

**ESTUDIO DE LECHADAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS CON LA INCORPORACIÓN
DE RESIDUOS DE PLÁSTICO TIPO PET**

MARTÍNEZ FLÓREZ ERIKA LUCÍA
MONTAÑEZ MUNAR JUANITA

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021

ESTUDIO DE LECHADAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS CON LA INCORPORACIÓN DE
RESIDUOS DE PLÁSTICO TIPO PET

MARTÍNEZ FLÓREZ ERIKA LUCÍA
MONTAÑEZ MUNAR JUANITA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera(o) Civil

Director:
HENRY GIOVANNI MARTINEZ MENDOZA
INGENIERO CIVIL

Codirector:
JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ
INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021

Nota de aceptación

Firma del jurado

Bogotá, noviembre de 2021

Bogotá, noviembre de 2021

Agradecimientos

En primer lugar, gracias a Dios por retarnos cada instante a ser mejores y nunca darnos por vencidos, por demostrarnos que uno nunca debe desistir, aunque el camino se torne difícil, siempre se debe sacar fortaleza y fuerza para seguir adelante y aprender de cada experiencia.

A nuestras familias por el apoyo incondicional y su interés en el transcurso de nuestros caminos formándonos como profesionales, apoyándonos siempre en todos los momentos tanto buenos y malos.

A las personas allegadas que compartieron con nosotros este proceso, agradecemos su ayuda, tiempo y dedicación, por esclarecer nuestras inquietudes y compartir sus conocimientos y experiencias a través de consejos y pláticas.

A los docentes, por dedicarnos el tiempo para formarnos como grandes profesionales transmitiéndonos su conocimiento para ser cada día mejores, poniendo su tiempo a nuestra disposición para cualquier inquietud que nos surgía, pero también como amigos, para momentos de confusión o discordia por situaciones que se presentaban y eran difíciles de afrontar en esos momentos de aprendizaje, confusión, desesperación, pero también de alegrías, motivación y demás sentimientos que se generan en esta etapa de la vida.

A los ingenieros Henry Giovanni Martínez y Juan Gabriel Bastidas por su acompañamiento en el desarrollo de este proyecto, por brindarnos su conocimiento y esclarecer nuestras inquietudes en el proceso del trabajo de grado. Por su tiempo y dedicación muchas gracias.

Erika Lucia Martínez Flórez
Juanita Montañez Munar

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	9
2. INTRODUCCIÓN	10
3. DESCRIPCIÓN	13
3.1. Objetivos	13
3.1.1. General	13
3.1.2. Específicos	13
3.2. Alcances	13
3.2.1. Limitaciones	13
3.2.2. Justificación	14
4. ESTADO DEL ARTE	15
4.1. Nuevas tendencias	15
5. MARCO TEÓRICO	18
5.1. Tratamientos superficiales	18
5.2. Clasificación de las emulsiones asfálticas:	18
5.3. Lechada asfáltica (LA)	19
Polietileno de tereftalato (PET)	22
6. FASE EXPERIMENTAL DE LABORATORIO	26
6.1. Prueba de consistencia	27
6.2. Prueba del tiempo de rotura de la emulsión asfáltica	28
6.3. Prueba de resistencia a la tracción	29

6.4. Prueba de resistencia a la compresión.....	31
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
7.1. Prueba de consistencia.....	33
7.2. Prueba del tiempo de rotura de la emulsión asfáltica.....	35
7.3. Prueba de resistencia a la tracción	37
7.4. Prueba de resistencia a la compresión.....	38
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Círculo de Möbius Composición Química del PET	21
Figura 2. Código de identificación de plásticos.....	21
Figura 3. Composición Química del PET	22
Figura 4. Distribución granulométrica de las partículas de PET	23
Figura 5. Procedimiento Ensayo de Consistencia	27
Figura 6. Consistencia Óptima	27
Figura 7. Ensayo de Rotura.....	28
Figura 8. Prueba de Rotura	28
Figura 9. Procedimiento Ensayo de Tracción	29
Figura 10. Esquema prueba de Tracción	30
Figura 11. Postura de la muestra en el equipo universal	30
Figura 12. Procedimiento prueba de Compresión	31
Figura 13. Esquema prueba de Compresión	32
Figura 14. Esquema prueba de compresión en el equipo	32
Figura 15. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para la lechada asfáltica de 13mm.....	33
Figura 16. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para la lechada asfáltica de 10mm.....	33
Figura 17. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para la lechada asfáltica de 10mm	34
Figura 18. Registro Fotográfico Falla del PET	35
Figura 19. Tiempo de rotura para las lechadas asfálticas	36
Figura 20. Lecturas de absorción de la emulsión asfáltica en las lechadas con y sin PET para la determinación del tiempo de rotura.....	36
Figura 21. Resistencia a la tracción indirecta vs Tipo de lecha asfáltica	37
Figura 22. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-13.....	38
Figura 23. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-10.....	38
Figura 24. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-5.....	39
Figura 25. Rigidez de las lechadas asfálticas	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificación INVIAS. Artículo 411	20
Tabla 2. Especificaciones para agregados INVIAS - Artículo 433 del 2013	24
Tabla 3. Ensayos de la caracterización física de los agregados	24
Tabla 4. Distribución granulométrica LA-13	25
Tabla 5. Distribución granulométrica LA-10	25
Tabla 6. Distribución granulométrica LA-5	25

1. RESUMEN

El desarrollo económico de un país está directamente relacionado con el estado de su red vial y en específico de las estructuras de pavimentos. Por lo anterior, es importante generar prácticas en la ingeniería civil que aporten a la conservación y preservación de los pavimentos. Razón por la cual el presente trabajo tiene como principal objetivo estudiar el comportamiento de las mezclas de lechadas asfálticas con la incorporación de residuos de Polietileno de Tereftalato comúnmente conocido como PET, abreviatura que se usará en el resto del texto.

En este trabajo se realizaron tres tipos de lechadas asfálticas correspondientes a la especificación del Instituto Nacional de Vías, en adelante INVIAS, - Artículo 433 del 2013 denominadas: Lechada Asfálticas (en adelante LA)-13, LA-10 y LA-5, entendiendo que el número que la acompaña se relaciona con el espesor de la mezcla, en este caso serían 13,10 y 5mm. Posteriormente se realizaron las mismas mezclas las cuales fueron modificadas reemplazando el 100% del agregado que pasa por el tamiz No. 8 (2,36 mm) y se retiene en el tamiz No.16 (1,15 mm) por PET molido. Las mezclas contienen materiales como emulsión asfáltica, material granular, cemento como llenante mineral y agua, las cuales fueron sometidas a pruebas de consistencia, tiempo de rotura, resistencia a la tracción y resistencia a la compresión. Los resultados arrojados por las pruebas fueron comparados para determinar el efecto del PET en las muestras de las lechadas asfálticas donde se evidenció, menor fluidez, disminución en el tiempo de rotura, menor resistencia a la tracción y compresión respecto a la mezcla convencional. Finalmente se concluyó que el tamaño de partícula reemplazada para el agregado no es la indicada para una lechada asfáltica.

2. INTRODUCCIÓN

Los cambios climáticos, las variaciones de tráfico y el tipo de vehículo generan afectaciones en la capa superficial de las vías, razón por la cual, con el pasar del tiempo, se evidencian problemas estructurales, agrietamientos, desgastes y desprendimientos del material pertenecientes a la capa de rodadura, razón por la cual se generan problemas de movilidad como son una disminución en la velocidad del flujo vehicular y, en presencia de escorrentías, problemas en la condición de agarre de las llantas de los automóviles en el asfalto. Sin embargo, estas complicaciones en la vía se pueden prevenir realizando de manera oportuna y periódica las acciones de mantenimiento que sean necesarias.

Es así como el mantenimiento de carreteras mejora la circulación de los vehículos, reduce el riesgo de accidentalidad y disminuye el consumo de combustibles y emisiones de gases de efecto invernadero. Una reciente investigación por parte de la Asociación Española de Carreteras (ARC), concluye que hasta el 94% de los accidentes viales son producidos por el mal estado de la vía. Al respecto, el Instituto Nacional de Vías reportó que en Colombia solo el 13.61% de los 7.019 km de la red vial primaria se encuentra en perfectas condiciones, adicionalmente, señala que del 100% de los tramos pavimentados solo el 47.19% tienen una terminación apropiada¹. Por otra parte, la secretaria de movilidad en 2018 reportó el estado de la malla vial en la capital, se notificó que el 57% se encontraban pavimentadas, y el 43% sin pavimentar².

Actualmente los tratamientos superficiales se han convertido en un tema alternativo de investigación debido a la cantidad de benéficos que aporta, en este caso la investigación se enfoca en el polietileno de tereftalato como sustituto del 100% de la fracción correspondiente al agregado de partículas N16. (1.15mm) para el diseño de mezcla, ya que esta se compone de agregados pétreos, agua, emulsión asfáltica, cemento hidráulico y aditivos si se requiere; es aplicada en la superficie de la vía regenerando la capa de rodadura.

Un ejemplo específico de uso de la Lechada Asfáltica como capa de protección de vías terciarias en vías municipales, el caso del municipio de Chía, Cundinamarca, en el cual por parte de la alcaldía municipal se intervinieron las redes terciarias del municipio, para evitar su deterioro y

¹ Situación que tuvo un amplio despliegue en la prensa nacional. Ver <https://www.larepublica.co/economia/solo-13-de-red-vial-primaria-esta-en-muy-buen-estado-2819046>

² Ver más en <https://concejodebogota.gov.co/el-mal-estado-de-la-malla-vial-de-la-ciudad-afecta-nuestra-calidad-de-vida/cbogota/2020-10-28/175437.php>

mejorar la movilidad en las veredas del municipio. Los resultados de este proyecto fueron exitosos debido al rápido mantenimiento de las vías, en corto tiempo y bajo costo, permitiendo una mejora en la movilidad para la comunidad.

No obstante, el diseño del Lechada Asfáltica debe obedecer a la normativa o especificación vigente de cada país. Estas normas y especificaciones contienen una serie de parámetros y características específicas que debe cumplir el diseño de la lechada asfáltica. En Colombia las especificaciones con la que se evalúa y se establece los diseños de vías y todo aquello relacionado a pavimentos corresponde a la norma INVIAS versión 2013.

Esta investigación plantea una alternativa de solución al deterioro de la capa de rodadura o capa superficial de la vía, por medio de la lechada asfáltica con PET triturado debido a sus grandes propiedades y eficiencia en el mejoramiento de la capa superficial, cabe destacar que no genera contaminación debido a que se aplica en frío sin generar emisiones, además es de fácil y rápida aplicación.

Adicionalmente, este proyecto hace un aporte a la solución de una de las problemáticas a nivel mundial usando el polietileno tereftalato (PET) triturado como agregado ya que, el plástico se ha convertido en una amenaza para la especie humana, debido a que este tarda de 100 a 1000 años en deteriorarse y solo el 1% de la industria está comprometida con la producción de plásticos biodegradables. El problema es que uno de los destinos finales de este material es el mar con un alto impacto a diferentes ecosistemas.

El tipo de plástico más utilizado es el polietileno tereftalato (PET), la mayoría de los textiles y envases utilizados por las empresas e industrias son fabricados en este material debido a su fácil manejo, resistencia, conservación y fácil adquisición. La elaboración de este material se ha incrementado en los últimos 50 años, produciendo en la última década más plástico que en toda la historia de la humanidad ya que se produce y se manipula a diario. En 2020 la producción total de plásticos fue alrededor de los 367 millones de toneladas de plástico, y Greenpeace realizó un informe el cual indica que en Colombia en el año 2020 el consumo de plástico fue de 1.250.000 toneladas, indicando que en Bogotá se producen cerca de 7.500 toneladas de plástico al día e indicando que cerca del 60% de los desechos diarios en la ciudad corresponden a este material. Las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) estima que en el sector de alimentos y bebidas demanda alrededor de 49.000 toneladas en polietileno tereftalato (PET), de las cuales solo se recicla el 30%. El 3 de julio del 2019 la ONU dio a conocer que: “Alrededor de 13 millones de toneladas de plástico son vertidas en los océanos cada año, afectando la biodiversidad, la

economía y la salud de las personas; un millón de botellas de plástico son compradas cada minuto. Casi el 70% o más van al medio ambiente o a vertederos, produciendo al año 300 millones de toneladas de residuos plásticos, lo que equivale al peso de toda la población humana.”³

³ Tomado de [¿Cuánto tiempo tardan los plásticos en descomponerse? \(eltiempo.com\)](http://eltiempo.com)

3. DESCRIPCIÓN

3.1. Objetivos

3.1.1. General

Analizar la composición y el desempeño en el laboratorio de lechadas asfálticas utilizadas para pavimentos con materiales convencionales como la incorporación de residuos de polietileno de tereftalato.

3.1.2. Específicos

Escoger y realizar tres tipos de mezcla de lechadas asfálticas para poder realizar una comparación de los parámetros a analizar

Analizar la consistencia, rotura, tracción y compresión de tres tipos de lechada asfáltica (LA) para observar su comportamiento y analizar el efecto del PET como agregado.

3.2. Alcances

El proyecto se enfocará directamente al comportamiento del PET sustituyendo el 100% del agregado correspondiente al tamaño del tamiz N.16 (1.15mm).

3.2.1. Limitaciones

El proyecto cuenta con una serie de limitaciones enfocadas directamente en la mezcla de las lechadas asfálticas que se muestran a continuación:

- Se analizaron tres tipos de lechada asfáltica correspondientes a la especificación INVIAS- Artículo 433 del 2013, denominadas: LA-13, LA-10 y LA 5.
- Se realizaron los ensayos con un tipo de emulsión asfáltica de las exigidas en la especificación INVIAS – ARTICULO 433 del 2013, correspondiente a la emulsión catiónica de rompimiento lento super estable (CRL-1h).
- El tamaño del agregado PET corresponde al material que pasa por el matiz No. 8 correspondiente a partículas de (2.36mm) y que se retiene en el tamiz N.16 en el cual se almacenan las partículas de 1.15mm, debido a que en el proceso de trituración varía el tamaño de partículas.

3.2.2. Justificación

El proyecto está enfocado en solucionar la necesidad que se exige en Colombia correspondiente al mantenimiento de corredores viales posterior al proceso de construcción y durante su operación, siendo necesario realizar un mantenimiento periódico para la conservación de la vía de forma rápida, económica y duradera.

El no realizar el debido mantenimiento acorta la vida útil de la carpeta asfáltica a causa del deterioro que esta sufre en el proceso de operación de la vía. Esto genera la necesidad de ejecutar labores que implican el retiro de la capa de rodadura y su posterior reposición, conllevando mayores costos en el mantenimiento general de esta infraestructura, aunada a los inconvenientes que se presentan para los usuarios de la vía durante los periodos de tiempo en que se realizan estos trabajos. Por lo anterior, la alternativa para mantener los corredores viales en excelente estado, prolongando su vida útil y garantizando la seguridad de sus usuarios, es la implementación y uso de lechadas asfálticas, ya que con la aplicación de esta mezcla se aporta una serie de propiedades como la protección, rehabilitación, impermeabilización y rejuvenecimiento de la capa de rodadura a un bajo costo y de forma práctica.

El segundo lugar, se busca generar un aporte a un problema mundial como es la contaminación por materiales plásticos, en razón a que la especie humana está siendo amenazada y amenaza la estabilidad ecológica, ya que no se percata, en buena medida, del mal uso de los envases plásticos, ni de las afectaciones que se generan en el medio ambiente, debido a que estos envases en alto porcentaje llegan a los mares, contaminando los ecosistemas, los cuales son recursos naturales indispensables para la vida humana y de otras especies.

Algunas de las características del PET material con el que se fabrican los envases plásticos es que es reutilizable y reciclable, su propiedad más relevante es la resistencia. Sin embargo, este material no es reciclado de manera correcta y después de su uso principal suele desecharse en los diferentes ambientes del planeta sin hacer una disposición adecuada del mismo. En consecuencia, de la afectación que causa el no reutilizar los envases plásticos, esta investigación ofrece un análisis acerca de los posibles usos adicionales al PET en la industria, el cual se trata de triturar este tipo de plástico para ser utilizado como parte de los agregados del diseño de la lechada asfáltica.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Nuevas tendencias

En diferentes contextos se ha recurrido al uso de plásticos en la elaboración de materiales para la construcción y mantenimiento de vías. En Corea se recomienda el uso de lechadas asfálticas en pavimentos de asfalto desgastado en carreteras nacionales debido a su rentabilidad, la extensión de la vida útil del pavimento y la mejora del rendimiento de la superficie, así como la fricción y el ruido. Baesens et al. (2003) indican cómo recientemente se está utilizando una emulsión modificada con polímeros para mejorar la estabilidad de las mezclas de tratamiento de superficies, y en un estudio, evalúan las influencias del tiempo de curado. Las agencias de carreteras siempre enfrentan el desafío de determinar el momento óptimo para el mantenimiento preventivo, particularmente en China, donde no hay indicadores de condición diseñados para determinar el momento adecuado para aplicar la lechada asfáltica; algunos de los indicadores de condición definidos incluyen relación de fisuras, profundidad de surco, índice internacional de rugosidad y coeficiente de fuerza lateral; también se han realizado las pruebas de carretera en la provincia de Hebei, China, con lechada asfáltica en diferentes horarios y se han recopilado datos sobre el estado del rendimiento del pavimento demostrando una mejoría y una relación costo-beneficio.

En esta línea de implementación de nuevas tecnologías y materiales para las vías, en la provincia oriental de Arabia Saudita, se han realizado investigaciones con el objetivo de analizar el rendimiento de las mezclas de lechada asfáltica que se utilizan y descubrir problemas asociados con las mezclas utilizadas. En un estudio de Chen, Williams & Mervyn (2014) se adoptó la prueba de abrasión en húmedo para evaluar el desempeño del sello de la mezcla. El análisis de varianza reveló que el tipo de agregado, el contenido de cemento y la temperatura tienen un efecto significativo sobre el valor de desgaste a un nivel significativo del 5%, mientras que el tipo de emulsión y el contenido de partículas finas tienen un efecto significativo.

Por otra parte, los métodos de lechadas asfálticas, son tratamientos rentables que aumentan la longevidad de los pavimentos, adicionalmente la incorporación de materiales reciclados como el pavimento de asfalto recuperado (Conocido con las siglas RAP del inglés Reclaimed Asphalt Pavemen) en el pavimento de asfalto es considerado como un factor que ayuda a reducir aún más los costos y el consumo de energía. En un análisis Chen, D.-H., D.-F. Lin, and H.-L. Luo (2003), en el análisis de los costos en el mantenimiento preventivo, indican que el uso de RAP

como agregado en el sello de lechada, redujo los costos hasta en un 14%, realizando el uso de rellenos alternativos en lugar del cemento costoso y de alto consumo energético que genera una disminución en el problema medioambiental. Asimismo, como lo señalan Jahren & Civil (2011), estos subproductos minimizarán sus depósitos y, de manera paralela, disminuirán el uso de la cantidad correspondiente de cemento ahorrando materias primas y energía consumida para su producción.

Por otra parte, el mantenimiento preventivo de carreteras proporciona a los usuarios viajes más seguros y cómodos y, se ha demostrado, que reduce los costos generales de transporte cuando los tratamientos de mantenimiento se seleccionan y se programan adecuadamente. Como tal, las agencias de infraestructura han expresado un interés creciente en la selección de materiales y el momento ideal para las actividades de mantenimiento de la infraestructura de transporte existente. Como lo evidenciaron Hajj et al (2011), el rendimiento a largo plazo de una carretera se asocia, en gran medida, a las condiciones técnicas de la carretera, el tráfico, las propiedades del material del pavimento, las condiciones ambientales y, de gran importancia, el historial de mantenimiento. Asimismo, la evaluación del rendimiento del pavimento a largo plazo y la rentabilidad de las escamas de lechada aplicadas a pavimentos flexibles nuevos y existentes se realizó en la región del condado de Washoe, Nevada, donde los resultados fueron satisfactorios en relación a la aplicación, tiempo y costo.

En Colombia, una carretera que contiene una mezcla de asfalto modificado con material plástico reciclado posconsumo, se encuentra en el municipio de Dibulla, en La Guajira. Alrededor de 1 tonelada de plástico reciclado fue utilizada en este proyecto. La intervención de 1.634 metros de longitud por 3.6 metros de ancho y 10 centímetros de espesor cuenta con una mezcla asfáltica que reúne asfalto modificado con material plástico reciclado posconsumo, lo que implicó que aproximadamente 1 tonelada de este material reciclado tuviera una nueva vida útil.

Adicionalmente, en España, la universidad de Madrid ha venido investigando y tratando una innovadora mezcla asfáltica más resistente y sostenible que las convencionales, gracias a la incorporación de residuos plásticos en su fabricación. Se trata de un asfalto a cuya composición se han añadido cada uno de los siguientes residuos de un modo independiente: neumáticos fuera de uso (NFU), tapones de polipropileno, envases de polietileno y perchas de polietileno para asfaltar un total de dos kilómetros de un tramo de la M-300 en los accesos a Alcalá de Henares⁴.

⁴ Ver <https://www.compromisorse.com/rse/2014/02/21/tapones-envases-y-perchas-cobran-una-nueva-vida-en-el-asfalto/>

En sus hallazgos destacan que las mezclas que incluyen residuos poliméricos en su composición obtienen una mejora notable en la resistencia a las deformaciones plásticas con respecto a la mezcla asfáltica convencional, lo que permite que tengan un mejor rendimiento importante con altas temperaturas o tráfico pesado lento. Una de sus mayores ventajas es hacer posible que se pueda reducir el volumen de materia prima empleada en su fabricación, como los áridos naturales y, por otra parte, proporciona nuevas vías de reutilización para grandes volúmenes de residuos plásticos a través de un método sencillo que se puede incorporar a cualquier planta asfáltica con un alto impacto de recuperación ambiental.

En la India, las carreteras construidas de residuos plásticos aparecieron hace casi dos décadas, pero apenas se está sistematizando su implementación en el pavimentado, resaltando que las carreteras pavimentadas con asfalto plástico evitan la aparición de grietas y baches. El proceso patentado de Vasudevan consiste en el secado y la trituración de envases de plástico desechados, fabricados esencialmente de polietileno, polipropileno y polietileno en piezas de dos a cuatro milímetros⁵. La tasa de reciclaje de la India es mucho mayor que la media global del 20% y su consumo de 11 kg (en 2014-15) es menos de la mitad que en el resto del mundo⁶.

Finalmente, en septiembre de 2018, los habitantes de la ciudad holandesa de Zwolle estrenaron el primer carril-bici fabricado por plástico reciclado. Unos treinta metros de calzada para los que se utilizó una cantidad de plástico, la innovación en construcción de carreteras es muy positiva, se han realizado proyectos con diversos materiales, como neumáticos fuera de uso o residuos de construcción y demolición⁷. En conclusión, en la India, Australia, Indonesia, Reino Unido o Estados Unidos se construyen desde hace años calzadas con algún porcentaje de plástico reciclado y en Colombia ya se está implementando, como es el caso presentado de la Guajira. Todas estas obras en su composición incluyeron la mezcla de la emulsión con los restos de plástico, sobre todo de productos de embalaje compuestos por PET (polietileno tereftalato), PVC (poli cloruro de vinilo), PP (polipropileno) y HDPE (polietileno de alta densidad). En el proceso de preparación se destaca que, tras la recogida y clasificación, el plástico se limpia, seca y mezcla a unos 170° Celsius. Después se le añade el betún caliente, y la combinación resultante se dispone sobre la vía en capas, de forma similar a como se recubre con asfalto.

⁵ Ibíd

⁶ Tomado de: <http://www.rocagallery.com/es/less-plastic-better-roads>

⁷ Tomado de: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/rodar-por-carreteras-recicladas-de-plastico/>

5. Marco Teórico

5.1. Tratamientos superficiales

El tratamiento superficial hace referencia a la aplicación de uno o más riegos de emulsiones y agregados sobre la capa de rodadura. Estos tratamientos aportan una cubierta impermeable a la superficie existente o a la base granular, proporcionando, adicionalmente, una resistencia a la acción abrasiva del tránsito.

5.2. Clasificación de las emulsiones asfálticas:

Las emulsiones asfálticas se componen de asfalto con agua y emulsificante. Dada la baja viscosidad de la emulsión se pueden fabricar mezclas asfálticas a frío para pavimento. Es decir, a temperaturas menores a 100°C. Así mismo, las emulsiones asfálticas se pueden clasificar en función de la velocidad de rompimiento y en función de la carga eléctrica.

➤ *Emulsiones de Rotura Rápida (RR):*

Los grados de rotura rápida se han diseñado para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir de la condición de emulsión a la de asfalto. Su uso principal es para aplicaciones de riego, como tratamientos superficiales, sellados con arena y tratamientos de superficie.

➤ *Emulsiones de Rotura Media (RM) :*

Las emulsiones de rotura media se diseñan para ser mezcladas con agregados graduados. Pues esto debido a que estos grados de emulsiones se formulan para no romper inmediatamente después del contacto con el agregado, ellos pueden utilizarse para recubrir una amplia variedad de agregados graduados. Las mezclas con emulsiones de rotura media pueden mantenerse trabajables por lapsos que van de algunos minutos a varios meses, según la formulación. Las mezclas se elaboran en mezcladora y planta ambulante o, en el camino.

➤ *Las emulsiones de Rotura Lenta (RL):*

Son diseñadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura buen cubrimiento con grados densos, de agregados con un alto contenido de finos. Su aplicación se extiende, además de la pavimentación, a otros usos industriales. Para tales propósitos, la viscosidad de las emulsiones es baja y puede ser reducida aún más con la adición de agua.

➤ *Aniónicas:*

Poseen cargas negativas y tienen, por este hecho, afinidad por los materiales pétreos electropositivos como las calizas y basaltos.

➤ *Catiónicas:*

Presentan cargas eléctricas positivas y tienen buena afinidad con los materiales pétreos electronegativos, como los de naturaleza silicosa (cuarzo).

Una de sus ventajas es el uso es de manera efectiva para el mantenimiento preventivo o correctivo de pavimentos, así mismo se aplica como capas delgadas de rodadura, sobre bases estabilizadas en construcción de vías, para recuperar o proveer fricción superficial al pavimento, por lo tanto, mejora la seguridad de la vía, permitiendo una pronta reapertura del pavimento al tráfico, lo que impide que el agregado este suelto, cuentan con una textura superficial y resistencia a la fricción.

5.3. Lechada asfáltica (LA)

Como lo menciona Herrera San Román (2007) la lechada asfáltica fue aplicada por primera vez en Alemania en la década de los años 30, pero tuvo mayor desarrollo en los años 60. Es un sistema de revestimiento de pavimentos de aplicación en frío compuesto por una mezcla de emulsión (normalmente de rompimiento lento), agregados seleccionados, agua y llenantes minerales tipo cemento o cal, distribuidas uniformemente sobre la superficie de un pavimento existente en espesores de 3 a 13 mm.

Componentes:

➤ **Material asfáltico:**

Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento super estable (**CRL-1h**) o Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento super estable modificada con polímeros (**CRL-1hm**), según las especificaciones del INVIAS en el artículo 433 del 2013 correspondiente a lechadas asfálticas. Los porcentajes de emulsión asfáltica utilizada oscilan entre el 8% y el 14%.

Tabla 1. Especificación INVIAS. Artículo 411

ESPECIFICACIÓN INVIAS ARTICULO 411 - TABLA 411-1					
CARACTERISTICA	Unidades	Noma Ensayos	Emulsión		Resultado
			Min	Max	
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	S	E- 763	-	100	26
Contenido de agua en volumen	%	E-761	-	43	40,9
Estabilidad de almacenamiento (24 horas), Sedimentación a los 5 días	%	E-764	-	1 y 5	0,08 - 1,70
Destilación Contenido de asfalto residual	%	E-762	57		59,1
Carga de partícula	-	E767	Positiva		Positiva
Tamizado. Retenido tamiz No. 20	%	E-765	-	0,1	0
Mezcla con cemento	%	E-770	-	2	1,2
pH		E-768	-	6	1,92
Ensayos sobre el residuo de destilación					
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	E-706	60	100	60,7
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	40	-	97
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	97,5	-	99,96

Nota. En la tabla No.1 se encuentran las especificaciones requeridas para la emulsión asfáltica.

➤ Agua:

El agua debe ser limpia y estar libre de materia orgánica, puede ser agua potable, lo importante es que su calidad no debe afectar el proceso de elaboración, tiempo de rotura y curado. Los porcentajes utilizados oscilan del 8% al 14%.

➤ El plástico:

Los plásticos son materiales orgánicos puesto que las materias primas que se utilizan para producir plástico son productos naturales como la celulosa, el carbón, el gas natural, la sal y el petróleo, hace referencia a la maleabilidad, o plasticidad, del material durante la fabricación, lo que permite fundirlo, comprimirlo, prensar y también se puede obtener diferentes formas, como láminas, fibras, placas, tubos, botellas, cajas, entre otros.

Actualmente se utiliza la tipología denominada 3R “Reusar, Reducir y Reciclar”. Las tres erres aparecieron representadas en un logo para simbolizar el reciclaje por primera vez en 1970. Se trata del anillo de Möbius. este símbolo internacional indica que los materiales con los que ha sido fabricado un producto pueden ser reciclados. Cuando el anillo aparece con un símbolo de porcentaje en el medio (%), significa que dicho porcentaje especificado será reciclable.

El diseño del círculo de Möbius se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Círculo de Möbius.

Fuente: <https://www.inforeciclaje.com/simbolo-reciclaje.php>

El símbolo del Punto Verde fue creado en 1991 en Alemania. En 1994 los Estados Miembros decidieron que fuera la marca para la Directiva Europea de Envases y Residuos de Envases. Los productos que lo llevan cumplen la Ley 11/97 de Envases y Residuos de Envases.

En cuanto a los símbolos que se utilizan en el plástico, debido a sus variedades en composición y reciclaje llevan un número distintivo en el interior del triángulo, un número entre el 1 y el 7, que sigue la clasificación del sistema de identificación americano SPI (siglas de Society of Plastics Industry) y, bajo él, unas letras que nos permiten reconocer a simple vista de qué tipo de plástico están hechas cada botella como lo muestra la Figura 2.



Figura 2. Código de identificación de plásticos

Fuente: <https://www.inforeciclaje.com/simbolo-reciclaje.php>

Polietileno de tereftalato (PET)

El polietileno tereftalato (PETE o PET) es un plástico liviano semirrígido y cristalino, este material contiene numerosos beneficios y funcionalidades, su principal característica es la resistencia al impacto, esta cualidad permite que sea empleado como envase para la protección de alimentos y líquidos, adicionalmente se debe tener en cuenta que su peso es bastante ligero y siendo un polímero, las moléculas de tereftalato del polietileno consisten en cadenas largas de unidades repetidas que sólo contienen el carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H), todos elementos orgánicos, siendo su fórmula química $(C_{10}H_8O_4)_n$.

La representación gráfica se muestra en la Figura 3.

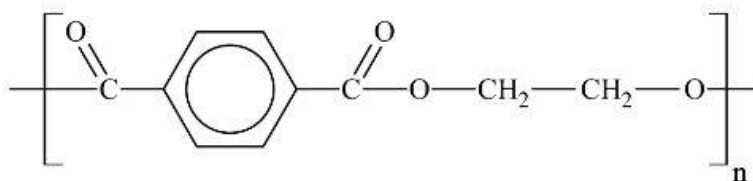


Figura 3. Composición Química del PET

Fuente: <https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/>

Como ventaja, los plásticos tienen una baja densidad, lo que puede resultar óptimo para muchos de sus usos, un aspecto interesante es que los plásticos son aislantes eléctricos, por lo que la corriente no se conduce a través de ellos, cuentan con propiedades únicas tales como: claridad, brillo, transparencia, barrera a gases u aromas, impacto, termoformabilidad, etc. Por otro lado, el precio del PET ha sufrido menos fluctuaciones que el de otros polímeros como PVC en los últimos 5 años. Cuentan con gran disponibilidad, ya que hoy se produce PET en Sur y Norteamérica, Europa, Asia y Sudáfrica. Finalmente, el PET puede ser reciclado dando lugar al material conocido como RPET (El material PET es una lámina PET Mono capa termo-formable y fabricada en su totalidad con material reciclado post-consumo). A pesar de que este tipo de materiales puede reciclarse, una vez que se ha reciclado no puede volver a utilizarse para el consumo humano; por otro lado, hay algunos plásticos que no pueden reciclarse debido al alto gasto que supondría, sin dejar a un lado que el uso de los plásticos trae alta contaminación, los equipos que se usan para este tipo de procesos son los de inyección soplado con biorientación que suponen una buena amortización en función de gran producción.

El PET fue seleccionado en esta investigación se utilizó como suplente del agregado de la granulometría que pasa por el tamiz N.8 y retiene en el tamiz N.16, es decir que el tamaño oscilla entre 2.36 mm y 1.15mm. Previamente se realizó una caracterización del material a través del molino mecánico por parte de la empresa Tecnopress Grafica S.A de la ciudad de Bogotá.

En la Figura 4 se presenta el análisis granulométrico del PET triturado, donde se evidencia que el tamaño máximo correspondiente a 3/8".

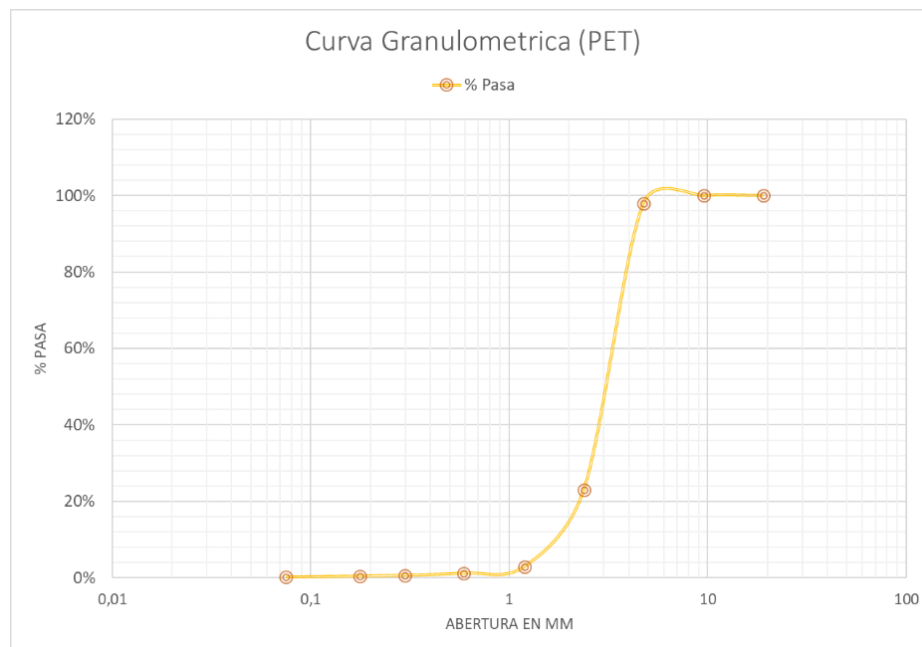


Figura 4. Distribución granulométrica de las partículas de PET

A partir de los resultados de la granulometría, se obtuvo un coeficiente de uniformidad 1.8 y 0.6 de curvatura respectivamente. Lo anterior indica que el material está mal gradado. Lo cual es coherente con la naturaleza del PET, dado que se trata de partículas con una forma cuadrada de pequeño espesor.

➤ Cemento (Llenante Mineral)

Como llenante mineral se utilizó el cemento Argos, este se puede usar para la fabricación de morteros, lechadas, en general para cualquier tipo de construcción es un producto versátil, con muchas posibilidades de aplicación.

➤ Agregados:

Los agregados seleccionados fueron provenientes de una cantera de la ciudad de Bogotá. En la tabla 2 y 3 se presentan los resultados de la caracterización física de los agregados. A partir de esos resultados, es posible evidenciar que los mismos cumplen con las especificaciones del INVIAS, artículo 433 del 2013 para la fabricación de lechadas asfálticas.

Tabla 2. Especificaciones para agregados INVIAS - Artículo 433 del 2013

TIPO DE GRADACIÓN	12,5	9,5	4,75	2.36	1.15	0.60	0.30	0.18	0,075
	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 80	No. 200
	% PASA								
LA-13	100	85 - 100	60 - 85	40-60	28-45	19- 34	12--25	7--8	4--8
LA-10		100	70-90	45-70	28-50	19-34	12--25	7--18	5--11
LA-5		100	85-100	65-90	45-70	30-50	18-30	10--20	5--15
LA-3			100	95-100	65-90	40-60	24-42	15-30	10--20
Tolerancia en producción sobre la fórmula de trabajo (+-)	4%			3%					1%

Tabla 3. Ensayos de la caracterización física de los agregados

Ensayos y especificaciones de agregados gruesos para la fabricación de mezclas asfálticas densas según el IDU									
Ensayo	Características	Especificación	Unidad	RCA	AN	Valores	Nivel de tránsito		
							NT1	NT2	NT3
Máquina de los Ángeles	Dureza	INV E-218	%	31.8	31.3	Máximos	30	30	25
Microdeval	Degradación	INV E-224	%	18	11	Máximos	25	25	20
Aplanamiento	Geometría	INV E-230	%	29.9	34.2	Máximos	25	20	20
Alargamiento	Geometría	INV E-230	%	9.3	12.3	Máximos	25	20	20

Para la fabricación de las lechadas asfálticas, se escogieron tres tipos correspondientes a las establecidas en el capítulo 4 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, según el artículo 433 del 2013 Lechada Asfáltica (LA), se encuentran los diferentes tipos de lechadas asfálticas por tipo de gradación. Para esta investigación se escogieron tres tipos de gradaciones diferentes para observar su comportamiento y poder realizar una comparación en su comportamiento. En las tablas de la número 4 a la número 6 se presentan las granulométricas de las tres lechadas de estudio.

- LA-13: Lechada asfáltica de 13mm de espesor
- LA-10: Lechada asfáltica de 10mm de espesor
- LA-5: Lechada asfáltica de 5mm de espesor

Tabla 4. Distribución granulométrica LA-13

Tamiz	Abertura (mm)	Pasa límite superior (%)	Pasa promedio (%)	Pasa límite inferior (%)	% Retenido
1/2"	12,5	100	100	100	
3/8"	9,5	100	92,5	85	7,5
4	4,75	85	72,5	60	20
8	2,36	60	50	40	22,5
16	1,15	45	36,5	28	13,5
30	0,6	34	26,5	19	10
50	0,3	25	18,5	12	8
80	0,18	18	12,5	7	6
200	0,075	8	6	4	6,5
Fondo					6

Tabla 5. Distribución granulométrica LA-10

Tamiz	Abertura (mm)	Pasa límite superior (%)	Pasa promedio (%)	Pasa límite inferior (%)	% Retenido
1/2"	12,5		0		
3/8"	9,5	100	100,0	100	100,0
4	4,75	90	80,0	70	20,0
8	2,36	70	57,5	45	22,5
16	1,15	50	39,0	28	18,5
30	0,6	34	26,5	19	12,5
50	0,3	25	18,5	12	8,0
80	0,18	18	12,5	7	6,0
200	0,075	11	8,0	5	4,5
Fondo					8,0

Tabla 6. Distribución granulométrica LA-5

Tamiz	Abertura (mm)	Pasa límite superior (%)	Pasa promedio (%)	Pasa límite inferior (%)	% Retenido
1/2"	12,5		0		
3/8"	9,5	100	100	100	100
4	4,75	100	92,5	85	7,5
8	2,36	90	77,5	65	15
16	1,15	70	57,5	45	20
30	0,6	50	40	30	17,5
50	0,3	30	24	18	16
80	0,18	20	15	10	9
200	0,075	15	10	5	5
					10

6. Fase experimental de laboratorio

Para los diseños de lechada asfáltica los lineamientos del INVIAS especifican los siguientes ensayos:

1. Consistencia con el cono y tiempo de rotura de las lechadas asfálticas según la especificación del ensayo INVIAS-777
2. Abrasión de las lechadas asfálticas por vía húmeda (WTAT) según la especificación del ensayo INVIAS-778
3. Medida del exceso de asfalto en lechadas asfálticas mediante la adhesión de arena en la máquina de rueda cargada (LWT) según la especificación del ensayo INVIAS-779.

Sin embargo, este proyecto de investigación generó una adaptación de los ensayos de compresión y tracción debido a que el campus universitario no cuenta con la maquinaria requerida para la aplicación de la norma de ensayos INVE 778 y INVE 779. Por tal razón, se realizó un análisis de los objetivos de dichas normas con el fin de sustituir estos ensayos realizando una serie de pruebas semejantes según disponibilidad de maquinaria en el laboratorio y sin que esto afecte los criterios de evaluación. Por tal motivo se generó una explicación clara del proceso de cada uno de los ensayos realizados, su funcionamiento y observaciones pertinentes.

Para el diseño de las lechadas asfálticas, se analizó la trabajabilidad de esta, basados en la consistencia y el tiempo de rotura de la emulsión asfáltica. Lo anterior para determinar la fórmula de trabajo de cada lechada, es decir, los porcentajes de agua, emulsión, cemento y agregado.

En el Anexo 1.1, se presentan los ejemplos de las dosificaciones para las lechadas LA-13, LA 10, LA-5, LA-13 PET, LA-10PET y LA-5PET respectivamente.

Cabe aclarar que se realizaron las pruebas para seis cantidades de lechadas asfálticas, tres con la mezcla convencional y tres con PET como reemplazo del 100% de los agregados del material que pasa por el tamiz N.8 (2.36mm) y se retiene en el tamiz N.16 (1.15mm), cabe aclarar que el material fue reemplazo en cuanto a masa y no en volumen.

6.1. Prueba de consistencia

El ensayo de consistencia se realiza bajo la especificación INVIAS, Artículo 777 del 2013 referente a “Consistencia con el cono y tiempo de rotura de las lechadas asfálticas. En la Figura 4. se presenta el procedimiento utilizado en el laboratorio. Adicionalmente, en la Figura 5 se presenta un esquema del ensayo, siendo que el umbral del resultado debe estar entre 2 y 3 cm.

Procedimiento:

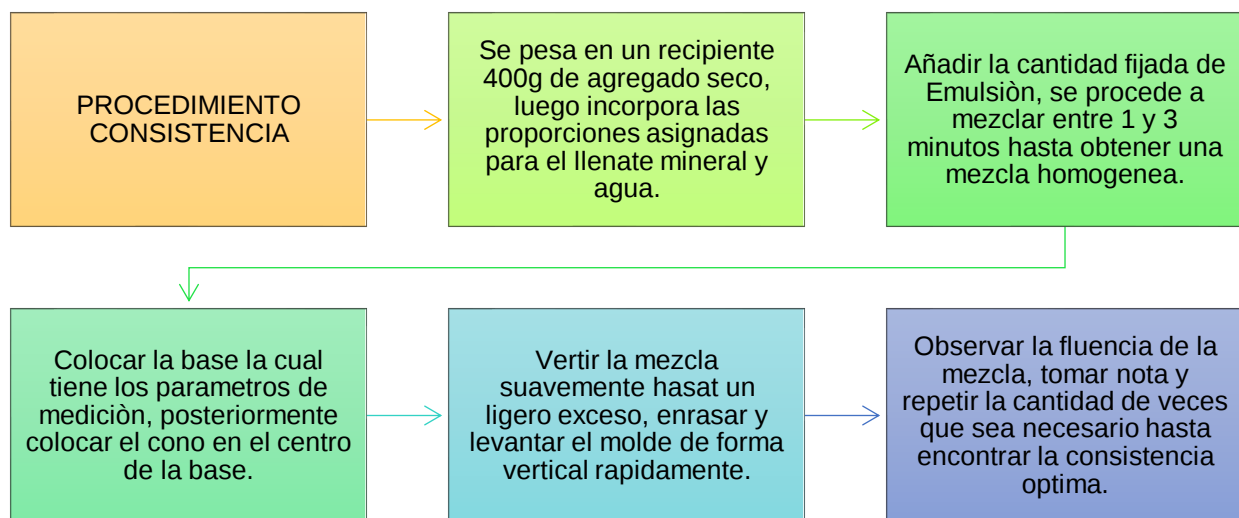


Figura 5. Procedimiento Ensayo de Consistencia

Nota: Para la interpretación de los siguientes datos se debe tener en cuenta que la norma indica que el grado de consistencia óptica es aquella mezcla que se desplaza entre 2 y 3 cm como se muestra en la Figura 5.

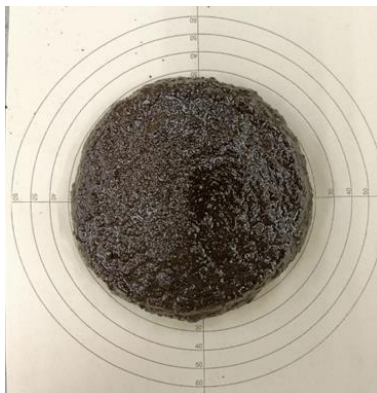


Figura 6. Consistencia Óptima

Se debe repetir los cálculos la cantidad de veces que sea necesario, hasta la obtención de la consistencia adecuada, como la ilustra la figura 6. Cabe destacar que se deben realizar teniendo en cuenta las variaciones del porcentaje de agua y emulsión, de igual manera se debe hacer para las mezclas con PET.

6.2. Prueba del tiempo de rotura de la emulsión asfáltica

El ensayo del tiempo de rotura se realiza bajo la especificación INVIAS, Artículo 777 del 2013, en este caso a la mezcla que presente una consistencia adecuada se le determinan las características vertiendo una muestra de la emulsión sobre una almohadilla de 150 mm (6”), transcurridos 15 minutos se debe presionar la superficie de la lechada con una toalla, si el papel no queda manchado de un color marrón se considera que la lechada ha alcanzado la rotura, el tiempo requerido para que el papel no sea manchado, se presenta como tiempo de rotura de la emulsión.

Procedimiento:

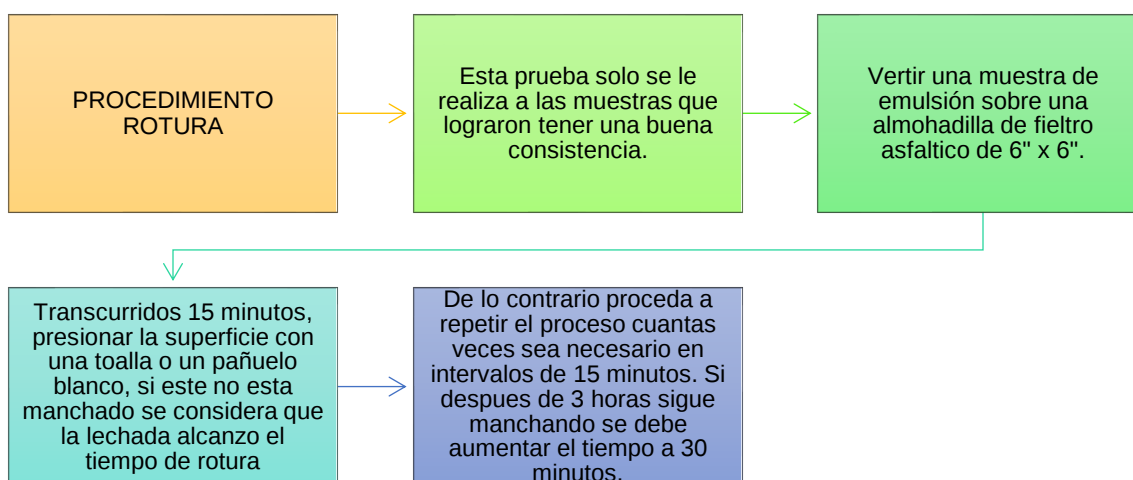


Figura 7. Ensayo de Rotura

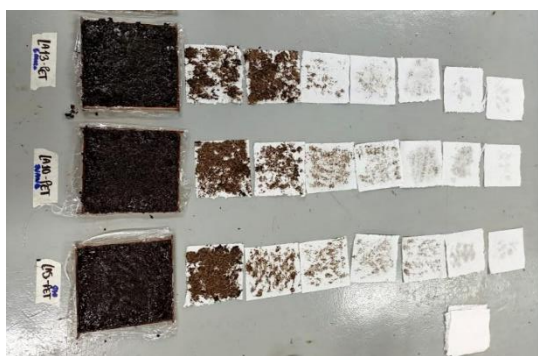


Figura 8. Prueba de rotura

6.3. Prueba de resistencia a la tracción

La prueba de resistencia a la tracción se realiza con el fin de determinar la calidad de la mezcla de las lechadas asfálticas además de la tracción entre partículas, es decir la pérdida de material o el desgaste generado en las probetas como resultado de una carga aplicada hasta llegar a su resistencia máxima.

Este ensayo consiste en generar una carga axial programando el equipo multiusos para el ensayo de CBR el cual ejerce una presión a una velocidad de penetración constante de 1.27 mm por minuto hasta llegar a la ruptura. La fórmula empleada para realizar el cálculo de la tracción indirecta se muestra en la Fórmula 1. Este proceso para todas probetas a analizar con relación 2:1, donde tendrá un diámetro de 5 cm con una altura de 2.5 cm, cabe destacar que el ensayo solo se aplica a la mezcla que cumple con la consistencia adecuada. Es decir que se deben realizar 6 pruebas en total, donde 3 probetas pertenecen a la mezcla normal, y las restantes vienen con PET como parte del agregado.

$$RTI = \frac{2000 * P}{\pi * D * H} \quad (1)$$

Donde:

RTI: Resistencia a la tracción indirecta. (kPa)

P: Carga máxima de ruptura. (N)

D: Diámetro de la probeta. (mm)

H: Altura de la probeta. (mm)

Procedimiento:

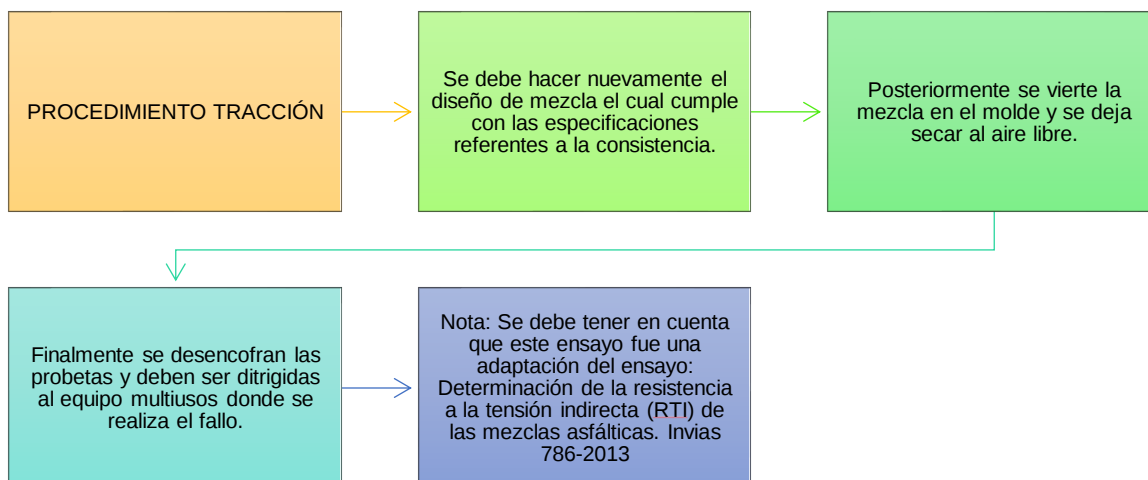


Figura 9. Procedimiento Ensayo de Tracción

A continuación, en la Figura 10 y 11 se relaciona el esquema del comportamiento al que serán sometidas las probetas respectivamente.

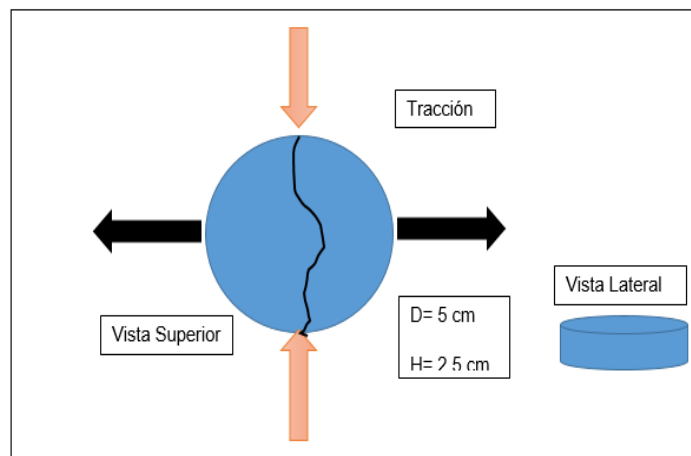


Figura 10. Esquema prueba de Tracción



Figura 11. Postura de la muestra en el equipo

6.4. Prueba de resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión se realiza con el fin de determinar la rigidez de las lechadas asfálticas y obtener una idea de la cohesión de las partículas, razón por la cual no se llevaron hasta la ruptura.

Este ensayo consiste en generar una carga axial programando el equipo multiusos para el ensayo de CBR el cual ejerce una presión a una velocidad de penetración constante de 1.27 mm por minuto sin llegar a la ruptura y posteriormente hallar el cálculo del esfuerzo máximo a través de la Fórmula 2. El ensayo se le aplica a una serie de probetas con relación 2:1, donde tendrá un diámetro de 5 cm con una altura de 10 cm, cabe destacar que el ensayo solo se aplica al diseño de mezcla que cumple con la consistencia adecuada. Es decir que se deben realizar seis pruebas donde tres probetas tienen el diseño normal, mientras que las restantes vienen con PET como parte del agregado.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde:

F : Esfuerzo máximo. (kg/cm^2)

A : Area de la cara de la probeta en la se aplica el esfuerzo. (cm^2)

Procedimiento:

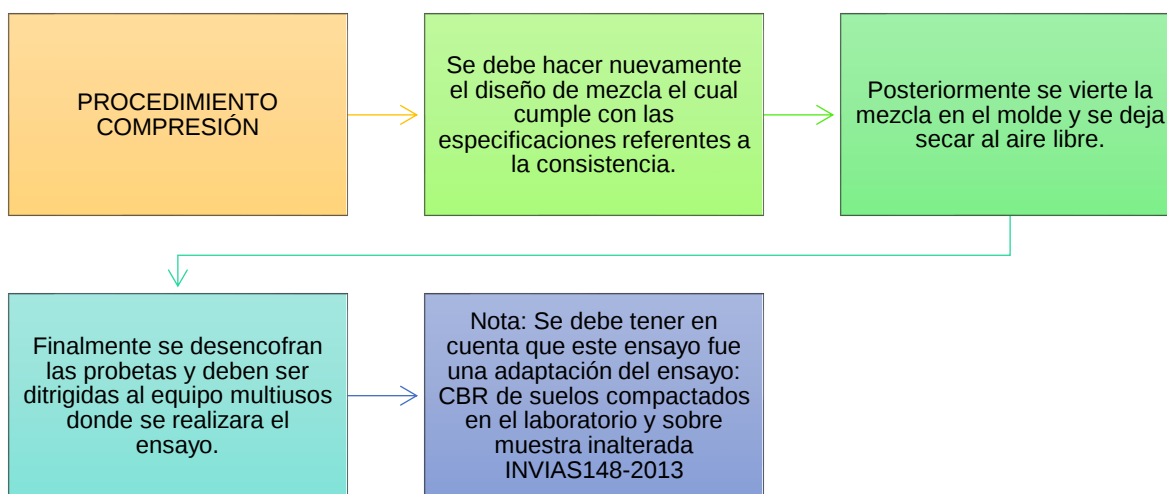


Figura 12. Procedimiento prueba de Compresión

A continuación, en la Figura 13 se relaciona el esquema del comportamiento al que serán sometidas las muestras

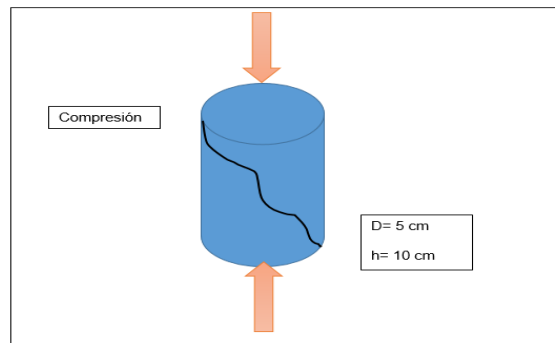


Figura 13. Esquema prueba de Compresión

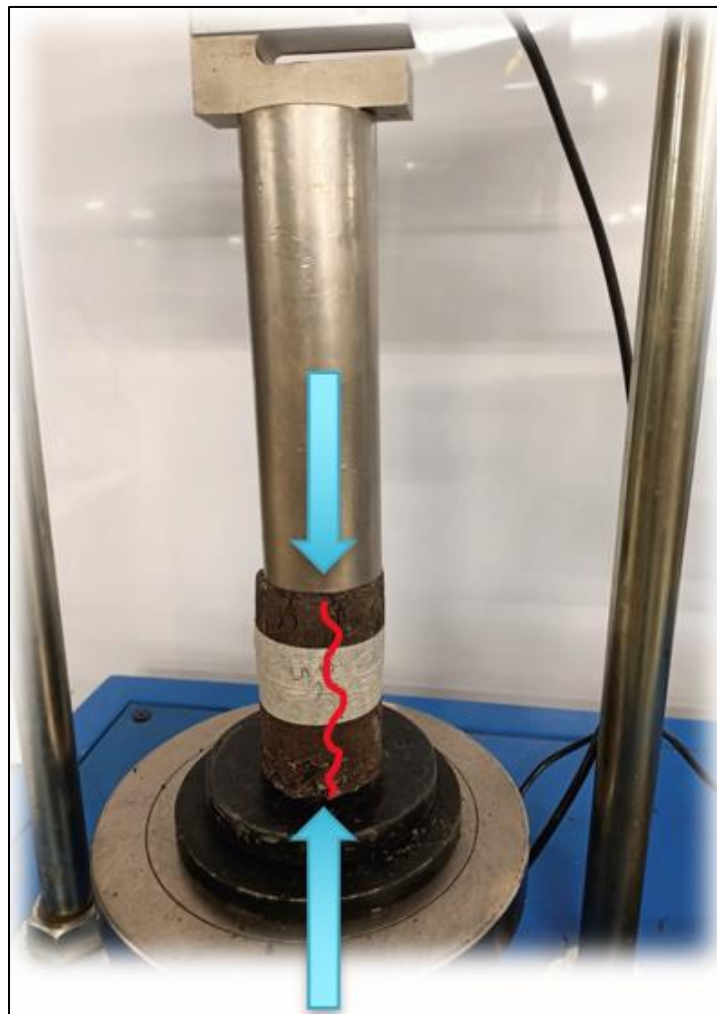


Figura 14. Esquema prueba de compresión en el equipo

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se consolidan los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas a los diferentes tipos de lechada asfáltica y posteriormente ser analizado su comportamiento en los diferentes escenarios.

8.1. Prueba de consistencia

En La Figura 14 a 16 se presentan los resultados de las pruebas de consistencia para las lechadas asfálticas LA-13, LA-10 y LA-5, respectivamente. Cabe destacar que las lechadas que tienen PET son las líneas que tienen las figuras sin relleno. Los resultados de consistencia corresponden a evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua. La especificación del artículo del INVIAS 433-2013 recomienda que el intervalo de fluidez para proporcionar una adecuada trabajabilidad de la lechada asfáltica debe estar entre los 2 y 3 cm. A partir de los resultados es posible evidenciar que las proporciones de agua y emulsión se incrementan en las lechadas asfálticas con PET, debido a que este, por tener menor densidad que el agregado original, incrementa el volumen.

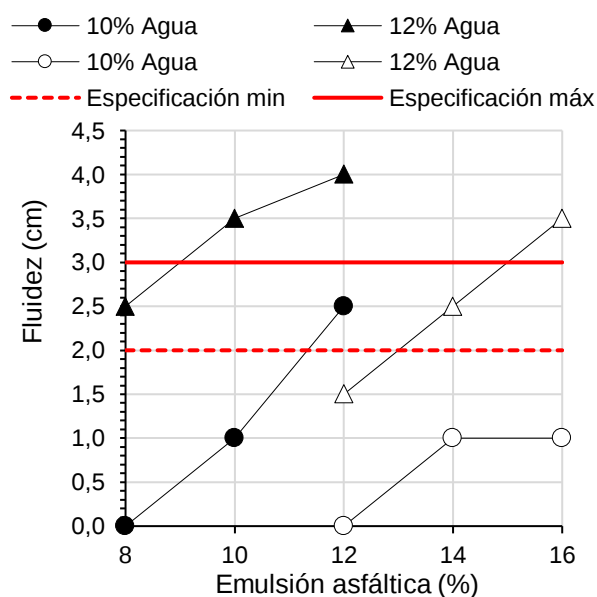


Figura 15. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para LA-13.

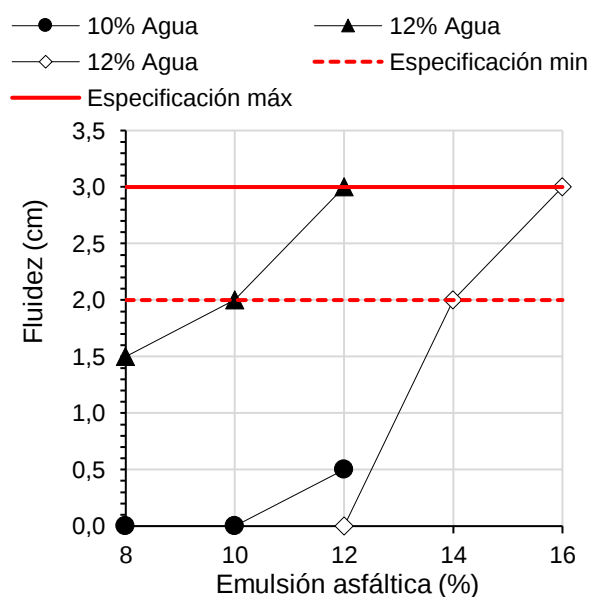


Figura 16. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para LA-10.

■ LA sin PET □ LA con PET

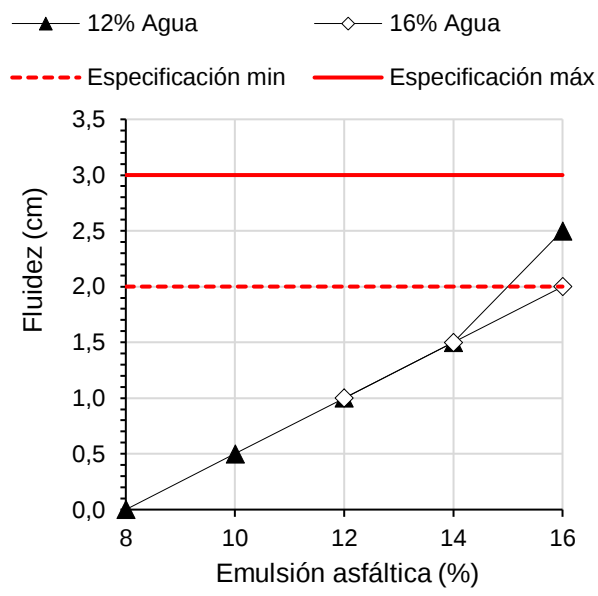


Figura 17. Evolución de la fluidez con el contenido de emulsión asfáltica y agua para LA-5.

Para la LA-13 las combinaciones que cumplen con los parámetros requeridos por la especificación son; emulsión al 12% con agua al 10% y emulsión al 8% con agua al 12%, sin embargo, al observar las características físicas de la muestra se trabajó con la segunda combinación debido a su apariencia, para el caso de la LA-13 con PET la combinación que cumplió con los requerimientos contiene agua al 12% y emulsión al 14%. Para LA-10 las combinaciones adecuadas contienen agua al 12%, pero se puede variar la emulsión entre el 10% y el 12%, sin embargo, por apariencia se trabajó con emulsión al 10%, en el caso de la LA-10 con PET la combinación idónea corresponde al contenido de agua al 12% y el contenido de emulsión puede variar entre el 14% y el 16%, sin embargo se trabajó con emulsión al 16% ya que la mezcla presentó mejor apariencia. Finalmente, para la LA-5 se trabajó con agua al 12% y emulsión al 16% debido a que con esta concentración la mezcla cumple los parámetros establecidos y para la LA-5 con PET la concentración de agua y emulsión que cumplen los parámetros es del 16%.

Cabe destacar que el tamaño del PET inicialmente correspondía al material que pasa por el tamiz N. 4 (4.75mm) y retenido en el N.8 (2.36mm) sin embargo, se evidenció que el tamaño de esta partícula era bastante grande y no permitía un agarre de los fluidos con los agregados como se muestra en la Figura 19, por tal razón se decidió trabajar con el PET que pasó por el tamiz N.8 y se retuvo en el tamiz N.16 (1.15mm).

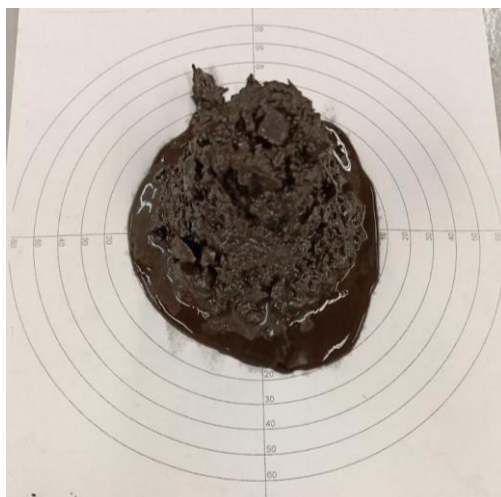


Figura 18. Registro Fotográfico Falla del PET

8.2. Prueba del tiempo de rotura de la emulsión asfáltica

En la Figura 18 se presenta los resultados referentes al tiempo de rotura de la emulsión asfáltica para las diferentes lechadas asfálticas de estudio LA-13, LA-10 y LA-5 con y sin PET. El tiempo de rotura fue obtenido según los protocolos de la especificación INV-477 de 2013, conforme se mencionó en la metodología. De los resultados obtenidos es posible evidenciar que todas las lechadas asfálticas con materiales convencionales, es decir, sin la presencia de PET presentaron un tiempo de rotura de 120 minutos. Mientras que, para todas las lechadas asfálticas con incorporación de PET, el tiempo de rotura fue de 105 minutos. Estos resultados son atribuidos a que en todas lechadas se utilizó el mismo tipo de emulsión asfáltica, la cual corresponde a una CRL-1h. Por otro lado, es posible evidenciar que las lechadas asfálticas con PET presentaron una reducción de 15 minutos en el tiempo de rotura, en referencia a las lechadas convencionales. Este resultado puede ser atribuido a una mayor cantidad de partículas en la lechada, lo cual requiere una mayor área superficial de recubrimiento y consecuentemente se produce un rompimiento de la emulsión asfáltica en un tiempo menor a los materiales convencionales. Por otro lado, en la Figura 19 se presenta las lecturas de los tiempos de rotura para las lechadas asfálticas con y sin PET, respectivamente.

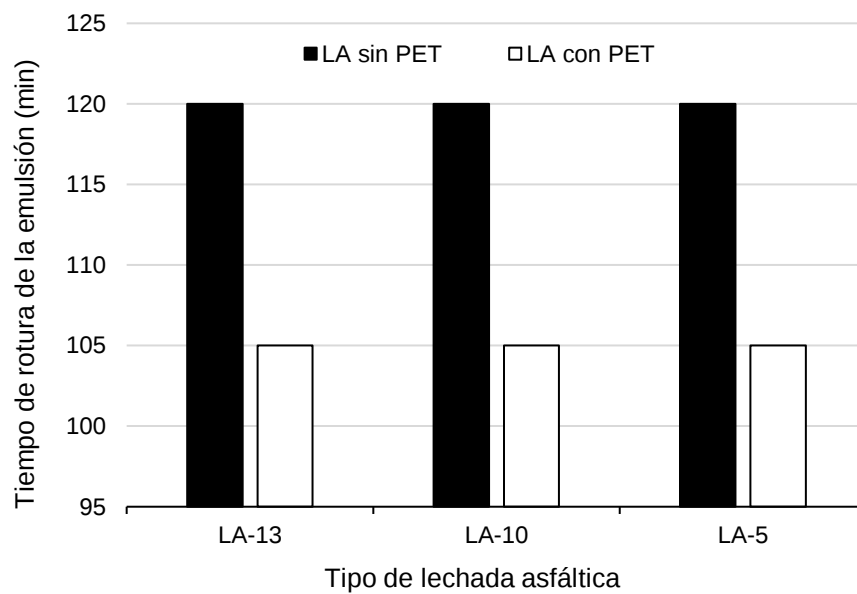


Figura 19. Tiempo de rotura para las lechadas asfálticas.

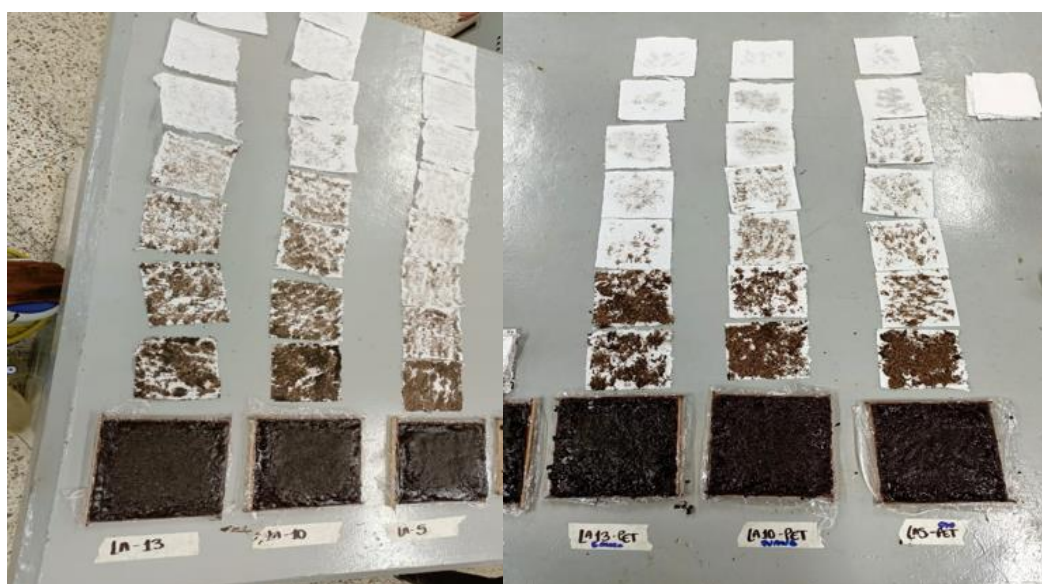


Figura 20. Lecturas de absorción de la emulsión asfáltica en las lechadas con y sin PET para la determinación del tiempo de rotura.

8.3. Prueba de resistencia a la tracción

En la figura 20. Resistencia a la tracción indirecta versus Tipo de lecha asfáltica se presentan los resultados de la prueba de resistencia indirecta a las probetas de las lechadas asfálticas de estudio LA-13, LA-10 y LA-5 de la mezcla convencional y de la mezcla modificada con PET respectivamente. Acorde a lo establecido en la metodología las dimensiones de las probetas correspondían a los 50mm de diámetro y 25mm de altura aproximadamente cumpliendo la relación 2:1. La prueba de resistencia se realizó con el fin de determinar la atracción entre las partículas y el desprendimiento de este, por ende, se programó el equipo multiusos con el ensayo de CBR el cual ejerce una presión a una velocidad de penetración constante de 1.27 mm por minuto hasta llegar a la falla de cada probeta. Cabe destacar que por tipo de emulsión se fabricaron tres probetas, es decir que en total se realizaron 18 pruebas con el fin de promediar los resultados por tipo de lechada y analizar su comportamiento.

En consecuencia, las pruebas realizadas demostraron que las muestras sin contenido de material PET tienen mayor atracción entre partículas, permitiendo que exista una mayor resistencia y un menor desgaste. Por el contrario, las muestras con contenido de material PET presentan unas condiciones de baja de resistencia y mayor desgaste.

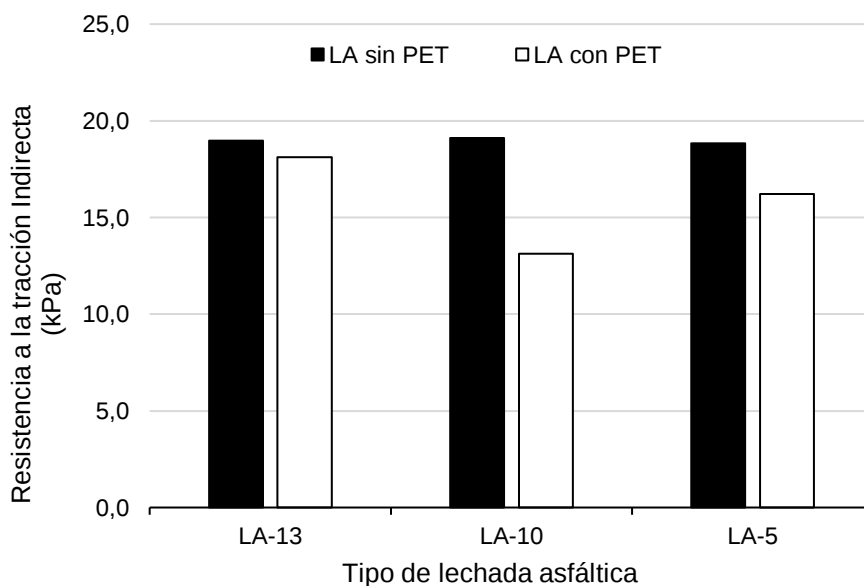


Figura 21. Resistencia a la tracción indirecta vs Tipo de lecha asfáltica

8.4. Prueba de resistencia a la compresión

En la Figura 21 a la Figura 23 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de probetas de las lechadas asfálticas de estudio LA-13, LA-10 y LA-5 con y sin presencia de PET. Conforme se describe en la metodología, las probetas fueron fabricadas con unas dimensiones de aproximadamente 100 mm de altura y 50 mm de diámetro. La prueba de resistencia a la compresión se realizó con el fin de determinar la rigidez de las lechadas asfálticas y obtener una idea de la cohesión de las partículas, por tal razón no se llevaron hasta la ruptura. Según los resultados de cada curva, fueron obtenidos los valores de rigidez a partir de la relación esfuerzo deformación, conforme se presentan en la Figura 24. Se puede notar que aquellas pruebas que contenían PET su esfuerzo fue menor para llegar a la deformación determinada, es decir que la cantidad de energía que soportó la probeta fue menor con respecto a las otras mezclas.

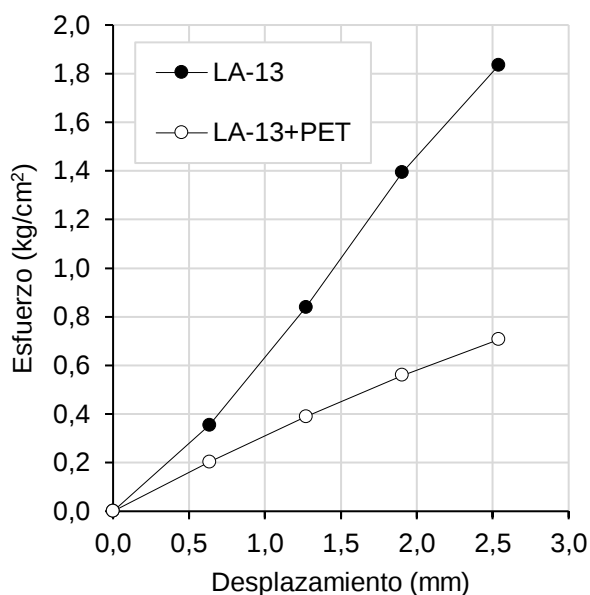


Figura 22. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-13.

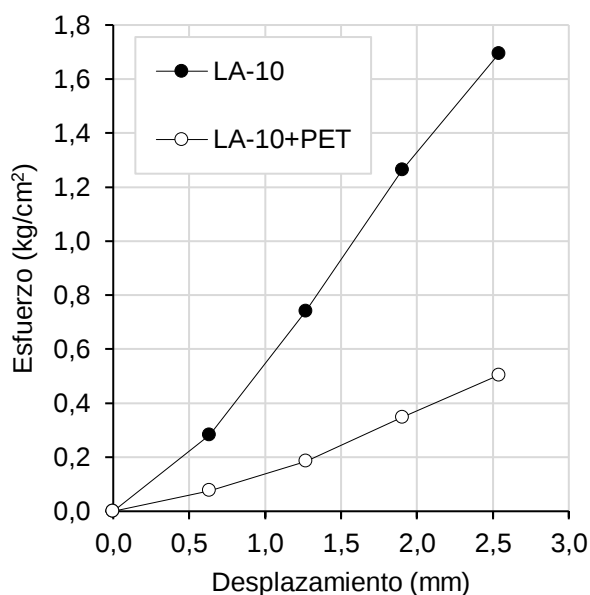


Figura 23. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-10.

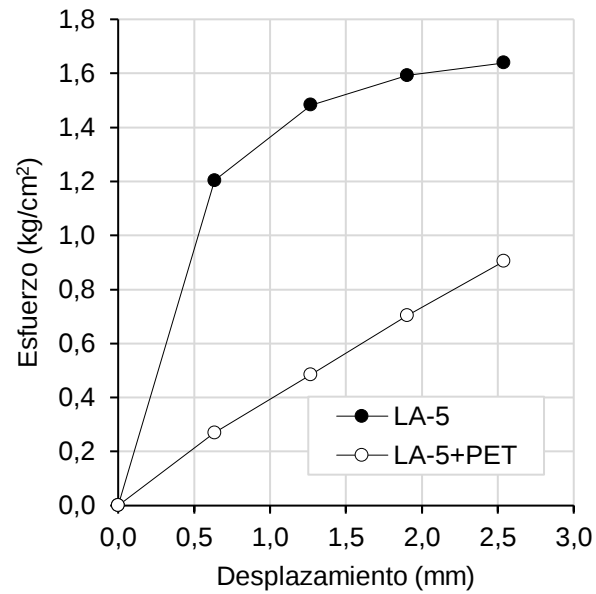


Figura 24. Curva de esfuerzo versus desplazamiento LA-5.

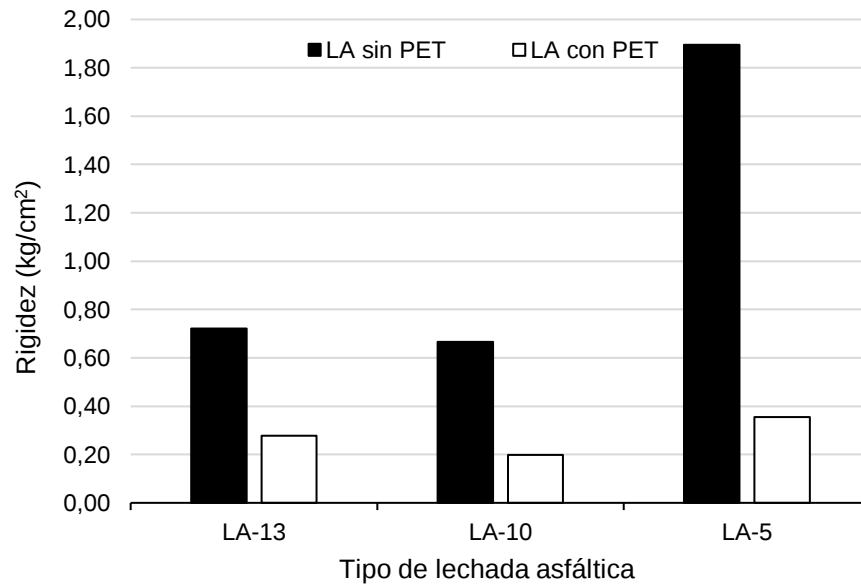


Figura 25. Rigidez de las lechadas asfálticas.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se encuentra condensado el resultado de todas las actividades de documentación, estructuración, fase experimental y análisis desarrollados a lo largo del proceso investigativo y sobre el cual se generan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Al analizar la composición y el desempeño en el laboratorio de lechadas asfálticas utilizadas para pavimentos con materiales convencionales como la incorporación de residuos de polietileno de tereftalato se evidencio una disminución de los resultados de los ensayos en las características a pesar de que el material PET es compatible como agregado de las lechadas asfálticas. Adicionalmente, se pudo concluir que esto se debe al gran tamaño de partícula reemplazada en los agregados.
- Al realizar la prueba de consistencia, descrito en el numeral 7.1, se evidenció que aquellas lechadas asfálticas que contenían PET requirieron de mayor cantidad de agua y emulsión, esto debido a que el PET, al ser menos denso que los agregados pétreos, el volumen correspondiente al agregado sustituido aumentó de manera considerable.
- Tras el análisis del numeral 7.2, referente al tiempo de rotura de la emulsión, se concluye que, en las lechadas asfálticas con PET, la emulsión utilizada CRL-1h llegó a la rotura 15 minutos antes que la lechada asfáltica convencional, sin embargo, con el acorte el tiempo de rotura se debe tener cuidado al hacer manejo de esta ya que el tiempo de aplicación y trabajabilidad debe ser más rápido. Cabe destacar que todas las muestras convencionales registraron el mismo tiempo de rotura y, de igual manera para las muestras con PET, esto debido a que el tipo de emulsión empleada es la misma para ambas muestras.
- En cuanto al análisis realizado en el numeral 7.3, resistencia a la tracción indirecta, se evidenció que aquellas pruebas con contenido de PET tuvieron una menor resistencia, demostrando que no existe una buena adherencia entre los materiales lo cual genera un mayor desgaste de las lechadas asfálticas.
- En referencia al numeral 7.4, resistencia a la compresión, se establece que las muestras con PET tienen menor rigidez en cuanto a la mezcla convencional, es decir, que la muestra no generó un mayor esfuerzo para soportar la carga aplicada, mostrando una disminución en la rigidez.

- A lo largo de la investigación se evidenció que cuando el tamaño del PET es muy grande, este no permite un agarre ni una adherencia entre los fluidos y los agregados, razón por la cual los resultados esperados fueron afectados de manera negativa, por lo tanto, se aconseja que el tamaño del PET no pase del tamiz N.16 (1.15mm).

Las siguientes recomendaciones surgieron a través del trabajo en el laboratorio debido a los diferentes comportamientos y situaciones que se presentaron.

- Se recomienda utilizar un solo proveedor de emulsiones, así tengan la misma especificación, puesto que se evidenció que el comportamiento varía según el distribuidor.
- Se recomienda buscar una empresa donde el PET triturado sea uniforme para no generar mayores desperdicios.
- Se recomienda que la guía de desplazamiento de la mezcla para el ensayo de consistencia sea plastificada o en materiales que no sean absorbentes para evitar la filtración de los líquidos.
- El tiempo de secado de la lechada es de por lo menos de 72 horas, por lo que deben tenerse en cuenta la cantidad de moldes requeridos según el ensayo y el tiempo presupuestado para este.

Referencias

- Baesens, B., T. Van Gestel, S. Viaene, M. Stepanova, J. Suykens, and J. Vanthienen. (2003). *Benchmarking state-of-the-art classification algorithms for credit scoring*. J. Oper. Res. Soc. 54 (6): 627–635. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601545>.
- Carreteras Pan-Americanas. (2020). *Colombia solo tiene el 13.61% de la red vial primaria en muy buen estado*. Carreteras Pan-americanas. <https://www.carreteras-pa.com/noticias/colombia-solo-tiene-el-13-61-de-la-red-vial-primaria-en-muy-buen-estado/#:~:text=El%20Instituto%20Nacional%20de%20V%C3%ADas,vial%20primaria%20en%20excelentes%20condiciones>
- Castiblanco J. (2015). *Uso de micro pavimento para adecuación de vías municipales*. Universidad militar nueva granada. Bogotá, Colombia. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13990/USO%20DE%20MICROPAVIMENTO%20PARA%20ADECUACI%C3%93N%20DE%20V%C3%8DAS%20MUNICIPALES.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Chen, D. H., Lin, D. F., & Luo, H. L. (2003). Effectiveness of preventative maintenance treatments using fourteen SPS-3 sites in Texas. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17(3), 136-143.
- Chen, C., R. C. Williams, and G. M. Mervyn. (2014). *Survival analysis for composite pavement performance in Iowa*. In Proc., Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 14–4688.
- Compromiso, RSE. (s.f) *Tapones envases y perchas cobran una nueva vida en el asfalto*: <https://www.compromisorse.com/rse/2014/02/21/tapones-envases-y-perchas-cobran-una-nueva-vida-en-el-asfalto/>
- Concejo de Bogotá. (s.f.) *El mal estado de la malla vial de la ciudad afecta nuestra calidad de vida*: <https://concejodebogota.gov.co/el-mal-estado-de-la-malla-vial-de-la-ciudad-afecta-nuestra-calidad-de-vida/cbogota/2020-10-28/175437.php>
- Crespo, R. (1999). *Jornadas sobre la calidad en el proyecto y la construcción de carreteras*. Barcelona: AEPO Ingenieros Consultores.
- Dong, Q., Chen, X., Huang, B., & Gu, X. (2018). Analysis of the influence of materials and construction practices on slurry seal performance using LTPP data. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(4), 04018046.
- Eléspuru, G. B. (2004). *Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: propuesta de norma peruana*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- García, B. (2019). *Rodar por carreteras de plástico reciclado*. OpenMind BBVA: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/rodar-por-carreteras-reciclad-as-de-plastico/>
- Greenpeace. (2019). *Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente*. http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

- Greenpeace. (2019). *Datos sobre la producción de plástico* <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>
- Hajj, E. Y., Loria, L., Sebaaly, P. E., Borroel, C. M., & Leiva, P. (2011). Optimum time for application of slurry seal to asphalt concrete pavements. *Transportation research record*, 2235(1), 66-81.
- Herrera San Román, T. I. (2007). *Método de diseño y construcción de la lechada asfáltica" Slurry Seal"* (Doctoral dissertation, Universidad Andrés Bello).
- IMMAC. (s.f) *Micropavimentos en frío, Lechadas asfálticas*. [Diapositivas en power point]. <http://immac.co/link/mocropavimentofrio.pdf>
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Pavimentos asfálticos. (Capítulo 4 Art. 400)
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 123 – 13, *Determinación Del Tamaño De Las Partículas*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 125 – 13, *Determinación Del Limite Liquido*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 126 – 13, *Limite Plástico E Índice De Plasticidad De Los Suelos*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 133 – 13, *Equivalente De Arena De Suelos Y Agregados Finos*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 218 – 13, *Resistencia A La Degradación De Los Agregados De Tamaños Menores de 37.5 mm, Por Medio De La Máquina De Los Ángeles*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 220 – 13, *Solidez De Los Agregados Frente A La Acción De Soluciones De Sulfato De Sodio O Magnesio*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 225 – 13, *Densidad Bulk del Llenante Mineral Del Kerosene*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 235 – 13, *Valor De Azul De Metileno En Agregados Finos*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 238 – 13, *Determinación De La Resistencia Del Agregado Grueso A La Degradación Por Abrasión, Utilizando El Aparato Micro-Deval*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 239– 13, *Determinación Del Contenido De Vacíos En Agregados Finos No Compactados*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 774 – 13, *Adhesividad De Los Ligantes Bituminosos A Los Agregados Finos*. Bogotá, Colombia.

- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 778 – 13, *Abrasión De Las Lechadas Asfálticas Por Vía Húmeda*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Norma I.N.V. E – 779 – 13, *Medida Del Exceso De Asfalto En Lechadas Asfálticas Mediante La Adhesión De Arena En La Máquina De Rueda Cargada*. Bogotá, Colombia.
- Jahren, C., & Civil, C. (2011). Development of Updated Specifications for Roadway Rehabilitation Techniques. *Iowa State University, Final Report*.
- Kolher F, E., Salgado Torres, M., & Achurra Torres, S. (2009). *Técnicas e Índices para la Evaluación de la Macro textura en Pavimentos*. Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.
- La opinión. (2020). *Colombianos consumen más de un millón de toneladas de plástico al año*. La opinión. <https://www.laopinion.com.co/zona-verde/colombianos-consumen-mas-de-un-millon-de-toneladas-de-plastico-al-ano>
- La República. (s.f.) *Sólo el 13% de la red vial primaria está en muy buen estado*: <https://www.larepublica.co/economia/solo-13-de-red-vial-primaria-esta-en-muy-buen-estado-2819046>
- Llapasi. (s.f.). *La importancia del mantenimiento de las carreteras*. <https://llapasi.com/sin-categoria/la-importancia-del-mantenimiento-de-las-carreteras/>
- Nagi, G. A. (1988). *Evaluation of slurry seal performance in the Eastern Province of Saudi Arabia* (Doctoral dissertation, KFUPM).
- National Geographic España. (s.f.). Tipos de plástico según su facilidad de reciclaje. Polietileno de baja densidad. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje_12714/2.
- Oikonomou, N., & Eskioglou, P. (2007). Alternative fillers for use in slurry seal. *Global NEST Journal*, 9(2), 182-186
- Pequeño Otoyá, D. A. (2015). *Comparación de costos y tecnología de mantenimiento utilizando slurry seal y mantenimiento convencional en un pavimento flexible*.
- Roco, V., Fuentes, C., & Valverde, S. (2002). Evaluación de la Resistencia al deslizamiento en Pavimentos Chilenos. In *Proc VI Congreso Internacional PROVIALc Chile*.
- Saghafi, M., Tabatabaee, N., & Nazarian, S. (2019). Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2673(1), 358-368.
- SalíaP. (2020) *Menos Plástico, mejores carreteras*. Roca Gallery <http://www.rocagallery.com/es/less-plastic-better-roads>
- Sandoval, C. (2008). Diseño de estructuras de pavimentos en afirmado. Escuela de Transportes y Vías, Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- Son, H. J., Kim, Y. J., Lim, J. K., Kwon, S. A., Hong, J. C., & Shin, H. J. (2014). Influences of curing time on polymer-modified emulsion used for slurry seal and micro-surfacing mixes. In *Recent developments in evaluation of pavements and paving materials* (pp. 35-42).
- Soo-Ahn K. (2011). *Utilizing Pavement Management System. Final Report*. Korea Institute of Construction Technology.
- Textos científicos. (s.f.) *PET*. ¿Qué es el PET? <https://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>
- Uribe. R. (2015). *Lechadas asfálticas y Microaglomerados en frío*. <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/lechadas%20y%20Microag%20en%20fr%C3%ADo.pdf>
- Zapata, I. M. (2015). *Tipos de tratamientos superficiales para pavimentos*. <https://civilgeeks.com/2011/08/17/tipos-de-tratamientos-superficiales-para-pavimentos/#:%7E:text=Los%20tratamientos%20superficiales%20abarcen%20desde,tipos%20de%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20agregados>
- Zhi, X. L., Wang, W. N., & Tsai, Y. C. (2012). Cost-benefit timing for applying slurry seal on actual roadway tests in China. *Journal of Central South University*, 19(8), 2394-2402.