- Estabilidad en la aplicación: el incremento porcentual del 19.05% es técnicamente favorable para la mezcla asfáltica en frío. Una mayor viscosidad dentro de los rangos normados (20 - 100 SSF) asegura que el ligante tenga una mejor adherencia inicial, que ayuda a reducir significativamente el riesgo de escurrimiento (*drain-down*) del asfalto hacia el fondo de la capa durante la puesta en obra.
- Capacidad de recubrimiento: aunque la emulsión es más viscosa, el valor de 25 SSF sigue óptimo para garantizar que el ligante envuelva completamente las partículas del agregado pétreo, para mantener una trabajabilidad adecuada sin comprometer la homogeneidad de la

mezcla.

En conclusión, la variación porcentual del 19.05% demuestra que la modificación con polímeros no solo altera la dureza del residuo, sino que optimiza la consistencia de la emulsión en su estado líquido, para mejorar las condiciones de manejo y estabilidad durante la construcción del pavimento.

2) Ensayo de penetración ASTM D5:

El objetivo es medir la dureza o consistencia de los materiales bituminosos. Se determina mediante la profundidad (medida en décimas de milímetro) a la que una aguja estándar de 100 g penetra verticalmente en la muestra durante un tiempo de 5 segundos, y mantiene una temperatura controlada de 25 °C.

Clasificación: permite verificar si el residuo asfáltico mantiene las propiedades de dureza especificadas (Grado "h" para asfalto duro).

Sensibilidad térmica: un valor de penetración adecuado garantiza que el pavimento no se deforme excesivamente en climas cálidos ni se agriete por fragilidad en climas fríos.

Los valores obtenidos reflejan el endurecimiento del ligante debido a la presencia del modificador elastomérico en la emulsión CSS-1hP.

La tabla XXIV detalla la profundidad de penetración alcanzada por una aguja estandarizada sobre el residuo de ambas emulsiones. El análisis en función de la variación porcentual arroja las siguientes interpretaciones:

TABLA XXIII
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN

Emulsión	Penetración (mm)	Variación Porcentual (%)
CSS – 1h	7.15	1.42
CCS – 1hP	7.50	

La emulsión convencional CSS-1h presenta una penetración de 71.50 (0.1 mm), mientras que la emulsión modificada CSS-1hP registra 70.50 (0.1 mm). Tal descenso en los valores denota una firmeza ligeramente superior en la consistencia del residuo poliémumerizado.

Con una variación de apenas el 1.42%, se infiere que la incorporación del polímero respeta la dureza original del asfalto base a la temperatura de control (25°C). Pese a la sutileza del cambio porcentual, la baja de 1.0 unidad en valor absoluto resulta significativa; evidencia la intervención

de la red elastomérica SBS y su función al dotar de mayor cohesión estructural al producto final.

Aunque la variación es mínima, el hecho de que la CSS-1hP presente una menor penetración es un indicador positivo. Un ligante con menor penetración tiende a ofrecer una mayor resistencia a las deformaciones permanentes (ahuellamiento) bajo cargas de tránsito, que ayuda con la integridad de la mezcla asfáltica en frío.

3) *Ensayo de ductilidad ASTM D113-07:*

El objetivo primordial de este ensayo es medir la cohesión y la capacidad de deformación elástica del residuo asfáltico sin que esta sufra fracturas.

- Elasticidad y adhesividad: una ductilidad adecuada garantiza que el ligante pueda estirarse y recuperar su forma ante las deflexiones causadas por las cargas de tránsito, y mantiene la unión entre los agregados.
- Resistencia al agrietamiento: valores elevados de ductilidad son indicativos de materiales menos frágiles, lo cual es esencial para prevenir el agrietamiento térmico y por fatiga en la estructura del pavimento.

La tabla XXV presenta la distancia máxima de elongación alcanzada por el hilo asfáltico antes de su ruptura. Los resultados muestran una variación significativa entre el ligante convencional y el modificado:

TABLA XXIV
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUCTILIDAD

Emulsión	Ductilidad (cm)	Variación Porcentual (%)
CSS – 1h	78.50	
CSS – 1hP	70.50	10.19

El análisis de los datos permite extraer las siguientes conclusiones técnicas:

- Efecto de la modificación con polímero: la emulsión CSS-1hP presenta una ductilidad de 70.50 cm, lo que representa una disminución del 10.19% en comparación con los 78.50 cm de la CSS-1h. La diferencia de 8 cm a la baja evidencia una estructura de mayor rigidez y tenacidad en el residuo asfáltico tras su modificación.
- Equilibrio entre cohesión y extensibilidad: la leve caída de ductilidad presente en la muestra polimerizada no equivale a un deterioro de la calidad. Al trabajar con asfaltos que incluyen SBS, esos descensos moderados en la medición tradicional de ductilidad suelen

contrarrestarse mediante la subida del punto de ablandamiento y la recuperación elástica, lo cual aporta al compuesto una solidez mecánica superior en conjunto.

- Desempeño en obra: ambas muestras superan los valores mínimos requeridos comúnmente en las normativas para emulsiones de rotura lenta (frecuentemente situados por encima de 40 cm), y asegura que el ligante no presentará comportamientos frágiles bajo condiciones de servicio.

4) Punto de Ablandamiento (ASTM D36) (ASTM D5973):

El punto de ablandamiento permite conocer la uniformidad del material, y es indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas que pueden presentarse durante su servicio.

TABLA XXV
RESULTADOS DEL ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Muestra	Punto de Ablandamiento (°C)	Variación Porcentual (%)
CSS-1h	50.50	
CSS-1hP	57.00	12.87

El análisis de la tabla XXVI demuestra que la incorporación del polímero SBS eleva el punto de ablandamiento de 50.50 °C a 57.00 °C, lo cual representa un incremento significativo del 12.87%. Esta elevación térmica confirma que el ligante modificado (CSS-1hP) adquiere una estructura molecular más robusta y una menor susceptibilidad ante los cambios de temperatura. En términos de desempeño vial, este resultado es fundamental, ya que garantiza que el pavimento mantenga su consistencia y resista de mejor manera las deformaciones plásticas o el ahuellamiento en climas cálidos, para superar la capacidad de respuesta de la emulsión convencional ante las condiciones de servicio más exigentes.

C. Ensayo Marshall

El ensayo Marshall es el indicador que permite evaluar dos parámetros importantes: flujo y estabilidad.

- Flujo (mm): es aquella deformación plástica que toma la briqueta antes de llegar a fallar por la deformación.
- Estabilidad (libras): indica cuál es la carga máxima que puede soportar nuestra briqueta antes de romperse o fallar.

1) *Ensayo de briquetas con emulsión CSS-1h:*

Se conformaron probetas con el porcentaje óptimo de agua de 5% y emulsión del 5, 6,7 y 8%, de estabilidad, flujo y relación estabilidad flujo se muestran en la tabla XXVII:

TABLA XXVI
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL BRIQUETAS SIN POLÍMEROS

No.	Agua	Emulsión	Fuerza (kN)	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)	Estabilidad promedio (lb)	Flujo promedio (mm)	Relación Estabilidad/Flujo
1			15,32	3444,09	21			
2	5	5	14,02	3151,84	20	3281,48	21,33	153,82
3			14,45	3248,50	23			
4			15,26	3430,60	22			
5	5	6	14,04	3156,33	24	3321,19	23,67	140,33
6			15,02	3376,65	25			
7			15,59	3504,79	32			
8	5	7	17,05	3833,01	34	3706,37	32,33	114,63
9			16,82	3781,30	31			
10			18,32	4118,52	37			
11	5	8	17,95	4035,34	35	4143,25	36,00	115,09
12			19,02	4275,89	36			

Los resultados del ensayo Marshall para las probetas elaboradas con emulsión convencional (sin polímeros) detallados en la tabla XXVIII evidencian una relación directamente proporcional entre el contenido de ligante y la resistencia mecánica de la mezcla. Se observa que, al incrementar el porcentaje de emulsión del 5% al 8%, la estabilidad promedio asciende de 3281,48 lb a un valor máximo de 4143,25 lb, lo cual indica que una mayor cantidad de asfalto residual mejora la cohesión interna del esqueleto mineral hasta alcanzar dicho punto. No obstante, este incremento de resistencia se acompaña de un aumento progresivo en el flujo promedio, el cual escala de 21,33 mm a 36,00 mm, y provoca una reducción en la relación estabilidad/flujo.

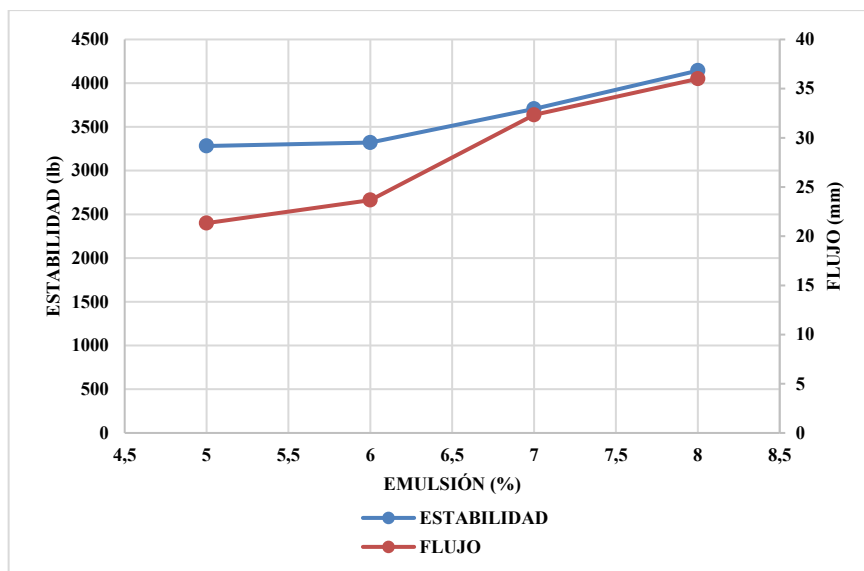


Fig. 19. Relación de la estabilidad y flujo para distintos valores de emulsión sin polímero.

La Fig. 19, en concordancia con los datos de la tabla XXVIII, ratifica que la mezcla convencional experimenta un fortalecimiento estructural a medida que aumenta el contenido de ligante, y alcanza su desempeño óptimo con un 8% de emulsión. En este punto, la estabilidad llega a su nivel máximo de 4143,25 lb, lo que consolida un esqueleto mineral más resistente ante cargas verticales. No obstante, la curva de flujo revela que este incremento de estabilidad conlleva una pérdida de rigidez relativa, ya que la deformación plástica se eleva significativamente hasta los 36,00 mm. Esta tendencia indica que, si bien la mezcla sin polímero logra cumplir con parámetros de resistencia considerables, posee una ventana de servicio limitada debido a su alta susceptibilidad a la deformación bajo esfuerzos sostenidos, situándose visualmente en la zona superior de la faja granulométrica de control para garantizar su integridad.

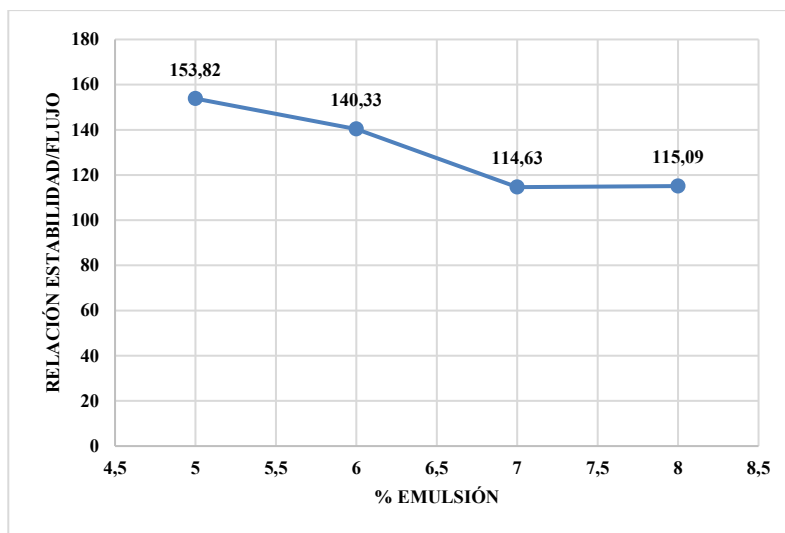


Fig. 20. Porcentajes de emulsión y la relación estabilidad/flujo CSS-1h.

Pese a la aparente solidez que indica la estabilidad bruta, el análisis gráfico delata una debilidad en la mezcla carente de polímeros: su marcada tendencia a la deformación plástica ante sollicitaciones sostenidas. Dicha característica compromete la integridad del material y limita su aplicación estructural en escenarios de alta exigencia.

2) Ensayo de briquetas con emulsión CSS-1hP:

El segundo caso utiliza el polímero SBS, pero con una cantidad de menor de agua de tan solo el 4%, los porcentajes de emulsión se mantienen del 5% al 8 %.

TABLA XXVII
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL BRIQUETAS POLIMERIZADAS.

No.	Agua %	Emulsión %	Fuerza (kN)	Flujo (mm)	Estabilidad (lb)	Estabilidad promedio (lb)	Flujo Promedio (mm)	Relación Estabilidad / Flujo
1			17,96	18	4037,59			
2	4	5	18,22	20	4096,04	4069,81	20,00	203,49
3			18,13	22	4075,81			
4			20,57	26	4624,34			
5	4	6	21,32	25	4792,95	4685,04	25,33	184,94
6			20,63	25	4637,83			
7			20,67	26	4646,82			
8	4	7	21,86	26	4914,35	4840,16	25,67	188,58
9			22,06	25	4959,31			
10			24,00	30	5395,44			
11	4	8	23,65	29	5316,76	5394,69	30,33	177,85
12			24,34	32	5471,88			

El análisis de la tabla XXVIII indica que las briquetas fabricadas con emulsión polimerizada alcanzan su estabilidad máxima de 5394,69 lb con un contenido de ligante del 8%. No obstante, la mayor eficiencia estructural se manifiesta con un 5% de emulsión, nivel en el cual la relación estabilidad/flujo registra su valor más elevado (203,49). Este resultado confirma que el polímero SBS facilita la formación de un esqueleto mineral rígido y cohesivo con una deformación plástica limitada.

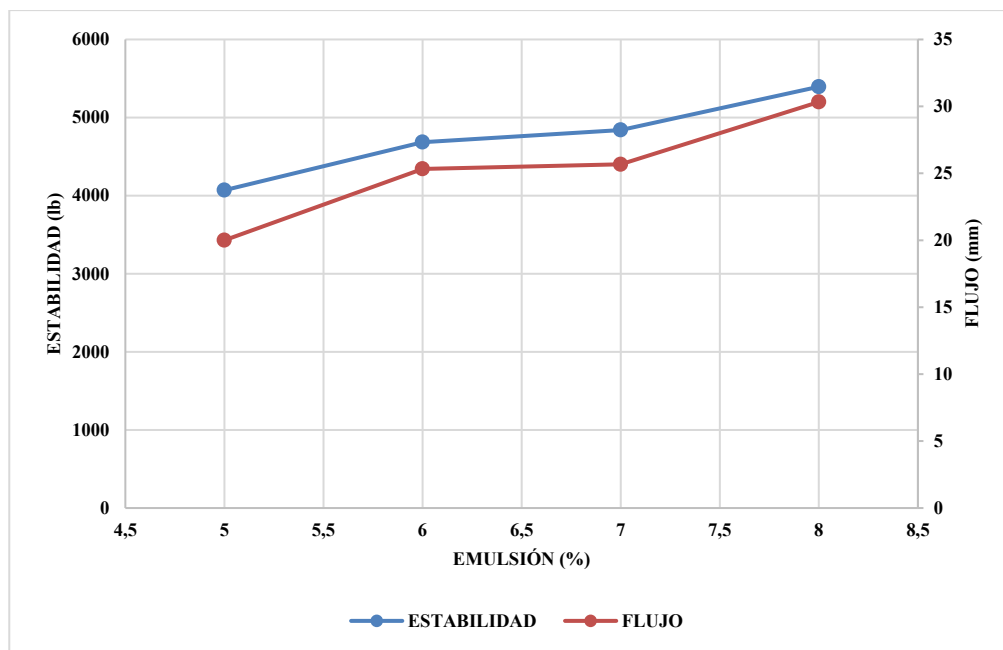


Fig. 21. Relación de la estabilidad y el flujo para distintos valores de emulsión con polímero.

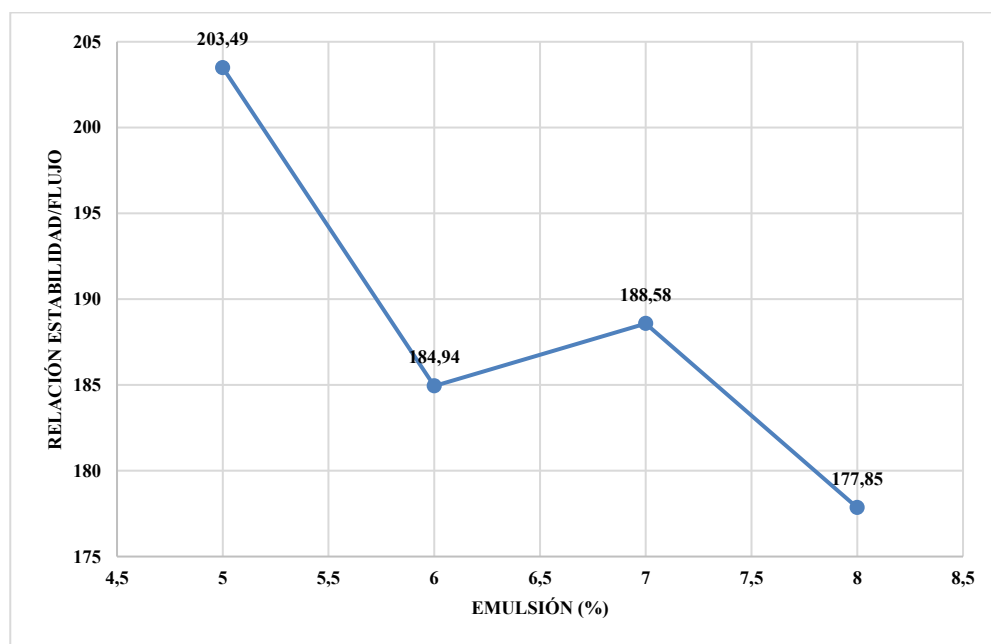


Fig. 22. Porcentajes de emulsión y la relación estabilidad/flujo CSS-1hP.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall permiten evaluar el desempeño estructural de las mezclas asfálticas elaboradas con ligantes convencionales y modificados. El análisis comparativo de las probetas revela diferencias significativas en su capacidad de soporte y deformación:

- Resistencia a la estabilidad: Las briquetas densificadas con la emulsión CSS-1hP alcanzaron un pico de estabilidad promedio de 5394.69 lbf; este valor contrasta con los 4143.25 lbf de las muestras hechas con emulsión convencional CSS-1h. Tal diferencia supone un aumento de carga cercano al 30% y confirma la acción de la red elastomérica del polímero SBS sobre la matriz asfáltica, pues le confiere rigidez estructural y una mejor respuesta ante la compresión diametral.
- Relación estabilidad - flujo: El análisis de la dupla estabilidad-flujo revela un comportamiento mecánico más eficiente en las probetas polimerizadas. Las mezclas con CSS-1h suelen deformarse en exceso con cargas bajas, pero el polímero restringe ese desplazamiento. Dicha característica implica que el modificador logra el balance exacto: aporta la dureza para el tráfico intenso y conserva la elasticidad justa para disipar energía sin fracturas frágiles.
- Evaluación de desempeño global: Los resultados señalan una cohesión interna superior en el material modificado. Al combinar un flujo bajo con una estabilidad elevada, se obtiene un parámetro técnico que anticipa una gran resistencia al ahuellamiento (deformación plástica) y promete una mayor durabilidad del pavimento. En consecuencia, el uso de la emulsión CSS-1hP en la fabricación de pavimentos ofrece una mayor confiabilidad estructural, y garantiza la integridad de la carpeta asfáltica bajo condiciones de servicio exigentes.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

D. Conclusiones

1. En la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los agregados provenientes de la cantera se determinó el cumplimiento de todas las especificaciones técnicas establecidas en el MOP 001F-2002. Asimismo, se evidenció un ajuste adecuado a la Faja tipo D descrita en el Manual MS-19 del Asphalt Institute y se obtuvo una curva granulométrica correctamente alineada con los límites máximos y mínimos de dicha faja. En este sentido, los agregados de ¾" y ½" cumplieron con el requisito de presentar un desgaste inferior al 40 % en el ensayo de la Máquina de Los Ángeles. Además, en la prueba de acción de los sulfatos, los tres agregados analizados no superaron una pérdida del 12 %.
2. Las propiedades físicas de las emulsiones evaluadas evidencian diferencias claras entre la formulación convencional y la modificada con polímero SBS. La emulsión polimerizada presentó un incremento del 19,05 % en la viscosidad con respecto a la emulsión sin polímero, así como un punto de ablandamiento ligeramente superior, con un valor de 57 °C frente a los 50 °C de la emulsión convencional. Estos resultados permiten concluir que la emulsión modificada ofrece mayor resistencia a la deformación inducida por la temperatura. Asimismo, la ductilidad mostró un aumento moderado del 10,19 % en comparación con la CSS-1h, lo cual evidencia una mayor capacidad para absorber esfuerzos sin alcanzar la fractura. Estas variaciones confirman que la incorporación del polímero mejora de manera significativa el comportamiento de la emulsión frente a las cargas y a las variaciones térmicas.
3. En el diseño de las mezclas asfálticas en frío se concluyó que el contenido óptimo de humedad para la emulsión sin polímero fue del 5 %, mientras que para la emulsión con polímero fue del 4 %. Este resultado indica que la mezcla polimerizada requiere menor contenido de humedad para alcanzar una adecuada trabajabilidad y densidad. Además, mediante la aplicación de la fórmula propuesta en el Manual MS-19 se obtuvo valores porcentuales tentativos de emulsión de 6,951 % para la CSS-1h y de 6,417 % para la CSS-1hP. No obstante, tras la ejecución del ensayo Marshall Modificado y el análisis de

la relación estabilidad/flujo de las briquetas finales, se determinó que los contenidos óptimos de emulsión correspondieron al 5 % tanto para la CSS-1h como para la CSS-1hP.

4. El análisis comparativo evidenció que la emulsión modificada con polímero alcanzó mayores valores de estabilidad, con un máximo de 5 471,88 lb, mientras que la emulsión no polimerizada registró un valor máximo de 4 275,89 lb. Al analizar el comportamiento del flujo se nota una tendencia al alza proporcional al contenido de emulsión; sin embargo, la superioridad técnica del compuesto modificado se hace patente en la relación estabilidad/flujo. Basta observar los datos: las briquetas tratadas con SBS marcaron un índice de desempeño de 203,49, una diferencia notable frente a las 153,82 unidades del material sin polímero. Dicha brecha numérica revela que la mezcla polimerizada tolera deformaciones más altas y mantiene intacta su resistencia, cualidad idónea para pavimentos expuestos a tráfico inconstante o estrés térmico.
5. El polímero SBS no solo afianza la cohesión interna y la estabilidad, sino que garantiza una respuesta predecible bajo carga. Por tanto, esta alternativa ofrece mayor fiabilidad técnica que la versión convencional (en especial ante la humedad y los rigores del clima) debido a su capacidad para asegurar una larga vida útil.

E. Recomendaciones

1. Se sugiere emplear emulsión modificada con polímero SBS en diseños de mezclas en frío destinadas a vías con tránsito ligero y medio, debido a que su mayor estabilidad Marshall y su adecuada capacidad de deformación permiten un mejor desempeño estructural a largo plazo. Esta recomendación resulta especialmente pertinente en zonas donde la humedad o las variaciones de temperatura aceleran la pérdida de adherencia.
2. La dosificación del 5 % de emulsión polimerizada debe considerarse como punto de referencia para futuros diseños, ya que fue la única que mostró la mejor combinación entre estabilidad y flujo. La ejecución de ensayos complementarios, como humedad inducida o curado acelerado, puede reforzar la selección final; no obstante, los resultados obtenidos hasta el momento sostienen que esta formulación resulta la más eficiente de acuerdo con la granulometría y las condiciones de compactación aplicadas.
3. El tipo de emulsión sin incorporación de polímero debe emplearse únicamente en proyectos que no requieran un alto esfuerzo estructural, dado que su estabilidad fue considerablemente menor en comparación con la emulsión modificada. Aunque el flujo de este tipo de emulsiones es menor, esta mayor rigidez no se traduce en una resistencia superior, lo cual puede generar problemas prematuros en capas sometidas a tracción continua.
4. Los resultados obtenidos permiten proponer la incorporación de emulsiones modificadas dentro de lineamientos internos o especificaciones locales, en especial en zonas donde la presencia de humedad reduce la vida útil del pavimento. La mejora observada en viscosidad, ductilidad y punto de ablandamiento respalda su aplicación en climas variables.
5. En el futuro, se recomienda complementar este estudio con ensayos de desempeño más tardío como deformación permanente (rutting), fatiga o módulo resiliente, ya que mediante los mismos se podrá comprobar si el buen comportamiento inicial de la mezcla polimerizada se mantiene si la mezcla ha terminado su proceso de curado y está sometida a ciclos de carga con más esfuerzo.

REFERENCIAS

- [1] T. Chavarria y J. Marreros, "Análisi del punto de ablandamiento dy grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles Mundo 2021", Tesis de Grado, Trujillo: Universidad Privada del Norte , 2021.
- [2] M. Castillo y B. Abrajan, «Análisis comparativo de mezclas asfálticas en frío, diseñadas con emulsión asfáltica no polimerizadas y polimerizadas con SBS y SBR,» UIDE, Quito, 2025.
- [3] PIARC, «Guía para el diseño y aplicación de emulsiones asfálticas en,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.piarc.org/en/orderlibrary/2781-esGu%C3%ADa%20para%20el%20dise%C3%B1o%20y%20aplicaci%C3%B3n>. [Último acceso: 10 Octubre 2025].
- [4] J. Rodriguez , J. Norambuena , A. Vega y D. Castro, «Estudio y análisis del comportamiento dinámico de pavimentos flexibles mediante la modelización y el desarrollo de ensayos no destructivos,» octubre 2008. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/280876309_Estudio_y_analisis_del_comportamiento_dinamico_de_pavimentos_flexibles_mediante_la_modelizacion_y_el_desarrollo_de_ensayos_no_destructivos.
- [5] MTOP, «Programa de Conservación Vial,» 2022. [En línea]. Available: https://www.mit.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2022/05/LOTAIP_5_MTOP_Programa-deConservacion-vial.pdf?utm_source. [Último acceso: 10 octubre 2025].
- [6] M. Sosa, C. Caldo, F. Halles y G. Tenoux, «Guía para la evaluación y selección de aditivos estabilizantes aplicados a materiales granulares y suelos en vías de bajo tránsito: estudio de caso en Paraguay,» BID, Paraguay, 2019.
- [7] M. Chumpitaz y D. Laura, «Desempeño de la mezcla asfáltica en frío con adición de polímeros de Ichu,» *Revista Digital Novasinergia*, vol. 8, nº 2, pp. 140-152, 2025.
- [8] ALTAVIA, «La importancia estratégica de la detección temprana de problemas en los pavimentos,» ALTAVIA, 10 octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.altavia.cl/la-importancia-estrategica-de-la-deteccion-temprana-de-problemas-en-los-pavimentos/>.
- [9] M. Gallardo y V. Manzanares, "Diseño de microaglomerado asfáltico drenante como tratamiento superficial sobre pavimentos porosos" Tesis de grado, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2020.
- [10] E. Nasiriamiri y P. Tavassoti, « Review of High-Performance Cold Mix Asphalt (HPCMA): Benefits and Challenges for Implementation in Canada,» *Conference: Transportation Association of Canada*, pp. 1-19, Septiembre 2024.
- [11] F. Wulf, "Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero", Tesis de grado, [Valdivia]: Universidad Austral de Chile, 2008.
- [12] A. Ulloa, «Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de calidad en materiales de un pavimento asfáltico,» *Métodos & Materiales* , vol. 1, nº 1, pp. 39-50, 2011.
- [13] CLASA S.A., «CLASA S.A. ASFALTOS,» [En línea]. Available:

-] <https://www.clasa.cl/productos/detalle/css-1h/>. [Último acceso: 10 septiembre 2025].
- [14 MOP, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, Quito:
] Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, 2002.
- [15 H. Rondón y F. Reyes, Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño, Bogota:
] EcoeEdiciones, 2022.
- [16 W. Jaramillo y J. Places, «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, Tesis de Grado, Universidad
] Central del Ecuador,» 2022. [En línea]. Available:
] [https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/b23864c5-d702-461c-92e2-
ce2195b22ab9/content](https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/b23864c5-d702-461c-92e2-ce2195b22ab9/content).
- [17 H. Delgado, «Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de
] tránsito,» Instituto Mexicano del Transporte, Queretaro, 2020.
- [18 ASFACOL, «¿Qué es la mezcla asfáltica en frío y por qué elegirla?,» 2024. [En línea].
] Available: [https://asfacol.com/2025/11/04/que-es-la-mezcla-asfaltica-en-frio-y-por-que-
elegirla/#:~:text=La%20mezcla%20asfáltica%20en%20frío%20es%20una%20solución%
20práctica%2C%20eficiente,aplicarse%20directamente%20sobre%20la%20superficie..](https://asfacol.com/2025/11/04/que-es-la-mezcla-asfaltica-en-frio-y-por-que-elegirla/#:~:text=La%20mezcla%20asfáltica%20en%20frío%20es%20una%20solución%20práctica%2C%20eficiente,aplicarse%20directamente%20sobre%20la%20superficie..)
- [19 M. Acosta y J. Herrera, "Uso de polímeros tipo III para mejorar la durabilidad y el
] comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19) empleadas en zonas cálidas", Tesis
] de grado, Cartagena: Universidad de Cartagena, 2016.
- [20 M. Avellán, «Asfaltos Modificados con Polímeros [Universidad de San Carlos de
] Guatemala, Tesis de Grado],» 2007. [En línea]. Available:
] http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2705_C.pdf.
- [21 AEMA, Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Lexington: ASPHALT INSTITUTE,
] 2022.
- [22 INTENDENCIA DE MONTEVIDEO, «Diseño de Mezclas Asfálticas,» [En línea].
] Available: [https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/4-
extractoprincipiosdeconstrucciondemezclasasfalticasencaliente.pdf](https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/4-extractoprincipiosdeconstrucciondemezclasasfalticasencaliente.pdf). [Último acceso: 1 10
] 2025].
- [23 ASTM, Especificación estándar para ligante asfáltico de alto rendimiento, American
] Society for Testing and Materials, 2023.
- [24 A. International, «ASTM C702: Método de prueba estándar para la reducción de
] muestras de agregados a tamaño de prueba.,» ASTM International, West Conshohocken,
] 2018.
- [25 A. International, «Designación: C136 / C136M - 19. Método de prueba estándar
] paraAnálisis por tamizado de agregados finos y gruesos1,» ASTM International, West
] Conshohocken, 2020.
- [26 INEN, Productos Derivados del petroleo. Cementos Asfálticos, Quito: Instituto
] Ecuatoriano de Normalización, 2002.
- [27 A. International, «ASTM C33-03: Especificación estándar para agregados para
] concreto.,» West Conshohocken, PA., 2003.
- [28 ASTM, Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de agregados
] gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles -

- ASTM C131, American Society for Testing and Materials, 2006.
- [29 ASTM, Método de prueba estándar para determinar la solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio - ASTM C88, American Society for Testing and Materials, 2013.
- [30 ASTM, Método de prueba estándar para la determinación rápida del valor de azul de metileno para agregados finos o rellenos minerales utilizando un colorímetro - ASTM C1777, American Society for Testing and Materials, 2020.
- [31 ASTM, Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts - ASTM D244, American Society for Testing and Materials, 2017.
- [32 ASTM, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials - ASTM D5, American Society for Testing and Materials, 2006.
- [33 ASTM, Standard Test Method for Settlement and Storage Stability of Emulsified Asphalts - D6930, American Society for Testing and Materials, 2019.
- [34 ASTM, Método de prueba estándar para la ductilidad de materiales asfálticos - ASTM D113, American Society for Testing and Materials, 2017.

GLOSARIO

- Adherencia: Capacidad del ligante asfáltico para mantenerse unido a los agregados, esencial para la durabilidad de las mezclas asfálticas, especialmente en presencia de humedad.
- Agregados: Material granular (como grava, arena o piedra triturada) utilizado en la composición de mezclas asfálticas. Sus propiedades físicas influyen directamente en el desempeño del pavimento.
- Ahuellamiento: Deformación permanente que se forma en la superficie del pavimento debido al paso repetitivo de vehículos. Es una de las principales fallas estructurales que se busca prevenir.
- Asfalto: Material de origen natural o derivado del petróleo, de consistencia viscosa, utilizado como ligante en la construcción de pavimentos.
- Asfalto modificado con polímeros: Tipo de asfalto al que se le han incorporado polímeros para mejorar su desempeño mecánico, térmico y reológico.
- Caracterización de materiales: Proceso mediante el cual se analizan las propiedades

- físicas, químicas y mecánicas de los materiales que se utilizarán en una mezcla asfáltica.
- Durabilidad: Capacidad de una mezcla asfáltica para mantener sus propiedades y funcionalidad durante un periodo prolongado, para resistir los efectos del clima, el tráfico y otros factores ambientales.
 - Emulsión asfáltica: Dispersión de asfalto en agua estabilizada con agentes emulsificantes. Se utiliza en pavimentación en frío por su facilidad de aplicación y bajo impacto ambiental.
 - Emulsión asfáltica convencional: Tipo de emulsión sin aditivos modificadores, utilizada comúnmente en mezclas asfálticas básicas.
 - Emulsión asfáltica modificada con SBS: Emulsión en la que el asfalto está modificado con polímero SBS, lo que mejora significativamente su elasticidad, resistencia y comportamiento ante temperaturas extremas.
 - Ensayos de laboratorio: Pruebas técnicas realizadas para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de materiales, como resistencia, deformación, adherencia y estabilidad.
 - Estabilidad: Resistencia de una mezcla asfáltica a deformarse bajo cargas repetidas. Es un parámetro clave en el diseño de pavimentos.
 - Estireno-Butadieno-Estireno (SBS): Polímero termoplástico utilizado para modificar el asfalto, mejora su elasticidad y resistencia a la deformación y al envejecimiento.
 - Fisuras: Grietas o fracturas que aparecen en la superficie del pavimento debido a tensiones térmicas, carga vehicular u otros factores.
 - Hormigón asfáltico en frío: Mezcla de agregados con emulsión asfáltica que no requiere calentamiento previo. Es una alternativa sostenible al pavimento tradicional en caliente.
 - Ligante: Sustancia (normalmente asfalto) que une los agregados en una mezcla, proporciona cohesión y resistencia.
 - Método Marshall: Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas que permite determinar la proporción óptima de materiales y evaluar propiedades como estabilidad y flujo.
 - Modificación con polímeros: Proceso de mejora del asfalto mediante la adición de polímeros como el SBS, que otorgan mejores propiedades mecánicas y reológicas.
 - Pavimento: Superficie de rodadura construida sobre una vía para permitir el tránsito vehicular, compuesta por capas de materiales seleccionados y compactados.
 - Propiedades mecánicas: Características físicas de los materiales que determinan su

comportamiento ante esfuerzos, tales como resistencia, elasticidad y deformación.

- Propiedades reológicas: Comportamiento del ligante asfáltico frente a diferentes temperaturas y esfuerzos. Influye en la fluidez, elasticidad y deformación del material.
- Red vial estatal (RVE): Conjunto de carreteras principales bajo la administración del Estado. En Ecuador, es gestionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE).
- Resistencia: Capacidad de un material para soportar fuerzas externas sin sufrir fallas o deformaciones excesivas.
- Sostenibilidad: Aplicación de prácticas y materiales que minimizan el impacto ambiental, reducen el consumo energético y prolongan la vida útil de la infraestructura.
- Tráfico intenso: Condición de circulación vehicular elevada, que somete al pavimento a mayores cargas dinámicas y acelera su desgaste.
- Transversalidad climática: Condiciones climáticas cambiantes, como lluvias intensas seguidas de alta radiación solar, que afectan negativamente la estabilidad del pavimento.

ANEXOS

Anexo 1. Ensayos de laboratorio abrasión mediante máquina de los ángeles en el agregado de 3/4".

 Pontificia Universidad Católica del Ecuador Seréis mis testigos		LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN			
<i>"Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad"</i>					
ÁREA DE HORMIGONES INFORME DE ENSAYO ABRASIÓN E IMPACTO POR LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES					
PROYECTO:	Comparación de Emulsiones Asfálticas en Frio con Polímeros y Sin Polímeros	SOLICITADO POR:	Bryan Abrajan, Madelin Castillo, Bryan Andramunio, Pablo Boada		
LOCALIZACIÓN:	UIDE - Quito	FISCALIZACIÓN:		
MUESTRA:	Tomada por el Cliente	CONTRATISTA:		
NORMA ENSAYO:	ASTM C 131	FECHA DE RECEPCIÓN:	3/6/2025		
CANTERA:	Holcim	FECHA DE EMISIÓN:	17/6/2025		
LOCALIZACIÓN:	Piño	ORDEN DE TRABAJO:	5813 M - 1		
DESCRIPCIÓN:	Agregado 3/4"		HOJA: 1 de 2		

$\text{Porcentaje de desgaste} = (C / A) * 100$
 $\text{Masa que pasa el tamiz No. 12} = (A - B)$

TAMANO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO:	1/2 plg
TIPO DE GRADACION:	B
MASA INICIAL DE LA MUESTRA	A= 5005 gr.
MASA RETENIDA EN EL TAMIZ N° 12 DESPUÉS DE 500 REVOLUCIONES	B= 3803 gr.
MASA QUE PASA EL TAMIZ N° 12	C= 1202 gr.
PORCENTAJE DE DESGASTE	D= 24 %

OBSERVACIONES:
 NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.


 Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
 RESPONSABLE DE ÁREA


 Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
 COORDINADOR

Dirección: Avenida 12 de Octubre y Alfredo Mena Caamaño
Código postal: 170525 / **Teléfono:** (593-2) 299 1700 Ext. 1529 / **Correo:** lmc-puce@puce.edu.ec
 Quito - Ecuador / www.puce.edu.ec

f t i y d



Anexo 2. Ensayos de laboratorio abrasión mediante máquina de los ángeles en el agregado 1/2”.



Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Seréis mis testigos

"Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad"

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



ÁREA DE HORMIGONES
INFORME DE ENSAYO
ABRASIÓN E IMPACTO POR LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

PROYECTO:	Comparación de Emulsiones Asfálticas en Frío con Polímeros y Sin Polímeros	SOLICITADO POR:	Bryan Abrajan, Madelin Castillo, Bryan Andramunlo, Pablo Boada
LOCALIZACIÓN:	UIDE - Quito	FISCALIZACIÓN:
MUESTRA:	Tomada por el Cliente	CONTRATISTA:
NORMA ENSAYO:	ASTM C 131	FECHA DE RECEPCIÓN:	3/6/2025
		FECHA DE EMISIÓN:	17/6/2025
CANTERA:	Holcim	ORDEN DE TRABAJO:	5813 M - 1
LOCALIZACIÓN:	Piño		HOJA: 2 de 2
DESCRIPCIÓN:	Agregado 1/2"		

Porcentaje de desgaste = (C / A) * 100

Masa que pasa el tamiz No. 12 = (A - B)

TAMANO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO:	1/2 pig
TIPO DE GRADACION:	B
MASA INICIAL DE LA MUESTRA	A= 5003 gr.
MASA RETENIDA EN EL TAMIZ N° 12 DESPUÉS DE 500 REVOLUCIONES	B= 3702 gr
MASA QUE PASA EL TAMIZ N° 12	C= 1301 gr
PORCENTAJE DE DESGASTE	D= 26 %

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.



Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DE ÁREA




Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
COORDINADOR

Dirección: Avenida 12 de Octubre y Alfredo Mena Caamaño
Código postal: 170525 / **Teléfono:** (593-2) 299 1700 Ext. 1529 / **Correo:** lmc-puce@puce.edu.ec
Quito - Ecuador / www.puce.edu.ec

f t i in y d




Anexo 3. Ensayos de laboratorio durabilidad de los agregados a la acción de los sulfatos.



Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Seréis mis testigos

"Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad"

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



ÁREA DE HORMIGONES
INFORME DE ENSAYO
DURABILIDAD DE LOS AGREGADOS A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS

PROYECTO: Comparación de Emulsiones Asfálticas en Frio con Polímeros y Sin Polímeros

LOCALIZACION: UIDE - Quito

MUESTRA: Tomada por el Cliente

NORMA ENSAYO: ASTM C 88

CANTERA: Holcim

LOCALIZACION: Pífo

SOLICITADO POR: Bryan Abrajan, Madelin Castillo, Bryan Andramunio, Pablo Boada

FISCALIZADOR:

CONTRATISTA:

FECHA DE RECEPCIÓN: 3/6/2025

FECHA DE EMISIÓN: 27/6/2025

ORDEN DE TRABAJO: 5813 M - 2

HOJA: 1 de 1

SOLUCION DE SULFATO DE MAGNESIO (5 CICLOS)

AGREGADO GRUESO - TMN 3/4"

FRACCION N°	N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
	PASA	RETIENE		DEL ENSAYO	DEL ENSAYO	ENSAYO	ENSAYO
1	1"	3/4"	11,70	500,0	497,0	0,60	0,07
2	3/4"	1/2"	53,30	670,0	666,0	0,60	0,32
3	1/2"	3/8"	21,03	330,0	328,0	0,61	0,13
4	3/8"	N° 4	13,97	300,0	299,0	0,33	0,05
PORCENTAJE DE DESGASTE TOTAL							1%

AGREGADO GRUESO - TMN 1/2"

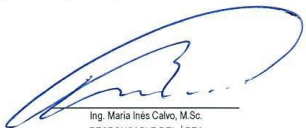
FRACCION N°	N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
	PASA	RETIENE		DEL ENSAYO	DEL ENSAYO	ENSAYO	ENSAYO
1	3/4"	1/2"	31,19	670,0	669,0	0,15	0,05
2	1/2"	3/8"	31,78	330,0	328,0	0,61	0,19
3	3/8"	N° 4	35,85	300,0	298,0	0,67	0,24
PORCENTAJE DE DESGASTE TOTAL							0%

AGREGADO FINO - ARENA


FRACCION N°	N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
	PASA	RETIENE		DEL ENSAYO	DEL ENSAYO	ENSAYO	ENSAYO
1	3/8"	N° 4	2,40	100,00	99,00	9,00	0,22
2	N° 4	N° 8	24,34	100,00	91,00	9,00	2,19
3	N° 8	N° 16	23,21	100,00	98,00	2,00	0,46
4	N° 16	N° 30	16,19	100,00	97,00	3,00	0,49
5	N° 30	N° 50	12,11	100,00	96,00	4,00	0,49
PORCENTAJE DE DESGASTE TOTAL							4%

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.



Ing. María Inés Calvo, M.Sc.
RESPONSABLE DEL AREA



Ing. Jorge Albuja, M.Sc., Ph.D.
COORDINADOR

Dirección: Avenida 12 de Octubre y Alfredo Mena Caamaño
Código postal: 170525 / **Teléfono:** (593-2) 299 1700 Ext. 1529 / **Correo:** lmc-puce@puce.edu.ec
Quito - Ecuador / www.puce.edu.ec

f t i n y d

