



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería.  
Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres y Movilidad.

Desarrollo de un aditivo polimérico hidrofóbico para riegos de sello en pavimentos.

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres y Movilidad

**Presenta:**

Ing. Orlinka Yinet Vizcaino Rodríguez

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-dirigido por:

Dra. Genoveva Hernández Padrón

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Presidente

Firma

---

Dra. Genoveva Hernández Padrón  
Secretario

Firma

---

Dr. Eduardo Rojas González  
Vocal

Firma

---

Dr. Ricardo Montoya Zamora  
Suplente

Firma

---

Mtro. Alejandro Castellanos Cordero  
Suplente

Firma

---

---

Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Directora de la Facultad

---

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Secretario de Innovación, Investigación  
y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## RESUMEN

El deterioro provocado por la acción del agua en las mezclas asfálticas constituye una de las principales causas de daño prematuro en los pavimentos flexibles, afectando su durabilidad y desempeño estructural. Este fenómeno se manifiesta por la pérdida de adherencia en la interfaz asfalto–agregado, lo que genera desprendimientos y disminuye la resistencia mecánica del sistema. Con el propósito de reducir la susceptibilidad al daño por humedad, el presente trabajo propone el empleo de tratamientos superficiales tipo riego de sello, modificados con aditivos poliméricos hidrofóbicos, los cuales actúan disminuyendo la afinidad del ligante hacia el agua y mejorando el comportamiento del pavimento frente a la acción de la humedad. Esta estrategia busca incrementar la durabilidad de la carpeta asfáltica y ofrecer una alternativa tecnológica sostenible para el mantenimiento preventivo de pavimentos en condiciones climáticas adversas.

**Palabras clave:** aditivos poliméricos hidrofóbicos, daño por humedad, riego de sello.

## SUMMARY

The deterioration caused by water action in asphalt mixtures represents one of the primary sources of premature failure in flexible pavements, compromising their durability and structural performance. This phenomenon is characterized by the loss of adhesion at the asphalt–aggregate interface, which results in stripping and a reduction in the mechanical strength of the pavement system. To mitigate moisture-induced damage, this study proposes the application of surface treatments of the seal coat type, modified with hydrophobic polymeric additives. These additives act by reducing the binder’s affinity for water and enhancing the pavement’s resistance to moisture exposure. This approach aims to increase the service life of the asphalt layer and provide a sustainable technological alternative for preventive pavement maintenance under adverse climatic conditions.

**Keywords:** hydrophobic polymeric additives, moisture damage, seal coat.

## **DEDICATORIA**

A mi mamá, mi Tía Luz por ser la impulsora de este logro, por su amor incondicional, su fortaleza y su ejemplo de perseverancia, que me inspiraron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi papá, Ramón por su apoyo constante, por permitirme vivir esta experiencia y por su locura dentro de la cordura, que siempre ha llenado de equilibrio mi camino.

A mi hermano, Lito por su apoyo incondicional, su sacrificio y su compañía; sin ti,  
no estaría aquí.

A los tres, por ser mi mayor motivación y el pilar sobre el que he construido cada uno de mis logros.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por darme salud, fuerzas para no rendirme en todo este proyecto. A Oshun y Eleggua por nunca abandonarme, ni en los peores momentos.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su apoyo y su tiempo en la elaboración de este proyecto.

A la Dra. Genoveva Hernández Padrón por su valioso tiempo, sus enseñanzas, su apoyo en las pruebas realizadas y su paciencia con la fase química experimental. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Mi gratitud se dirige igualmente a **la empresa Ceviter y Ergon Asfaltos, Puebla**, por facilitar el acceso a equipos, materiales y datos esenciales para la realización de los ensayos experimentales.

Al maestro Alejandro Castellanos por sus sabios consejos y su ayuda tan certera para aterrizar el tema de investigación.

Al Dr. Ricardo Montoya por siempre estar al pendiente de todo el proceso.

A Rosita, que me permitió realizar una estancia por Ergon Asfaltos y permitirme vivir experiencias ingenieriles en la empresa. A Jorge Mejía por compartirme todos sus conocimientos sobre emulsiones asfálticas y ayudarme con mi proceso de ensayos. A todos los ingenieros del laboratorio, mi agradecimiento por hacerme sentir una más del equipo.

De manera especial, agradezco a **mi familia**, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante durante todo este proceso. A mi mamá por ser la autora de que hoy me titule como maestra.

A mis padrinos Cayola y Martin por sus sabios consejos.

A mis amigas Gennys, Sus, Anhis por su ayuda, compañía, viajes, risas. Me las llevo de esta experiencia para el resto de la vida.

A Kikito, por su apoyo, consejos, ánimos, paciencia y amor.

A los **amigos y compañeros de estudio**, por su colaboración, por compartir conmigo cada etapa de este recorrido académico.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado en la realización de esta Maestría.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo brindado durante la Maestría.

A CFATA por permitirme hacer el trabajo experimental para el desarrollo de mi material polimérico.

# INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICACIÓN .....	15
1.2	ANTECEDENTES .....	16
1.3	MARCO TEÓRICO .....	18
1.3.1	<i>Susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas. ....</i>	<i>18</i>
1.3.2	<i>Tratamientos superficiales .....</i>	<i>23</i>
1.3.3	<i>Riego de sello.....</i>	<i>27</i>
1.3.4	<i>Emulsión asfáltica.....</i>	<i>28</i>
1.3.5	<i>Polímeros.....</i>	<i>33</i>
1.3.6	<i>Aditivos hidrofóbicos .....</i>	<i>36</i>
1.4	HIPÓTESIS .....	38
1.5	OBJETIVOS .....	38
1.5.1	<i>Objetivo General:.....</i>	<i>38</i>
1.5.2	<i>Objetivo Particular:.....</i>	<i>38</i>
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>39</b>
2.1	SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.....	40
2.1.1	<i>Definición del banco de procedencia del material pétreo: .....</i>	<i>40</i>
2.1.2	<i>Definición de la emulsión a emplear: .....</i>	<i>40</i>
2.1.3	<i>Definición de los polímeros a emplear para obtener el aditivo hidrofóbico:.....</i>	<i>40</i>
2.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO.....	41
2.2.1	<i>Requisitos de granulometría y calidad del material pétreo: N-CMT-4-04-17: CTM.</i> <i>Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para</i> <i>mezclas asfálticas. ....</i>	<i>41</i>
2.2.2	<i>Difracción de Rayos X (RX).....</i>	<i>42</i>
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA: N-CMT-4-05-005/02, CALIDAD DE EMULSIONES ASFÁLTICAS .....	43
2.4	CARACTERIZACIÓN DEL ADITIVO HIDROFÓBICO.....	45



2.4.1	<i>Caracterización Espectroscópica (FT- IR)</i> .....	45
2.5	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA .....	46
2.5.1	<i>Preparación de muestras</i> .....	47
2.5.2	<i>Medición del ángulo de contacto</i> .....	47
2.5.3	<i>Análisis de Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples: ASTM D7000 Standard Test Method for Sweep Test of Emulsified Asphalt Surface Treatment Samples</i> .....	48
2.5.4	<i>Análisis de la permeabilidad: Método aro y cono.</i> .....	50
2.5.5	<i>Análisis del desprendimiento por fricción: Recomendación AMAAC RA 07/2010. Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua.</i> .....	52
2.6	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL MATERIAL HIDROFÓBICO .....	53
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>54</b>
3.1	SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.....	54
3.1.1	<i>Definición del banco de procedencia del material pétreo</i> .....	54
3.1.2	<i>Definición de la emulsión a emplear</i> .....	55
3.1.3	<i>Definición de los polímeros a emplear para obtener el aditivo hidrofóbico</i> .....	56
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO.....	57
3.2.1	<i>Requisitos de granulometría y calidad del material pétreo: N-CMT-4-04-17: CTM. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.</i> .....	57
3.2.2	<i>Difracción de Rayos X (RX)</i> .....	60
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA .....	61
3.4	CARACTERIZACIÓN DEL ADITIVO HIDROFÓBICO.....	62
3.4.1	<i>Caracterización Espectroscópica (FT- IR)</i> .....	63
3.5	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA .....	66
3.5.1	<i>Preparación de muestras</i> .....	66
3.5.2	<i>Medición del ángulo de contacto</i> .....	67

3.5.3	<i>Análisis de Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples: ASTM D7000 Standard Test Method for Sweep Test of Emulsified Asphalt Surface Treatment Samples.....</i>	68
3.5.4	<i>Análisis de la permeabilidad: Método aro y cono. ....</i>	73
3.5.5	<i>Análisis del desprendimiento por fricción: Recomendación AMAAC RA 07/2010. Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua. ....</i>	75
3.6	<b>ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL MATERIAL HIDROFÓBICO .....</b>	76
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS CONSTRUCTIVO Y ECONÓMICO .....</b>	<b>79</b>
4.1	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO DEL CICLO DE VIDA.....</b>	<b>79</b>
4.1.1	<i>Descripción de las alternativas.....</i>	79
4.1.2	<i>Costo de materiales.....</i>	80
4.1.3	<i>Análisis del ciclo de vida .....</i>	83
4.2	<b>PROCESO CONSTRUCTIVO .....</b>	<b>86</b>
4.2.1	<i>Preparación del agregado en planta.....</i>	86
4.2.2	<i>Transporte del material pretratado.....</i>	87
4.2.3	<i>Ejecución del riego de sello simple en campo.....</i>	87
4.2.4	<i>Puesta en servicio y mantenimiento.....</i>	87
4.3	<b>SOSTENIBILIDAD DE LA VARIANTE MODIFICADA .....</b>	<b>88</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>92</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>110</b>

## INDICE DE FIGURAS

Pag

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO $\theta$ ENTRE LA GOTA DE AGUA Y LA SUPERFICIE.....	36
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DE SUPERFICIE HIDROFÓBICA .....	37
FIGURA 3: METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DESARROLLAR EL ADITIVO HIDROFÓBICO. ....	39
FIGURA 4: UBICACIÓN DEL BANCO EL JOVERO .....	55
FIGURA 5: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO ENSAYADO Y EL MATERIAL TIPO 3-A ....	58
FIGURA 6: DIFRACCIÓN RX DEL MATERIAL PÉTREO .....	60
FIGURA 7: ESPECTRO DEL POLÍMERO 1 BASE PI-SBS .....	64
FIGURA 8: ESPECTRO DEL POLÍMERO 2 BASE PI-EVA .....	65
FIGURA 9: ESPECTRO DEL POLÍMERO 3 BASE PMMA- $\text{SiO}_2$ .....	65
FIGURA 10: MASA PERDIDA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO EN ESTADO NATURAL. ....	71
FIGURA 11: MASA PERDIDA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO PREMEZCLADO CON ASFALTO.....	71
FIGURA 12: MASA PERDIDA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO PREMEZCLADO CON ADITIVO.....	72
FIGURA 13: COMPARACIÓN DEL ÍNDICE DE PERMEABILIDAD ANTES Y DESPUÉS DE COLOCADO EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL. ....	75

## **INDICE DE TABLAS**

**Pag**

<b>TABLA 1. REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA CAPAS DE RODADURA POR SISTEMA DE RIEGO DE SELLOS. ....</b>	<b>41</b>
<b>TABLA 2. REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA CAPAS DE RODADURA POR SISTEMA DE RIEGO DE SELLOS.....</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 3. REQUISITOS DE CALIDAD PATA EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS MODIFICADAS CON POLÍMERO. ....</b>	<b>44</b>
<b>TABLA 4: GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO ENSAYADO .....</b>	<b>57</b>
<b>TABLA 5: REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO ENSAYADO .....</b>	<b>59</b>
<b>TABLA 6: REQUISITOS DE CALIDAD DE LA EMULSIÓN ECR-68P.....</b>	<b>61</b>
<b>TABLA 7: RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO METIDO DE LA GOTA SÉSIL. ....</b>	<b>67</b>
<b>TABLA 8: MASA PERDIDA EN LA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO EN ESTADO VIRGEN. ....</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 9: MASA PERDIDA EN LA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO PREMEZCLADO CON ASFALTO.....</b>	<b>70</b>
<b>TABLA 10: MASA PERDIDA EN LA PRUEBA DE BARRIDO BLANCO AGREGADO PÉTREO PREMEZCLADO CON EL ADITIVO.....</b>	<b>70</b>
<b>TABLA 11: CONDICIONES INICIALES DE PERMEABILIDAD DEL PAVIMENTO ANTES DEL TRATAMIENTO POR RIEGO DE SELLO.....</b>	<b>73</b>
<b>TABLA 12: ÍNDICES DE PERMEABILIDAD DEL PAVIMENTO LUEGO DE APLICADO EL TRATAMIENTO POR RIEGO DE SELLO. ....</b>	<b>74</b>
<b>TABLA 13: VALORES DE DESPRENDIMIENTO POR FRICCIÓN PARA EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL POR RIEGO DE SELLO. ....</b>	<b>76</b>
<b>TABLA 14: COSTOS DE MATERIALES PARA EL ANÁLISIS .....</b>	<b>81</b>

TABLA15: COSTO DEL ADITIVO .....	81
TABLA 16: COSTO TOTAL DE MATERIALES.....	82
TABLA 17: NÚMERO DE APLICACIONES REQUERIDA EN AÑOS.....	84
TABLA 18: COSTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA .....	84
TABLA 19: NOMENCLATURA DE LAS MUESTRAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA. ....	110
TABLA 20: PROCESO DEL ENSAYO SWEEP TEST (BLANCO AGREGADO VIRGEN). ....	111
TABLA 21: PROCESO DEL ENSAYO SWEEP TEST (BLANCO AGREGADO PREMEZCLADO CON ASFALTO). ....	111
TABLA 22: PROCESO DEL ENSAYO SWEEP TEST (BLANCO AGREGADO PREMEZCLADO CON EL ADITIVO). ....	111
TABLA 23: COSTO DE MATERIALES ALTERNATIVA A (RIEGO DE SELLO CONVENCIONAL). ....	112
TABLA 24: COSTO DE MATERIALES ALTERNATIVA B (RIEGO DE SELLO CON AGREGADO PREMEZCLADO CON ASFALTO).....	112
TABLA 25: COSTO DE MATERIALES ALTERNATIVA C (RIEGO DE SELLO CON AGREGADO PREMEZCLADO CON ADITIVO HIDROFÓBICO POLIMÉRICO HIDROFÓBICO) .....	112
TABLA 26: COSTO DE MANO DE OBRA PARA LAS ALTERNATIVAS. ....	113
TABLA 27: COSTO DE EQUIPOS EMPLEADOS EN LA APLICACIÓN.....	113
TABLA 28: EQUIPO ADICIONAL PARA FABRICACIÓN Y PREMEZCLADO .....	114

<b>INDICE DE IMÁGENES</b>	<b>Pag</b>
IMAGEN 1: COMPONENTES DE LA EMULSIÓN DE ROMPIMIENTO RÁPIDO MODIFICADA CON POLÍMERO (ECR-68P) .....	56
IMAGEN 2: CAPTURAS TOMADAS PARA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO. ....	68
IMAGEN 3: ENSAYO DE SWEEP TEST DE LAS MUESTRAS.....	69
IMAGEN 4: ENSAYO DE PERMEABILIDAD PARA LAS CONDICIONES INICIALES DEL PAVIMENTO. ....	73
IMAGEN 5: ENSAYO DE PERMEABILIDAD PARA LAS CONDICIONES DE TRATAMIENTO POR RIEGO DE SELLO PAVIMENTO. ....	74

## 1. INTRODUCCIÓN

El pavimento flexible se conforma por varias capas colocadas una sobre otra, dispuestas horizontalmente, diseñadas con criterios técnicos y construidas con materiales adecuados como mezclas asfálticas en las capas superiores, materiales granulares triturados en la base y subbase, y suelos naturales o estabilizados en la subrasante, todos cumpliendo los requisitos de calidad establecidos en las normas técnicas y compactados de forma controlada (Fonseca, 2011). Este tipo de estructura comprende principalmente una carpeta asfáltica, una capa de base, subbase, y una subrasante previamente estabilizada (Mineros y Rodríguez Molina, 2004). La función esencial de este sistema es distribuir las cargas del tránsito de manera progresiva hacia las capas inferiores, garantizando tanto el desempeño estructural como funcional de la vía (Bhandari *et al.*, 2023).

Las capas superficiales de pavimentos elaboradas con mezclas asfálticas se utilizan ampliamente en la construcción de infraestructura vial en todo el mundo. (Cui *et al.*, 2020). Esta es elaborada con agregados pétreos seleccionados y un ligante asfáltico, cuya formulación depende del tipo y categoría del camino proyectado (Mineros y Rodríguez Molina, 2004). Esta capa soporta de manera directa las cargas vehiculares, asumiendo los esfuerzos horizontales y una fracción de los verticales (Utrera, 2000). Adicionalmente, cumple una función protectora al impermeabilizar la estructura, evitando la filtración de agua que pueda deteriorar las capas inferiores, y al mismo tiempo contribuye a conservar la integridad del pavimento frente al desgaste causado por el tráfico vehicular (Sazo, 2013).

Los principales deterioros que pueden presentarse en las mezclas asfálticas incluyen la deformación permanente o ahuellamiento, la fatiga estructural, las grietas provocadas por bajas temperaturas, los daños asociados a la humedad y el proceso de envejecimiento del material (Arenas, 2020).

El deterioro causado por la humedad es uno de los factores que más afecta el desempeño de los pavimentos, reduciendo su nivel de servicio y elevando considerablemente los costos de mantenimiento.(Do, 2024).

El desempeño de una mezcla asfáltica en caliente se ve afectado por la presencia del agua o vapor de agua en el interior de la misma, lo que provoca la pérdida de capacidad estructural de la mezcla. Este problema se relaciona principalmente con una falla de cohesión (en el ligante) o una falla de adherencia (ligante-agregado) (Tan *et al.*, 2013). (Wang *et al.*, 2025) señalan que la presencia de agua puede reducir la cohesión mediante distintos mecanismos, entre ellos el debilitamiento de la mezcla por saturación y la aparición de fallas asociadas a procesos de expansión. Sumado a todo esto, la fricción es una de las principales características funcionales de los pavimentos de carretera que se ve afectada. Además, esta se reduce expresamente cuando hay agua en la superficie de la carretera.

### 1.1 Justificación

Airey *et al.*, (2008) y Weldegiorgis *et al.*, (2015) coinciden en que, aunque se han llevado a cabo numerosas investigaciones, el fenómeno del daño por humedad y los factores que lo provocan aún no se comprenden ni se han identificado por completo.

Hua Luo *et al.*, (2021) argumenta que las técnicas tradicionales para combatir el daño por humedad, como el uso de aditivos mejoradores de adherencia, modificadores del asfalto y tratamientos superficiales convencionales, han mostrado resultados variables y frecuentemente insuficientes para proporcionar una protección duradera contra la infiltración de agua. Estas limitaciones se deben, en parte, a que muchas de estas soluciones se enfocan en los efectos visibles del problema en lugar de las causas fundamentales del mismo (Abuawad *et al.*, 2015).

Los riegos de sello convencionales, aunque efectivos para sellar fisuras menores y proporcionar una superficie de rodadura renovada, presentan limitaciones en términos de durabilidad y resistencia al agua (Little *et al.*, 2018). La pérdida gradual



de adherencia del material sellante y su susceptibilidad a la acción del agua y las condiciones ambientales reducen su efectividad a mediano y largo plazo (He *et al.*, 2025).

Para implementar soluciones constructivas para contrarrestar el efecto del agua sobre el hormigón asfáltico, Arabzadeh *et al.*, (2017) recomiendan el empleo de tecnologías emergentes como los revestimientos hidrofóbicos. Asimismo, Emelyanenko, (2008), argumenta que el diseño de materiales y revestimientos hidrófobos se ha convertido es una vía individual de la ciencia moderna de materiales, debido a la variedad de propiedades funcionales que presentan.

La incorporación de selladores hidrofóbicos en la composición de riegos de sello representa una aproximación innovadora que combina la funcionalidad tradicional de estos tratamientos con las propiedades avanzadas de los materiales hidrofóbicos (Lu *et al.*, 2023). Xu *et al.*, (2025) afirman que esta integración tecnológica puede resultar en superficies con propiedades mejoradas de repelencia al agua, mayor durabilidad, y resistencia superior a los mecanismos de deterioro asociados con la humedad.

## 1.2 Antecedentes

Para mejorar la resistencia al agua de las mezclas en operación, es común emplear aditivos antidesprendimiento o agentes que favorecen la adherencia (Yao *et al.*, 2015). En este sentido, el uso de polímeros modificadores es un medio eficaz para mitigar los problemas relacionados con el deterioro (Yang *et al.*, 2024). El polímero incorporado debe transferir sus propiedades previstas al sistema polímero-asfalto y alterar las propiedades reológicas y de falla del asfalto virgen (Mostafiz *et al.*, 2023)

Por otra parte (Segundo *et al.*, 2020) argumentan que recubrimientos hidrofóbicos en superficies de hormigón asfáltico que contienen politetrafluoroetileno (PTFE), y con nanopartículas como óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), óxido de zinc (ZnO), óxido de calcio (CaO), por ejemplo, se han aplicado sobre mezclas asfálticas para mejorar la

seguridad vial; midiendo el coeficiente de fricción para caracterizar la resistencia al deslizamiento de las superficies recubiertas superhidrofóbicas.

De igual manera Peng *et al.*, (2018) afirman que agregados artificiales hidrofóbicos a base de geopolímeros, un nuevo tipo de material cementante ecológico, destacan por su resistencia a la corrosión y su capacidad de sellado, lo que los posiciona como la alternativa más utilizada en pavimentación.

Investigaciones recientes han clasificado los factores que pueden afectar las propiedades hidrofóbicas con el fin de formular condiciones óptimas. Resultados demostraron que el contenido de ZnO tiene mayor contribución en el ángulo de contacto con el agua (Mohamed *et al.*, 2014).

Shahnazari *et al.*, (2022) argumentan que en aplicaciones de riego de sello (simple, doble o triple), la modificación del ligante con polímeros tipo I (SBS) en concentraciones de 2-4 % mejora significativamente la cohesión del ligante y su capacidad para retener los agregados bajo la acción del tráfico. La incorporación simultánea de mejoradores de adherencia catiónicos en dosificaciones de 0.3-0.6 % garantiza una adhesión robusta entre el ligante modificado y los agregados pétreos, reduciendo sustancialmente el desprendimiento prematuro de piedras, especialmente durante las primeras semanas después de la aplicación cuando el ligante aún no ha desarrollado su máxima cohesión (Shahnazari *et al.*, 2022).

Esta combinación es particularmente efectiva en tratamientos superficiales tipo riego de sello aplicados sobre pavimentos con microfisuramiento, donde el polímero proporciona elasticidad que permite al tratamiento acomodar pequeños movimientos sin fracturarse, mientras que el aditivo hidrófobo previene la entrada de agua en la interface que podría causar desprendimiento (Rahman *et al.*, 2021). Un análisis de supervivencia de proyectos chip seal han demostrado que los tratamientos con ligantes doblemente modificados (polímero + mejorador de adherencia) exhiben extensiones de vida útil de 2-4 años adicionales en comparación con chip seals convencionales (Jalali y Vargas-Nordcbeck, 2021).

En aplicaciones de slurry seal y microsurfacing, las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros (típicamente látex SBR o SBS en concentraciones de 3-7 % del residuo asfáltico) se combinan frecuentemente con aditivos que mejoran la adherencia y controlan el tiempo de rotura (He *et al.*, 2020). Revisiones sistemáticas sobre microsurfacing destacan que las formulaciones que combinan emulsiones poliméricas con surfactantes catiónicos que actúan como mejoradores de adherencia exhiben mejor desempeño en términos de resistencia al desgaste, vida útil extendida y menor susceptibilidad al desprendimiento bajo condiciones de tráfico y humedad (Zhou *et al.*, 2024).

Las especificaciones actualizadas de ISSA (International Slurry Surfacing Association) reconocen la importancia de la modificación polimérica en microsurfacing, estableciendo requisitos específicos para emulsiones modificadas que incluyen pruebas de cohesión acelerada, resistencia al desgaste húmedo y compatibilidad con agregados (ISSA, 2020). Los aditivos hidrófobos en estas formulaciones no solo mejoran la adhesión inicial, sino que también protegen la interface ligante-agregado durante la fase crítica de curado, cuando el agua presente en la emulsión debe evaporarse sin causar daño a la interface (Fu *et al.*, 2024).

### 1.3 Marco teórico

#### 1.3.1 Susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas.

El diseño de mezclas asfálticas se fundamenta en principios volumétricos que buscan optimizar la relación entre los diferentes componentes de la mezcla: agregados, asfalto y vacíos (Zaumanis *et al.*, 2018). El control del porcentaje de vacíos con aire constituye un parámetro crítico que influye directamente en el desempeño de la mezcla frente a diversos tipos de deterioro, incluyendo el daño por humedad (Moretti y D'Andrea, 2025).

Las especificaciones técnicas internacionales establecen que las mezclas asfálticas densas deben presentar un porcentaje de vacíos con aire entre 3 % y 5 %, siendo

el 4 % el valor óptimo de diseño (Rahbar-Rastegar *et al.*, 2022). Este criterio no es arbitrario, sino que responde a consideraciones técnicas específicas relacionadas con la durabilidad, trabajabilidad y resistencia al deterioro de la mezcla (ASTM D3203, 2022).

Ma *et al.*, (2021) explican que la selección del 4 % como valor óptimo garantiza una estructura de vacíos que proporciona la flexibilidad necesaria para absorber las tensiones térmicas y mecánicas, mientras mantiene la impermeabilidad requerida para limitar la penetración del agua. Este equilibrio es fundamental para maximizar la resistencia al daño por humedad sin comprometer otras propiedades mecánicas de la mezcla (López y Martínez, 2022).

La estructura de vacíos en las mezclas asfálticas actúa como una red de canales interconectados que pueden facilitar o restringir el movimiento del agua en función de su configuración y volumen total (Ma *et al.*, 2021). Cuando el porcentaje de vacíos supera el 5 %, se establece una red de permeabilidad que permite la penetración rápida del agua hacia el interior de la mezcla, incrementando exponencialmente la susceptibilidad al daño por humedad (Hernández *et al.*, 2021).

Los estudios han evidenciado que la permeabilidad de la mezcla aumenta de manera exponencial conforme se incrementa el porcentaje de vacíos (Moretti y D'Andrea, 2025). Mezclas con porcentajes de vacíos superiores al 6 % presentan coeficientes de permeabilidad hasta 100 veces mayores que aquellas con 4 % de vacíos, evidenciando la importancia crítica del control volumétrico en la resistencia al daño por humedad (Dalhat y Osman, 2023).

En la actualidad, las mezclas drenantes han ganado protagonismo en investigaciones por sus beneficios funcionales (Noaman, 2023). El uso de mezclas de Capa de Fricción de Granulometría Abierta (OGFC) como superficie de rodadura ha demostrado ser eficaz para mejorar la resistencia a la fricción del pavimento en condiciones húmedas, disminuir el spray y las salpicaduras de vehículos cercanos, y reducir el deslumbramiento provocado por los faros durante lluvias (Gu *et al.*,

2018). Esto se debe a que su estructura abierta, formada por vacíos interconectados, permite la rápida infiltración del agua, disminuyendo el riesgo de hidroplaneo; además, su elevada macrotextura favorece el drenaje en la interfaz llanta–pavimento, lo que mejora el contacto y la seguridad del usuario (Noaman, 2023). Estas características hacen que su uso sea atractivo en capas superficiales con fines de seguridad vial y sostenibilidad (Emtiaz *et al.*, 2023).

Sin embargo, a nivel estructural, los pavimentos requieren resistencia mecánica y durabilidad a largo plazo, cualidades que son mejor aseguradas por las mezclas densas (Neupane y Wu, 2025). Son adecuadas para necesidades estructurales, de fricción, nivelación y parcheo (Lokesh *et al.*, 2024). Cuando están apropiadamente diseñadas y construidas, las mezclas de gradación densa son relativamente impermeables (Moretti y D’Andrea, 2025). La mezcla asfáltica con gradación de esqueleto denso tiene cadenas de fuerza más largas y mayor resistencia que otros tipos de gradación en mezclas asfálticas (Omar *et al.*, 2020).

En contraste, las mezclas drenantes presentan altos porcentajes de vacíos (15–25 %), lo que las hace vulnerables a problemas de desintegración (raveling), desprendimiento del ligante y oxidación acelerada (TaylorMcPherson, 2020). Los cursos de fricción de gradación abierta generalmente han proporcionado buen desempeño durante 7 a 10 años bajo un rango de condiciones de tráfico, pero estudios documentan que, en regiones con ciclos de congelación-deshielo o climas húmedos, las OGFC presentan fallas prematuras y una relación costo-beneficio desfavorable debido a la alta frecuencia de mantenimiento requerida (Pathak *et al.*, 2023).

Por ello, aunque las mezclas drenantes se aplican con éxito en capas superficiales donde los beneficios funcionales son prioritarios, la estructura portante del pavimento sigue confiándose a mezclas densas, ya que éstas ofrecen mejor equilibrio entre desempeño mecánico, impermeabilidad y vida útil (Ji *et al.*, 2023). Fang *et al.*, (2019) argumentan que el nivel de tráfico es una consideración directa

en el diseño de mezclas de gradación densa. Asimismo, (Barros *et al.*, 2022) explican que la angularidad del agregado, contenido de arcilla, grado del ligante, grado de compactación, y algunas propiedades volumétricas varían con el nivel de tráfico en el procedimiento de diseño de mezclas de gradación densa. Además, las especificaciones internacionales como las de AASHTO y ASTM continúan estableciendo como estándar el uso de mezclas densas en capas base y de rodadura de pavimentos sometidos a tráfico pesado, relegando a las drenantes a aplicaciones muy específicas (Dinegdae y Birgisson, 2025).

No obstante, incluso las mezclas densas presentan limitaciones frente a la acción del agua. El daño inducido por humedad es un problema crítico en pavimentos asfálticos, impactando significativamente su durabilidad y longevidad (Luo *et al.*, 2024). Figueroa Infante y Reyes, (2016) argumenta que el daño por humedad en mezclas asfálticas, conocido como *Moisture Damage*, es uno de los fenómenos más estudiados a nivel mundial debido a su alto impacto económico en la durabilidad de los pavimentos. Se define como la pérdida prematura de resistencia y durabilidad causada por la presencia de humedad en la mezcla asfáltica (Hernández y Ossa, 2020). La humedad puede penetrar la mezcla asfáltica, debilitando la unión entre el ligante y el agregado, y llevando a un deterioro de la estructura del pavimento un proceso comúnmente conocido como desprendimiento (Bozorgzad *et al.*, 2018).

La presencia de humedad en el concreto asfáltico puede generar daños significativos, como el desprendimiento de los agregados, fenómeno conocido como stripping (Lu *et al.*, 2023). Raza *et al.*, (2022) y (Neupane y Wu, 2025) coinciden que este tipo de deterioro ocurre cuando se debilita la unión entre el ligante asfáltico y el agregado, lo que puede derivar en fallas adhesivas o cohesivas. La falla adhesiva ocurre cuando la unión entre el ligante y el agregado se ve comprometida, llevando a una superficie de agregado limpia después de la falla (Neupane y Wu, 2025). En contraste, la falla cohesiva se refiere a la ruptura dentro del ligante o mastic ligante-llenante mismo, llevando a deterioro visible (Neupane y Wu, 2025). La severidad del

daño por humedad es influenciada por factores como el tipo de agregados y asfalto, diseño de mezcla, métodos de construcción, condiciones ambientales, volúmenes de tráfico, y las propiedades de aditivos antistripping (Omar *et al.*, 2020).

La severidad del daño por humedad es influenciada por factores tales como el tipo de agregados y asfalto, diseño de mezcla, métodos de construcción, condiciones ambientales, volúmenes de tráfico, y las propiedades de aditivos antistripping (Pratik y Shenghua, 2025). Las propiedades adhesivas y cohesivas del asfalto, mastic y mortero en la misma mezcla asfáltica porosa controlan esencialmente la durabilidad y el modo de falla de la mezcla (Wang *et al.*, 2021). Además, el daño por humedad resulta de procesos termodinámicos, químicos, físicos y mecánicos complejos, incluyendo permeabilidad al agua, ascenso capilar y difusión de vapor, afectando las propiedades mecánicas del mastic y la adhesión entre el mastic y los agregados (Mallick *et al.*, 2015).

Las fallas adhesivas y cohesivas han sido comúnmente conocidas como dos mecanismos principales que causan daño por humedad en pavimentos asfálticos, siendo que la pérdida de adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico es más apropiadamente medida mediante esfuerzo tensil (Thamer *et al.*, 2024). Los resultados de pruebas indican que la resistencia a tracción indirecta, el módulo de rigidez en falla, el TSR (Tensile Strength Ratio), la resistencia a compresión y la cohesión de mezclas asfálticas se reducen debido a la acción prolongada del agua (Zhang *et al.*, 2020). Aunque la humedad incrementa la polaridad del asfalto, la intrusión de humedad en la interfaz debilita seriamente la capacidad de adhesión del asfalto y el agregado (Lyu *et al.*, 2021).

El daño inducido por humedad presenta riesgos de seguridad, incluyendo hidroplaneo, reducción de fricción, y debilitamiento estructural, lo cual eleva la probabilidad de accidentes durante condiciones húmedas (Neupane y Wu, 2025). En consecuencia, aunque las mezclas densas constituyen la opción preferida en la práctica ingenieril por su balance estructural y de durabilidad, la susceptibilidad al

daño por humedad representa un desafío aún vigente (Maurya y Singh, 2024). Este panorama abre la puerta a la investigación de tecnologías emergentes, como la incorporación de aditivos poliméricos hidrofóbicos o selladores especializados, que permitan potenciar las ventajas de las mezclas densas y al mismo tiempo reducir su vulnerabilidad frente al agua (Nejad *et al.*, 2012). En la búsqueda de soluciones que no solo mantengan la funcionalidad sino también extiendan la vida útil del pavimento, surgen los tratamientos superficiales.

### 1.3.2 Tratamientos superficiales

Los tratamientos superficiales constituyen técnicas de pavimentación que consisten en la aplicación de una o varias capas de material bituminoso seguidas de la extensión y compactación de agregados pétreos sobre la superficie de un camino, con el objetivo principal de mejorar las características superficiales del pavimento, proporcionando una capa de rodadura resistente y duradera (Tighe y Gransberg, 2025). Estas aplicaciones representan una alternativa económica y efectiva para el mantenimiento y mejoramiento de la infraestructura vial, especialmente en caminos de bajo a medio volumen de tránsito, destacándose como una de las técnicas de mantenimiento preventivo más utilizadas por las agencias de carreteras para extender la vida útil de los pavimentos asfálticos de manera costo-efectiva (Li *et al.*, 2021).

La función primordial de los tratamientos superficiales es múltiple y abarca diversos aspectos del desempeño del pavimento (Shuler *et al.*, 2011). En primer lugar, la película bituminosa aplicada sella la superficie del pavimento, impidiendo la infiltración de agua hacia las capas inferiores de la estructura, protegiendo así la base y subbase de los efectos dañinos de la humedad (Buss *et al.*, 2018). Adicionalmente, los agregados pétreos distribuidos sobre el ligante bituminoso proporcionan una textura rugosa que mejora significativamente la resistencia al deslizamiento y la fricción entre el neumático y el pavimento, incrementando la seguridad vial, especialmente en condiciones de lluvia (Zhao *et al.*, 2018). Estos



tratamientos actúan también como capa protectora frente a la acción abrasiva del tráfico vehicular y los agentes atmosféricos, prolongando la vida útil del pavimento subyacente, además de permitir sellar fisuras capilares y grietas de baja severidad, evitando su propagación y el deterioro acelerado del pavimento (Jin *et al.*, 2023). Investigaciones recientes mediante el uso de modelos de función de supervivencia Kaplan-Meier han demostrado que el análisis de 253 secciones de proyectos de riego de sello permite determinar que factores como la condición existente del pavimento, el clima, el volumen de tráfico medido en KESAL (miles de ejes equivalentes) y el número estructural afectan significativamente el tiempo óptimo de aplicación y la vida útil del tratamiento (Talha *et al.*, 2022).

Los tratamientos superficiales se clasifican según el número de aplicaciones de ligante y agregado que involucran. El tratamiento superficial simple o chip seal consiste en una aplicación única de material bituminoso seguida de una capa de agregado pétreo, siendo el tipo más básico y económico, apropiado para caminos de bajo volumen de tránsito, con dosificaciones típicas del ligante que oscilan entre 0.9 y 1.8 litros por metro cuadrado, mientras que el agregado se aplica en cantidades de 10 a 16 kg/m<sup>2</sup> (Cerón Gómez *et al.*, 2013). El tratamiento superficial doble comprende dos aplicaciones sucesivas de ligante bituminoso y agregado pétreo, utilizando en la segunda capa un agregado de menor tamaño que en la primera, proporcionando mayor durabilidad y mejor sellado que el tratamiento simple, siendo adecuado para caminos con tránsito medio; la primera capa emplea típicamente agregado de 19 mm o 12.5 mm, mientras que la segunda utiliza material de 9.5 mm o 6.3 mm (Cerón Gómez *et al.*, 2013). El tratamiento superficial triple involucra tres aplicaciones alternadas de ligante y agregado, con granulometrías decrecientes en cada capa sucesiva, ofreciendo la mayor durabilidad entre los tratamientos superficiales convencionales y siendo aplicable en vías de tránsito medio a alto, con secuencias granulométricas típicas de 19 mm - 12.5 mm - 6.3 mm (Overby y Michael Pinard, 2013).

Lane *et al.*, (2019) argumentan que además de los tratamientos convencionales, existen técnicas especializadas como la lechada asfáltica (slurry seal), que es una mezcla fluida de emulsión asfáltica, agregado fino, filler mineral y agua, aplicada en espesores delgados de 3 a 6 mm, existiendo tres tipos según la granulometría del agregado: Tipo I (agregado fino), Tipo II (agregado medio) y Tipo III (agregado grueso), utilizándose principalmente para sellar superficies y corregir deficiencias menores en pavimentos con bajo nivel de deterioro, con especificaciones actualizadas en las guías A105 de ISSA (ISSA, 2020). El microsurfacing, por su parte, es similar a la lechada asfáltica, pero emplea emulsiones de rotura controlada y polímeros modificados, que permiten su aplicación en espesores mayores (hasta 25 mm) y en múltiples capas, pudiendo aplicarse tanto para mantenimiento preventivo como correctivo, incluyendo la corrección de deformaciones mediante relleno de roderas (Yu *et al.*, 2025).

Los materiales constituyentes de los tratamientos superficiales deben cumplir con especificaciones rigurosas para garantizar un desempeño adecuado (Tighe y Gransberg, 2025). Los ligantes bituminosos utilizados incluyen asfaltos rebajados, emulsiones asfálticas (Calderón, 2012); y asfaltos modificados, que son ligantes convencionales mejorados mediante la incorporación de polímeros (SBS, SBR, EVA) u otros aditivos que mejoran sus propiedades reológicas, adhesión y resistencia al envejecimiento (Martínez y Torres Dahbura, 2012). Las especificaciones revisadas del Asphalt Institute del año 2021 para emulsiones asfálticas incorporan formulaciones con polímeros modificados que mejoran significativamente el desempeño de los tratamientos (Díaz Romero, 2022).

Los agregados pétreos, por su parte, deben cumplir requisitos estrictos de calidad en cuanto a resistencia mecánica, medida mediante ensayos de desgaste Los Ángeles con un máximo de 35-40 % de desgaste (ASTM C131, 2020) y durabilidad con sulfato de sodio o magnesio (AASHTO T104, 2020); forma de partículas preferentemente cúbicas o angulares, con bajo contenido de partículas alargadas,

planas o lajeadas (máximo 10-15 %) (ASTM D4791-19, 2023); limpieza con contenido de finos menor al 1-2 %, libre de polvo, arcilla y materia orgánica que pueda interferir con la adhesión del ligante (AASHTO T11, 2022); granulometría que debe ajustarse a las especificaciones según el tipo de tratamiento (AASHTO T 27-, 2023), siendo crucial una graduación uniforme para lograr una distribución homogénea; y adhesividad con buena afinidad con el ligante bituminoso, pudiendo requerir aditivos mejoradores de adherencia en agregados hidrófilos, conforme a las prácticas estándar actualizadas de la Society for Testing and Materials (ASTM D 3625, 2017).

El diseño y dosificación de un tratamiento superficial constituye un aspecto técnico fundamental que implica la determinación de la tasa de aplicación del ligante, calculada en función del tamaño del agregado, textura superficial existente, porosidad y tráfico esperado; la tasa de aplicación del agregado, que debe proporcionar cobertura mínima del 70-100 % del área según el tipo de tratamiento, calculada en función del tamaño medio del agregado y su gravedad específica; y la compatibilidad ligante-agregado, evaluada mediante ensayos de adhesión y afinidad que predicen el comportamiento del sistema (Torres y Juela, 2021).

Existen metodologías de diseño establecidas y actualizadas, como el método de McLeod y la metodología del Asphalt Institute, que consideran variables como el tamaño medio del agregado, el volumen de vacíos, la absorción del ligante por el agregado y la textura superficial existente, proporcionando herramientas sistemáticas para optimizar la dosificación de materiales (Gómez, 2019). La (Foundation for Pavement Preservation, 2022) ha publicado mejores prácticas actualizadas para tratamientos superficiales que incorporan avances recientes en técnicas de diseño, selección de materiales y control de calidad.

Romero y Rodríguez, (2024) coinciden en que los tratamientos superficiales presentan ventajas significativas que justifican su amplia aplicación en la infraestructura vial, incluyendo un costo económico significativamente inferior al de

mezclas asfálticas en caliente (30-40 % del costo), rapidez de ejecución y puesta en servicio, mínima interrupción del tráfico, no requieren equipo especializado de alta complejidad, proporcionan mejora inmediata de la seguridad vial mediante incremento de la fricción superficial, ofrecen versatilidad de aplicación en diferentes condiciones y consumen menos recursos energéticos que otras técnicas de pavimentación (Li *et al.*, 2021).

Además Romero y Rodríguez, (2024) expresan que presentan limitaciones importantes que deben considerarse al seleccionar esta técnica, tales como no aportar capacidad estructural significativa, ser sensibles a condiciones climáticas durante la construcción, requerir superficie de apoyo en buenas condiciones, tener vida útil limitada (5-10 años típicamente, aunque proyectos recientes han documentado extensiones de vida útil de 3 a 5 años en pavimentos bien mantenidos), no ser apropiados para corregir deficiencias estructurales severas, poder generar proyección de agregados durante el período inicial de servicio, y ser susceptibles a exudación si el ligante se aplica en exceso.

### 1.3.3 Riego de sello

El riego de sello, empleado como método de preservación de pavimentos, es considerado uno de los tratamientos superficiales más rentables a nivel mundial y se utiliza desde finales del siglo XIX (Žlender *et al.*, 2024). Según el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Synthesis 342), también es conocido como chip seal. Borbor Pezo y Ladera Espejo, (2022) lo definen como una herramienta para la preservación de la superficie de rodamiento que consiste en aplicar una capa de ligante asfáltico, usualmente una emulsión o asfalto modificado, seguida de una capa de agregado triturado, el cual se compacta para formar una superficie de rodamiento durable y antideslizante.

Su función principal es sellar microfisuras, prevenir la infiltración de agua y mejorar la resistencia al deslizamiento, actuando como una capa protectora que reduce la oxidación del ligante y el deterioro prematuro del pavimento (Gaspar Alvarez, 2023).

La vida útil de este tipo de tratamiento está alrededor de 3 a 5 años, dependiendo del tipo de vehículos, la forma de conducción y la calidad de la obra ( Li *et al.*, 2022). El incremento de la resistencia a la rodadura es de un 25 % del valor original (Ccanccapa Yucra, 2022).

Para lograr un desempeño óptimo, el pavimento existente debe encontrarse en buenas condiciones estructurales, sin deformaciones graves ni baches, ya que el chip seal está diseñado para conservar y proteger más que para rehabilitar (Navarrete Mera, 2024). El éxito de su aplicación depende en gran medida del diseño adecuado de materiales y tasas de aplicación (Lawson y Senadheera, 2009). El ligante debe seleccionarse considerando el clima, el tránsito y la textura de la superficie, mientras que la cantidad de agregado y de ligante debe ser cuidadosamente calibrada; un exceso de ligante provoca sangrado (*bleeding*), mientras que una cantidad insuficiente produce desprendimiento de grava (*chip loss*) (Gransberg y James, 2005). Además, se recomienda que los agregados sean limpios, angulares y de granulometría uniforme, y que se apliquen inmediatamente después del ligante para garantizar la adhesión (Gransberg y James, 2005).

Respecto a los ligantes asfálticos, aunque predominan las emulsiones de rompimiento rápido, también se emplean asfaltos convencionales, líquidos y modificados (Miranda, 2022). Independientemente del tipo, el ligante debe asegurar buena adhesividad con los agregados, fluidez inicial adecuada para permitir un rociado uniforme y un cubrimiento eficiente. Además, debe desarrollar cohesión rápidamente y tener una viscosidad compatible con las características del agregado y la superficie (Campagnoli Martinez, 2007).

#### 1.3.4 Emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas constituyen ligantes bituminosos en los cuales el asfalto se encuentra en estado de dispersión coloidal en una fase acuosa continua mediante la acción de agentes emulsificantes, permitiendo su aplicación a temperaturas ambiente o moderadas (Vega, 2015), lo que reduce significativamente

el consumo energético, mejora las condiciones de seguridad durante el manejo y minimiza las emisiones contaminantes asociadas con su utilización (Shanbara *et al.*, 2021). La mezcla asfáltica en frío se produce mediante la combinación de betún emulsificado, asfalto rebajado o asfalto espumado con agregados no calentados, proceso que no requiere calentamiento de agregados, lo cual hace que las mezclas en frío sean económicas y relativamente libres de contaminación (Al Nageim *et al.*, 2012).

Su formulación básica comprende tres componentes principales: asfalto como fase dispersa, agua como fase continua y un agente emulsificante que actúa como surfactante para estabilizar la dispersión, aunque frecuentemente se incorporan aditivos complementarios que modifican características específicas tales como la velocidad de rotura, la afinidad con materiales pétreos, la resistencia frente a la acción del agua y la durabilidad del sistema (Calderón, 2012). Una revisión sistemática del estado del arte sobre el desempeño mecánico, funcional y de largo plazo de mezclas asfálticas en frío indica que estas mezclas han atraído considerable atención debido a sus ventajas ambientales y económicas, destacándose desarrollos recientes en emulsiones modificadas con polímeros que mejoran significativamente su desempeño (Guo *et al.*, 2023).

Estas emulsiones se clasifican fundamentalmente según dos criterios principales: la polaridad de la carga eléctrica del agente emulsificante, que determina si la emulsión es catiónica (partículas de asfalto con carga positiva) o aniónica (partículas de asfalto con carga negativa), característica que influye directamente en la compatibilidad electroquímica con los diferentes tipos de materiales pétreos y suelos (Vega, 2015). Investigaciones recientes sobre emulsiones aniónicas han estudiado la diversidad de emulsificantes aniónicos y los procesos de manufactura, encontrando que los emulsificantes aniónicos pueden mejorar la estabilidad de la emulsión, asegurar dispersión uniforme de aceite y agua, poseer buena viscosidad de descompresión, propiedades de espesamiento y lubricación, y mantener buena

estabilidad bajo condiciones ácidas, aunque la emulsión asfáltica aniónica está restringida en aplicaciones de ingeniería debido a problemas de estabilidad de almacenamiento (Zhang *et al.*, 2024). El segundo criterio de clasificación corresponde a la velocidad de rotura, categorizándose en rotura rápida (RS), rotura media (MS) y rotura lenta (SS), parámetro que determina el intervalo de tiempo requerido para que el ligante se separe de la fase acuosa y se adhiera al agregado, siendo un factor crítico para la selección apropiada según la aplicación específica, ya sea en mezclas en frío, tratamientos superficiales, estabilización de bases o lechadas asfálticas (Miranda, 2022).

El contenido residual de asfalto y la viscosidad representan parámetros determinantes que condicionan el desempeño final del material aplicado, dado que estas propiedades afectan directamente aspectos como la rigidez del ligante curado, la capacidad de adherencia con los agregados, el comportamiento mecánico bajo cargas de tráfico y la respuesta ante variaciones climáticas y envejecimiento. (Graziani *et al.*, 2020).

Las emulsiones asfálticas constituyen el ligante fundamental en la mayoría de los tratamientos de riego de sello contemporáneos, habiendo desplazado progresivamente a los asfaltos rebajados debido a sus ventajas ambientales, operacionales y de seguridad (Miranda, 2022). En aplicaciones de riego de sello, las emulsiones asfálticas catiónicas de rotura rápida o media son las más utilizadas, ya que permiten la aplicación del ligante a temperaturas moderadas (50-70 °C) en lugar de las temperaturas elevadas requeridas por los asfaltos en caliente (140-160 °C), reduciendo significativamente el consumo energético y las emisiones durante la construcción (Mallick *et al.*, 2015). El mecanismo de funcionamiento de la emulsión en estos tratamientos se basa en la rotura controlada del sistema coloidal: después de la aspersión sobre el pavimento, el agua presente en la emulsión comienza a evaporarse y el ligante asfáltico se deposita sobre la superficie, proporcionando la película adhesiva necesaria para retener los agregados pétreos

que se distribuyen inmediatamente después (Ravera *et al.*, 2021). La velocidad de rotura de la emulsión debe ser cuidadosamente seleccionada para permitir suficiente tiempo de trabajo para la distribución uniforme del agregado, pero lo suficientemente rápida para desarrollar adherencia inicial antes de la apertura al tráfico (Banerjee *et al.*, 2012).

Las emulsiones catiónicas presentan ventajas particulares en los riegos de sello debido a su afinidad química con la mayoría de los agregados pétreos, especialmente aquellos de naturaleza ácida o silícea que históricamente han presentado problemas de adhesión con ligantes convencionales (Huang *et al.*, 2025). La carga positiva de las partículas de asfalto en emulsiones catiónicas facilita la atracción electrostática con la superficie típicamente cargada negativamente de los agregados, mejorando la adhesión inicial y la resistencia al desprendimiento bajo la acción del agua (Zhang *et al.*, 2024). En aplicaciones de riego de sello, donde no se incorporan agregados o solo se utiliza arena fina (sand seal), las emulsiones de rotura lenta son preferidas, ya que deben penetrar en la superficie del pavimento envejecido, rellenando microfisuras y proporcionando una película protectora uniforme (Fan *et al.*, 2024). Las emulsiones modificadas con polímeros, particularmente látex estireno-butadieno (SBR) o copolímeros tipo SBS, han demostrado desempeño superior en tratamientos de chip seal y microsurfacing, proporcionando mayor cohesión del ligante, mejor retención de agregados y mayor durabilidad ante ciclos de temperatura y humedad (Emtiaz *et al.*, 2023).

Meena y Monu, (2025) afirman que el empleo de la emulsión es en mezclas en frío representa una alternativa sostenible frente a las mezclas en caliente, ya que permite utilizar agregados con cierto contenido de humedad sin requerir secado, reduciendo así el consumo energético y las emisiones contaminantes durante la producción. Además, al emplear un diseño adecuado, estas mezclas pueden conservar propiedades mecánicas satisfactorias para aplicaciones de bajo y medio tránsito (Rivera *et al.*, 2023). No obstante, diversos estudios señalan que las



mezclas en frío presentan menor resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la humedad en comparación con las mezclas en caliente; sin embargo, los avances en el uso de modificadores y aditivos poliméricos están mejorando significativamente su desempeño y ampliando su campo de aplicación en la infraestructura vial (Fan *et al.*, 2024).

Cuando las emulsiones asfálticas se emplean en la estabilización de suelos o bases granulares, estas contribuyen significativamente a mejorar propiedades fundamentales como el valor de soporte California (CBR), la densidad seca máxima, el contenido óptimo de humedad y la resistencia a la deformación permanente, incrementando así la capacidad estructural de la capa tratada y su contribución al sistema multicapa del pavimento (Abdul Wahhab *et al.*, 2025).

Desarrollos recientes incluyen modificadores poliméricos multicomponente en base acuosa para emulsión asfáltica vial, con diseño modular, mecanismo de acción y evaluación de desempeño, demostrando mejoras significativas en propiedades mecánicas y durabilidad (Zhang *et al.*, 2025).

Finalmente, la selección del tipo de emulsión resulta determinante para el éxito de la aplicación, debiendo fundamentarse en consideraciones técnicas que incluyen la velocidad de rotura requerida según el método constructivo, las características químicas y mineralógicas del suelo o agregado a tratar, la compatibilidad electroquímica entre la emulsión y los materiales pétreos, las condiciones climáticas locales durante la construcción y servicio, y los requerimientos de desempeño a corto y largo plazo del pavimento (Fan *et al.*, 2024). En conjunto, las emulsiones asfálticas se consolidan como una alternativa técnicamente viable, económicamente competitiva y ambientalmente sustentable en la ingeniería de pavimentos contemporánea, siempre que su formulación, compatibilidad con los materiales y diseño de mezcla sean rigurosamente evaluados para garantizar su desempeño satisfactorio durante la vida útil proyectada del pavimento (J. Li *et al.*, 2023).

### 1.3.5 Polímeros

Los polímeros se utilizan para modificar asfaltos gracias a sus propiedades físicas y químicas, así como a su buena compatibilidad con el ligante bituminoso, lo que los convierte en una de las alternativas más eficaces para optimizar el desempeño de los pavimentos asfálticos en distintas condiciones de servicio (Zhu *et al.*, 2014). Argumentan (King *et al.*, 2011) que estas sustancias son macromoléculas constituidas por la repetición de unidades estructurales más simples denominadas monómeros, presentando un elevado peso y diversas arquitecturas moleculares que les confieren propiedades particulares como elasticidad, rigidez, capacidad de recuperación elástica, viscosidad y compatibilidad con otras sustancias, incluyendo la posibilidad de sinergias con aditivos funcionales como los mejoradores de adherencia hidrófobos.

Conforme a la Norma Mexicana N-CMT-4-05-002/06, los materiales asfálticos modificados se clasifican en cuatro categorías principales de modificadores: Polímero Tipo I, Polímero Tipo II, Polímero Tipo III y Hule molido de neumáticos, cada uno diseñado con características específicas para mejorar propiedades diferenciadas del asfalto (SCT, 2006). El Polímero Tipo I comprende modificadores elastoméricos basados en bloques de estireno, en configuraciones bibloque o tribloque como styrene-butadiene-styrene (SBS) o styrene-butadiene (SB), recomendándose su uso para mejorar el desempeño tanto a temperaturas elevadas como bajas, siendo especialmente efectivos en pavimentos sometidos a tránsito pesado y condiciones climáticas extremas (SCT, 2006). El Polímero Tipo II incluye elastómeros lineales como caucho-de-estireno-látex o neopreno-látex, orientados principalmente a mejorar el comportamiento del asfalto a bajas temperaturas, reduciendo la susceptibilidad al agrietamiento térmico (SCT, 2006). El Polímero Tipo III corresponde a plastómeros, tales como etil-vinil-acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), diseñados para mejorar la resistencia al ahuellamiento, incrementar la rigidez térmica y optimizar el desempeño del asfalto a temperaturas elevadas (SCT, 2006). Finalmente, el modificador de hule molido de

neumáticos actúa aumentando la flexibilidad y la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, contribuyendo a disminuir la aparición de grietas por fatiga o por variaciones térmicas (Lozano *et al.*, 2020).

La incorporación de polímeros contribuye a mejorar de manera notable el desempeño de los pavimentos asfálticos y disminuye los impactos ambientales asociados a las mezclas, favoreciendo así un desarrollo más sostenible en la construcción vial (Peña *et al.*, 2022). Sin embargo, la efectividad de los polímeros puede verse comprometida cuando los agregados presentan características hidrofílicas que dificultan la adhesión del ligante modificado, haciendo necesaria la incorporación complementaria de aditivos hidrófobos o mejoradores de adherencia (He *et al.*, 2020).

La modificación de ligantes con polímeros y la incorporación de aditivos hidrófobos representan estrategias complementarias especialmente relevantes en tratamientos superficiales, donde la adhesión ligante-agregado y la resistencia al desprendimiento son factores críticos para el éxito del tratamiento. En chip seals, slurry seals y microsurfacing, la interface ligante-agregado está directamente expuesta a la acción del tráfico, el agua y los agentes atmosféricos, por lo que tanto las propiedades cohesivas del ligante como las propiedades adhesivas en la interface son determinantes para la durabilidad del tratamiento (Zhou *et al.*, 2024).

Investigaciones recientes sobre microsurfacing han demostrado que las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros exhiben mejor desempeño en términos de resistencia al desgaste, cohesión y durabilidad, siendo particularmente efectivas cuando se combinan con aditivos que mejoran la adhesión ligante-agregado (Fu *et al.*, 2024). Los polímeros, especialmente elastómeros tipo SBS y látex estireno-butadieno (SBR), mejoran las propiedades cohesivas y elásticas de la película de ligante en tratamientos como fog seal, chip seal y microsurfacing, incrementando su resistencia al envejecimiento, a la fatiga y a las deformaciones inducidas por el tráfico (Meng *et al.*, 2025).

Mesquita Jr. *et al.*, (2024) argumentan que el incremento de viscosidad y modificación reológica producido por los polímeros puede dificultar la humectación completa de los agregados, especialmente cuando estos presentan naturaleza hidrofílica (silíceo o ácido). En estos casos, los aditivos hidrófobos actúan modificando la química superficial del agregado o del ligante, reduciendo la tensión interfacial y facilitando la dispersión del ligante modificado sobre la superficie del agregado (Shi *et al.*, 2024). Estudios sobre la evaluación mecánica del desempeño de chip seal han confirmado que la combinación de emulsiones modificadas con polímeros y mejoradores de adherencia resulta en tratamientos con mayor resistencia cohesiva y mejor resistencia al desprendimiento de agregados bajo la acción del tráfico y la humedad (Gupta *et al.*, 2020).

El mecanismo combinado actúa de manera sinérgica en tratamientos superficiales: el polímero forma una red elástica dentro de la matriz del ligante que mejora la cohesión, la recuperación elástica y la resistencia a la propagación de microfisuras, mientras que el aditivo hidrófobo se concentra en la interfaz ligante-agregado, modificando las propiedades de mojado y promoviendo una adhesión más fuerte y resistente a la acción del agua (Zhao *et al.*, 2025). Esta dualidad es especialmente crítica en tratamientos de bajo espesor como chip seal y slurry seal, donde no existe redundancia estructural y la falla de la interface ligante-agregado resulta en el desprendimiento inmediato del tratamiento (Kim y Elipse, 2025).

Desarrollos recientes en polímeros hidrófobos multifuncionales para modificación de asfalto han integrado ambas funciones en un solo aditivo, combinando las propiedades elastoméricas o plastoméricas con características hidrofóbicas intrínsecas mediante modificación química de las cadenas poliméricas (Li *et al.*, 2023). Estos polímeros de nueva generación, como copolímeros funcionalizados con grupos hidrofóbicos específicos, representan una evolución hacia materiales multifuncionales que simplifican la formulación y potencialmente mejoran la compatibilidad entre los diferentes aditivos (Hadi *et al.*, 2025).

### 1.3.6 Aditivos hidrofóbicos

Forbes, (2008) sostiene que una superficie se considera hidrofóbica cuando las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua superan a las fuerzas de adhesión que actúan entre el agua y dicha superficie. En este caso, el agua asume la forma energéticamente eficiente de una esfera, figura 1.

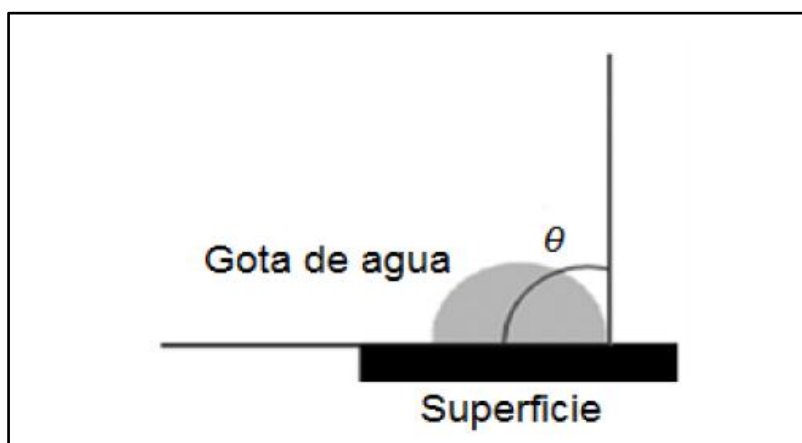


Figura 1: Representación del ángulo de contacto  $\theta$  entre la gota de agua y la superficie  
Fuente: Yeverino, (2013).

Abdallah *et al.*, (2007) argumentan que, en el contexto fisicoquímico, el término se aplica a aquellas sustancias que son repelidas por el agua o que no se pueden mezclar con ella. Sin embargo, cuando se trata de superficies, se utiliza el término mojabilidad para determinar la capacidad que posee la superficie de atraer el agua y dejar que se adhieran varias capas de ella.

Según Emelyanenko, (2008) se entiende por material hidrofóbico a los empleados en recubrimientos para los que el ángulo de contacto con el agua y las soluciones acuosas es superior a  $90^\circ$ , (figura 2).

Yeverino, (2013) explica que la medición del ángulo de contacto realiza depositando una gota del líquido de prueba, por lo general agua, sobre la superficie sólida que se desea analizar. La gota se ilumina con luz difusa para obtener una imagen clara, la cual es captada por el objetivo de un microscopio acoplado a un goniómetro graduado. Este microscopio incorpora una cámara de video que permite visualizar

la imagen en un monitor en escala de grises. El sistema también incluye un banco óptico compacto y dos mecanismos de desplazamiento, uno vertical y otro horizontal.



Figura 2: Representación de superficie hidrofóbica  
Fuente: Forbes, (2008)

Los materiales hidrofóbicos poseen una serie de propiedades funcionales únicas: son impermeables, resistentes a la corrosión y estables frente a la bioincrustación y los contaminantes inorgánicos y en algunos casos inorgánicos (Abdallah *et al.*, 2007).

Según Wenzel, (Shardt y Elliott, 2020), la humectabilidad se describe mediante un proceso termodinámico. En el caso de superficies hidrófobas el proceso no es espontáneo como en el caso de las hidrofiliyas debido a que la energía libre de la interfaz seca es menor que la de la interfaz húmeda (Arabzadeh *et al.*, 2016). La humectabilidad está relacionada con la rugosidad de la superficie. El aumento de la rugosidad eleva el ángulo de contacto de la superficie (CA) entre las gotas de agua y la superficie del material, lo que puede mejorar la hidrofobicidad (Nascimento *et al.*, 2012).

Segundo *et al.*, (2020) argumentan que la capacidad hidrófoba se evalúa principalmente mediante análisis ópticos y electrónicos; midiendo el ángulo de

contacto del agua y la superficie. La rugosidad de la superficie permite el análisis de la microtopografía de dicha superficie.

En el caso de las mezclas asfálticas utilizando nanopartículas los resultados de las superficies hidrofóbicas han obtenido CA que oscilan entre 150 y 166°, dependiendo del material y el método de aplicación. El CA más alto que se consiguió fue utilizando micropartículas de politetrafluoroetileno (PTFE) (Arabzadeh *et al.*, 2016).

#### 1.4 Hipótesis

La incorporación de un aditivo polimérico hidrofóbico a la composición de un riego de sello para carpetas asfálticas aumentará el ángulo de contacto con la superficie, disminuirá la susceptibilidad a la humedad y el desprendimiento por fricción de la carpeta asfáltica.

#### 1.5 Objetivos

##### 1.5.1 Objetivo General:

Desarrollar un riego de sello para carpetas asfálticas incorporando un aditivo polimérico con propiedades hidrofóbicas para aumentar el ángulo de contacto con la superficie, disminuir la susceptibilidad a la humedad y el desprendimiento por fricción en la superficie de rodamiento.

##### 1.5.2 Objetivo Particular:

1. Encontrar el aditivo polimérico con propiedades hidrofóbicas que conformen el material hidrofóbico.
2. Encontrar la proporción adecuada de material hidrofóbico que se debe colocar en el riego de sello que proporcione las propiedades hidrofóbicas a la superficie de rodamiento.
3. Determinar la eficiencia del material hidrofóbico mediante el ángulo de contacto para valorar su aporte en la mejora de la permeabilidad y la disminución del desprendimiento por fricción de la carpeta asfáltica.

## 2. Metodología

En la figura 3 se muestra la metodología propuesta para desarrollar el aditivo hidrofóbico, así como validar su eficiencia de aplicación.

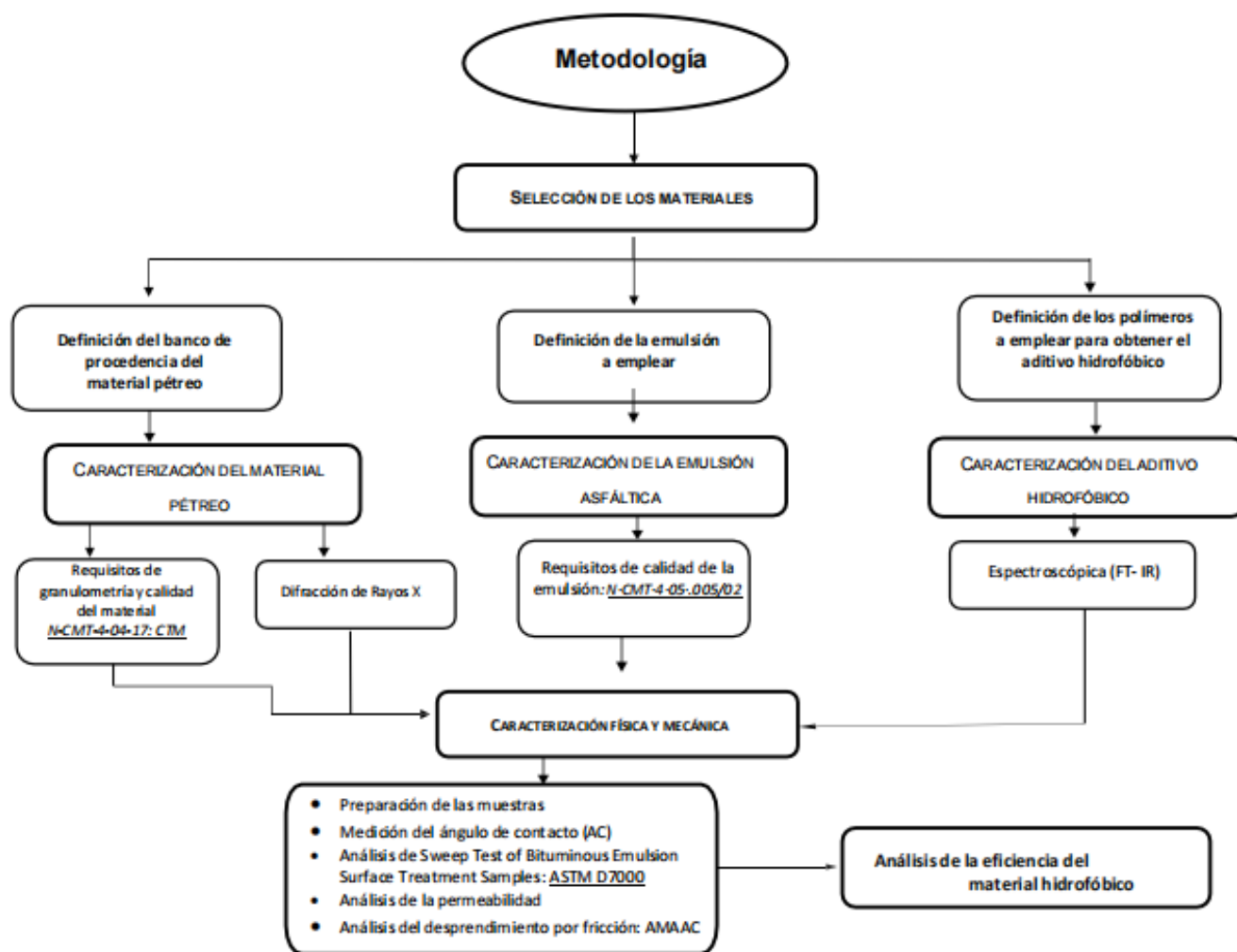


Figura 3: Metodología propuesta para desarrollar el aditivo hidrofóbico.  
Fuente: elaboración propia

Las actividades de desarrollo del aditivo serán llevadas a cabo en el laboratorio de Síntesis Molecular de Sistemas en el CFTA-UNAM y los trabajos de caracterización de la emulsión, así como el diseño óptimo del riego de sello y su caracterización mecánica se desarrollará en Ergon Asfalto, el laboratorio de materiales Ceviter y la UAQ.



## 2.1 Selección de los materiales

### 2.1.1 Definición del banco de procedencia del material pétreo:

Primeramente, se ubica el banco de material, considerando criterios de accesibilidad, disponibilidad y cumplimiento normativo. El banco de selección representa la fuente primaria de agregados. La selección inicial en campo es complementada con pruebas de laboratorio que confirmen la idoneidad del agregado extraído del banco elegido.

### 2.1.2 Definición de la emulsión a emplear:

Se define el tipo de emulsión a emplear, basándose en las recomendaciones de la ASTM D2397/D2397M-20 (2020) y las directrices técnicas del Instituto Mexicano del Transporte, que establecen los criterios para la preparación y control de calidad de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros.

Para el estado de Querétaro, donde el clima puede presentar variaciones térmicas y exposición a humedad, es esencial elegir una emulsión que tenga un residuo adecuado, velocidad de rompimiento compatible con el proceso constructivo y buena compatibilidad electroquímica con los agregados disponibles.

La emulsión seleccionada será elaborada y caracterizada para valorar el cumplimiento de los requisitos de calidad de la normativa vigente.

### 2.1.3 Definición de los polímeros a emplear para obtener el aditivo hidrofóbico:

Se seleccionan cuidadosamente los materiales a emplear para la formulación del aditivo polimérico, priorizando aquellos polímeros que hayan demostrado eficiencia en la modificación de asfaltos en estudios previos. La elección se orienta a promover una sinergia entre los componentes que favorezca el desarrollo de propiedades hidrofóbicas estables y compatibles con el ligante asfáltico y la mineralogía del agregado pétreo. Paralelamente, se incorporan compuestos con capacidad promotora de hidrofobicidad que contribuyan a reducir la afinidad del material con el agua y mejoren el comportamiento frente al daño por humedad.

## 2.2 Caracterización del material pétreo

### 2.2.1 Requisitos de granulometría y calidad del material pétreo: N-CMT-4-04-17: CTM. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

El agregado pétreo empleado en la construcción de las capas de rodadura para riegos de sello se clasifica de acuerdo con su distribución de tamaños y debe ajustarse a las especificaciones granulométricas establecidas en la Tabla 1, además de cumplir con los criterios de calidad señalados en la Tabla 2 de la Norma N-CMT-4-04-17: CTM.

Este análisis garantiza la uniformidad y adecuada interrelación entre los tamaños de los agregados, lo cual influye directamente en la resistencia, estabilidad y durabilidad del sello.

Asimismo, se define la condición del material pétreo, definiendo si se encuentra en estado seco o premezclado, ya que esta característica afecta la adherencia del ligante asfáltico y el comportamiento general del tratamiento durante su aplicación y compactación en obra.

Tabla 1. Requisitos de Granulometría del material pétreo para capas de rodadura por sistema de riego de sellos.

Malla		Denominación del material pétreo				
Abertura mm	Designación	1	2	3-A	3-B	3-E
Porcentaje que pasa						
31,5	1 1/4 in	100	--	--	--	--
25	1 in	95 mín.	--	--	--	--
19	3/4 in	--	100	--	--	--
12,5	1/2 in	5 máx.	95 mín.	100	--	100
9,5	3/8 in	--	--	95 mín.	100	95 mín.
6,3	1/4 in	0	5 máx.	--	95 mín.	--
4,75	N.º 4	--	--	--	--	5 máx.
2	N.º 10	--	0	5 máx.	5 máx.	0
0,425	N.º 40	--	--	0	0	--

Fuente: N-CMT-4-04-17: CTM. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Tabla 2. Requisitos de calidad del material pétreo para capas de rodadura por sistema de riego de sellos.

Característica		Valor
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2.4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		30
Partículas alargadas y lajeadas, %, máximo		35
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	100
	Dos o más caras	90
Valor de Pulimento Acelerado, adimensional, mínimo		30

Fuente: N-CMT-4-04-17: CTM. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

### 2.2.2 Difracción de Rayos X (RX)

Se realiza una caracterización mineralógica del agregado pétreo mediante el ensayo de difracción de rayos X para identificar la composición cristalina del agregado empleado.

(Ali *et al.*, 2022) argumentan que la difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica no destructiva destinada para identificar y, en muchos casos, cuantificar las fases cristalinas presentes en materiales sólidos. Ferreira *et al.*, (2019) explica que su fundamento físico se apoya en la interacción del haz de rayos X con los planos atómicos de los minerales: cuando la radiación incide sobre una muestra pulverizada, los planos cristalográficos dispersan la radiación en ángulos definidos que cumplen la ley de Bragg; el registro de la intensidad en función del ángulo (difractograma) produce un “patrón” característico que funciona como huella mineralógica para cada fase (Omori *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista práctico y de investigación, la DRX aportará evidencias objetivas que complementarán otras pruebas minerales y físicas: por ejemplo, la combinación DRX + ensayos de contenido de finos (equivalente de arena, índice de azul de metileno) y petrográfica permite distinguir entre material “fino inocuo” y finos

compuestos por arcillas dañinas (Zhou y Liu, 2018); además, integrar DRX con técnicas complementarias (FTIR, SEM-EDS) aumenta la fiabilidad de la interpretación sobre la idoneidad del agregado en aplicaciones viales (Utomo *et al.*, 2022). La literatura reciente y guías técnicas recomiendan precisamente este enfoque integrado para minimizar sorpresas en obra y para fundamentar decisiones de selección o tratamiento de agregados (Mulenshi *et al.*, 2021).

## **Equipos**

- Difractómetro de rayos X (XRD)
- Computadora con software de adquisición y análisis
- Portamuestras
- Espátula
- Balanza analítica (precisión 0.001 g)
- Guantes, mascarilla, gafas y pinzas

## **Procedimiento**

La muestra será pulverizada hasta lograr un tamaño de partícula predominantemente inferior a 75  $\mu\text{m}$  (malla 200), lo cual favorece una distribución aleatoria de los cristalitos y minimiza efectos de orientación preferencial que pueden distorsionar la intensidad de los picos de difracción (Aslani, 2019).

A continuación, la muestra pulverizada se monta sobre el porta-muestras compatible con el goniómetro del difractómetro, y se procede al alineamiento preciso mediante muescas de orientación o marcas de referencia, asegurando que la superficie de la muestra quede en la posición de difracción óptima. Una vez cerrada la cámara de seguridad, se fijan los parámetros de adquisición en el software. Tras la adquisición, se guarda el difractograma y se analiza en Origin Pro, comparando las posiciones e intensidades de los picos con bases de datos cristalográficas internacionales para la identificación de fases.

### **2.3 Caracterización de la emulsión asfáltica: N·CMT·4·05·.005/02, *Calidad de emulsiones Asfálticas***

Luego de definida la emulsión a emplear se realiza un análisis de la emulsión asfáltica de acuerdo con la normativa de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes N·CMT·4·05·005/02, *Calidad de emulsiones Asfálticas* tabla 3.

Tabla 3. Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímero.

Características	Clasificación					
	ECR-45P	ECR-65P	ECR-68P	ECL-62P	ECCR-62P	ECCL-62P
Contenido de cemento asfáltico en masa, % mínimo	45	65	68	62	62	62
Viscosidad Saybolt-Furol a 25 °C, s, mínimo	5	25–100	--	20	20	20
Viscosidad Saybolt-Furol a 50 °C, s, mínimo	--	--	50–200	--	--	--
Asentamiento en 5 días, diferencia %, máximo	5	3	3	--	--	--
Retenido en malla N°20 en la prueba del tamiz, %, máximo	0.1					
Carga eléctrica de las partículas	(+)					
Disolvente en volumen, %, máximo	3					
Demulsibilidad, % mínimo	--	60	60	--	--	--
Penetración a 25 °C (100 g, 5 s), 10 <sup>-1</sup> mm, mínimo	15–60	70–150	110–200	40–90	40–90	40–90
Recuperación elástica por torsión a 25 °C, %, mínimo	--	30	30	20	20	20
Recuperación elástica en ductilómetro a 10 °C (20 cm/min), %, mínimo	--	50	50	20	20	20
Recuperación elástica en ductilómetro a 40 °C (20 cm/min), %, mínimo	15	--	--	--	--	--
Ductilidad a 25 °C (5 cm/min), cm, mínimo	--	40	40	40	40	40

Fuente: N·CMT·4·05·005/02, Calidad de emulsiones Asfálticas.

Esta verificación tiene por objeto garantizar que la emulsión empleada cumpla con las características de contenido de cemento asfáltico, viscosidad, estabilidad al almacenamiento, comportamiento del residuo y otras propiedades que determinan su idoneidad para riegos superficiales, tal y como lo exige la norma. La realización

de estas pruebas permite detectar desviaciones que podrían afectar la aplicación, el rompimiento en obra, la adherencia con los agregados y la durabilidad del tratamiento.

Se ejecutan los ensayos normalizados indicados en la norma y en los métodos asociados: determinación del contenido de cemento asfáltico por masa, medición de la viscosidad Saybolt-Furol a las temperaturas especificadas, ensayos de asentamiento en almacenamiento, demulsibilidad, carga eléctrica de partículas, retención en mallas, destilación para recuperación del residuo y caracterización del residuo (penetración, solubilidad, ductilidad u otras propiedades según el tipo de emulsión). Estos parámetros validaran la emulsión según los límites incluidos en la norma.

## 2.4 Caracterización del aditivo hidrofóbico

### 2.4.1 Caracterización Espectroscópica (FT- IR)

La caracterización del aditivo hidrofóbico constituye una etapa esencial para validar su composición química y su compatibilidad con los materiales. Para ello, se emplea la espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), técnica ampliamente utilizada para identificar grupos funcionales presentes en compuestos orgánicos y polímeros.

El análisis se orienta a confirmar la ausencia de grupos hidroxilo ( $-OH$ ) dentro de la estructura funcional del aditivo, debido a que estos grupos están asociados a afinidad por el agua y, por tanto, podrían comprometer su desempeño hidrofóbico. La presencia de señales características del grupo  $-OH$  (principalmente en la región de  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ ) indicaría polaridad y tendencia a la absorción de humedad, lo cual resultaría incompatible con los objetivos del tratamiento asfáltico.

Las técnicas espectroscópicas facilitan la identificación y cuantificación de la composición en muestras orgánicas, inorgánicas y en análisis elemental (Cantellano y Zetina, 2015). La espectrometría infrarroja (IR) se fundamenta en que los enlaces

presentes en los compuestos vibran a frecuencias características. Con la energía asociada a dichas vibraciones es posible identificar los elementos o grupos funcionales que conforman las muestras (Atkins, 2006).

### **Equipos**

- Espectrómetro FTIR (Fourier Transform Infrared)
- ATR (Attenuated Total Reflectance) con cristal de diamante
- Portamuestras de pastillas prensadas
- Espátulas

### **Procedimiento**

El procedimiento se desarrolla de acuerdo con las prácticas establecidas en la norma (ASTM E1252-98, 2021), *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*.

Para el análisis de polímeros mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se preparan 0.1 gr aproximadamente de los aditivos propuestos. Estos se colocan en forma de película delgada. Una vez posicionada la muestra en el espectrómetro, se hace incidir un haz infrarrojo que interactúa con las moléculas del polímero, generando absorbancias características según los grupos funcionales presentes. El equipo registra la intensidad de la radiación absorbida en función del número de onda, generando un espectro que permite identificar enlaces específicos. Finalmente, se interpreta el espectro comparándolo con bases de datos o literatura especializada para confirmar composiciones químicas, modificaciones estructurales o la presencia de aditivos.

### **2.5 Caracterización física y mecánica**

La caracterización física y mecánica del material se enfoca en evaluar su comportamiento frente a condiciones que reflejan su desempeño real en aplicaciones asfálticas. Para ello, se llevan a cabo ensayos de grado de hidrofobicidad, desprendimiento y permeabilidad, los cuales permitirán determinar

la interacción del material con el agua, su adherencia frente a esfuerzos mecánicos y su capacidad de resistir el paso de fluidos. Estos ensayos son fundamentales para validar la efectividad del aditivo y su influencia en la durabilidad y estabilidad de las mezclas asfálticas, proporcionando una base técnica para correlacionar las propiedades fisicoquímicas del material con su desempeño funcional.

#### 2.5.1 Preparación de muestras

La preparación de las muestras se realiza considerando tanto las formulaciones convencionales como las modificadas. Se elaborarán muestras base que representen el riego de sello tradicional y, en paralelo, se producirán muestras modificadas con la incorporación del aditivo hidrofóbico. Este enfoque comparativo permite evaluar de manera controlada el efecto del aditivo sobre el desempeño del tratamiento superficial. Además, durante esta etapa se definirá y valorará la forma más adecuada de incorporación del aditivo hidrofóbico al sistema de riego de sello, considerando variables como dosificación, método de integración y compatibilidad con los materiales. Esta preparación rigurosa garantiza que las muestras sean representativas y permitan obtener resultados válidos en la etapa de evaluación. Las dosificaciones del aditivo hidrofóbico se definen con base al peso de la emulsión. Las dosificaciones del aditivo hidrofóbico serán: 1, 2 y 3 %.

#### 2.5.2 Medición del ángulo de contacto

Se evalúan las propiedades superficiales mediante la medición del ángulo de contacto para determinar el grado de hidrofobicidad del material analizando la interacción de una gota de agua con la superficie de la muestra.

La medición del ángulo de contacto se realiza por el método de la gota sésil. El método consiste en aplicar una gota de agua destilada (u otro líquido de prueba) sobre la superficie de la muestra y medir el ángulo de contacto formado en la interfaz trifásica (sólido-líquido-gas) (Ponomar *et al.*, 2022). El método de la gota sésil está ampliamente extendido debido a la simplicidad del montaje de medición y del protocolo de medición, el pequeño volumen del líquido de prueba y el tamaño de la



muestra requeridos para las mediciones. El método funciona mediante la observación de cómo se comporta el líquido al mojar al sólido, registrándose una imagen de la gota sésil mediante una cámara fotográfica, y posteriormente un software calcula el ángulo de contacto basándose en esta imagen.

### **Procedimiento:**

Se coloca la muestra sobre una superficie nivelada y libre de contaminantes, y se deposita cuidadosamente una gota de agua desionizada con ayuda de una micropipeta o jeringa de precisión, evitando que la gota se deforme por impacto. Inmediatamente después, se captura una imagen lateral del perfil de la gota utilizando una cámara digital de alta resolución, asegurando iluminación homogénea y enfoque nítido para definir con claridad la interfaz líquido–sólido–aire. Las fotografías obtenidas se analizarán mediante el software ImageJ, calibrando previamente la escala según una referencia conocida. A partir del contorno de la gota, se traza la línea base sobre la superficie y se ajusta la curva del perfil para calcular el ángulo formado en el punto de contacto. Este procedimiento se repite en distintos puntos de la muestra y los valores resultantes se promedian para obtener un ángulo representativo del comportamiento hidrofóbico del material. Se selecciona el polímero que mayor ángulo de contacto presente con la superficie y será el empleado en las siguientes pruebas de caracterización.

#### **2.5.3 Análisis de Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples; ASTM D7000 Standard Test Method for Sweep Test of Emulsified Asphalt Surface Treatment Samples.**

Se propone la utilización de la prueba *ASTM D7000 Standard Test Method for Sweep Test of Emulsified Asphalt Surface Treatment Samples*. Esta prueba sirve de correlación con el desempeño de los riegos de sello durante la etapa de construcción, evalúa las características de curado y resistencia al desprendimiento entre el asfalto y el agregado.

La prueba puede ser ejecutada a diferentes temperaturas de curado, pero para esta investigación la temperatura de la prueba se define a 35 °C considerando las

temperaturas en la superficie del pavimento para la zona de Querétaro. Los tiempos de curado en horno serán de: una, dos y tres horas.

De este análisis se definirá el porcentaje óptimo de aditivo y el tiempo de curado del riego de sello.

### **Procedimiento**

El procedimiento de ensayo establecido en la norma ASTM D7000 comienza con la preparación de la muestra utilizando moldes de 300 mm de diámetro el cual será pesado y registrada su masa. Sobre los moldes aplica 90 gr de la emulsión asfáltica y se distribuye uniformemente el agregado. La cantidad de agregado a incorporar es calculada según la granulometría obtenida del agregado pétreo según la ecuación 1 y su gravedad específica aparente.

$$\frac{A(202.1X-15.8)}{100} + \frac{B(146.4X-4.7)}{100} = Y \quad (1)$$

Donde:

A= % de agregado de 9.5 a 6.3 mm

B= % de agregado de 6.3 a 4.75 mm

X= gravedad específica aparente (BSG)

Y= cantidad de agregado necesario para la prueba de barrido (g)

Una vez preparadas, las muestras deben acondicionarse a una temperatura de  $25 \pm 3$  °C durante los tiempos propuestos para la realización del ensayo, registrándose cuidadosamente la masa inicial del agregado presente en la muestra. Todo este proceder no debe exceder los 5 minutos para evitar que la emulsión comience su proceso de rompimiento.

Posteriormente, la muestra se coloca en el dispositivo de ensayo donde se instala un cepillo rotatorio con cerdas, ajustándose la carga vertical aplicada sobre el cepillo y configurando la velocidad de rotación según los parámetros establecidos en la norma (Bahia *et al.*, 2009). Durante la ejecución del ensayo, el mecanismo de barrido se activa y la muestra es sometida al barrido continuo del cepillo giratorio durante un tiempo de 1 minuto, simulando de manera acelerada la acción abrasiva

del tráfico vehicular sobre la superficie del tratamiento. Al finalizar el barrido, se recolecta cuidadosamente todo el material desprendido durante el proceso y se pesa con precisión de 0.1 g, calculándose el porcentaje de pérdida de agregado después del barrido, mediante la relación entre la masa de agregado perdido y la masa inicial del agregado ajustando el valor por el factor 1.33 (ecuación 2).

El factor 1.33 es un coeficiente de corrección introducido en la norma ASTM D7000-11 para compensar la diferencia entre la energía de barrido aplicada en el laboratorio y la energía real de campo que sufriría el sello asfáltico por acción del tráfico y el viento.

$$\% \text{ masa perdida} = \left( \frac{A-B}{A-C} \right) \times 100 \times 1.33 \quad (2)$$

Donde:

A= peso inicial del espécimen

B= peso final del espécimen

C= peso del disco de muestra de asfalto

Los resultados obtenidos se comparan con criterios de aceptación establecidos, siendo valores típicamente aceptables aquellos que presentan pérdidas menores al 10-15 % según las especificaciones locales, donde menores pérdidas indican mejor retención y adhesión entre el ligante y el agregado (Gransberg y James, 2005).

Se obtendrán de la prueba las condiciones de curado aplicadas, la temperatura de ensayo, el porcentaje de pérdida de agregado obtenido, y cualquier observación relevante sobre el patrón de falla observado durante el ensayo. El procedimiento completo, incluyendo la preparación de muestras, curado y ejecución del ensayo, requiere aproximadamente entre tres y cuatro horas, proporcionando una herramienta eficiente para evaluar la resistencia al desprendimiento de agregado en tratamientos superficiales y optimizar las dosificaciones de la combinación emulsión-agregado antes de su aplicación en campo.

#### 2.5.4 Análisis de la permeabilidad: Método aro y cono.

El análisis de la permeabilidad se realiza utilizando el método de aro y cono, una técnica que permite evaluar la capacidad del material para permitir el paso de agua a través de su estructura de forma controlada.

**Equipo y material que se utiliza:**

- Aro de lámina galvanizada del Núm. 16, de 250 mm. de diámetro interior y 50 mm de altura.
- Cono de bronce de 25.4 mm de altura y base de 20 mm de diámetro.
- Probetas graduadas.
- Cronómetro con aproximación de 1 segundo.
- Recipiente para agua.
- Sellador constituido por plastilina.

**Procedimiento**

Se coloca el aro en la superficie tratada previamente. Esta debe estar limpia, libre de polvo o cualquier sustancia. Se le coloca plastilina en el contorno del aro, se fija en posición horizontal sobre el área donde se aplicó el tratamiento, la consistencia de la plastilina se adecuará para aplicarlo en forma de un cordón de dos centímetros de diámetro, aproximadamente; se presiona el cordón con los dedos para obturar debidamente las oquedades entre el aro y la superficie.

Luego se coloca el cono en el centro del espécimen delimitado por el aro y enseguida se vierte rápidamente suficiente agua para cubrir dicho cono hasta el vértice y se toma la lectura inicial. Seguido de eso se activa el cronometro por 10 minutos. Al pasar ese tiempo se repone el agua infiltrada con una probeta graduada; tomándose la lectura final de la cantidad de agua repuesta.

Se calcula el índice de permeabilidad mediante la ecuación # 3

$$Ip = \frac{Vi}{Vt} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

Ip: Índice de permeabilidad (%)

Vi: Volumen de agua infiltrada cm<sup>3</sup> (lectura final)

Vt: Volumen delimitado al interior del aro cm<sup>3</sup> (lectura inicial)

#### 2.5.5 Análisis del desprendimiento por fricción: Recomendación AMAAC RA 07/2010. Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua.

El análisis de desprendimiento por fricción determina la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos bajo la acción del agua. Se emplea la recomendación AMAAC RA 07/2010 la cual establece el procedimiento para evaluar la adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos cuando son sometidos a la acción del agua y así validar la efectividad del aditivo hidrofóbico en comparación de un tratamiento convencional.

##### **Equipo y material que se utiliza:**

- Platos de aluminio de  $152 \pm 1$  mm de ancho por  $152 \pm 1$  mm de largo con una profundidad de 6 mm
- Pinzas de punta
- Baño de agua
- Termómetros
- Mallas de 12.5 mm
- Horno

##### **Procedimiento**

Para este procedimiento, se añaden 30 gramos de emulsión asfáltica sobre un plato de aluminio y se distribuyen de manera uniforme, procurando que esta operación no exceda un minuto. Previamente, se seleccionan 50 partículas del agregado pétreo, las cuales se colocarán manualmente sobre la emulsión aplicando ligera presión para asegurar su adherencia inicial.

Una vez dispuestos los agregados, el plato de aluminio con la emulsión y el material pétreo es introducido en el horno durante el tiempo definido como óptimo de curado, el cual habrá sido determinado previamente a partir del ensayo *Sweep Test*. La temperatura del horno se fija en 35 °C, correspondiente a las condiciones

ambientales del estado de Querétaro, con el fin de simular un escenario real de aplicación del riego de sello.

Luego de transcurrido el tiempo se retira del horno y se coloca en un baño de agua durante 4 días a temperatura de  $55 \pm 5$  °C. Posterior a los días indicados se coloca el plato en baño de maría a  $25 \pm 1$  °C por dos horas. Una vez retirado el plato del baño de maría se despega cada partícula del material pétreo con unas pinzas de punta realizando un movimiento vertical y se observa el área que estuvo en contacto con el asfalto.

Luego se agrupan las partículas del material pétreo en 3 grupos:

- Completamente desprendido: menos del 25 % del área cubierta del total del área que estuvo en contacto con el asfalto.
- Parcialmente desprendido: entre un 25 y 75 % de área cubierta del total del área que estuvo en contacto con el asfalto.
- No desprendido: entre un 75 y 100 % de área cubierta del total del área que estuvo en contacto con el asfalto.

### Cálculo y Resultados

Mediante la observación visual se registra el porcentaje del área con o sin cubrimiento asfáltico de cada partícula del agregado pétreo de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Completamente desprendido cuenta como 0 unidades.
- Parcialmente desprendido cuenta como 1 unidad.
- No desprendido cuenta como 2 unidades.

Se suman las unidades y se reporta como % de cubrimiento total, el cual puede variar desde 0 % hasta 100 % expresándose siempre como número entero.

### 2.6 Análisis de la eficiencia del material hidrofóbico

En esta etapa se evalúa el desempeño del aditivo hidrofóbico incorporado al sistema, considerando los parámetros clave que determinan su efectividad. El análisis se centra en las propiedades de hidrofobicidad y adhesividad, tomando como referencia la dosificación óptima previamente establecida. Asimismo, se considerará el tiempo de curado en el cual se obtuvo la menor pérdida de masa a través del ensayo de *sweep test*, lo que permite identificar las condiciones más favorables para la consolidación del material modificado.

Además, se compara el comportamiento entre las muestras base y las modificadas en cuanto a la reducción de la permeabilidad, lo que evidenciará el aporte del aditivo en la limitación del paso de agua. De igual forma, se evalúa la disminución del desprendimiento por fricción, lo que permite determinar si el aditivo mejora la cohesión y estabilidad del sistema frente a esfuerzos mecánicos. Los resultados obtenidos permiten establecer de manera integral la eficiencia del material hidrofóbico y su viabilidad para aplicaciones en tratamientos superficiales o sistemas de riego de sello.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1 Selección de los materiales**

##### **3.1.1 Definición del banco de procedencia del material pétreo**

Se selecciono el banco de material pétreo “El Jovero”, ubicado en el municipio de José de Iturbide, estado de Guanajuato (Figura 4). El material extraído fue sometido a una serie de ensayos de laboratorio destinados a evaluar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, con el propósito de verificar su idoneidad y cumplimiento con la normativa vigente para su utilización en riegos de sello. Asimismo, se analizó su compatibilidad con los aditivos poliméricos empleados en el desarrollo del aditivo hidrofóbico, asegurando la adecuada interacción entre los componentes y el desempeño esperado del sistema asfáltico modificado.

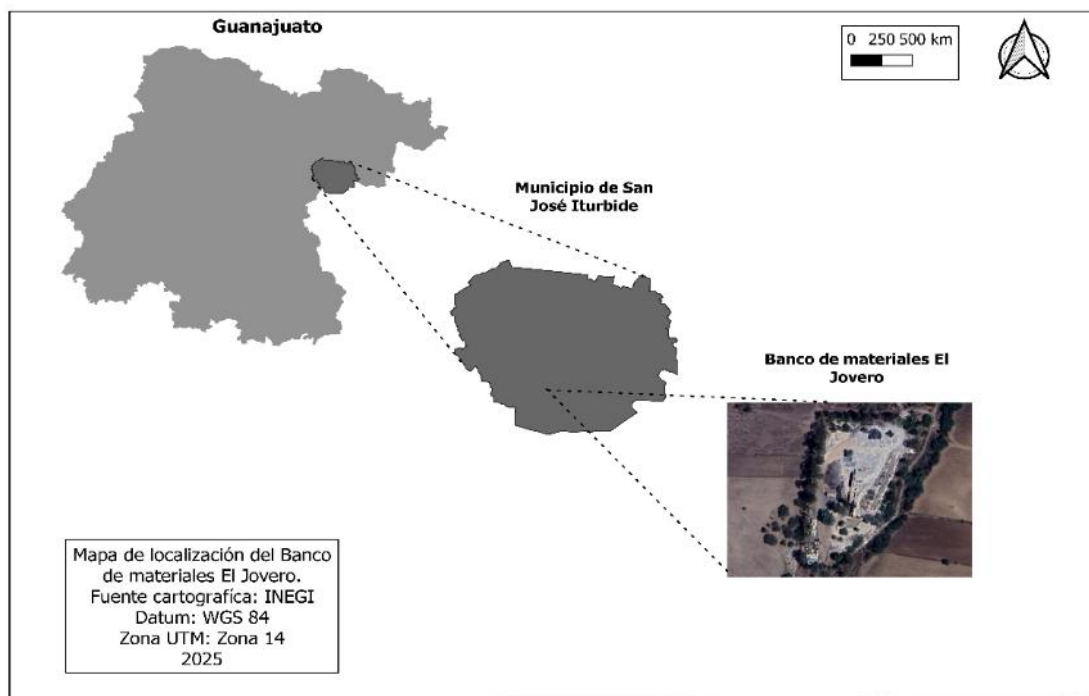


Figura 4: Ubicación del banco el Jovero  
Fuente: elaboración propia

### 3.1.2 Definición de la emulsión a emplear

La emulsión que se decidió emplear es la ECR-68P, emulsión catiónica de rompimiento rápido, 68 % de residuo asfáltico mínimo con polímero. Durante el proceso de elaboración, se formuló una emulsión de rompimiento rápido modificada con polímero (ECR-68P), caracterizada por un contenido de residuo asfáltico del 68%. La preparación inició con la fase acuosa o solución jabonosa, obtenida a partir de un emulsificante de base amina (KE52W) al que se adicionó ácido clorhídrico (HCl) para ajustar el pH y favorecer la estabilidad de la mezcla. Paralelamente, en la fase oleosa, se empleó asfalto base AC-20 al cual se incorporaron los aditivos KA71L y KA40A, destinados a mejorar la penetración del ligante y su comportamiento a bajas temperaturas, respectivamente (imagen 1).



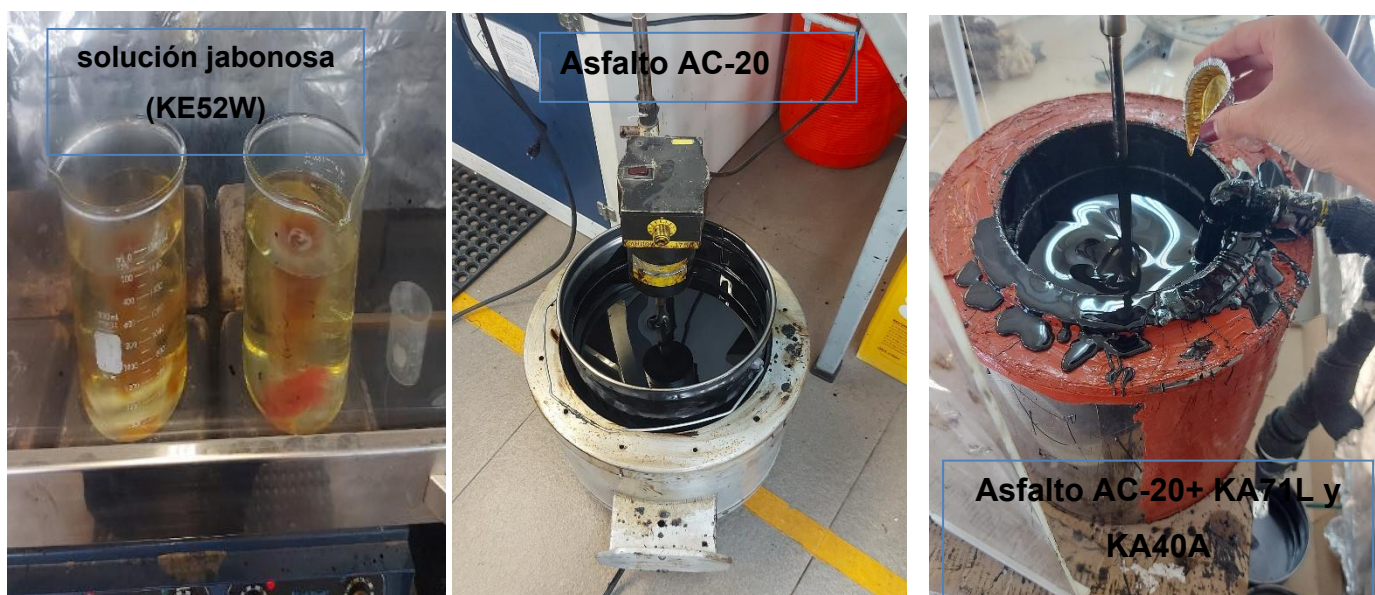


Imagen 1: Componentes de la emulsión de rompimiento rápido modificada con polímero (ECR-68P)  
Fuente: elaboración propia

Posteriormente, ambas fases fueron incorporadas en un molino coloidal, donde se llevó a cabo la emulsificación del asfalto modificado con la solución jabonosa, permitiendo la formación de una emulsión estable.

### 3.1.3 Definición de los polímeros a emplear para obtener el aditivo hidrofóbico

Durante el desarrollo experimental se formularon tres variantes de aditivos hidrofóbicos con el objetivo de evaluar su influencia en la mejora del desempeño del tratamiento superficial frente al daño por humedad. Las formulaciones se basaron en diferentes polímeros de naturaleza termoplástica y nanocompuestos, seleccionados por su capacidad para modificar las propiedades superficiales del asfalto y reducir su afinidad con el agua.

La primera formulación correspondió al polímero base Pi-SBS, elaborado a partir de estireno-butadieno-estireno (SBS). Este material se caracteriza por su alta elasticidad y estabilidad térmica, aportando flexibilidad y resistencia a la deformación permanente del ligante.

La segunda variante, denominada polímero base Pi-EVA, se desarrolló empleando etileno-acetato de vinilo (EVA). Su estructura química facilita la interacción entre las fases asfáltica y polimérica, incrementando la resistencia al agrietamiento térmico y la durabilidad del sistema.

Finalmente, se formuló un aditivo basado en polimetilmetacrilato con nanopartículas de dióxido de silicio (PMMA-SiO<sub>2</sub>), el cual combina las ventajas de la matriz polimérica con el efecto reforzante de las nanopartículas.

### 3.2 Caracterización del material pétreo

#### 3.2.1 Requisitos de granulometría y calidad del material pétreo: N-CMT-4-04-17: CTM. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

De la realización del ensayo de granulometría se obtuvo un material de composición granulométrica tipo 3-A, como lo muestra la tabla 4.

Tabla 4: Granulometría del material pétreo ensayado

Malla		Material ensayado				Requisito Norma				
						Denominación del material pétreo				
Abertura	Tamiz	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)	1	2	3-A	3-b	3-e
31.5	1 1/4"	0.0	0.0	0.0	100.0	100	--	--	--	--
25	1	0.0	0.0	0.0	100.0	95	--	--	--	--
19	3/4"	0.0	0.0	0.0	100.0	0	100	--	--	--
12.5	1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0	5	95	100	--	100
9.5	3/8"	10.8	0.5	0.5	99.5	--	--	95	100	95
6.3	1/4"	560.7	26.3	26.8	73.2	--	5	--	95	--
4.75	No. 4	783.2	36.8	63.6	36.4	--	--	--	--	5
2	No. 10	754.1	35.4	99.0	1.0	--	--	5	5	--
0.425	No. 40	18.5	0.9	99.9	0.0	--	--	--	--	--
pasa		2.8	0.1	100.0	0.0	--	--	--	--	--
Total		2130.1 g								

Fuente: elaboración propia

El material presentó un porcentaje pasante del 99.5 % en el tamiz de 9.5 mm (3/8”), cumpliendo con el límite mínimo del 95 % exigido por la norma. Asimismo, el porcentaje pasante en el tamiz de 0.425 mm (No. 40) fue de 0 %, valor que se encuentra dentro del límite máximo permitido del 5 %, indicando un bajo contenido de finos.

En la Figura 5 se presenta la curva granulométrica correspondiente al material utilizado para el sello proveniente del banco *El Jovero*, comparada con los límites establecidos para el material tipo 3-A, según la clasificación especificada en la normativa aplicable.

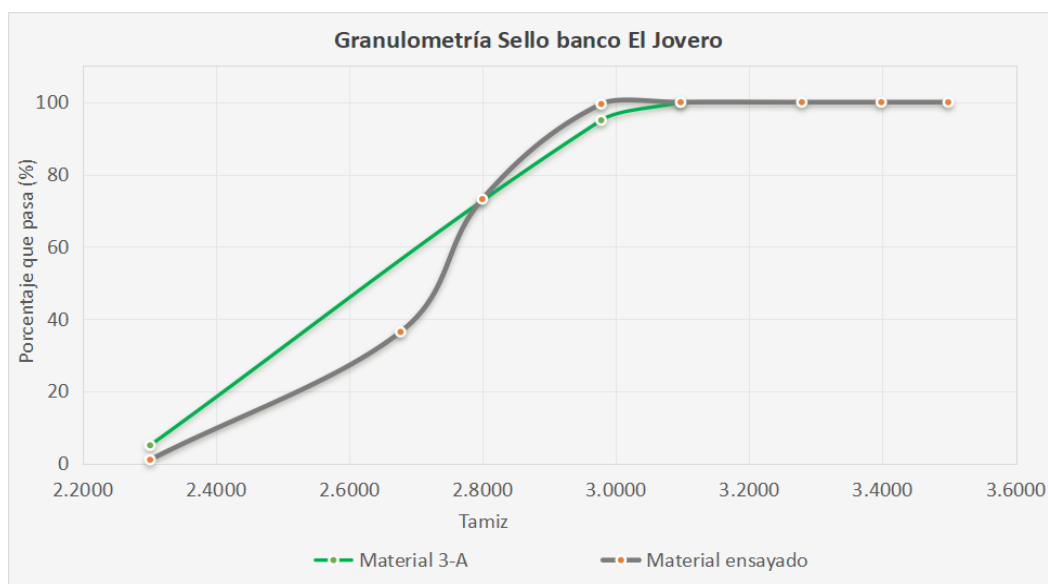


Figura 5: Curva granulométrica del agregado ensayado y el material tipo 3-A  
Fuente: elaboración propia

Se observa que la curva del material ensayado (línea gris) presenta una distribución de partículas más gruesa en los tamices iniciales, con un porcentaje de paso inferior al del material tipo 3-A hasta aproximadamente el tamiz de 2.8 mm. A partir de este punto, la curva del material ensayado asciende rápidamente, alcanzando el 100 % de paso en el tamiz de 3.0 mm, lo que indica una mayor proporción de partículas finas en esta fracción.

El comportamiento de la curva muestra que el material ensayado se encuentra dentro del rango granulométrico permitido, aunque con una ligera tendencia hacia la zona más fina del límite superior. Esto sugiere una buena uniformidad del agregado, adecuada para su aplicación en riegos de sello, garantizando una cobertura eficiente y una adecuada adherencia del ligante asfáltico.

En la tabla 5, los requisitos de calidad del material evidencian que el agregado ensayado cumple con todos los parámetros exigidos por la tabla 2.

Tabla 5: Requisitos de calidad del material pétreo ensayado

Característica		UM	Valor normativo	Material ensayado
Densidad relativa del material pétreo seco	mínimo		2.4	2.44
Desgaste de Los Ángeles	máximo	%	30	12
Partículas Alargadas y lajeadas	máximo	%	35	10
Partículas trituradas	Una cara	mínimo	%	100
	Dos o más caras	mínimo	%	90
Valor de pulimento acelerado		--	30	38

Fuente: elaboración propia

La densidad relativa del material pétreo seco fue de 2.44, superando el valor mínimo de 2.4 requerido, lo cual indica una adecuada compactación y baja porosidad del agregado. En cuanto al desgaste de Los Ángeles, se obtuvo un valor del 12 %, muy inferior al máximo permitido del 30 %, reflejando una alta resistencia al desgaste por abrasión.

El porcentaje de partículas alargadas y lajeadas fue del 10 %, también por debajo del límite máximo del 35 %, lo que sugiere una forma de partículas favorable para el intertrabado y la estabilidad estructural del sello. Respecto a la textura superficial, se verificó que el 100 % de las partículas presentan al menos una cara triturada y el 100 % dos o más caras, cumpliendo con los valores mínimos establecidos (100 % y 90 %, respectivamente). Esto asegura una buena adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico.

Finalmente, el valor de pulimento acelerado fue de 38, superior al mínimo requerido de 30, lo que indica una resistencia adecuada al alisamiento por acción del tránsito, garantizando una textura superficial suficiente para la fricción y la seguridad vehicular.

### 3.2.2 Difracción de Rayos X (RX)

En el difractograma figura 6 se observan picos de alta intensidad entre los  $10^\circ$  y  $35^\circ$   $2\theta$ , los cuales son característicos de minerales del grupo de los feldespatos plagioclasas. El análisis cualitativo revela la presencia predominante de Anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), Anortita sódica, Albita sódica ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y Andesina, todos pertenecientes a la serie isomorfa que se extiende entre la albita y la anortita.

Desde el punto de vista mineralógico, esto indica que el material analizado pertenece al grupo de los feldespatos, minerales típicos de rocas ígneas de tipo intermedio a básico. La composición identificada sugiere que el agregado presenta una estructura cristalina estable y resistente a la alteración, cualidad favorable para su utilización en capas de rodadura, donde se requiere alta durabilidad y resistencia al desgaste.

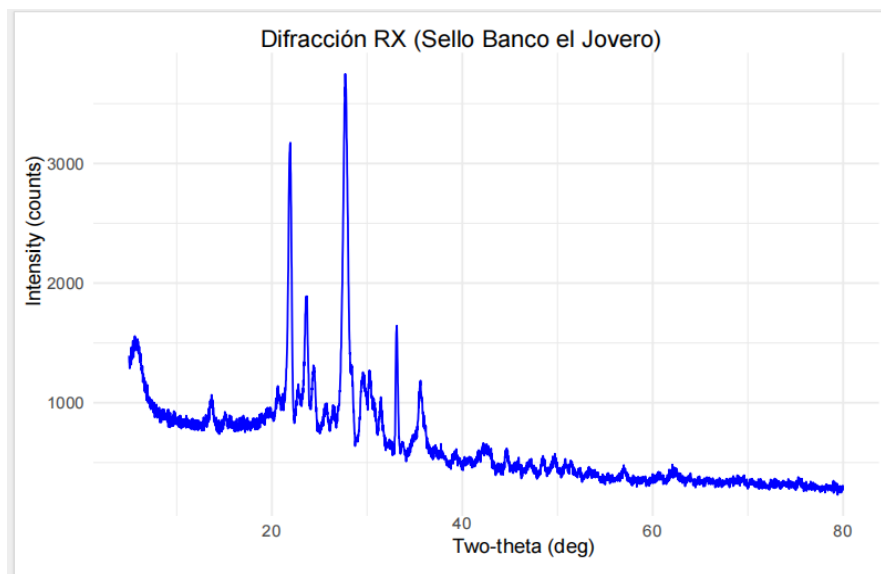


Figura 6: Difracción RX del material pétreo  
Fuente: elaboración propia

### 3.3 Caracterización de la emulsión asfáltica

Los resultados de la caracterización de la emulsión asfáltica ECR-68P según los requisitos de calidad establecidos en la tabla 6 muestran que la misma cumple con los parámetros mínimos y máximos para garantizar la calidad y el desempeño adecuado del material en aplicaciones de tratamientos superficiales tabla 6.

Tabla 6: Requisitos de calidad de la emulsión ECR-68P

Características	UM	ECR-68P		
		norma	muestra	
De la emulsión				
Contenido de cemento asfáltico en masa	%	68	68	mínimo
Viscosidad Saybolt-Furol a 50 °C	s	50-200	350	mínimo
Asentamiento en 5 días	%	3	0.42	máximo
Retenido en malla No 20	%	0.1	0.0353	máximo
Carga eléctrica de las partículas		(+)	(+)	
Demulsibilidad	%	60	66.6	mínimo
Del residuo de la destilación				
Penetración a 25 °C en 100 g y 5 s	mm	110-200	139.25	mínimo
Recuperación por torsión a 25°C	%	30	63	mínimo
Recuperación elástica en ductilómetro a 10°C	%	50	66.25	mínimo
Ductilidad a 25°C	cm	40	101.95	mínimo

Fuente: elaboración propia

En cuanto al contenido de cemento asfáltico, la muestra presentó un valor del 68 %, cumpliendo con el mínimo especificado por la norma, lo que asegura una proporción adecuada de ligante en la emulsión. La viscosidad Saybolt-Furol a 50 °C alcanzó un valor de 350 s, superior al rango normativo (50–200 s), lo que indica una emulsión más viscosa; sin embargo, este comportamiento puede considerarse favorable para ciertas aplicaciones donde se requiere mayor cohesión del material.

El asentamiento en cinco días fue de 0.42 %, por debajo del límite máximo de 3 %, lo que evidencia una excelente estabilidad durante el almacenamiento. De manera similar, el retenido en malla No. 20 registró 0.0353 %, valor menor al máximo permitido (0.1 %), lo que confirma una buena homogeneidad y ausencia de

partículas gruesas. La carga eléctrica positiva de las partículas corroboró que la emulsión es de tipo catiónico, adecuada para agregados con carga superficial negativa.

La demulsibilidad presentó un valor de 66.6 %, superando el mínimo de 60 %, lo que indica que la emulsión rompe con facilidad al entrar en contacto con el agregado, favoreciendo una correcta adhesión.

Respecto a las propiedades del residuo de la destilación, los resultados mostraron un comportamiento óptimo: la penetración a 25 °C fue de 139.25 mm, dentro del rango de 110–200 mm, lo que sugiere una consistencia intermedia del ligante. La recuperación por torsión a 25 °C y la recuperación elástica en ductilómetro a 10 °C alcanzaron valores de 63 % y 66.25 %, respectivamente, ambos superiores a los mínimos requeridos, lo cual demuestra una excelente capacidad elástica del residuo. Finalmente, la ductilidad a 25 °C fue de 101.95 cm, más del doble del valor mínimo (40 cm), reflejando una alta capacidad de deformación sin fractura.

### 3.4 Caracterización del aditivo hidrofóbico

La etapa inicial consistió en la mezcla controlada de los polímeros seleccionados, cuyo objetivo era lograr una sinergia que permitiera obtener un material con propiedades hidrofóbicas deseadas. Se estudiaron 3 posibles polímeros para el aditivo hidrofóbico.

Polímero 1 (Pi-SBS):

- Composición:

Poliisopreno (Pi) modificado con bloques de estireno-butadieno-estireno (SBS).

- Procedimiento:

Se preparó una disolución de poliisopreno en estireno y estireno-butadieno-estireno en tolueno. Se añadió azufre como agente reticulante y ácido abiético como promotor de hidrofobicidad. La mezcla se agitó a temperatura ambiente durante 24 horas (sin calentamiento) para evitar degradación térmica.

Polímero 2 (Pi-EVA):

- Composición:

Poliisopreno (Pi) con etileno-acetato de vinilo (EVA).

- Procedimiento:

Se preparó una disolución de poliisopreno en estireno y etileno-acetato de vinilo en tolueno. Se incorporó el azufre como agente reticulante y ácido abiético como promotor de hidrofobicidad al igual que la preparación anterior. La mezcla se agitó a temperatura ambiente durante 24 horas sin calentamiento.

Polímero 3 (PMMA-SiO<sub>2</sub>):

- Composición:

Polimetilmetacrilato (PMMA) con nanopartículas de sílice (SiO<sub>2</sub>) funcionalizadas.

- Procedimiento:

Se realizó una dispersión de PMMA en tolueno y se incorporó nanopartículas de sílice previamente tratado con silano hidrofóbico. Agitación continua por 24 h para homogeneización.

#### 3.4.1 Caracterización Espectroscópica (FT- IR)

El análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permitió identificar los grupos funcionales presentes en los aditivos hidrofóbicos formulados a partir de diferentes combinaciones poliméricas. En la Figura 7, 8 y 9 se presentan los espectros correspondientes a los tres polímeros analizados (Polímero 1, Polímero 2 y Polímero 3), donde se observa la variación en la transmitancia en función del número de onda (cm<sup>-1</sup>), reflejando las vibraciones características de los enlaces químicos presentes en cada muestra.



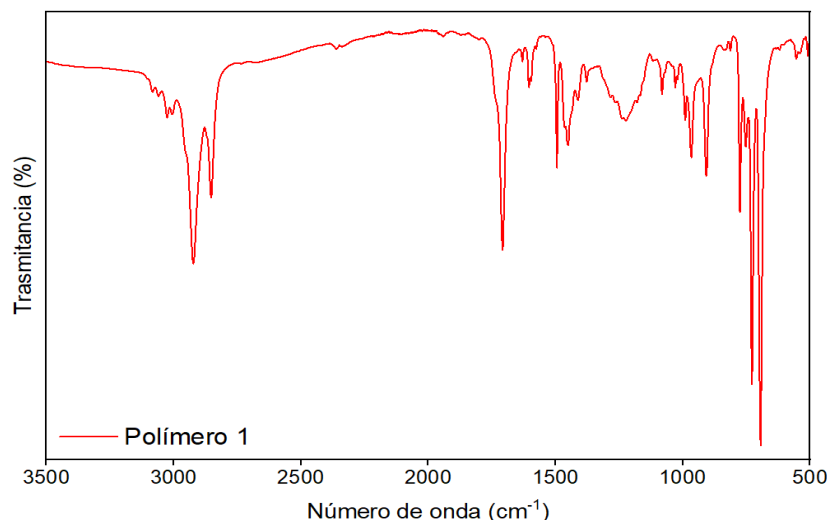


Figura 7: Espectro del polímero 1 base Pi-SBS  
Fuente: elaboración propia

El Polímero 1, con base en poliisopreno y copolímero SBS (estireno-butadieno-estireno), mostró una banda intensa alrededor de  $2900\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente al estiramiento de los enlaces C–H alifáticos típicos de cadenas hidrocarbonadas. Asimismo, se identificó una señal en  $1700\text{ cm}^{-1}$ , atribuida al grupo carbonilo (C=O) del ácido abiético, componente utilizado como agente resinoso. Las bandas observadas en  $1450$  y  $1375\text{ cm}^{-1}$  se relacionan con las deformaciones de los grupos metileno ( $\text{CH}_2$ ) y metilo ( $\text{CH}_3$ ), mientras que la presencia de una señal en torno a  $1050\text{ cm}^{-1}$  puede asociarse a enlaces C–S, derivados de la presencia de azufre en la estructura del SBS.

El Polímero 2, formulado a partir de poliisopreno y copolímero EVA (acetato de vinilo-etileno), presentó un espectro con bandas similares al Polímero 1, aunque con ligeras variaciones atribuibles al EVA. En particular, se identificó una banda en  $1735\text{ cm}^{-1}$ , característica del grupo carbonilo (C=O) del acetato de vinilo, así como señales en la región de  $1000$  a  $1300\text{ cm}^{-1}$ , asociadas a los estiramientos de enlaces C–O. Estas diferencias confirman la incorporación del copolímero EVA en la formulación, aportando una leve polaridad sin comprometer el carácter hidrofóbico del material.

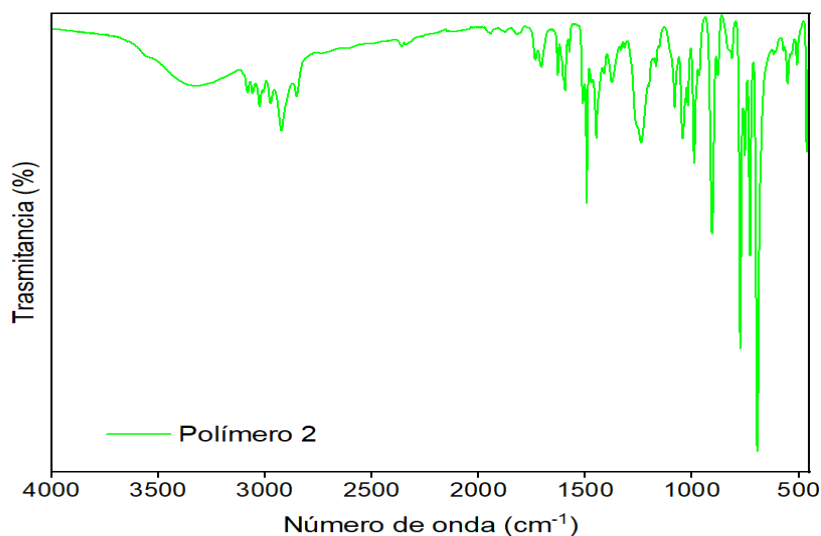


Figura 8: Espectro del polímero 2 base Pi-EVA  
Fuente: elaboración propia

En el caso del Polímero 3, el espectro infrarrojo evidenció una respuesta distinta en la zona inferior a  $1000\text{ cm}^{-1}$ , lo que sugiere la presencia de otros grupos funcionales o aditivos estructurales que modifican la respuesta vibracional del material.

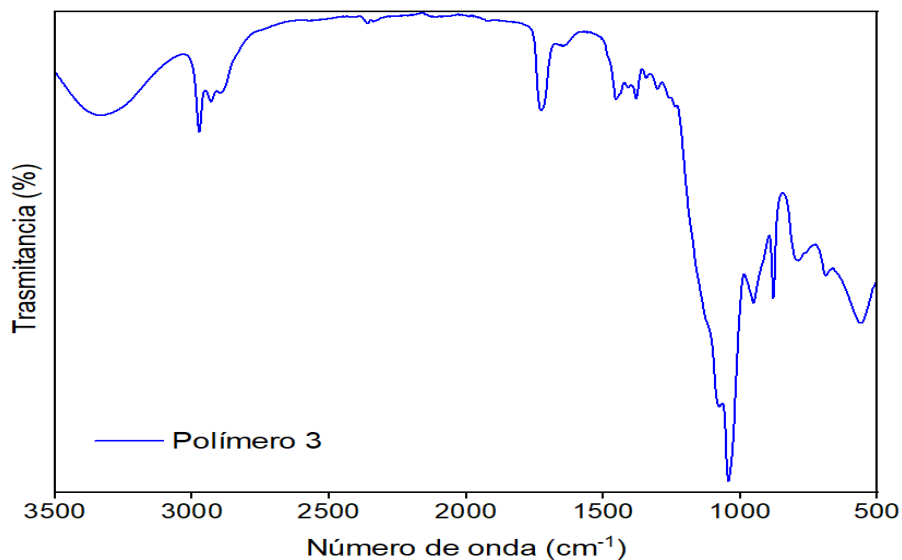


Figura 9: Espectro del polímero 3 base PMMA-  $\text{SiO}_2$   
Fuente: elaboración propia

Un aspecto relevante en los tres espectros es la ausencia de una banda ancha en la región de  $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ , la cual es característica de los grupos hidroxilo ( $-\text{OH}$ ).

La no aparición de esta señal confirma que los materiales analizados no contienen grupos funcionales polares y, por lo tanto, poseen un comportamiento marcadamente hidrofóbico.

### 3.5 Caracterización física y mecánica

#### 3.5.1 Preparación de muestras

La preparación de las muestras se llevó a cabo considerando tanto las formulaciones convencionales como las formulaciones modificadas con el aditivo hidrofóbico. Este planteamiento permitió establecer un enfoque comparativo que facilitó analizar, bajo condiciones controladas, el efecto del aditivo sobre el desempeño del tratamiento superficial tipo riego de sello.

Para el caso de las muestras convencionales, se estudiaron dos alternativas de aplicación del riego de sello:

1. Una primera opción en la que el agregado pétreo se mantuvo en su estado natural, sin ningún tipo de pretratamiento previo a la aplicación.
2. Una segunda alternativa en la que el agregado fue premezclado con asfalto antes de la aplicación del sello, con el objetivo de mejorar la adherencia inicial y la distribución del ligante sobre la superficie granular.

En cuanto a las muestras modificadas con el aditivo hidrofóbico, se evaluaron diferentes formas de incorporación del aditivo al sistema, considerando la compatibilidad con los materiales, la uniformidad de mezcla y la facilidad de aplicación. Se analizaron distintas posibilidades de adición, resultando más efectiva la opción de premezclar el agregado con el aditivo hidrofóbico antes de la aplicación del riego de sello.

Las dosificaciones empleadas para la modificación del agregado se definieron en función del peso de la emulsión asfáltica, estableciéndose tres niveles de contenido: 1, 2 y 3 %. Estas proporciones fueron seleccionadas con el propósito de determinar

el rango óptimo de adición que permitiera maximizar la repelencia al agua sin afectar la cohesión del sistema.

### 3.5.2 Medición del ángulo de contacto

La tabla 7 presenta los resultados obtenidos mediante la medición del ángulo de contacto por el método de la gota sésil. Este parámetro se determina observando el ángulo formado entre la superficie sólida y la tangente a la gota de agua depositada sobre ella; cuanto mayor es este ángulo, mayor es la capacidad del material para repeler el agua.

Tabla 7: Resultados de la medición del ángulo de contacto metido de la gota sésil.

Muestra	PUEBA 1		PRUEBA 2		PROMEDIO
	Ángulo	Promedio	Ángulo	Promedio	
Base	85.703	86.144	76.3	76.1	81
	86.585		75.9		
Pi-SBS	83.4	83.5	89.7	89.0	86.3
	83.6		88.4		
Pi-EVA	69.4	69.5	84.075	85.767	78
	69.6		87.459		
PMMA-SiO <sub>2</sub>	90.5	92.571	74.205	74.119	83
	94.6		74.033		

Fuente: elaboración propia

En la tabla se muestran los valores obtenidos para cada tipo de muestra base y modificadas con los polímeros Pi-SBS, Pi-EVA y PMMA-SiO<sub>2</sub> a partir de dos pruebas independientes, registrando los valores de los ángulos medidos y sus respectivos promedios.

Los resultados evidencian que la muestra base presentó un ángulo de contacto promedio de 81°, lo que indica un comportamiento moderadamente hidrofóbico. En comparación, la muestra modificada con el polímero Pi-SBS alcanzó un ángulo promedio de 86°, con una desviación estándar ( $\pm 1.5^\circ$ ), lo que indica una superficie altamente hidrofóbica y con resultados consistentes, reflejando un incremento en la

repelencia al agua respecto a la base, debido a la naturaleza elastomérica del aditivo que favorece la formación de una superficie menos polar.

Por otro lado, la modificación con el polímero Pi-EVA arrojó un ángulo promedio inferior ( $78^\circ$ ), pero con la mayor variabilidad ( $\pm 2.0^\circ$ ); lo que sugiere una interacción más afín con el agua y, por tanto, una menor hidrofobicidad. Finalmente, la muestra tratada con el polímero PMMA-SiO<sub>2</sub> obtuvo un ángulo promedio de  $83^\circ$ , lo que demuestra una respuesta intermedia, probablemente influenciada por la presencia de nanopartículas de sílice que contribuyen a la rugosidad superficial y al comportamiento hidrofóbico.

La imagen 1 ilustra el perfil característico de las gotas de agua sobre las superficies evaluadas. En ellas se observa que, en las muestras con mejor desempeño (particularmente el polímero Pi-SBS), la gota mantiene una forma esférica y estable, evidenciando una baja interacción con la superficie. En cambio, en los casos con menor ángulo de contacto, la gota tiende a extenderse, indicando una mayor mojabilidad del material. Por ese comportamiento hidrofóbico se seleccionó el polímero 1 como aditivo hidrofóbico para la incorporación al tratamiento superficial

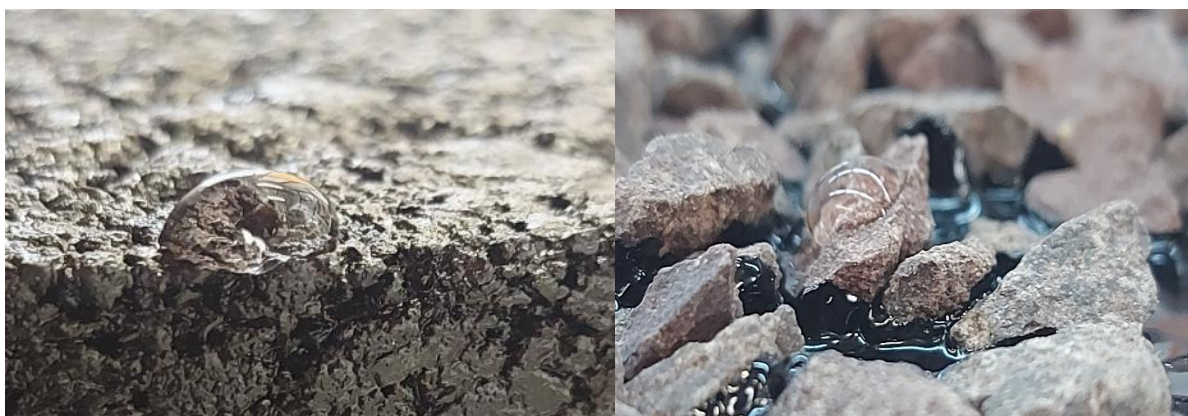


Imagen 2: Capturas tomadas para la medición del ángulo de contacto.  
Fuente: elaboración propia

### 3.5.3 Análisis de Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples: ASTM D7000 Standard Test Method for Sweep Test of Emulsified Asphalt Surface Treatment Samples.

Para establecer el porcentaje óptimo de aditivo y el tiempo de curado del riego de sello se realizó el ensayo de Sweep Test a las muestras base (agregado virgen y agregado premezclado con asfalto) y a las muestras modificadas imagen 3.



Imagen 3: Ensayo de sweep test de las muestras  
Fuente: elaboración propia

En las tablas 8, 9 y 10 se muestran los porcentajes de masa perdida para los blancos de agregado pétreo virgen (BAV), los blancos de agregado pétreo premezclado con asfalto (BPA) y los blancos de agregado pétreo premezclado con el aditivo (BAP-aditivo) respectivamente.

Tabla 8: Masa perdida en la prueba de barrido blanco agregado pétreo en estado virgen.

Muestra	Horas	Condición de corrido el ensayo	
		% de aditivo hidrofóbico	% masa perdida
BVA -1	1	–	5.935
BAV-2	2	–	4.538
BAV-3	3	–	4.260

Fuente: elaboración propia

Tabla 9: Masa perdida en la prueba de barrido blanco agregado pétreo premezclado con asfalto.

Condición de corrido el ensayo			
Muestra	Horas	% de aditivo hidrofóbico	% masa pérdida
BAP-1	1	–	10.825
BAP-2	2	–	6.696
BAP-3	3	–	2.981

Fuente: elaboración propia

Tabla 10: Masa perdida en la prueba de barrido blanco agregado pétreo premezclado con el aditivo.

Condición de corrido el ensayo			
Muestra	Horas	% de aditivo hidrofóbico	% masa perdida
BAP aditivo -1-1	1	1	7.348
BAP aditivo -1-2		2	4.503
BAP aditivo -1-3		3	14.595
BAP aditivo -2-1	2	1	3.823
BAP aditivo -2-2		2	2.492
BAP aditivo -2-3		3	7.197
BAP aditivo -3-1	3	1	4.330
BAP aditivo -3-2		2	3.057
BAP aditivo -3-3		3	4.988

Fuente: elaboración propia

Para el caso del agregado pétreo en estado virgen, sin presencia de asfalto ni aditivo hidrofóbico. Se observa una disminución progresiva en el porcentaje de masa perdida conforme aumenta el tiempo de ensayo (de 5.935 % a 4.260 %), lo cual indica una leve mejora en la estabilidad del material con el tiempo, figura 10.

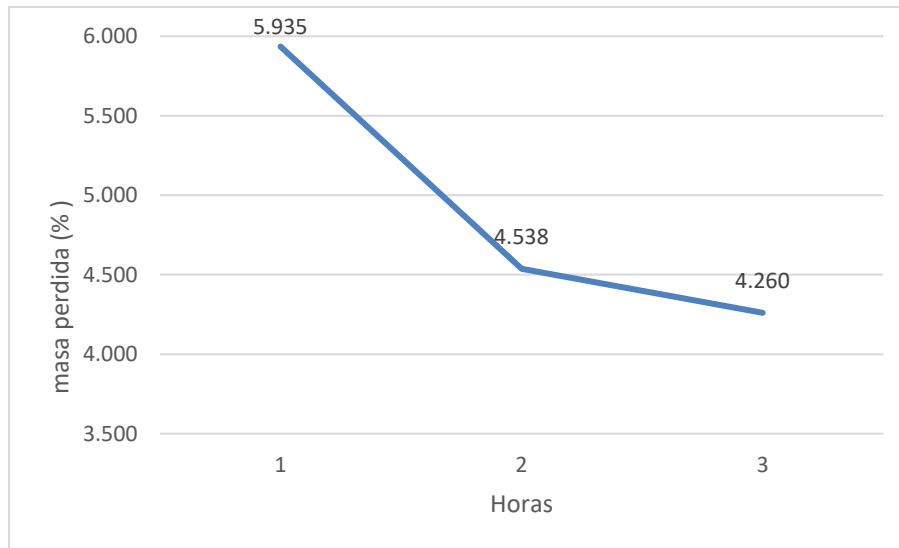


Figura 10: Masa perdida prueba de barrido blanco agregado pétreo en estado natural.  
Fuente: elaboración propia

La figura 11 muestra que las pérdidas de masa para el agregado pétreo premezclado con asfalto, también sin aditivo son significativamente mayores (entre 10.825 % y 2.981 %), lo que sugiere que la presencia del asfalto modifica la adherencia y la resistencia superficial del agregado frente a la acción del ensayo.

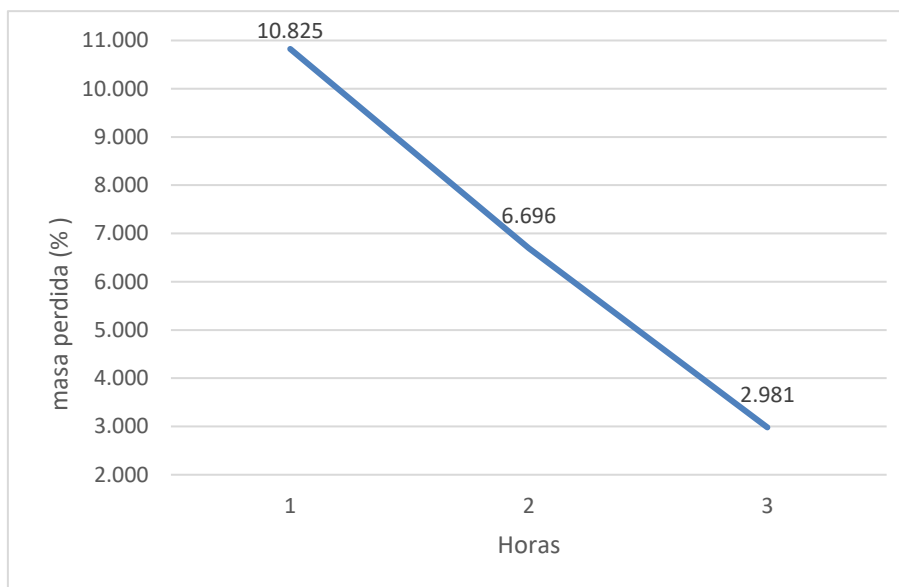


Figura 11: Masa perdida prueba de barrido blanco agregado pétreo premezclado con asfalto.  
Fuente: elaboración propia



Para el caso del agregado pétreo premezclado con diferentes concentraciones de aditivo hidrofóbico (1, 2 y 3 %), analizadas en tres tiempos de exposición: 1, 2 y 3 horas, se visualiza cómo varía la pérdida de masa según el porcentaje de aditivo, con líneas que representan los tres tiempos del ensayo figura 12.

Se observa que, para una hora de ensayo, la pérdida de masa presenta una tendencia irregular: disminuye al 2% de aditivo (4.503%), pero aumenta considerablemente al 3% (14.595%), lo que sugiere una posible sobre concentración del aditivo a corto plazo.

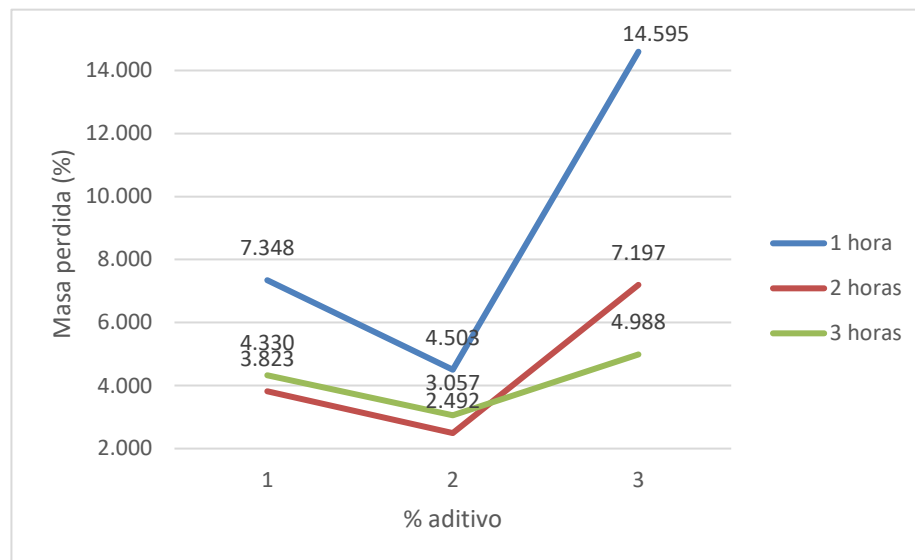


Figura 12: Masa perdida prueba de barrido blanco agregado pétreo premezclado con aditivo.  
Fuente: elaboración propia

En cambio, para dos y tres horas de ensayo, las pérdidas de masa son más bajas y estables. En ambos casos, el 2% de aditivo hidrofóbico muestra el mejor desempeño, con las menores pérdidas de masa (2.492 y 3.057 %, respectivamente).

En el caso del agregado pétreo premezclado con el aditivo hidrofóbico en diferentes porcentajes de 1, 2 y 3 % los valores de pérdida de masa varían entre 14.595 % y 2.492 %, mostrando una tendencia general a la disminución de masa perdida al aumentar tanto el tiempo de ensayo como la concentración de aditivo, lo que evidencia una mejora en la resistencia al desprendimiento del material.

#### 3.5.4 Análisis de la permeabilidad: Método aro y cono.

Para el análisis de la permeabilidad se evaluaron tres áreas distintas del Paqueo Ergon (Área 1, Área 2 y Área 3), registrando sus condiciones iniciales para obtener su índice de permeabilidad antes de la aplicación del tratamiento superficial imagen 4. Los resultados del índice de permeabilidad se muestran en la tabla 11.



Imagen 4: Ensayo de permeabilidad para las condiciones iniciales del pavimento.  
Fuente: elaboración propia

Tabla 11: Condiciones iniciales de permeabilidad del pavimento antes del tratamiento por riego de sello

	Condiciones iniciales		
	Vi (cm3)	Vt(cm3)	Ip(%)
Área 1	42	1425	2.947
Área 2	40	1420	2.817
Área 3	35	1420	2.465

Fuente: elaboración propia

Sobre esas áreas se aplicaron las variantes de riego de sello con las diferentes condiciones del agregado pétreo para valorar el comportamiento de la superficie después de aplicado el tratamiento.

Se ensayaron las áreas de la siguiente manera imagen 5:

- Área 1: Agregado premezclado con aditivo hidrofóbico.
- Área 2: Agregado premezclado con asfalto.
- Área 3: Agregado virgen.



Imagen 5: Ensayo de permeabilidad para las condiciones de tratamiento por riego de sello pavimento.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 12 se observan los valores de índice de permeabilidad ( $I_p$ ). Estos varían entre 0.643 % y 1.667 %, siendo notablemente más bajos que en las condiciones iniciales, lo que evidencia una reducción significativa en la capacidad de infiltración del agua tras la incorporación de los ligantes y aditivos.

Tabla 12: Índices de permeabilidad del pavimento luego de aplicado el tratamiento por riego de sello.

Tratamiento superficial				Observaciones
Localización: Parqueo Ergon				
	Vi (cm3)	Vt(cm3)	Ip(%)	
Área 1	9	1400	0.643	Agregado premezclado con aditivo
Área 2	15	1450	1.034	Agregado premezclado con asfalto
Área 3	25	1500	1.667	Agregado virgen

Fuente: elaboración propia

El área con agregado premezclado con aditivo presenta el menor valor de permeabilidad (0.643 %), lo que confirma el efecto hidrofóbico del tratamiento. En la Figura 13 se presenta la comparación del índice de permeabilidad (Ip) antes y después de aplicar el tratamiento superficial en tres áreas experimentales.

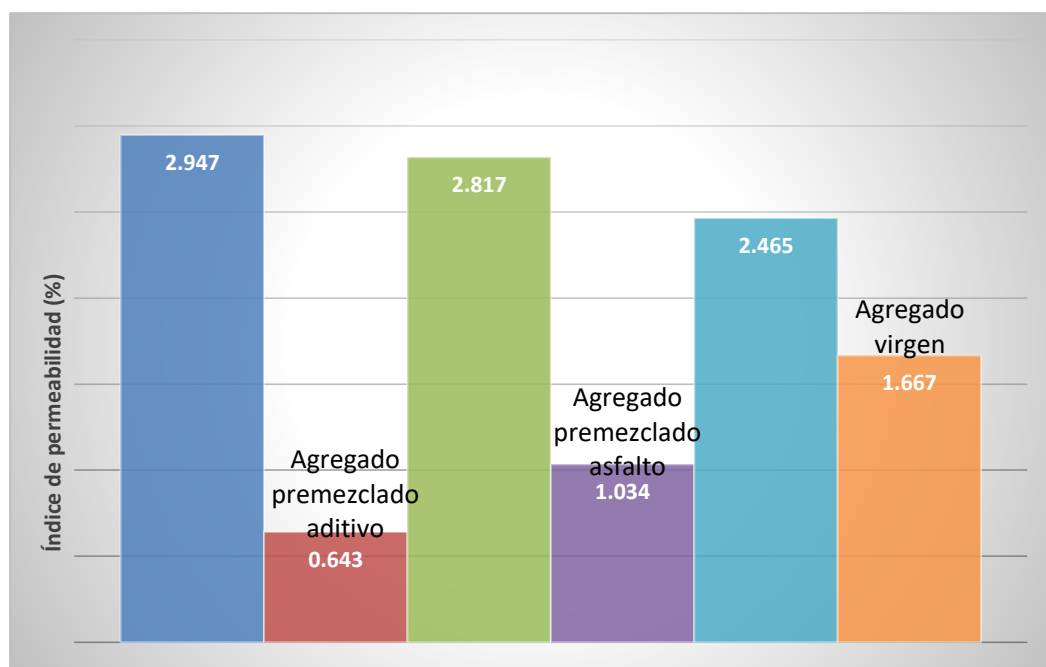


Figura 13: Comparación del índice de permeabilidad antes y después de colocado el tratamiento superficial.

Fuente: elaboración propia

### 3.5.5 Análisis del desprendimiento por fricción: Recomendación AMAAC RA 07/2010. Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua.

En la tabla 13 se presentan los resultados del análisis de desprendimiento por fricción conforme a la recomendación AMAAC RA 07/2010, con el propósito de evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua.

Los valores de cubrimiento promedio indican que el agregado virgen (BAV) alcanzó un 76% con una desviación estándar de  $\pm 1.73$ , evidenciando una adherencia limitada y variable frente a la acción del agua. En contraste, el agregado

premezclado con asfalto (BAP-asfalto) mostró un cubrimiento promedio del 91 % y una desviación estándar de  $\pm 1.15$ , lo que representa una adherencia más estable y una menor dispersión de resultados. Por su parte, el agregado premezclado con aditivo hidrofóbico (BAP-aditivo) presentó un cubrimiento promedio de 86 % con la desviación más baja ( $\pm 0.58$ ), lo que sugiere un comportamiento más uniforme y controlado frente al desprendimiento.

Tabla 13: Valores de desprendimiento por fricción para el tratamiento superficial por riego de sello.

Muestra	Desprendimiento				Promedio de cubrimiento
	Menos de 25 %	Entre 25% y 75%	Entre 75% y 100%	% de cubrimiento	
BAV	7	9	34	77	76
	6	14	30	74	
	9	5	36	77	
BAP (asfalto)	1	6	43	92	91
	0	8	42	92	
	3	4	43	90	
BAP (aditivo)	2	10	38	86	86
	3	8	39	86	
	4	7	39	85	

Fuente: elaboración propia

### 3.6 Análisis de la eficiencia del material hidrofóbico

La eficiencia del material hidrofóbico fue evaluada a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización física y mecánica descritas en el apartado 3.5, las cuales permitieron comparar el desempeño de los agregados pétreos en diferentes condiciones: en estado virgen, premezclados con asfalto y premezclados con aditivo hidrofóbico. Este análisis integral consideró tres indicadores principales: la hidrofobicidad superficial (ángulo de contacto), la resistencia al desprendimiento (ensayo Sweep Test y desprendimiento por fricción), y la reducción de la permeabilidad en campo.

#### a) Hidrofobicidad superficial

Los resultados de medición del ángulo de contacto demostraron que la adición del polímero hidrofóbico incrementó significativamente la capacidad del material para repeler el agua. La muestra base presentó un ángulo promedio de  $81^\circ$ , mientras que la muestra modificada con el polímero Pi-SBS alcanzó  $86^\circ \pm 1.5$ , valor que refleja un comportamiento marcadamente hidrofóbico. Este incremento se atribuye a la naturaleza elastomérica del aditivo, que reduce la polaridad superficial del agregado, favoreciendo una menor interacción con el agua.

En comparación, los polímeros Pi-EVA y PMMA-SiO<sub>2</sub> mostraron ángulos promedio menores ( $78^\circ$  y  $83^\circ$  respectivamente), lo que sugiere una menor eficacia en la generación de superficies repelentes al agua. Estos resultados justifican la selección del polímero Pi-SBS como el aditivo hidrofóbico más eficiente para su incorporación al tratamiento superficial tipo riego de sello.

#### b) Resistencia al desprendimiento

El ensayo Sweep Test (ASTM D7000) permitió analizar la pérdida de masa en función del tiempo de curado y la concentración del aditivo. Se observó que el agregado pétreo virgen presentó pérdidas de masa entre 5.935 % y 4.260 %, mientras que el agregado premezclado con asfalto mostró valores más altos (10.825 % a 2.981 %), evidenciando que el ligante asfáltico, aunque mejora la adherencia inicial, no garantiza una resistencia estable ante la acción mecánica prolongada.

Por otro lado, las muestras con aditivo hidrofóbico mostraron un comportamiento más controlado y estable. La formulación con 2 % de aditivo presentó las menores pérdidas de masa (2.492 % y 3.057 % para 2 y 3 horas de ensayo, respectivamente), indicando que esta dosificación optimiza la cohesión del sistema sin generar sobre concentraciones. Estos valores representan una reducción de hasta 58 % en la pérdida de masa respecto al agregado virgen, lo que confirma una mejora sustancial en la resistencia mecánica frente al barrido y desprendimiento.

El comportamiento observado valida que el aditivo hidrofóbico contribuye a una



mejor distribución del ligante, aumentando la estabilidad y la durabilidad de la capa superficial del riego de sello.

Adicionalmente, los resultados del análisis de desprendimiento por fricción (AMAAC RA 07/2010) corroboran esta tendencia. El agregado virgen alcanzó un promedio de cubrimiento del 76 % ( $\pm 1.73$ ), el premezclado con asfalto alcanzó 91 % ( $\pm 1.15$ ) y el premezclado con aditivo 86% ( $\pm 0.58$ ). Aunque el valor medio del cubrimiento del agregado con aditivo es ligeramente inferior al del agregado con asfalto, presenta la menor dispersión de resultados, indicando un desempeño más uniforme y estable frente al desprendimiento por acción del agua. Esto evidencia que el aditivo no solo mejora la adherencia, sino que estabiliza el comportamiento de la mezcla, reduciendo la variabilidad en las respuestas del sistema.

#### c) Reducción de la permeabilidad

El ensayo de permeabilidad mediante el método de aro y cono demostró que la incorporación del aditivo hidrofóbico reduce significativamente la infiltración del agua en la superficie tratada. En las condiciones iniciales, los índices de permeabilidad ( $I_p$ ) variaron entre 2.465 % y 2.947 %. Posterior a la aplicación de los tratamientos superficiales, el área tratada con agregado premezclado con aditivo registró el menor índice (0.643 %), seguida del área con agregado premezclado con asfalto (1.034 %) y el agregado virgen (1.667 %).

Esto representa una disminución de más del 75% en la permeabilidad respecto a la condición inicial, demostrando que el material hidrofóbico actúa efectivamente como una barrera al paso del agua, favoreciendo la durabilidad y estabilidad de la capa superficial frente a fenómenos de humedad y deterioro por filtraciones.

#### d) Evaluación global de la eficiencia

Al integrar los resultados de los tres enfoques experimentales, se concluye que la eficiencia del material hidrofóbico se manifiesta principalmente en tres aspectos:

1. Aumento de la hidrofobicidad superficial, evidenciado por el incremento del ángulo de contacto en más de 6° respecto al material base.

2. Mejora de la resistencia al desprendimiento, con reducciones en la pérdida de masa superiores al 50 % y una menor desviación estándar en los ensayos de adherencia.
3. Reducción significativa de la permeabilidad, lo que contribuye a una mayor durabilidad frente a la acción del agua.

El comportamiento más favorable se obtuvo con la dosificación del 2 % de aditivo hidrofóbico, premezclado con el agregado pétreo antes de la aplicación del riego de sello y tiempo de curado de 2 horas, logrando un equilibrio óptimo entre repelencia al agua, adherencia y estabilidad superficial.

#### **4. Análisis constructivo y económico**

##### **4.1 Análisis comparativo costo-beneficio del ciclo de vida**

El análisis tiene como propósito realizar una evaluación costo-beneficio de los tratamientos ensayados, con el fin de valorar la idoneidad técnica y económica de la aplicación de la alternativa que incorpora un aditivo polimérico hidrofóbico aplicado como recubrimiento al agregado.

Alternativas comparadas

Este análisis evalúa tres alternativas para la aplicación de riego de sello en pavimentos:

- **Alternativa A:** Riego de sello convencional
- **Alternativa B:** Riego de sello con agregado premezclado con asfalto AC-20
- **Alternativa C:** Riego de sello con agregado premezclado con aditivo hidrofóbico polimérico

El análisis se basa en precios de mercado mexicano actualizados a 2025 y considera tanto costos de materiales como procesos de fabricación.

##### **4.1.1 Descripción de las alternativas**



La alternativa A, correspondiente al riego de sello convencional. Este procedimiento comprende la limpieza de la superficie existente, la aplicación de una emulsión asfáltica, el tendido del agregado pétreo sin tratamiento previo y su posterior compactación. En condiciones normales de operación y tráfico, la vida útil de este tipo de tratamiento se estima entre 3 y 5 años.

La alternativa B, denominada riego de sello con agregado premezclado con asfalto, constituye una variante mejorada que incluye un proceso de premezclado del agregado con 2 % de asfalto AC-20 respecto al peso total del material pétreo. Este procedimiento requiere el calentamiento tanto del asfalto (entre 140 y 160 °C) como del agregado (120 a 140 °C) antes de su aplicación, lo cual favorece una mejor adherencia del ligante, una distribución más uniforme y una menor susceptibilidad frente a condiciones climáticas adversas. Como resultado de estas mejoras, se proyecta una vida útil estimada entre 5 y 7 años, dependiendo del nivel de tránsito y las condiciones ambientales.

Finalmente, la alternativa C, riego de sello con agregado premezclado con aditivo hidrofóbico, propone un sistema innovador basado en la incorporación de un aditivo polimérico hidrofóbico que se dosifica al 2 % del peso del agregado. A diferencia del método anterior, este proceso no requiere calentamiento, lo que permite realizar la mezcla en frío, reduciendo los requerimientos energéticos y simplificando la operación en planta. El aditivo está compuesto por poliisopreno disuelto en tolueno, copolímero SBS (estireno-butadieno-estireno) disuelto en estireno, además de azufre y ácido abiético. Esta formulación confiere propiedades hidrofóbicas superiores, mejora la flexibilidad del ligante gracias a la presencia de polímeros elastoméricos y aumenta la resistencia al agrietamiento, favoreciendo una mayor durabilidad del tratamiento superficial bajo condiciones de humedad o tráfico variable.

#### 4.1.2 Costo de materiales

La tabla 14 muestra los costos de materiales empleados para los análisis tomados de fuentes de internet.

Tabla 14: Costos de materiales para el análisis

Material	Precio (MXN/kg o ton)	Dosificación por metro cuadrado	Fuente / Referencia
Agregado pétreo	\$250 – \$400 MXN/ton (promedio \$0.325 MXN/kg)	1 m <sup>2</sup>	(IMARC Group, 2025)
Asfalto AC-20	\$6,200 – \$11,000 MXN/ton (promedio \$8.50 MXN/kg)	2% del peso del agregado =0.20 kg/m <sup>2</sup>	(QuimiNet, 2025)
Emulsión asfáltica	\$8,000 – \$12,000 MXN/ton (promedio \$10.0 MXN/kg)	0.9 – 1.8 L/m <sup>2</sup>	(IMARC Group, 2025)

Fuente: elaboración propia

Para el caso del aditivo hidrofóbico se muestran en la tabla 15 los costos para cada uno de los materiales que lo componen.

Tabla15: Costo del aditivo

Componente	Cantidad (g o mL)	Masa equivalente (kg)	Precio (MXN/kg)	Costo parcial (MXN)
Poliisopreno	10 g	0.010 kg	50*	0.5
SBS	1.5 g	0.0015 kg	45*	0.07
Tolueno	100 mL	0.087 kg	25*	2.18
Estireno	100 mL	0.087 kg	30*	2.61
Azufre	0.5 g	0.0005 kg	5*	0.003
Ácido abiético	2 g	0.002 kg	60*	0.12
Total masa	—	0.188 kg aditivo	—	\$5.48 MXN por 0.188 kg
Costo del aditivo				29.15 MXN/kg aditivo

\*Fuente: (QuimiNet, 2025)

De la tabla anterior se deduce que para un metro cuadrado de tratamiento por riego de sello se necesitaran 0.24 kg de aditivo con un costo aproximado de 7.0 MXN/m<sup>2</sup>.

El análisis costo-beneficio desarrollado se centró exclusivamente en la evaluación de los costos directos, tomando en cuenta únicamente la partida correspondiente a los materiales utilizados en cada alternativa de tratamiento superficial. Este enfoque permite comparar de manera objetiva el impacto económico inmediato asociado a la adquisición y dosificación de los insumos principales como la emulsión asfáltica, el agregado pétreo, el asfalto AC-20 y el aditivo hidrofóbico, sin considerar el resto de los costos directos de mano de obra, maquinaria o administración. De esta forma, el análisis se orienta a determinar la viabilidad técnica-económica de cada propuesta desde la perspectiva del costo directo por metro cuadrado de aplicación.

Para las alternativas del agregado premezclado se analiza el proceso de fabricación en planta del material pétreo empleado. En las tablas 16 se muestran los costos por metro cuadrado para cada alternativa.

Tabla 16: Costo total de materiales

CONCEPTO	ALT. A	ALT. B	ALT. C
<b>I. Materiales</b>			
Emulsión asfáltica ECR	\$14.00	\$14.00	\$14.00
Agregado pétreo 3-A	\$4.23	\$4.23	\$4.23
Asfalto AC-20 (2%)	--	\$2.21	--
Aditivo hidrofóbico (2%)	--	--	\$7.00
Subtotal Materiales	\$18.23	\$20.44	\$25.23
<b>II. Mano de obra</b>			
Cuadrilla pavimentación	\$0.80	\$0.80	\$0.80
Herramienta menor (3%)	\$0.02	\$0.02	\$0.02
Subtotal Mano de Obra	\$0.82	\$0.82	\$0.82
<b>III. Maquinaria</b>			
Fabricación/premezclado	--	\$3.74	\$0.85
Aplicación en campo	\$3.87	\$3.87	\$3.87
Subtotal Maquinaria	\$3.87	\$7.61	\$4.72
Costo total directo	\$22.92	\$28.87	\$30.77

Fuentes: elaboración propia

La alternativa A representa la opción más económica con un costo total directo de \$22.92/m<sup>2</sup>, al no requerir procesos adicionales de premezclado ni el uso de aditivos o asfaltos modificados. Por su parte, la alternativa B muestra un incremento del 25.9 % respecto a la alternativa convencional, alcanzando un costo de \$28.87/m<sup>2</sup>, principalmente debido al consumo energético asociado al calentamiento del asfalto y los agregados, así como al costo adicional de fabricación del proceso térmico. En contraste, la alternativa C presenta el costo más elevado (\$30.77/m<sup>2</sup>), resultado del empleo del aditivo hidrofóbico, aunque reduce considerablemente el gasto energético al eliminar el calentamiento del material. A pesar de su mayor inversión inicial, esta última alternativa ofrece ventajas técnicas relevantes, como una mejor adherencia, menor susceptibilidad a la humedad y mayor sostenibilidad ambiental, lo cual podría traducirse en un mejor desempeño y durabilidad del pavimento a largo plazo. En este sentido, el análisis sugiere que la selección de la alternativa óptima no debe basarse únicamente en el costo directo, sino en una evaluación integral que considere tanto los aspectos económicos como los beneficios funcionales y de desempeño del material empleado. Por tal motivo se debe validar la propuesta en campo realizando tramos de pruebas que permitan verificar la durabilidad de la alternativa propuesta.

#### 4.1.3 Análisis del ciclo de vida

Para el análisis del ciclo de vida se consideró el período de evaluación de 20 años, lo que permite estimar el desempeño técnico y económico de las alternativas a largo plazo. El área de análisis corresponde a 10,000 m<sup>2</sup>, superficie representativa para la comparación de los costos directos de las distintas soluciones constructivas. Se aplicó una tasa de descuento del 0 %, lo que implica que el estudio se realizó en pesos constantes, sin considerar la variación temporal del valor del dinero. Asimismo, no se aplicó ajuste por inflación, con el fin de efectuar una comparación en valores presentes, centrada exclusivamente en las diferencias reales de costos entre las alternativas evaluadas, sin la influencia de factores económicos externos.

En la tabla 17 se muestran el número de aplicaciones para cada alternativa y diferentes escenarios de vida útil en años.

Tabla 17: Número de aplicaciones requerida en años.

Alternativa	Vida útil (años)	Aplicaciones en 20 años
A - Convencional	4	5
B - Con asfalto	6	3.33
C - Con aditivo (6 años)	6	3.33
C - Con aditivo (7 años)	7	2.86
C - Con aditivo (8 años)	8	2.5
C - Con aditivo (10 años)	10	2

Fuente: elaboración propia

La tabla 18 muestra el costo total de ciclo de vida para cada alternativa y para los años de vida útil que se estiman en el período de evaluación de 20 años.

Tabla 18: Costo total del ciclo de vida

Escenario	Alternativa	Costo/m <sup>2</sup> (\$)	Aplicaciones	Costo total 20 años (\$)	Costo anual (\$)	Costo/m <sup>2</sup> /año (\$)
1. Vida útil conservadora (C = 6 años)	A - Convencional	22.92	5	1,146,000	57,300	3.73
	B - Con asfalto	28.87	3.33	961,771	48,089	4.81
	C - Con aditivo (6 años)	32.85	3.33	1,093,905	46,976	4.7
2. Vida útil realista (C = 7 años)	A - Convencional	22.92	5	1,146,000	57,300	3.73
	B - Con asfalto	28.87	3.33	961,771	48,089	4.81

	C - Con aditivo (7 años)	32.85	2.86	939,510	46,976	4.7
3. Vida útil optimista (C = 8 años)	A - Convencional	22.92	5	1,146,000	57,300	3.73
	B - Con asfalto	28.87	3.33	961,771	48,089	4.81
	C - Con aditivo (8 años)	32.85	2.5	821,250	41,063	4.11
4. Vida útil muy optimista (C = 10 años)	A - Convencional	22.92	5	1,146,000	57,300	3.73
	B - Con asfalto	28.87	3.33	961,771	48,089	4.81
	C - Con aditivo (10 años)	32.85	2	657,000	32,850	3.29

Fuente: elaboración propia

En el escenario 1 (vida útil conservadora de 6 años), la alternativa B resulta 12.1% más económica que la alternativa C, debido a que el costo de los materiales con aditivo aún no se compensa con una mayor durabilidad. En este caso, la alternativa C solo se vuelve competitiva si su vida útil supera los 7 años.

En el escenario 2 (vida útil realista de 7 años), la alternativa C comienza a mostrar ventajas económicas, siendo 2.3% más económica que B, con un ahorro acumulado de \$22,261 en 20 años. Este punto representa el umbral de equilibrio, a partir del cual la inclusión del aditivo hidrofóbico empieza a generar beneficios financieros.

En el escenario 3 (vida útil optimista de 8 años), la ventaja de la alternativa C se amplía significativamente: el costo total se reduce en 14.6 % respecto a la alternativa B, con un ahorro de \$140,521 en el periodo de análisis. Esto evidencia

que la inversión inicial más alta se compensa ampliamente gracias a la mayor durabilidad del pavimento.

Finalmente, en el escenario 4 (vida útil muy optimista de 10 años), la alternativa C se consolida como la más rentable y sostenible a largo plazo, con el menor costo anual (\$32,850) y el costo unitario más bajo por metro cuadrado y año (\$3.29). Este resultado confirma que, si el aditivo logra extender la vida útil del pavimento al menos a 8 años o más, la alternativa C representa la opción técnica y económicamente más eficiente dentro del periodo de evaluación.

## 4.2 Proceso constructivo

Como resultado del análisis técnico-económico realizado, se propone un proceso constructivo industrial para la aplicación de un aditivo hidrofóbico en la ejecución de riegos de sello simple, orientado a mejorar la durabilidad y resistencia a la humedad de la superficie de rodadura. Este procedimiento considera la adaptación de operaciones existentes en plantas de producción y en obra, sin la necesidad de procesos térmicos adicionales, dado que el aditivo no requiere calentamiento para su activación.

### 4.2.1 Preparación del agregado en planta

El proceso inicia en planta con la selección, cribado y limpieza del agregado pétreo conforme a las especificaciones granulométricas del tipo de sello (por ejemplo, sello tipo 3-A). Posteriormente, el agregado se somete a un premezclado con el aditivo hidrofóbico, el cual se dosifica aproximadamente al 2 % del peso del material pétreo seco, según los lineamientos técnicos del fabricante o resultados de laboratorio.

El aditivo se distribuye mediante una mezcladora mecánica o tolva dosificadora, asegurando una cobertura uniforme sobre la superficie de las partículas. Esta operación se realiza en frío, sin necesidad de calentamiento del agregado, lo que representa una ventaja energética y ambiental frente a procesos convencionales de mezclado en caliente.

#### 4.2.2 Transporte del material pretratado

Una vez concluido el premezclado, el agregado tratado se transporta en seco hacia el frente de obra, utilizando camiones de volteo o tolvas selladas que eviten la contaminación o pérdida del material fino. Dado que el aditivo no altera las propiedades volumétricas del agregado ni requiere control térmico, el transporte puede realizarse bajo condiciones ambientales normales, sin restricciones de tiempo por enfriamiento o endurecimiento del material.

#### 4.2.3 Ejecución del riego de sello simple en campo

En obra, el proceso de aplicación se realiza conforme a las especificaciones convencionales para riego de sello simple, manteniendo el mismo procedimiento constructivo que en los sistemas sin aditivo:

1. Preparación de la superficie: limpieza y eliminación de polvo o material suelto.
2. Riego de la emulsión asfáltica ECR-68P mediante distribuidor a presión, asegurando la tasa de aplicación establecida por diseño.
3. Distribución inmediata del agregado premezclado con el aditivo hidrofóbico, utilizando esparcidor mecánico para garantizar una cobertura uniforme.
4. Compactación con rodillo neumático o combinado, realizando al menos dos pasadas para asegurar la adherencia entre el ligante y el agregado.
5. Curado y barrido final, retirando el material suelto una vez que la emulsión haya roto y curado adecuadamente.

Este procedimiento mantiene la secuencia estándar del riego de sello, pero introduce una mejora en el desempeño del agregado, que adquiere propiedades repelentes al agua y mayor afinidad con el ligante asfáltico, reduciendo el riesgo de desprendimiento y daños por humedad en la capa superficial.

#### 4.2.4 Puesta en servicio y mantenimiento



El sello puede abrirse al tránsito una vez alcanzado el curado de la emulsión, sin requerir tiempos adicionales. Dado que el aditivo hidrofóbico incrementa la estabilidad frente al agua y la durabilidad del sello, se espera extender los intervalos de mantenimiento y reducir la frecuencia de rehabilitación.

#### 4.3 Sostenibilidad de la variante modificada

Con el fin de optimizar la sostenibilidad y reducir los costos de producción del aditivo hidrofóbico, se propone la utilización de polímeros y solventes provenientes de fuentes recicladas o subproductos industriales, en lugar de insumos vírgenes de alto costo.

En el caso del políisopreno, puede obtenerse a partir de caucho natural reciclado, especialmente de neumáticos en desuso o descartes industriales del hule (Markl y Lackner, 2020). El proceso de devulcanización del caucho molido (GTR, *ground tire rubber*), mediante métodos mecánicos, químicos o por extrusión, permite recuperar fracciones de políisopreno líquido o sólido con propiedades adecuadas para su integración en formulaciones de aditivos, reduciendo significativamente el consumo de polímeros vírgenes (Sobrinho *et al.*, 2024).

Por su parte, (Xu *et al.*, 2022) en su investigación argumenta que el copolímero SBS (estireno-butadieno-estireno) puede obtenerse de residuos post-industriales como recortes, desechos de extrusión o sobrantes de manufactura. Estos materiales pueden ser reprocesados mediante molienda, clasificación y regranulado por extrusión, generando un polímero reciclado que conserva parte de las propiedades termoplásticas y elastoméricas del SBS original (Sobrinho *et al.*, 2024). También es viable incorporar fracciones recicladas compatibles provenientes de mezclas de termoplásticos con contenido de estireno-butadieno, reduciendo así la necesidad de SBS virgen (Maung *et al.*, 2022).

En cuanto a los solventes orgánicos como el tolueno y el estireno, cuyo costo e impacto ambiental son significativos, se recomienda implementar sistemas de recuperación y rectificación en la planta, tales como destilación fraccionada y

condensación de vapores, con el objetivo de reutilizar los solventes provenientes de corrientes de proceso o efluentes orgánicos (Srishti *et al.*, 2024). De forma complementaria, es posible reducir el contenido total de solventes mediante el desarrollo de formulaciones con menor volatilidad o incluso sustituirlos parcialmente por bio-solventes compatibles (Lee *et al.*, 2024). En el caso particular del estireno, puede recuperarse a partir de la pirólisis o degradación catalítica del poliestireno posconsumo, obteniendo monómero de estireno reciclado para su re-monomerización (Shen *et al.*, 2023).

(Andarani y Priyatna, 2023) explican que el azufre elemental puede adquirirse como subproducto de los procesos Claus en refinerías de petróleo o plantas de tratamiento de gas natural, donde se recupera a partir del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Este azufre refinado o granulado se comercializa a bajo costo como subproducto industrial, lo cual representa una fuente viable y económica para la formulación del aditivo.

Finalmente, (Vevere *et al.*, 2020) justifica que el ácido abiético puede obtenerse de fuentes naturales renovables, como la resina, subproductos de la industria papelera y de la pulpa de madera. Estos materiales contienen una alta proporción de ácidos resínicos, principalmente ácido abiético, el cual puede extraerse mediante destilación fraccionada y purificación. La compra directa a plantas papeleras o proveedores forestales representa una alternativa más económica y ambientalmente responsable frente al uso de ácido abiético químicamente puro.

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la investigación permiten confirmar la hipótesis planteada, demostrando que es posible desarrollar un aditivo hidrofóbico funcional para su aplicación en tratamientos superficiales tipo riego de sello en pavimentos asfálticos.

Se logró identificar un aditivo polimérico hidrofóbico eficiente, conformado por una mezcla de poliisopreno, SBS, ácido abiético y azufre, el cual mostró compatibilidad con la emulsión y estabilidad al ser aplicado en el sistema asfáltico, sin afectar negativamente su cohesión ni su proceso constructivo.

Se determinó que la incorporación del aditivo mediante la premezcla con el agregado pétreo en una proporción del 2 % garantizó la mayor uniformidad de distribución del compuesto sobre la superficie, obteniendo un equilibrio adecuado entre adherencia y repelencia al agua. Asimismo, el tiempo de curado óptimo se estableció en 2 horas, ya que permitió alcanzar la resistencia inicial necesaria frente a esfuerzos de barrido.

El análisis del ángulo de contacto confirmó el incremento de la hidrofobicidad de la superficie tratada, alcanzando valores cercanos a los 90°, propios de materiales de baja mojabilidad.

Esto se reflejó directamente en:

- Una reducción significativa de la permeabilidad de la superficie de hasta 78.2 % respecto al agregado sin tratamiento.
- Una mayor resistencia al desprendimiento por fricción, superando al agregado virgen y al premezclado únicamente con asfalto, con cubrimientos promedio del 86 % y desviaciones estándar muy bajas, lo que demuestra un comportamiento más estable y consistente frente al agua.

En términos técnicos, la incorporación del aditivo polimérico hidrofóbico mejora la adhesión ligante-agregado, la resistencia a la acción del agua y la estabilidad del

pavimento, prolongando su desempeño funcional bajo condiciones variables de humedad y tránsito. Además, el proceso constructivo propuesto demuestra ser viable y adaptable a las operaciones actuales de planta y obra, sin necesidad de infraestructura adicional ni consumo energético elevado.

El análisis del ciclo de vida a 20 años evidenció que la alternativa con aditivo se vuelve económicamente competitiva a partir de una vida útil de 7 años, superando en rentabilidad a la alternativa B y reduciendo los costos anuales de mantenimiento hasta en un 14.6 % en escenarios optimistas. Si el tratamiento alcanza una durabilidad de entre 8 y 10 años, se consolida como la opción más rentable y sostenible, al presentar el menor costo anual por metro cuadrado.

Se recomienda la validación en campo mediante tramos experimentales que permitan verificar su comportamiento real y confirmar las proyecciones de vida útil obtenidas en el análisis teórico.

## 6. REFERENCIAS

AASHTO T 27-. (2023). *AASHTO T 27-23 PDF - AASHTO Standards Online*. <https://www.aashtostandards.com/product/AASHTO-T-27-23/>

AASHTO T11. (2022). *AASHTO T11—Determinación de Materiales Finos en Agregados*. Studocu. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-catolica-de-el-salvador/ingenieria-de-carreteras/aashto-t11-determinacion-de-materiales-finos-en-agregados/134451444>

AASHTO T104. (2020). *Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*.

Abdul Wahhab, H. I. A., Balbahaith, F. A. S., Rafiq, W., Babalghaith, A. M., & Abdulrahman, S. (2025). Mechanical and statistical evaluation of performance properties of sulfur modified foamed asphalt for local soil stabilization. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00345-2>

Abuawad, I. M. A., Al-Qadi, I. L., & Trepanier, J. S. (2015). Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: Testing techniques and additives/modifiers effectiveness. *Construction and Building Materials*, 84, 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.001>

Al Nageim, H., Al-Busaltan, S. F., Atherton, W., & Sharples, G. (2012). A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials. *Construction and Building Materials*, 36, 743-748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.032>

Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>

Andarani, P., & Priyatna, M. N. R. (2023). Analysis of Sulfur Recovery Unit (SRU) Refinery as Sulfur Emission Control Unit at PT X, Indonesia. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(3), 1260-1267. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.3.1250>

Arenas, C. S. (2020). *Impacto del envejecimiento en la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas*. Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Aslani, H. (2019). *Why Powder material for XRD test should be passing the 75  $\mu$ m sieve?* ResearchGate. <https://www.researchgate.net/post/Why-Powder-material-for-XRD-test-should-be-passing-the-75-mm-sieve>

ASTM C131. (2020). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. [https://store.astm.org/c0131\\_c0131m-20.html](https://store.astm.org/c0131_c0131m-20.html)

ASTM D 3625. (2017). *ASTM D 3625: Efecto del Agua Hirviendo en Agregado Bituminoso*. Studocu. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-politecnica-y-artistica-del-paraguay/materiales-i/astm-d-3625-efecto-del-agua-hirviendo-en-agregado-bituminoso/135609223>

ASTM D3203, N. (2022). *D3203—Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de huecos de aire en mezclas asfálticas compactadas* | GlobalSpec. <https://standards.globalspec.com/std/14572887/d3203>

ASTM D4791-19. (2023). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. <https://store.astm.org/d4791-19r23.html>

ASTM E1131. (2020). *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*. <https://store.astm.org/e1131-20.html>

ASTM E1252-98. (2021). *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*. <https://store.astm.org/e1252-98r21.html>

ASTM E1356. (2014). *Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry (Withdrawn 2023)*. <https://store.astm.org/e1356-08r14.html>

Banerjee, A., Smit, A. de F., & Prozzi, J. A. (2012). Modeling the effect of environmental factors on evaporative water loss in asphalt emulsions for chip seal applications. *Construction and Building Materials*, 27(1), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.001>

Barros, L. M. de, do Nascimento, L. A. H., & Aragão, F. T. S. (2022). Effects of binder and aggregate properties on the permanent deformation of asphalt mixtures by means of uniaxial and triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 332, 127346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127346>

Bhandari, S., Luo, X. H., & Wang, F. (2023). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(1), 258-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.004>

Bozorgzad, A., Kazemi, S.-F., & Moghadas Nejad, F. (2018). Evaporation-induced moisture damage of asphalt mixtures: Microscale model and laboratory validation. *Construction and Building Materials*, 171, 697-707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.171>

Buss, A., Guirguis, M., & Gransberg, D. (2018). Chip seal aggregate evaluation and successful roads preservation. *Construction and Building Materials*, 180, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.255>

Calderón, A. U. (2012). *Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio*.

Campagnoli Martinez, S. X. (2007). Tratamientos superficiales: ¿por qué los hemos abandonado? *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, XVII(65), 7-12.

Cantellano, M. A. G., & Zetina, L. M. M. (2015). *La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI*.

Cerón Gómez, J. L., Martínez Durán, S., & Morales Cuéllar, M. D. C. (2013). *Tratamiento superficial simple tipo cape seal como técnica de preservación en pavimento flexible*. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/20870>

Cui, P., Schito, G., & Cui, Q. (2020). VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118757>

Dalhat, M. A., & Osman, S. A. (2023). Studying the impact of aggregates and mix volumetric properties on the moisture resistance of asphalt concrete using a feed-Forward artificial neural network. *Road Materials and Pavement Design*, 24(11), 2737-2758. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2165533>

Diaz Romero, P. L. (2022). *Refining Particle Size Specification for Asphalt Emulsion*.

Dinegdae, Y., & Birgisson. (2025). Effects of truck traffic on top-down fatigue cracking performance of flexible pavements using a new mechanics-based analysis framework | Request PDF. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/310387928\\_Effects\\_of\\_truck\\_traffic\\_on\\_top-down\\_fatigue\\_cracking\\_performance\\_of\\_flexible\\_pavements\\_using\\_a\\_new\\_mechanics-based\\_analysis\\_framework](https://www.researchgate.net/publication/310387928_Effects_of_truck_traffic_on_top-down_fatigue_cracking_performance_of_flexible_pavements_using_a_new_mechanics-based_analysis_framework)

Do, T. C. (2024). Engineering properties-based parameters used for moisture damage evaluation of asphalt mixtures: A review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 51(4), 390-398. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0243>



Emtiaz, M., Imtiyaz, M. N., Majumder, M., Idris, I. I., Mazumder, R., & Rahaman, M. M. (2023). A Comprehensive Literature Review on Polymer-Modified Asphalt Binder. *CivilEng*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/civileng4030049>

Fan, Z., Wang, C., Li, Y., Feng, L., & Chen, Q. (2024). State of the art review on fog seal for asphalt pavement: Material composition, classification, performance evaluation, and mechanism analysis. *Progress in Organic Coatings*, 194, 108573. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108573>

Fang, M., Park, D., Singuranayo, J. L., Chen, H., & Li, Y. (2019). Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance: A review. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2018.1430365>

Ferreira, S. L., Junior, M. M. S., Silva, D. L. da, Félix, C. S., Santos, A. S., Souza, C. T. de, Neto, J. H. S., Junior, R. A. C., & Souza, A. S. (2019). Multivariate optimization techniques in food analysis – A review. *Food Chemistry*, 273, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.114>

Figueroa Infante, A. S., & Reyes, F. A. (2016). Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica a partir del ensayo MIST y del programa iPAS 2D®. *Infraestructura Vial*, 17(30), 31-39. <https://doi.org/10.15517/iv.v17i30.22926>

Foundation for Pavement Preservation. (2022). *Best practices for slurry surfacing systems*.

Fu, H., Chen, Q., Sun, X., Zhang, W., & Wang, S. (2024). *Bonding Durability Evaluation of Polymer-Modified Emulsified Asphalt Microsurfacing*. <https://doi.org/10.1155/2024/5719655>

Ganeeva, Y. M., Okhotnikova, E. S., Yusupova, T. N., Bryzgalov, N. I., Fazylyzyanova, G. R., Barskaya, E. E., & Raisovich, K. A. (2025). Thermal characteristics of polymer modified bitumen according to simultaneous thermal

analysis and microcalorimetry investigation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150(6), 4075-4082. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14036-8>

Gómez, L. D. H. (2019). Comparación del desempeño en laboratorio de tratamientos superficiales elaborados a partir de las metodologías de diseño de TxDOT y Austroads. *Métodos y materiales*, 9(9), 19-26.

Gransberg, D. D., & James, D. M. B. (2005). *Chip seal best practices*. Transportation Research Board, National Research Council.

Gu, F., Watson, D., Moore, J., & Tran, N. (2018). Evaluation of the benefits of open graded friction course: Case study. *Construction and Building Materials*, 189, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.185>

Hadi, M. A., Christopoulos, S.-R. G., Chroneos, A., Naqib, S. H., & Islam, A. K. M. A. (2020). Elastic behaviour and radiation tolerance in Nb-based 211 MAX phases. *Materials Today Communications*, 25, 101499. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101499>

Hadi, M. K., Wang, X., Peng, Y., Sangaraju, S., & Ran, F. (2025). Functional Polymeric Membrane Materials: A Perspective from Versatile Methods and Modification to Potential Applications. *Polymer Science & Technology*, 1(5), 366-412. <https://doi.org/10.1021/polymscitech.4c00030>

He, R., Liang, Y., Gao, L., Chen, H., Yang, B., Guo, F., & Geng, J. (2020). *Preparation and Performance Assessment of Asphalt Emulsion Modified by the Fabricated SBS Latex*. <https://doi.org/10.1155/2020/6699416>

He, R., Xu, L., Wang, W., Shi, J., & Chen, Z. (2025). Experimental study on the low-temperature performance and evaluation methods of crack sealants for asphalt pavements in seasonal frozen regions. *Scientific Reports*, 15(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03538-y>

Hernández, M., & Ossa, A. (2020). *EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON RCD*.

Hua Luo, X., Wang, F., Bhandari, S., Wang, N., & Qiu, X. (2021). Effectiveness evaluation and influencing factor analysis of pavement seal coat treatments using random forests. *Construction and Building Materials*, 282, 122688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122688>

Huang, H.-Y., Xiao, H., Han, S., Xiao, M., Jia, G., & Yao, H. (2025). *Research Progress on Adhesion Mechanism and—ProQuest*. <https://www.proquest.com/docview/3239021583?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar&sourcetype=Scholarly%20Journals>

IMARC Group. (2025). *Mercado de agregados para la construcción en México 2033*. <https://www.imarcgroup.com/report/es/mexico-construction-aggregates-market>

ISSA. (2020). *A143 Micro Surfacing Guideline Specifications—Revised Feb 2020*. Studocu. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-tecnologica-del-peru/pavimentos/a143-microsurfacing-guideline-specifications/84884910>

Jalali, F., & Vargas-Nordbeck, A. (2021). Life-Extending Benefit of Chip Sealing for Pavement Preservation. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/0361198121989721>

Ji, T., Hao, P., She, H., Yang, K., Li, H., Wang, D., Kang, R., & Liu, J. (2023). Durability behavior of asphalt mixtures in regard to material properties and gradation type. *Frontiers in Materials*, 10, 1151479. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1151479>

Jin, D., Yin, L., Xin, K., & uested, Z. (2023). Comparison of asphalt emulsion-based chip seal and hot rubber asphalt-based chip seal. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02175. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02175>

Kim, J. W., & Elipse, C. (2025). (PDF) Effect of Simultaneous Application of Glass Fiber Reinforcement and Polymer-Modified Asphalt Emulsion on DBST's Resistance to Aggregate Loss Using Laboratory Investigation. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.3390/coatings14060702>

King, G., Madanat, S., Voth, M., & Lanotte, M. A. (2011). *Polymer Modified Asphalt Emulsions: Composition, Uses, and Specifications for Surface Treatments*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34586.03520>

Lane, L., Cheng, D., & Hicks, G. (2019). *Manual for Slurry Surfacing*.

Lawson, W. D., & Senadheera, S. (2009). Chip Seal Maintenance: Solutions for Bleeding and Flushed Pavement Surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2108(1), 61-68. <https://doi.org/10.3141/2108-07>

Laye, P. G., Warrington, S. B., Group, T. M., Heal, G. R., Price, D. M., & Wilson, R. (2002). *Principles of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://books.rsc.org/books/edited-volume/393/Principles-of-Thermal-Analysis-and-Calorimetry>

Lee, J. L., Chong, G. H., Ota, M., Guo, H., & Smith, R. L. (2024). Solvent Replacement Strategies for Processing Pharmaceuticals and Bio-Related Compounds—A Review. *Liquids*, 4(2), 352-381. <https://doi.org/10.3390/liquids4020018>

Li, J., Li, M., & Wu, H. (2023). Key Performance Analysis of Emulsified Asphalt Cold Recycling Mixtures of the Middle Layer of Pavement Structure. *Materials*, 16(4), 1613. <https://doi.org/10.3390/ma16041613>

Li, W., Cao, W., Ren, X., Lou, S., Liu, S., & Zhang, J. (2022). Impacts of Aggregate Gradation on the Volumetric Parameters and Rutting Performance of Asphalt Concrete Mixtures. *Materials*, 15(14), 4866. <https://doi.org/10.3390/ma15144866>

Little, D. N., Allen, D. H., & Bhasin, A. (2018). Chemical and Mechanical Processes Influencing Adhesion and Moisture Damage in Hot Mix Asphalt Pavements. En *Modeling and Design of Flexible Pavements and Materials* (pp. 123-186). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58443-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58443-0_4)

Lokesh, Y., Parate, H. R., Swamy, H. M. R., & T, S. (2024). Investigation on structural and functional behavior of open and dense graded asphalt mixes in mitigating urban floods. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00081-z>

Lozano, D. A., Ruge Cárdenas, J. C., Moreno, L. A., Molina Gomez, F. A., & Bastidas, J. G. (2020). Asphalts and modified dense bituminous mixtures with rubber of military boots. *DYNA*, 87(212), 120-128. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78135>

Lu, C., Zhang, Z., Qiang, Y., Zhao, F., & Wang, D. (2023). A hydrophobic and sustainable anti-icing sand fog seal for asphalt pavement: Its preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 401, 132918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132918>

Lu, Z., Chen, A., Wu, S., Li, Y., Zou, Y., Zhu, Y., & Wang, K. (2023). Experimental Study on the Physicochemical Properties of Asphalt Modified by Different Anti-Stripping Agents and Their Moisture Susceptibility with Aggregates. *Materials*, 16(13), 4545. <https://doi.org/10.3390/ma16134545>

Luo, L., Yang, S.-H., Oeser, M., & Liu, P. (2024). Moisture damage mechanism of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement binder: A novel molecular dynamics study. *Journal of Cleaner Production*, 475, 143711. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143711>

Ma, X., Zhao, Y., Jiang, J., & Wang, H. (2021). Characterization of the interconnected pore and its relationship to the directional permeability of porous

asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 269, 121233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121233>

Mallick, R. B., Li, H., Harvey, J., Myers, R., Veeraragavan, A., & Reck, N. (2015). Pavement Life–Extending Potential of Geosynthetic-Reinforced Chip Seal with High-Reflectivity Aggregates. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/2474-03>

Markl, E., & Lackner, M. (2020). Devulcanization Technologies for Recycling of Tire-Derived Rubber: A Review. *Materials*, 13(5), 1246. <https://doi.org/10.3390/ma13051246>

Martínez, M. E. R., & Torres Dahbura, E. A. (2012). *Diseño de una emulsión asfáltica modificada de alto desempeño para riego de liga, evaluando su resistencia al esfuerzo de corte y la adherencia entre capas de pavimento*.

Maung, A. N. W., Lee, Y. P. K., Ho, N. Y., Tiah, G. W., & Yi, K. (2022). Effects of Recycled Plastics on the Performance of Polymer Modified Bitumen (PMB). En H. R. Pasindu, S. Bandara, W. K. Mampearachchi, & T. F. Fwa (Eds.), *Road and Airfield Pavement Technology* (pp. 781-793). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87379-0\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87379-0_59)

Maurya, A. K., & Singh, D. (2024). Novel Approach to Characterize Moisture Damage in Asphalt Mixtures Based on Critical Permeability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(5), 04024093. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16824>

Meena, P., & Monu, K. (2025). (PDF) Effect of Binary Blended Fillers on the Durability Performance of Recycled Cold-Mix Asphalt. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.3390/su16124908>

Meng, Y., Lu, T., Fang, G., Li, W., He, G., & Pan, Z. (2025). Study on modification mechanism and properties of SBR/WER composite modified emulsified asphalt

waterproof binder. *Construction and Building Materials*, 465, 140246.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140246>

Mesquita Jr., G. S., Barroso, S. H. de A., & Gondim, L. M. (2024). Analysis of the binder-aggregate interface of chip seal binders in different stages of ageing using the bitumen bond strength (BBS) test. *Road Materials and Pavement Design*.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2024.2320872>

Miranda, J. C. M. (2022, octubre 5). Emulsiones asfálticas: Concepto, aplicación, clasificación, rompimiento y curado. *Blog LanammeUCR*.  
<https://bloglanammeucr.wordpress.com/2022/10/05/emulsiones-asfalticas-concepto-aplicacion-clasificacion-rompimiento-y-curado/>

Moretti, L., & D'Andrea, A. (2025). Analysis of the Relationship Between Air Voids Content, Hydraulic Conductivity, and Gas Permeability in Asphalt Mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-16.  
<https://doi.org/10.1007/s42947-025-00548-x>

Mulenshi, J., Gilbricht, S., Chelgani, S. C., & Rosenkranz, J. (2021). Systematic characterization of historical tailings for possible remediation and recovery of critical metals and minerals – The Yxsjöberg case. *Journal of Geochemical Exploration*, 226, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106777>

Nejad, F. M., Azarhoosh, A., Hamed, GH. H., & Azarhoosh, M. (2012). Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 31, 384-388.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.004>

Neupane, P., & Wu, S. (2025a). A comprehensive review of moisture damage in asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and mitigation strategies. *Construction and Building Materials*, 471, 140740.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140740>

- Neupane, P., & Wu, S. (2025b). A comprehensive review of moisture damage in asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and mitigation strategies. *Construction and Building Materials*, 471, 140740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140740>
- Noaman, A. (2023). *Open-Graded Friction Courses (OGFC)*. [https://www.academia.edu/63926057/Open\\_Graded\\_Friction\\_Courses\\_OGFC](https://www.academia.edu/63926057/Open_Graded_Friction_Courses_OGFC)
- Omar, H. A., Yusoff, N. I. Md., Mubarak, M., & Ceylan, H. (2020). Effects of moisture damage on asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 600-628. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>
- Omori, N. E., Bobitan, A. D., Vamvakeros, A., Beale, A. M., & Jacques, S. D. M. (2023). Recent developments in X-ray diffraction/scattering computed tomography for materials science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0350>
- Overby, C. & Michael Pinard. (2013). (PDF) *The Otta Seal Surfacing: A practical and Economic Alternative to Traditional Bituminous Surface Treatments*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/313565464\\_The\\_Otta\\_Seal\\_Surfacing\\_A\\_practical\\_and\\_Economic\\_Alternative\\_to\\_Traditional\\_Bituminous\\_Surface\\_Treatments](https://www.researchgate.net/publication/313565464_The_Otta_Seal_Surfacing_A_practical_and_Economic_Alternative_to_Traditional_Bituminous_Surface_Treatments)
- Pathak, S., Choudhary, R., Kumar, A., & Kumar, B. (2023). Mechanical Properties of Open-Graded Asphalt Friction Course Mixtures with Basic Oxygen Furnace Steel Slag as Coarse Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004696](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004696)
- Ponomar, M., Krasnyuk, E., Butylskii, D., Nikonenko, V., Wang, Y., Jiang, C., Xu, T., & Pismenskaya, N. (2022). Sessile Drop Method: Critical Analysis and Optimization for Measuring the Contact Angle of an Ion-Exchange Membrane Surface. *Membranes*, 12(8), 765. <https://doi.org/10.3390/membranes12080765>



QuimiNet. (2025). *Precios de Cemento asfáltico AC-20*. QuimiNet. <https://www.quiminet.com/productos/cemento-asfaltico-ac-20-70847021245/precios.htm>

Rahbar-Rastegar, R., Pouranian, M. R., Batioja-Alvarez, D., Notani, M. A., Montoya, M., & Haddock, J. E. (2022). Superpave 5: Improving Asphalt Mixture Performance. *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials*, 1711-1717. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4\\_217](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_217)

Rahman, M. N., Sarkar, M. T. A., Elseifi, M. A., Mayeux, C., Samuel B. Cooper, I. I., & Free, K. (2021). Short-Term Field Performance and Cost-Effectiveness of Crumb-Rubber Modified Asphalt Emulsion in Chip Seal Applications. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/03611981211005469>

Ravera, F., Dziza, K., Santini, E., Cristofolini, L., & Liggieri, L. (2021). Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 288, 102344. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102344>

Raza, A., Khan, I., Tufail, R. F., Frankovska, J., Mushtaq, M. U., Salmi, A., Awad, Y. A., & Javed, M. F. (2022). Evaluation of Moisture Damage Potential in Hot Mix Asphalt Using Polymeric Aggregate Treatment. *Materials*, 15(15), 5437. <https://doi.org/10.3390/ma15155437>

Rivera, J. J., Battista, N. D., Oviedo, A., Rebollo, O. R., Ferrero, I. Z., Fensel, E. A., Delbono, H. L., & Martínez, A. H. (2023). Cold mix asphalt with polymeric stone for low traffic volume roads. *Construction and Building Materials*, 401, 132714. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132714>

Romero, V. M. C., & Rodríguez, E. T. (2024). *INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN EL CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS*.

- Segundo, I. R., Silva, L., Palha, C., Freitas, E., & Silva, H. (2021). Surface rehabilitation of Portland cement concrete (PCC) pavements using single or double surface dressings with soft bitumen, conventional or modified emulsions. *Construction and Building Materials*, 281, 122611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122611>
- Shakor, Z. M., Tayib, Y. M., AbdulRazak, A. A., Shnain, Z. Y., & Al-Shafei, E. (2025). Thermogravimetric Analysis Integrated with Mathematical Methods and Artificial Neural Networks for Optimal Kinetic Modeling of Biomass Pyrolysis: A Review. *ACS Omega*, 10(33), 36750-36770. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02250>
- Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, Monower, & Talaat Abdel-Wahed. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>
- Shardt, N., & Elliott, J. A. W. (2020). Gibbsian Thermodynamics of Wenzel Wetting (Was Wenzel Wrong? Revisited). *Langmuir*, 36(1), 435-446. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b02984>
- Shen, D., Xie, Z., Shentu, J., Long, Y., Lu, L., Li, L., & Qi, S. (2023). Enhanced oxidation of aromatic hydrocarbons by ozone micro-nano bubble water: Mechanism and influencing factors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110281>
- Shi, B., Long, K., Zhang, Z., Yu, D., Ai, C., & Yan, C. (2024). Investigation of anti-aging performance in nano-sol modified high-SBS content emulsified asphalt and its micro-surfacing mixtures. *Construction and Building Materials*, 453, 139050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139050>

Shuler, S., Señor, Antonio, Epps-Martin, Amy, & Hoyt, Denise. (2011). *Manual for Emulsion-Based Chip Seals for Pavement Preservation*. <https://doi.org/10.17226/14421>

Sobrinho, E. D. de M., Ferreira, E. da S. B., Silva, F. U. da, Bezerra, E. B., Wellen, R. M. R., Araújo, E. M., & Luna, C. B. B. (2024). From Waste to Styrene–Butadiene (SBR) Reuse: Developing PP/SBR/SEP Mixtures with Carbon Nanotubes for Antistatic Application. *Polymers*, 16(17), 2542. <https://doi.org/10.3390/polym16172542>

Srishti, S., Anilkumar, A., & Roy, Y. (2024). A Review of Advancements in Solvent Recovery from Hazardous Waste. *Journal of the Indian Institute of Science*, 104(4), 811-825. <https://doi.org/10.1007/s41745-025-00466-8>

Talha, S. A., Nazzal, M. D., Manasreh, D., & Khan, M. T. F. (2022). Survival analysis to determine the factors affecting the optimum timing of chip seal application. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(6), 350. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00949-y>

TaylorMcPherson. (2020, noviembre 12). *Pavimentación de carreteras más seguras con una capa de fricción de nivel abierto—Lehman-Roberts Company*. <https://www.lehmanroberts.com/paving-safer-roads-with-open-graded-friction-course/>, <https://www.lehmanroberts.com/paving-safer-roads-with-open-graded-friction-course/>

Tighe, S., & Gransberg, D. D. (2025). (PDF) Sustainable Pavement Maintenance and Preservation Practices: Review of Current Practices. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/263235086\\_Sustainable\\_Pavement\\_Maintenance\\_and\\_Preservation\\_Practices\\_Review\\_of\\_Current\\_Practices](https://www.researchgate.net/publication/263235086_Sustainable_Pavement_Maintenance_and_Preservation_Practices_Review_of_Current_Practices)

Torres, B. A. Z., & Juela, R. O. P. (2021). *Caracterización de materiales bituminosos para uso en pavimentos de la zona 7* [Tesis de Grado]. Universidad Técnica Particular de Loja.

Utomo, D. A., Saputra, I. J., Husein, M., & Abiyud, R. (2022). (PDF) Determining Clay Mineral on Methylene Blue (MeB) Analysis on Drilling Cutting Based on XRD Analysis. Case Study: Blawan-Ijen Field, Indonesia. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/364307279\\_Determining\\_Clay\\_Mineral\\_on\\_Methylene\\_Blue\\_MeB\\_Analysis\\_on\\_Drilling\\_Cutting\\_Based\\_on\\_XRD\\_Analysis\\_Case\\_Study\\_Blawan-Ijen\\_Field\\_Indonesia](https://www.researchgate.net/publication/364307279_Determining_Clay_Mineral_on_Methylene_Blue_MeB_Analysis_on_Drilling_Cutting_Based_on_XRD_Analysis_Case_Study_Blawan-Ijen_Field_Indonesia)

Vega, G. M. C. (2015). *EVALUACION DE UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO CON EMULSION ASFALTICA COMO ALTERNATIVA DE MANTENIMIENTO EN VIAS ARTERIALES DEL ECUADOR*”.

Vevere, L., Fridrihsone, A., Kirpluks, M., & Cabulis, U. (2020). A Review of Wood Biomass-Based Fatty Acids and Rosin Acids Use in Polymeric Materials. *Polymers*, 12(11), 2706. <https://doi.org/10.3390/polym12112706>

Wang, S., Chen, Y., Wang, L., Cui, N., Li, C., & Sun, S. (2025). Study on Water Damage of Asphalt–Aggregate Based on Molecular Dynamics. *Materials*, 18(1), 209. <https://doi.org/10.3390/ma18010209>

Wang, X., Ren, J., Gub, X., Lia, N., & Chen. (2021). Investigation of the adhesive and cohesive properties of asphalt, mastic, and mortar in porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 276, 122255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122255>

Xu, P., Zhang, D., Liu, Z., Fu, C., & Lv, H. (2022). Chemical and rheological properties evaluation of a novel synchronous rejuvenated aged SBS modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135213>

Xu, X., Zhao, Y., Wang, Q., Sun, M., & Li, Y. (2025). Preparation and Comprehensive Performance Evaluation of Hydrophobic Anti-Icing Coating Materials for Highway Pavements. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma18204778>

Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, 12, 100255. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100255>

Yu, D., Luo, J., Lang, H., Hua, F., Yang, Y., & Xie, M. (2025). Study on the Micro-Surfacing Properties of SBR Modified Asphalt Emulsion with Reclaimed Asphalt Pavement. *Materials*, 18(4), 802. <https://doi.org/10.3390/ma18040802>

Zaumanis, M., Poulikakos, L. D., & Partl, M. N. (2018). Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters. *Materials & Design*, 141, 185-201. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.035>

Zhang, H., Li, H., Guo, F., Wang, S., & Yue, J. (2025). Research on the Adhesion Performance of Fast-Melting SBS-Modified Emulsified Asphalt–Aggregate Based on the Surface Free Energy Theory. *Materials*, 18(15), 3523. <https://doi.org/10.3390/ma18153523>

Zhao, G., Li, S., Jiang, Y., & Lee, J. (2018). *Quality Assurance Procedures for Chip Seal Operations Using Macrottexture Metrics*. <https://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1671>

Zhao, L., Li, W., Zhang, C., Yu, X., Liu, A., & Huang, J. (2025). The Study on the Effect of Waterborne Epoxy Resin Content on the Performance of Styrene–Butadiene Rubber Modified Micro-Surface Mixture. *Polymers*, 17(9), 1175. <https://doi.org/10.3390/polym17091175>

Zhou, X., & Liu, D. (2018). XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. *Solid Earth Sciences*, 3(1), 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>

Zhou, Y., Peng, Z., Wang, J., Wei, J., Liu, H., Wang, D., & Li, J. (2024). A review on adhesion behavior of chip seal pavement and aggregate. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11(3), 441-466.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.11.003>

Žlender, B., Gürer, C., Varga, R., & Jelušič, P. (2024). Cost Effectiveness of Chip Seal and Hot Mix Asphalt Pavements. *Geotechnics*, 4(4), 1140-1158.  
<https://doi.org/10.3390/geotechnics4040058>

## 7. ANEXOS

Tabla 19: Nomenclatura de las muestras para la caracterización mecánica.

No. Muestra	Clave	Aditivo	Descripción
1	BAV-1	--	Blanco agregado virgen sin aditivo curado 1 hora
2	BAV-2	--	Blanco agregado virgen sin aditivo curado 2 horas
3	BAV-3	--	Blanco agregado virgen sin aditivo curado 3 horas
4	BAP-1	--	Blanco agregado premezclado con asfalto sin aditivo curado 1 hora
5	BAP-2	--	Blanco agregado premezclado con asfalto sin aditivo curado 2 horas
6	BAP-3	--	Blanco agregado premezclado con asfalto sin aditivo curado 3 horas
7	BAP aditivo 1-1	1	Blanco agregado premezclado con aditivo 1% curado 1 hora
8	BAP aditivo 1-2		Blanco agregado premezclado con aditivo 1% curado 2 horas
9	BAP aditivo 1-3		Blanco agregado premezclado con aditivo 1% curado 3 horas
10	BAP aditivo 2-1	2	Blanco agregado premezclado con aditivo 2% curado 1 hora
11	BAP aditivo 2-2		Blanco agregado premezclado con aditivo 2% curado 2 horas
12	BAP aditivo 2-3		Blanco agregado premezclado con aditivo 2% curado 1 hora
13	BAP aditivo 3-1	3	Blanco agregado premezclado con aditivo 3% curado 1 hora
14	BAP aditivo 3-2		Blanco agregado premezclado con aditivo 3% curado 2 horas
15	BAP aditivo 3-3		Blanco agregado premezclado con aditivo 3% curado 1 hora

Fuente: elaboración propia

Tabla 20: Proceso del ensayo Sweep test (blanco agregado virgen).

Muestra	BVA-1	BAV-2	BAV-3
Peso del filtro (gr)	33	32.2	31.3
Peso del filtro+emulsión+agregado (gr)	449.8	459.5	435.5
Peso inicial (gr)	389.3	401.5	390.3
Peso final (gr)	373.4	388.9	378.8
% masa perdida	5.935	4.538	4.260

Fuente: elaboración propia

Tabla 21: Proceso del ensayo Sweep test (blanco agregado premezclado con asfalto).

Muestra	BAP-1	BAP-2	BAP-3
Peso del filtro (gr)	32.8	31.9	31.8
Peso del filtro+emulsión+agregado (gr)	444.4	445.4	438.2
Peso inicial (gr)	380.5	379.5	388.7
Peso final (gr)	352.2	362	380.7
% masa perdida	10.825	6.696	2.981

Fuente: elaboración propia

Tabla 22: Proceso del ensayo Sweep test (blanco agregado premezclado con el aditivo).

Muestra	BAP aditivo - 1-1	BAP aditivo - 1-2	BAP aditivo -1-3	BAP aditivo -2-1	BAP aditivo -2-2	BAP aditivo -2-3	BAP aditivo -3-1	BAP aditivo -3-2	BAP aditivo -3-3
Peso del filtro (gr)	33	32	30.9	32	33.2	32.33	32.3	32.4	32.4
Peso del filtro+emulsión+agregado (gr)	447	445	443	447.5	451.5	448.2	453.1	462.2	451.3
Peso inicial (gr)	393.2	401.2	387.2	397.3	406.8	403.8	400.9	406.6	392.4
Peso final (gr)	373.3	388.7	348.1	386.8	399.8	383.7	388.9	398	378.9
% masa perdida	7.348	4.503	14.595	3.823	2.492	7.197	4.330	3.057	4.988

Fuente: elaboración propia



Tabla 23: Costo de materiales alternativa A (Riego de sello convencional).

Alternativa A			
Materiales	Dosificación (kg/m <sup>2</sup> )	Precio (\$/m <sup>2</sup> )	Costo (\$/m <sup>2</sup> )
Emulsión asfáltica	1.4	10	14
Agregado pétreo	13	0.325	4.225
Costo total materiales			18.225

Fuente: elaboración propia

Tabla 24: Costo de materiales alternativa B (Riego de sello con agregado premezclado con asfalto)

Alternativa B			
Materiales	Dosificación (kg/m <sup>2</sup> )	Precio (\$/m <sup>2</sup> )	Costo (\$/m <sup>2</sup> )
Emulsión asfáltica	1.4	10	14
Agregado pétreo	13	0.325	4.225
Asfalto AC-20 (2%)	0.26	8.5	2.21
Costo total materiales			20.435
Subtotal fabricación			3.74

Fuente: elaboración propia

Tabla 25: Costo de materiales alternativa C (Riego de sello con agregado premezclado con aditivo hidrofóbico polimérico hidrofóbico)

Alternativa C			
Materiales	Dosificación (kg/m <sup>2</sup> )	Precio (\$/m <sup>2</sup> )	Costo (\$/m <sup>2</sup> )
Emulsión asfáltica	1.4	10	14
Agregado pétreo	13	0.325	4.225
Aditivo hidrofóbico (2%)	0.188	29.15	5.4802
Costo total materiales			23.7052
Subtotal fabricación			0.85

Fuente: elaboración propia

Tabla 26: Costo de mano de obra para las alternativas.

Concepto	Descripción	Rendimiento	Costo unitario (MXN)	Costo total por jornada (MXN)	Costo por m³ (MXN)	Costo por m² (MXN)
Cabo de oficiales	1 cabo (0.0175 jornadas × \$703.30)	4,000–5,000 m² / 8 h (prom. 4,500 m²/jornada)	\$703.30*	\$12.31	\$66.48	\$0.80
Oficial albañil / operador	1 oficial (incluido en la cuadrilla)	--	--	--	--	--
Peones	4 peones (0.175 jornadas × \$309.53)	--	\$309.53*	\$54.17	--	--
Total mano de obra por m³	--	--	--	--	\$66.48	\$0.80

Fuente: elaboración propia  
\* APU 2025

Tabla 27: Costo de equipos empleados en la aplicación.

Equipo	Costo horario (MXN/hr)	Rendimiento (hr/m²)	Costo (\$/m²)
Petrolizadora–esparcidora	\$950.00/hr	0.0020 hr/m²	\$1.90*
Compactador neumático 10 ton	\$400.00/hr	0.0020 hr/m²	\$0.80*
Barredora mecánica	\$450.00/hr	0.0010 hr/m²	\$0.45*
Camión volteo 7 m³	\$350.00/hr	0.0020 hr/m²	\$0.70*
Herramienta menor (3 % MO)	–	–	\$0.02*
Total de equipo aplicación	–	–	\$3.87/m²

Fuente: elaboración propia  
\* APU 2025

Tabla 28: Equipo adicional para fabricación y premezclado

Alternativa	Parámetro	Cálculo	Costo (\$/m²)
ALTERNATIVA A: Riego Convencional	No requiere proceso de premezclado	--	\$0.00/m²
ALTERNATIVA B: Premezclado con Asfalto (Proceso en Caliente)			
Calentamiento asfalto**	(0.2 kg a 150°C)	150 kWh/ton asfalto × 0.0002 ton × \$2.50/kWh	\$0.30
Calentamiento agregado**	(13 kg a 150°C)	150 kWh/ton × 0.013 ton × \$2.50/kWh	\$4.87
Costo energía total	--	Suma de energías	\$5.17
Mezclado en caliente*	Operación planta	Equipo + operador	\$0.45
Transporte térmico*	Calor adicional	20% adicional	\$0.90
Total fabricación B			\$6.34/m²
ALTERNATIVA C: Premezclado con Aditivo (Proceso en Frío)			
Preparación aditivo (mezclado de base)	Energía térmica: sin calentamiento Energía eléctrica: 10 kWh/ton × 0.00208 ton × \$2.50/kWh		\$0.05
Mezclado con agregado (temperatura ambiente)	Sin calentamiento	--	\$0.00
Energía mecánica**	5.8 kWh/ton × 0.013 ton × \$2.50/kWh	--	\$0.19
Equipo mecánico	Mezcladora	3.5 min/m²	\$0.60
Transporte*	Camión ordinario (sin aislamiento térmico)	--	\$0.85
Total fabricación C			\$0.85/m²

Fuente: elaboración propia  
\* APU 2025 \*\*Wirtgen Group