

Práctica empresarial como auxiliar de ingeniería en apoyo al área de Obras en la  
Comercializadora Internacional Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. (C.I. MPI Ltda.).

Juan Diego Guerrero Mejía

Trabajo de Grado para Optar al Título de ingeniero civil

Director

Alex Eduardo Alvarez Lugo

Ph.D. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

Principalmente a la querida memoria de mi madre quien forjo la persona que soy hoy y de todas aquellas personas que desafortunadamente no pueden estar presentes en este momento debido a circunstancias de la vida.

A la familia Ulloa Vargas y Bautista Navarro quienes abrieron sus hogares y corazones, acogiéndome como uno más de los suyos en cada momento.

A Javier Ulloa Duarte, quien no solo ha sido una figura paterna en mi vida, sino también un modelo a seguir inigualable. Su guía, apoyo y sabiduría han sido pilares fundamentales en mi desarrollo personal y académico.

A mis amigos, Sebastián, Julián, Juan David y Carlos Andrés quienes fungieron como mis hermanos, brindándome su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Su amistad ha sido un pilar fundamental.

Con cariño, quiero extender mi gratitud a todas aquellas personas que fueron parte integral de este proceso. Cada uno de ustedes, de una u otra manera, contribuyó a este logro y ha dejado una huella imborrable en mi camino. Sus enseñanzas y experiencias compartidas han sido invaluable.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme alcanzar una nueva meta en mi vida y más aún como miembro de esta importante institución.

A C.I. MPI LTDA por brindarme la valiosa oportunidad de formar parte de su institución. Mi tiempo en la compañía ha sido una experiencia enriquecedora que ha contribuido significativamente a mi crecimiento profesional y personal. A todo el personal de la compañía, quienes no solo me han brindado instrucción técnica, sino que lo han hecho con una paciencia y bondad excepcionales.

Al ingeniero Iván Paba y a mi director de trabajo de grado por su acompañamiento en el desarrollo del proyecto y todos sus consejos y recomendaciones.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	15
1.1. Objetivo General .....	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología .....	16
2.1. Inducción y capacitación.....	16
2.2. Revisión del estado del arte .....	16
2.3. Realización de ensayos de laboratorio .....	16
2.4. Análisis de resultados .....	17
3. Revisión bibliográfica.....	17
3.1. Antecedentes históricos del slurry seal o lechadas asfálticas .....	17
3.2. Slurry seal o lechada asfáltica.....	19
3.2.1. Agregado pétreo.....	19
3.2.2. Asfalto emulsionado. ....	20
3.2.3. Agua añadida. ....	20
3.2.4. Filler mineral.....	21
3.2.5. Aditivos.....	21
3.3. Emulsiones asfálticas modificadas .....	21
4. Plan de trabajo.....	22
5. Materiales y metodología de ensayo.....	23
5.1. Materiales.....	23

5.1.1.	Asfalto.....	23
5.1.2.	Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	23
5.1.3.	Agregado pétreo.....	24
5.2.	Proceso de modificación del asfalto con GCR .....	25
5.3.	Fabricación y formulación de la emulsión asfáltica .....	27
5.3.1.	Caracterización física de la emulsión asfáltica con GCR obtenida y del asfalto residual 29	
5.3.2.	Caracterización física de la emulsión asfáltica estándar obtenida y del asfalto residual 30	
6.	Diseño de lechadas asfálticas.....	31
6.1.	Determinación del contenido óptimo de emulsión .....	31
6.1.1.	Contenido de emulsión teórico .....	31
6.1.2.	Condiciones de mezclado .....	32
6.1.3.	Ensayo de abrasión (WTAT) .....	33
6.1.4.	Ensayo de Absorción de Arena con Rueda Cargada (LWT) .....	34
6.1.5.	Correlación de los ensayos de WTAT y LWT.....	35
6.2.	Ensayo de cohesión.....	36
6.3.	Formula de trabajo .....	38
7.	Implementación del diseño en un caso práctico .....	40
8.	Conclusiones .....	46
9.	Recomendaciones .....	48
	Referencias Bibliográficas .....	49
	Apéndices.....	52

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Resultados de la caracterización del agregado pétreo.</i> .....	24
Tabla 2. <i>Distribución granulométrica del agregado pétreo.</i> .....	24
Tabla 3. <i>Caracterización de la emulsión asfáltica con GCR y del asfalto residual.</i> .....	29
Tabla 4. <i>Caracterización de la emulsión asfáltica estándar.</i> .....	30
Tabla 5. <i>Caracterización del asfalto residual de la emulsión asfáltica estándar.</i> .....	31
Tabla 6. <i>Condiciones preliminares de mezclado de las lechadas asfálticas.</i> .....	33
Tabla 7. <i>Resultados del ensayo WTAT para ambas lechadas asfálticas.</i> .....	34
Tabla 8. <i>Resultados del ensayo LWT para la lechada asfáltica con emulsión estándar.</i> .....	35
Tabla 9. <i>Resultados de cohesión en función del tiempo</i> .....	38
Tabla 10. <i>Condiciones óptimas de mezclado.</i> .....	38
Tabla 11. <i>Requisitos del agregado pétreo para especificaciones FAA e INVIAS.</i> .....	40
Tabla 12. <i>Proporciones de la mezcla de diseño VS aplicado.</i> .....	43

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Diagrama de flujo del plan de trabajo.</i> .....	22
Figura 2. <i>GCR empleado para el desarrollo del proyecto.</i> .....	23
Figura 3. <i>Distribución granulométrica del agregado pétreo según ART. 433-22 del INVIAS para una LA-5.</i> .....	25
Figura 4. <i>Agitación mecánica del asfalto con una varilla de corte.</i> .....	26
Figura 5. <i>Incorporación del GCR en el asfalto base</i> .....	26
Figura 6. <i>Diagrama de flujo del proceso de modificación del asfalto.</i> .....	27
Figura 7. <i>Fabricación del jabón requerido para la emulsión.</i> .....	28
Figura 8. <i>Proceso de emulsificación del asfalto modificado.</i> .....	28
Figura 9. <i>Emulsión asfáltica modificada con GCR</i> .....	30
Figura 10. <i>Mezclas obtenidas durante la determinación de las condiciones de mezclado.</i> .....	33
Figura 11. <i>Curva de Abrasión y Absorción VS Contenido de asfalto de la lechada con emulsión estándar.</i> .....	36
Figura 12. <i>Ensayos de manejabilidad de la mezcla con el óptimo de asfalto</i> .....	37
Figura 13. <i>Lechada asfáltica recién aplicada en el aeropuerto Internacional Los Garzones, Montería.</i> .....	41
Figura 14. <i>Proceso de instalación de la lechada asfáltica.</i> .....	42
Figura 15. <i>Textura y acabado de la lechada posterior a 2 días de servicio.</i> .....	42
Figura 16. <i>Temperatura del pavimento, medida a las 10:00 am con temperatura ambiente promedio de la zona.</i> .....	44

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Requisitos del agregado pétreo para lechadas asfálticas .....	52
Apéndice B. Gradaciones del agregado para lechadas asfálticas. ....	52
Apéndice C. Cálculo de % teórico de asfalto por método de Duriez. ....	53

## Glosario

**Agua de pre-envuelta:** Es el agua que se utiliza para humedecer los agregados pétreos antes de mezclarlos con la emulsión asfáltica.

**Cohesión:** Se refiere a la fuerza que mantiene unidos los componentes de una sustancia o mezcla.

**Curado:** Para el contexto específico de este proyecto, el curado se refiere al proceso de evaporación del agua presente en las emulsiones asfálticas.

**Emulgente:** Sustancia que permite mezclar y estabilizar dos componentes que normalmente no se mezclarían, creando así una emulsión homogénea.

**Emulsión asfáltica:** Dispersión de glóbulos de asfalto en una solución acuosa compuesta de agua y un agente emulsificante.

**Equivalente de arena:** Medida utilizada para evaluar la calidad de los agregados finos en términos de su limpieza.

**Grano de Caucho Reciclado (GCR):** Caucho vulcanizado proveniente de la trituración mecánica y separación de materiales de las llantas usadas y/o no aptas para su uso.

**Humedad total:** Es la cantidad de agua presente en una muestra. Esta cantidad de agua incluye tanto el agua que está adherida a las partículas como el agua que llena los espacios entre ellas.

**Lechada asfáltica:** Una mezcla de una emulsión asfáltica, agregado pétreo, agua y aditivos especificados, proporcionados, mezclados y uniformemente esparcidos sobre una superficie adecuadamente preparada.

**Manejabilidad de la mezcla:** Se refiere a la facilidad con la que se puede trabajar y manipular, garantizando la consistencia adecuada de la mezcla.

**Neumáticos Fuera de Uso (NFU):** Aquellos neumáticos que han llegado al final de vida útil y no son aptos para su uso seguro en vehículos.

**Rotura de la mezcla:** Consiste en la separación de fases de la emulsión asfáltica y es la etapa en la que inicia el proceso de endurecimiento de la capa aplicada.

**Tasa de aplicación:** Indica la cantidad de agregado seco presente en la lechada asfáltica y aplicado por unidad de área.

## Resumen

**Título:** Práctica empresarial como auxiliar de ingeniería en apoyo al área de Obras en la Comercializadora Internacional Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. (C.I. MPI Ltda.).\*

**Autor:** Juan Diego Guerrero Mejía\*\*

**Palabras Clave:** Lechada asfáltica, Emulsión asfáltica, Grano de Caucho Reciclado, Neumáticos Fuera de Uso, Aditivos.

**Descripción:** En la práctica empresarial realizada se brindó apoyo a C.I. MPI Ltda. en diversas labores, entre las que destacan, la revisión del estado del arte en el contexto colombiano de las aplicaciones de mezclas asfálticas tipo lechada o slurry Seal, así como una revisión de los antecedentes en incorporación del grano de caucho reciclado en emulsiones asfálticas; la implementación de un plan de trabajo y evaluación de desempeño para la producción a escala laboratorio de una lechada asfáltica bajo la especificación técnica INVIAS Art. 433-22 incorporando grano de caucho reciclado en la emulsión asfáltica. A su vez de brindar apoyo en el diseño y aplicación de lechada asfáltica estándar en la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional Los Garzones de Montería, Córdoba. Como resultado de este proyecto, se desarrolló una emulsión asfáltica con GCR que mantiene su estabilidad durante el almacenamiento, además de contar con un asfalto residual modificado que exhibe propiedades de elasticidad y punto de ablandamiento altamente favorables. Sin embargo, llegar a la producción de una lechada asfáltica que cumpliera con los requisitos de la técnica resultó inalcanzable en este contexto específico. A pesar de ello, se podrían explorar potenciales aplicaciones alternativas para esta emulsión en diversos escenarios. Por ejemplo, su utilización podría ser evaluada en contextos como impermeabilizaciones, riegos de liga y otras aplicaciones similares. Este trabajo presentó una nueva oportunidad para abordar la problemática medioambiental que rodea a los neumáticos fuera de uso (NFU), su desecho de manera inapropiada y al mismo tiempo una opción de mejora en cuanto a la calidad de los pavimentos flexibles, preservando su vida útil y promoviendo prácticas sostenibles en la industria vial de Colombia.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería civil. Director: Alex Eduardo Alvarez Lugo. Ph.D. en Ingeniería Civil.

### Abstract

**Title:** Business internship as an engineering assistant in support of the Works area at Comercializadora Internacional Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. (C.I. MPI Ltda.).\*

**Author(s):** Juan Diego Guerrero Mejía \*\*

**Key Words:** Slurry seal, asphalt emulsion, Recycled Rubber Grain, Disused Tires, Additives.

**Description:** During the conducted business practice, support was provided to C.I. MPI Ltda. in various tasks, including the review of the state of the art in the Colombian context regarding applications of slurry seals, as well as a review of the background in incorporating recycled rubber particles into asphalt emulsions. A work plan was implemented to conduct a performance evaluation for laboratory-scale production of a slurry under the INVIAS technical specification Article 433-22, incorporating recycled rubber particles into the asphalt emulsion. Additionally, support was provided in the design and application of standard asphalt slurry on the Los Garzones International Airport runway in Montería, Córdoba. As a result of this project, an asphalt emulsion with recycled rubber particles (GCR) was developed, which maintains its stability during storage and includes a modified residual asphalt that exhibits highly favorable elasticity and softening point properties. However, arriving at the production of an asphalt slurry that met the requirements of the technique was unattainable in this specific context. Nonetheless, potential alternative applications for this emulsion could be explored in various scenarios. For instance, its utilization could be evaluated in contexts such as waterproofing, tack coats, and other similar applications. This work presented a new opportunity to address the environmental issue related to end-of-life tires (ELT), their inappropriate disposal, and at the same time an option for improvement in terms of the quality of flexible pavements, extending their lifespan, and promoting sustainable practices in the Colombian road industry.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: Alex Eduardo Alvarez-Lugo. Ph.D. in Civil Engineering.

## Introducción

El parque automotriz en Colombia presenta un promedio de crecimiento anual equivalente al 5.53% según los datos recopilados en los últimos 4 años por el Registro Único Nacional de Tránsito, RUNT (*Parque Automotor Registrado En RUNT / RUNT*, 2023). Lo anterior ha generado un incremento significativo en la fabricación y uso de neumáticos. Sin embargo, la falta de un tratamiento adecuado para la reutilización de estos elementos ha llevado a convertirlos en uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad. Cada año, más de 158 mil toneladas de neumáticos entran en desuso y son desechados en Colombia, siendo arrojados a ríos y quebradas, abandonados al aire libre, quemados ilegalmente o utilizadas de forma inadecuada en usos domésticos (Martínez-Gallego, 2017).

Un neumático se fabrica con más de 100 sustancias diferentes, siendo la principal el caucho, con un 50% del peso total de la pieza, aproximadamente. Además, posee relleno como el negro de humo o gel de sílice (25% del peso), acero (10% del peso), azufre (1% del peso), óxido de zinc (1% del peso) y muchos otros aditivos como aceite de procesamiento, plastificante o aceleradores de vulcanización, siendo todos estos compuestos difíciles de degradar naturalmente (Nazer et al., 2019). Algunas industrias han optado por implementar la reutilización del caucho vulcanizado triturado en sus procesos, obteniendo subproductos con valor comercial, como lo es en su incorporación como parte del ligante asfáltico empleado en la construcción de carreteras. La adición de granos de caucho reciclado en la modificación de mezclas asfálticas ofrece numerosos beneficios, incluyendo una mayor vida útil del pavimento, disminución de los costos a largo plazo, brindando un mejor comportamiento ante los gradientes térmicos y contribuyendo en la reducción de impactos negativos para el medio ambiente (Herrera Moreno, 2021; Morante, 2019).

En la actualidad, la utilización de mezclas asfálticas en caliente se ha convertido en una alternativa muy costosa para la pavimentación de las vías con bajo volumen de tráfico; por lo tanto, las mezclas asfálticas en frío, utilizando emulsión y agregados pétreos, representan una alternativa de uso preferencial para la construcción y/o mantenimiento de un pavimento adecuado para este tipo de vías (Pierini et al., 2006).

Con base en los antecedentes expuestos, surge el reto de buscar nuevos enfoques amigables al medio ambiente en proyectos viales. En este proyecto se plantea la revisión del estado del arte sobre la aplicación de lechadas asfálticas y el proceso de incorporación de grano de caucho en las emulsiones asfálticas y posteriormente la producción de una lechada asfáltica con emulsión que incorpore GCR y su evaluación de desempeño bajo especificación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en su artículo 433-22 (INVIAS., 2022).

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Brindar apoyo como auxiliar de ingeniería civil en el área de obras e investigación y desarrollo en la empresa C.I. Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. en la formulación a escala laboratorio de una emulsión asfáltica con grano de caucho reciclado para su implementación en lechadas asfálticas.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión del estado del arte sobre la aplicación de lechadas asfálticas en Colombia y el proceso de incorporación del grano de caucho reciclado en emulsiones asfálticas.
- Construir e implementar un plan de trabajo para la producción a escala laboratorio de una lechada asfáltica bajo especificación INVIAS Art. 433-22 incorporando grano de caucho reciclado en la emulsión asfáltica.
- Evaluar el desempeño a escala laboratorio de la lechada asfáltica bajo lineamientos establecidos en la especificación INVIAS, Artículo 433-22.
- Apoyar en el diseño y la aplicación de una lechada asfáltica en la zona central de la pista de aterrizaje del aeropuerto Internacional Los Garzones, en Montería, Córdoba.

## **2. Metodología**

Para alcanzar los objetivos planteados anteriormente se propuso distribuir el trabajo a desarrollar en las prácticas empresariales en las siguientes fases o etapas:

### **2.1. Inducción y capacitación**

En la primera semana de la práctica empresarial, se realizaron las inducciones correspondientes, desarrolladas por el área de Recursos Humanos y Salud, Seguridad y Medio Ambiente (HSE, por sus siglas en inglés). La inducción comprendió el conocimiento de las instalaciones físicas de la empresa, los valores propios de ésta, así como, misión, visión, historia y normatividad jurídica y técnica. Además, en las semanas posteriores se plantea la capacitación en laboratorio, en donde se presentaron los diferentes equipos, lineamientos normativos de los ensayos y el plantel de trabajo.

### **2.2. Revisión del estado del arte**

Primeramente, se realizó una revisión bibliográfica en diferentes bases de datos disponibles en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, como Scopus, y en herramientas web como Google Scholar y SCIELO, partiendo de diferentes fuentes tales como artículos científicos, proyectos de grado, y normas de ensayo y especificaciones técnicas. Esta actividad se realizó mediante la previa selección de palabras clave, “Slurry seal”, “emulsiones asfálticas” “grano de caucho reciclado”, y “neumáticos fuera de uso”.

### **2.3. Realización de ensayos de laboratorio**

Se implementaron una serie de ensayos de laboratorio acorde a las diferentes normativas y especificaciones técnicas relacionadas con los temas abordados. Para este fin se partió de las

especificaciones INVIAS aplicables (INVIAS, 2022), correspondientes a las lechadas asfálticas, verificando que estas se cumplan.

#### **2.4. Análisis de resultados**

Se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio en contraste con los valores especificados para una emulsión asfáltica modificada con polímeros, tanto en comportamiento químico-mecánico, así como un análisis comparativo económico entre ellas con el fin de definir la viabilidad de su implementación en procesos a escala industrial.

### **3. Revisión bibliográfica**

#### **3.1. Antecedentes históricos del slurry seal o lechadas asfálticas**

La primera forma de Slurry seal se remonta a finales de la década de 1920, en el mantenimiento de las carreteras en Alemania, con un producto llamado “schlämme”, el cual consistía en la mezcla de áridos húmedos muy finos y agua hasta alcanzar una consistencia adecuada y posteriormente se mezclaba con asfalto 80/100; la idea era implementar un proceso de mezcla en frío (Alvarado Romero et al. 2007). La mezcla se preparaba en una planta central y se mantenía bajo agitación durante el transporte con el fin de evitar la sedimentación. El primer “proceso de mezclado en húmedo” fue completado en el aeropuerto de Berlin-Staaken en 1936. Eventualmente el aglutinante bituminoso caliente se reemplazó con una emulsión aniónica de fraguado lento (Jiménes Acuña. M., et al. 2016).

Sin embargo, su mayor desarrollo se produjo principalmente en la década de los años 50 y 60, gracias a la aparición de equipos de flujo continuo como el primer mezclador de proceso continuo en 1955 y el primer pavimentador montado en camión fabricado por Young Slurry Seal

Incorporated en 1959 (Croteau et al., n.d.); y a los avances en la tecnología de emulsiones asfálticas, con la aparición de emulsiones catiónicas como respuesta a los problemas principalmente de la compatibilidad con los agregados que se presentaban con el uso de las emulsiones aniónicas.

Estos avances permitieron controlar mejor la ruptura de las emulsiones y no depender en gran medida de las condiciones climáticas, reduciendo varias horas el tiempo de apertura al tráfico a una o dos horas. Además, el desarrollo de las máquinas de colocación de flujo continuo también permitió la colocación de superficies de lechada sobre grandes áreas en un corto período de tiempo (Croteau et al., n.d.; M. Jiménez Acuña et al., n.d.).

La Asociación Nacional de Sellos de Lechada Asfáltica (NSSA por sus siglas en inglés) se formó en 1963. Posteriormente, a partir de la NSSA se estableció la Asociación Internacional de Sellos de Lechada Asfáltica (ISSA por sus siglas en inglés “International Slurry Seal Association”). Finalmente, en 1990 la palabra “seal” se cambió por “surfacing” (Jiménez Acuña et al., 2008).

A mediados de la década de 1970, Screg Route, una empresa francesa, diseñó Seal-Gum, el primer sistema de sellado de lechada modificado con polímeros, este sistema polímero-modificado, paso a ser llamado micro-pavimento o micro-concreto asfáltico, que posteriormente fue mejorado por la firma alemana Racha y comercializado en Estados Unidos con el nombre comercial "Ralumac®" (*Slurry Surfacing - International Slurry Surfacing Association*, n.d.).

Las lechadas asfálticas se venían aplicando tímidamente en Colombia desde hace más de treinta años con resultados aislados exitosos. Debido a la falta de programas de mantenimiento vial y conocimientos generales de la técnica, las lechadas asfálticas hasta la actualidad no habían tenido la oportunidad de demostrar su verdadero potencial en la ingeniería de pavimentos en el

país (Ulloa Duarte, 2002). A pesar de lo anterior, más recientemente se cuenta con antecedentes de aplicación de Slurry seal o lechada asfáltica en las vías de la ciudad Medellín, en tramos de la carretera en San Juan del Cesar, en el municipio de Maicao, sobre la carretera troncal del Caribe, en la carretera Sogamoso-Yopal, en la Mesa de los Santos, en el aeropuerto Palonegro (Bucaramanga) y muchas otras zonas del país. Cada vez son más las entidades y/o empresas que apuestan en el potencial de esta técnica como lo son Concesión Vial Andina y Autopistas del Café, entre otras, que lo han implementado como una respuesta a los requerimientos de mantenimiento y preservación vial.

### **3.2. Slurry seal o lechada asfáltica**

Según la International Slurry Surfacing Association (ISSA) (ISSA, 2018), se define el Slurry Seal como: “una mezcla de una emulsión asfáltica aprobada, agregado mineral, agua y aditivos especificados, proporcionados, mezclados y uniformemente esparcidos sobre una superficie adecuadamente preparada”. La lechada asfáltica es una mezcla asfáltica que adquiere un aspecto “cremoso” cuando es mezclada, aplicada como un tratamiento de superficie de poco espesor, con una máquina especialmente diseñada, la cual fabrica el Slurry seal al mismo tiempo que la aplica. El objetivo es mejorar la textura de la superficie y el índice de fricción (Quintana López, 2018).

Como se mencionó anteriormente el Slurry seal es una mezcla asfáltica fría a base de diferentes elementos, los cuales interactúan para lograr un desempeño óptimo y la alteración de alguno de estos elementos puede producir la falla.

#### **3.2.1. Agregado pétreo**

El agregado pétreo es un material particulado con un uso determinado en la construcción. En este caso el agregado constituye el mayor porcentaje de la lechada asfáltica y tiene una gran relevancia, puesto que, en última instancia, es este el que interactúa con los neumáticos de los

vehículos. Como consecuencia, las propiedades físicas del agregado son extremadamente importantes con respecto al desempeño de la mezcla de lechada en la calzada. Además, la consistencia y el desempeño de la mezcla están muy influenciados tanto por la cantidad de finos (partículas de menos de 75 [ $\mu\text{m}$ ]) contenidas en la mezcla como por la naturaleza de estos finos (Croteau et al., n.d.; Capítulo 1 - INVIAS., 2012). Cabe resaltar la especificación expresa que las arenas naturales no pueden exceder el 25% de la masa total del agregado.

### ***3.2.2. Asfalto emulsionado***

El ligante bajo los requerimientos de la especificación técnica del INVIAS (INVIAS, 2022) es siempre una emulsión catiónica, modificada con polímeros o de asfalto puro, de rotura lenta y superestable. La compatibilidad de la emulsión con el agregado es extremadamente importante. Por lo tanto, la ruptura de la emulsión debe controlarse con precisión y, en muchos casos, esto solo se puede lograr diseñando una emulsión específica para un agregado específico. (Croteau et al., n.d.; INVIAS, 2012)

### ***3.2.3. Agua añadida***

El propósito del agua añadida es facilitar el recubrimiento, ajustar la consistencia de la lechada asfáltica y acelerar o retardar la ruptura de la emulsión. La cantidad de agua a añadir depende principalmente de las condiciones climáticas y de la cantidad de humedad ya contenida en el árido. Esta deberá ser limpia y libre de materia orgánica, su calidad debe ser tal que no afecte el proceso normal de elaboración, rotura y curado de la lechada asfáltica. Esta podrá ser agua potable, de no ser así, se deberá cumplir los criterios de pH y contenido de sulfatos estipulados en la tabla 433-4 del artículo 433-13 del INVIAS (Croteau et al., n.d.; INVIAS, 2012).

#### **3.2.4. Llenante mineral**

El llenante mineral incluido en los agregados se podrá complementar o suplir con un producto comercial o especialmente preparado, generalmente cal o cemento. Puede utilizarse el llenante mineral para mejorar la consistencia de la mezcla, ajustar las propiedades de rotura y curado de la mezcla y/o activar la consecución de la cohesión de la lechada. Los niveles típicos de uso son de entre un 0 y un 3% y pueden considerarse parte de la granulometría del agregado (INVIAS, 2022; Rd et al., 2010).

#### **3.2.5. Aditivos**

En algunas ocasiones que lo requieren se hace uso de aditivos de control de campo, especialmente con el fin de retardar el tiempo de rotura de la emulsión.

### **3.3. Emulsiones asfálticas modificadas**

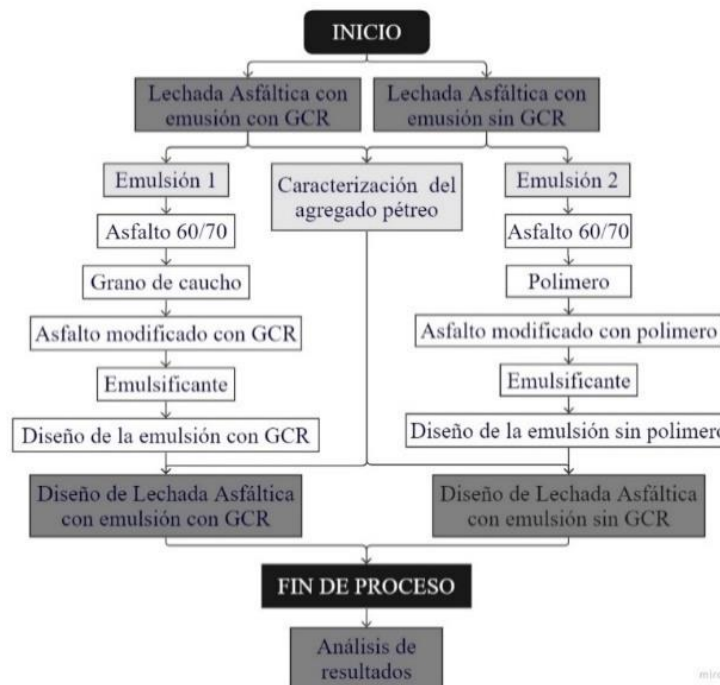
Se definen como emulsiones asfálticas modificadas con polímeros a las dispersiones de pequeñas partículas de un cemento asfáltico y de un polímero en una solución de agua y un agente emulsificante de carácter catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión. El asfalto por sí solo es un material de construcción e ingeniería con propiedades mecánicas susceptibles de mejorar. Debido a esto, el asfalto generalmente se modifica para mejorar sus propiedades mecánicas, físicas y reológicas, disminuyendo su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación (*ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO*, n.d.). Este refuerzo se consigue añadiendo al asfalto pequeñas cantidades de polímeros gomosos. Uno de los materiales más populares utilizados para la modificación del asfalto son los copolímeros de estireno-butadieno (Hernández et al., 1997).

#### 4. Plan de trabajo

El plan de trabajo implementado para el componente práctico de este proyecto se elaboró partiendo de los objetivos específicos mencionados anteriormente. Los cuales en su mayoría culminaron con la implementación de un diseño de una lechada asfáltica con emulsión asfáltica con GCR. Con el fin de realizar un análisis de resultados adecuado, fue necesario contar con un punto de comparación económico, técnico y mecánico por lo tanto se optó por diseñar una segunda lechada asfáltica donde la única variación fuese la no incorporación de GCR en la emulsión. Esto significa que se trabajó con una emulsión asfáltica estándar para estas técnicas. El plan de trabajo desarrollado se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo del plan de trabajo.*



## 5. Materiales y metodología de ensayo

En este capítulo se detallan los materiales utilizados en el diseño y fabricación de la emulsión asfáltica con GCR, así como la elaboración de la lechada asfáltica implementando dicha emulsión. También se describe la metodología de ensayo en su aplicación.

### 5.1. Materiales

#### 5.1.1. *Asfalto*

El material de base utilizado para fabricar el asfalto modificado con GCR es un cemento asfáltico (AC) de grado de penetración 60-70, proveniente de la refinería Barrancabermeja, en el departamento de Santander, cumpliendo con la caracterización física exigida por el INVIAS en el artículo 410-22 (INVIAS., 2022).

#### 5.1.2. *Grano de Caucho Reciclado (GCR)*

El GCR usado para la modificación del asfalto, es un material compuesto por caucho vulcanizado proveniente de la trituración mecánica y separación de materiales de las llantas usadas. En la Figura 2 se evidencia el GCR usado para el desarrollo del presente proyecto.

#### **Figura 2.**

*GCR empleado para el desarrollo del proyecto*



**5.1.3. Agregado pétreo**

El agregado pétreo usado en el proyecto proviene de la fuente de explotación del Río Chicamocha, en el departamento de Santander. Este agregado cumple con los requisitos exigidos en el artículo 433-22 del INVIAS como se observa en la Tabla 1 (INVIAS., 2022). Los requisitos de la especificación técnica se muestran en el Apéndice A. Requisitos del agregado pétreo para lechadas asfálticas.

**Tabla 1.**

*Resultados de la caracterización del agregado pétreo.*

PROPIEDAD	INV E ART 433-22	REPORTE DE CALIDAD
Desgaste en máquina de los Ángeles, 100 revoluciones [%]	Max: 25	4.7
Desgaste en máquina de los Ángeles, 500 revoluciones [%]		24.7
Índice de plasticidad	NP	NP
Equivalente de arena [%]	Min: 50	63
Azul de metileno	Max: 10	8
Solidez en sulfato de magnesio [%]	Max: 18	14.7
Caras fracturadas (Retenido en No. 4) [%]	REPORTAR	100
Angularidad de la fracción fina [%]	Min: 45	46.5
Peso volumétrico suelto y seco [kg/m3]	REPORTAR	1627

Como se puede observar en la Tabla 2 y en la Figura 3, la distribución granulométrica se ubica dentro del huso o rango correspondiente a una lechada asfáltica tipo LA-5 establecida en la Tabla 433-4. del artículo INVIAS 433-22 (INVIAS., 2022). (ver Apéndice B. Gradaciones del agregado para lechadas asfálticas).

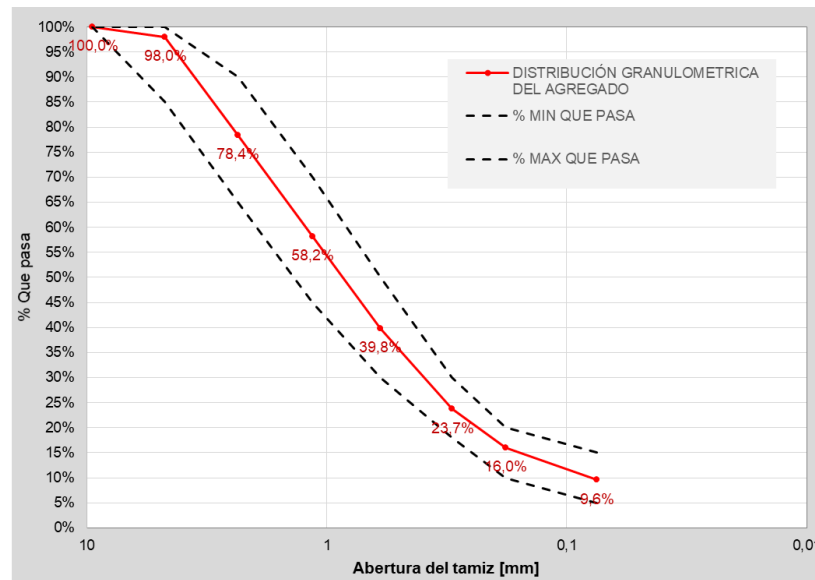
**Tabla 2.**

*Distribución granulométrica del agregado pétreo.*

Tamiz	% QUE PASA							
	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 80	No. 200
INV 433-22	100	90- 100	65- 90	45- 70	30- 50	18- 30	10- 21	5- 15
Agregado pétreo	100	96.5	70.9	53.5	38.5	24.5	16.4	9.7

**Figura 3.**

*Distribución granulométrica del agregado pétreo según ART. 433-22 del INVIAS para una LA-5.*



Para efectos del proyecto y como se mencionó anteriormente, para tener un punto comparativo se diseñaron las dos lechadas asfálticas empleando el mismo agregado pétreo.

## 5.2. Proceso de modificación del asfalto con GCR

Se realizó una modificación física del asfalto. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, en este caso se adicionó el GCR caracterizado anteriormente; para esto se requirió implementar un proceso de incorporación que asegurara la interacción entre el asfalto y el polímero. El proceso realizado para dicha modificación se describe a continuación. El proceso se ejecutó por medio de agitación mecánica (mezclado) durante un tiempo de 45 minutos con varillas de corte y el asfalto base a una temperatura controlada entre los 170 y 175°C. Una vez preparadas las muestras, se inició con el proceso de modificación, ubicándola sobre una resistencia eléctrica con el fin de controlar la temperatura de mezclado en un rango específico antes mencionado. Con la temperatura deseada, se inició la agitación por medio del agitador mecánico como se observa en la Figura 4.

**Figura 4.**

*Agitación mecánica del asfalto con una varilla de corte.*



Pasado el tiempo de agitación y con la temperatura del asfalto estable en el rango deseado, se incorporó el GCR a la mezcla como se observa en la Figura 5, agregándolo en fracciones de su totalidad cada cierto tiempo y con el agitador encendido con el fin de obtener homogeneidad en la muestra.

**Figura 5.**

*Incorporación del GCR en el asfalto base*

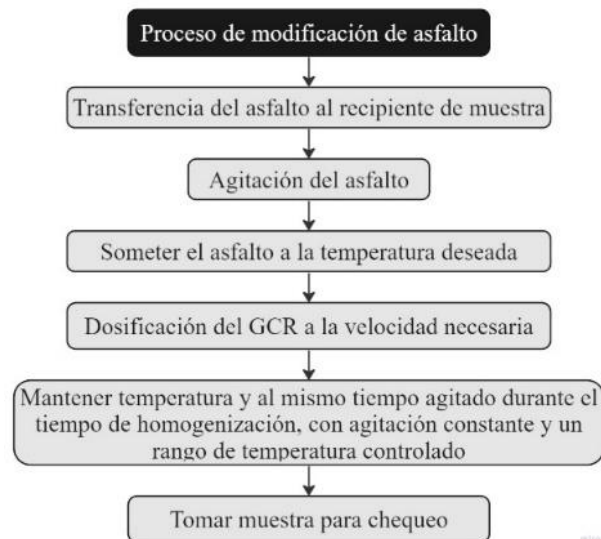


El proceso de incorporación del GCR en el asfalto base se llevó a cabo manteniendo el asfalto en un rango de temperatura entre los 170 y 175°C y teniendo la precaución de que este no quede adherido en las paredes del recipiente. Una vez finalizado el tiempo de incorporación y homogenización, se tomó una muestra para su evaluación.

A continuación, en la Figura 6 se muestra diagrama de flujo para el proceso desarrollado y descrito anteriormente.

### Figura 6.

*Diagrama de flujo del proceso de modificación del asfalto.*



### 5.3. Fabricación y formulación de la emulsión asfáltica

Una vez verificada y ajustada la fórmula para poder llevar a cabo la emulsificación del asfalto modificado, se procedió con la fabricación de la emulsión asfáltica modificada en el molino coloidal. El proceso de fabricación implementado incluyó la fabricación del agente emulsificante bajo los requerimientos y proporciones de formulación, verificando el pH requerido y haciendo uso de un emulgente para emulsiones de este tipo. En la Figura 7 se observa el proceso de verificación del pH del emulgente.

**Figura 7.**

*Fabricación del jabón requerido para la emulsión.*



- Se estableció la temperatura del asfalto modificado, normalmente entre 140 – 150 [°C] y de la solución jabonosa según lo requerido, con el fin de que la emulsión no sobrepase temperaturas de 95°C, ya que a esta temperatura el agua inicia proceso de evaporación.
- En el molino coloidal, se procede a incorporar poco a poco el jabón y el asfalto modificado al mismo tiempo, proceso el cual se evidencia en la Figura 8.

**Figura 8.**

*Proceso de emulsificación del asfalto modificado.*



**5.3.1. Caracterización física de la emulsión asfáltica con GCR obtenida y del asfalto residual**

Con la emulsión asfáltica elaborada se llevó a cabo el proceso de caracterización física, según la naturaleza y el rompimiento de la emulsión, siguiendo las especificaciones del INVIAS, en su artículo 415-22, tomando como referencia la Tabla 415-1 “Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros” (INVIAS., 2022).

Se realizaron los ensayos correspondientes sobre la emulsión asfáltica modificada y el asfalto residual obtenido por proceso de destilación bajo la norma técnica INV E-762 (INVIAS., 2022), verificando que cumplieran con todas las especificaciones exigidas para una lechada asfáltica, los resultados se plasman en la Tabla 3, a su vez en la Figura 9 se expone la muestra de emulsión con la que se realizó la caracterización.

**Tabla 3.**

*Caracterización de la emulsión asfáltica con GCR y del asfalto residual.*

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE REFERENCIA			REPORTE DE CALIDAD
	--	MÁXIMO	MÍNIMO	
Viscosidad: Saybolt-Furol a 25°C, (s)	--	100	20	34
Contenido de agua [%]	INV-E 761	43	-	36.4
Estabilidad durante almacenamiento (24 horas) [%]	INV-E 764	1	-	0.9
Contenido de asfalto por destilación hasta 260°C	INV-E 762	-	57	63.6
Evaporación Contenido de asfalto [%]	--	-	57	63.6
Tamizado: Retenido en tamiz No.20 [%]	INV-E 765	0.1	-	0.0891
ENSAYOS AL RESIDUO DE LA EVAPORACIÓN				
Penetración @25 °C, 100 g, 5 s [mm/10]	INV-E 706	100	60	64
Ductilidad @5 °C, 5 cm/min [cm]	INV-E 702	-	10	61
Recuperación elástica por torsión @25 °C [%]	INV-E 727	-	12	27.7
Punto de ablandamiento [°C]	INV-E 712	-	55 45	66.1

**Figura 9.**

*Emulsión asfáltica modificada con GCR*



**5.3.2. Caracterización física de la emulsión asfáltica estándar obtenida y del asfalto residual**

Al igual que con la emulsión asfáltica con GCR, se llevó un proceso de caracterización para la emulsión estándar, así como de su asfalto residual, con el fin de analizar los efectos del GCR en el asfalto base, lo cual se expondrá más adelante en el presente documento. A continuación, en la Tabla 4 se muestran los resultados de dicha caracterización de la emulsión asfáltica, mientras que en la Tabla 5 se plasman los resultados referentes al asfalto residual.

**Tabla 4.**

*Caracterización de la emulsión asfáltica estándar.*

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN TECNICA DE REFERENCIA			REPORTE DE CALIDAD
	--	%MAX	%MIN	
Viscosidad: Saybolt-Furol a 25°C, (s)	--	100	20	25
Contenido de agua [%]	INV-E 761	43	-	37.8
Estabilidad durante almacenamiento (24 horas) [%]	INV-E 764	1	-	1
Contenido de asfalto por destilación hasta 260°C	INV-E 762	-	57	62.2
Evaporación Contenido de asfalto [%]	--	-	57	62.1
Tamizado: Retenido en tamiz No.20 [%]	INV-E 765	0.1	-	0.00493

**Tabla 5.**

*Caracterización del asfalto residual de la emulsión asfáltica estándar.*

<b>ENSAYOS AL RESIDUO DE LA EVAPORACIÓN</b>				
Penetración @25°C, 100g, 5seg [mm/10]	INV-E 706	100	60	68
Ductilidad @5°C, 5cm/min [cm]	INV-E 702	-	10	128
Recuperación elástica por torsión @25°C [%]	INV-E 727	-	12	23.3
Punto de ablandamiento [°C]	INV-E 712	-	55	59.2
		-	45	

## **6. Diseño de lechadas asfálticas**

Ya con el agregado pétreo y las emulsiones asfálticas diseñadas, caracterizadas y verificadas según las especificaciones aplicables, se procedió a realizar el diseño de las lechadas asfálticas siguiendo las fases indicadas a continuación, las cuales aplican para ambos casos: Emulsión asfáltica estándar y emulsión asfáltica con GCR.

### **6.1. Determinación del contenido óptimo de emulsión**

El contenido óptimo de emulsión es un valor determinado a partir de una correlación entre las curvas obtenidas en los ensayos de Abrasión por Vía Húmeda o ensayo WTAT (Wet Track Abrasion Test) según la norma de ensayo INV E-778 (INVIAS., 2022) y Absorción de Arena con Rueda Cargada o ensayo LWT (Loaded Wheel Tester) de acuerdo a la norma de ensayo INV E - 779 (INVIAS., 2022), los cuales de manera individual establecen el porcentaje de emulsión mínimo y el porcentaje de emulsión máxima correspondientemente.

#### **6.1.1. Contenido de emulsión teórico**

Antes de determinar el contenido óptimo de la emulsión, se establece un valor teórico que sirve como punto de partida para llevar a cabo los ensayos WTAT y LWT. Dicho valor inicial es

establecido mediante la metodología de Duriez (Ibarra & Paba, 2022), la cual es un enfoque de diseño que permite estimar la cantidad adecuada de asfalto residual en la mezcla. Esta metodología se basa en cálculos específicos que considera factores como la granulometría, la superficie y peso específico del agregado pétreo (Ibarra & Paba, 2022).

Puesto que la metodología implementada como se mencionó, solo se basa en cálculos donde se consideran únicamente factores referentes al agregado pétreo, el contenido teórico de asfalto residual será de 8.1% para ambas lechadas asfálticas. La diferencia en la dosificación de la emulsión radica en que estas cuentan con diferentes contenidos de asfalto, siendo un 12.7% para la emulsión asfáltica con GCR (63.6% de contenido de asfalto) y un 13.0% para la emulsión asfáltica estándar (62.2% de contenido de asfalto). En el Apéndice C se encuentra los cálculos para la determinación del contenido óptimo de asfalto.

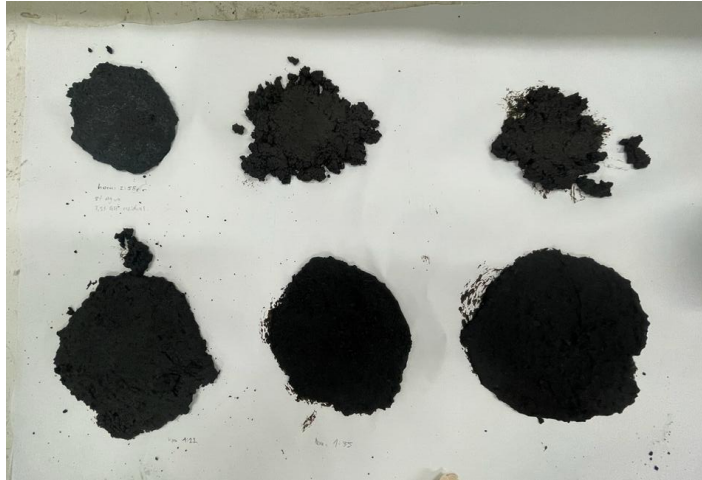
#### ***6.1.2. Condiciones de mezclado***

Previo a la determinación del contenido óptimo de asfalto, se establecieron las condiciones de mezclado para el contenido teórico calculado anteriormente por metodología de Duriez. Estas condiciones de mezclado se determinaron por medio de manejabilidades llevando la lechada hasta un tiempo de mezclado igual a tres minutos, momento en que se extienden para evaluar su consistencia y rotura franca de la emulsión.

Las condiciones de mezclado permiten determinar la consistencia de la lechada y fijar el contenido de humedad total en la mezcla, un valor que se mantendrá constante incluso si hay discrepancias entre el valor teórico y el óptimo del asfalto. En la Figura 10 se muestran las lechadas resultantes de este proceso.

**Figura 10.**

*Lechadas obtenidas durante la determinación de las condiciones de mezclado.*



Las condiciones de mezclado preliminares al contenido teórico de asfalto para las lechadas se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Condiciones preliminares de mezclado de las lechadas asfálticas.*

EMULSIÓN EMPLEADA	EMULSIÓN ESTÁNDAR	EMULSIÓN CON GCR
Contenido de asfalto [%]	8.1	8.1
Contenido de emulsión [%]	13	12.7
Agua de preenvuelta y mezclado [%]	8	7
Contenido de cemento Portland [%]	1	1
Contenido de aditivo [%]	0	0.5
<b>Humedad total de mezclado [%]</b>	<b>12.9</b>	<b>11.6</b>
Tiempo de mezclado [min:seg]	3:00	3:00
Tiempo de rotura [min]	4.75	25

**6.1.3. Ensayo de abrasión (WTAT)**

Teniendo en cuenta las condiciones de mezclado determinadas, se procedió a realizar los especímenes de prueba variando el porcentaje de asfalto residual. El asfalto residual se varió entre el 6.5% y 8.0% para la lechada con emulsión estándar y entre el 7.5% y 9.0% para la lechada con emulsión con GCR. Es de importancia recalcar que este ensayo permite determinar el contenido

de asfalto mínimo para el máximo desgaste permitido, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Resultados del ensayo WTAT para ambas lechadas asfálticas.*

<b>EMULSIÓN ESTÁNDAR</b>				
<b>Asfalto residual [%]</b>	6.5	7.0	7.5	8.0
<b>Contenido de emulsión [%]</b>	10.5	11.3	12.1	12.9
<b>Promedio Pérdidas [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>930</b>	<b>694</b>	490	318
<b>EMULSIÓN CON GCR</b>				
<b>Asfalto residual [%]</b>	7.5	8.0	8.5	9.0
<b>Contenido de emulsión [%]</b>	11.5	12.6	13.4	14.2
<b>Promedio Pérdidas [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>5305</b>	<b>4657</b>	<b>3828</b>	<b>3180</b>

La especificación técnica en el artículo 433-22 del Invias permite un desgaste máximo de 650 [g/m<sup>2</sup>]. En consecuencia, la lechada asfáltica con emulsión asfáltica estándar debe contener un mínimo de 7.5% de asfalto para cumplir con este requerimiento. Sin embargo, en el caso de la lechada con emulsión con GCR, no se logró satisfacer las exigencias de desgaste, lo que impidió continuar con el diseño de dicha lechada. Esto probablemente se debió a la incompatibilidad del agregado pétreo con la emulsión asfáltica, puesto que por separado cada componente presenta propiedades mecánicas adecuadas. Esta hipótesis se podría comprobar realizando un nuevo diseño con la misma emulsión, pero con un agregado de otra fuente totalmente diferente al Río Chicamocha.

**6.1.4. Ensayo de Absorción de Arena con Rueda Cargada (LWT)**

Se procedió únicamente con el diseño de la lechada asfáltica con emulsión estándar con el fin de finalizar el proceso realizado. Como se mencionó anteriormente, este ensayo permite determinar el contenido de asfalto máximo donde se presenta la máxima absorción de arena expuesta en la especificación técnica y al igual que en el ensayo WTAT, se parte de las mismas

condiciones de mezclado antes determinadas, se realizaron los especímenes de prueba y se varió el porcentaje de asfalto residual entre el 7% y el 8.5%, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

*Resultados del ensayo LWT para la lechada asfáltica con emulsión estándar.*

<b>EMULSIÓN ESTÁNDAR</b>				
<b>Asfalto residual [%]</b>	7.0	7.5	8.0	8.5
<b>Contenido de emulsión [%]</b>	11.3	12.1	12.9	13.7
<b>Absorción de arena [g/m<sup>2</sup>]</b>	160	169	405	<b>627</b>

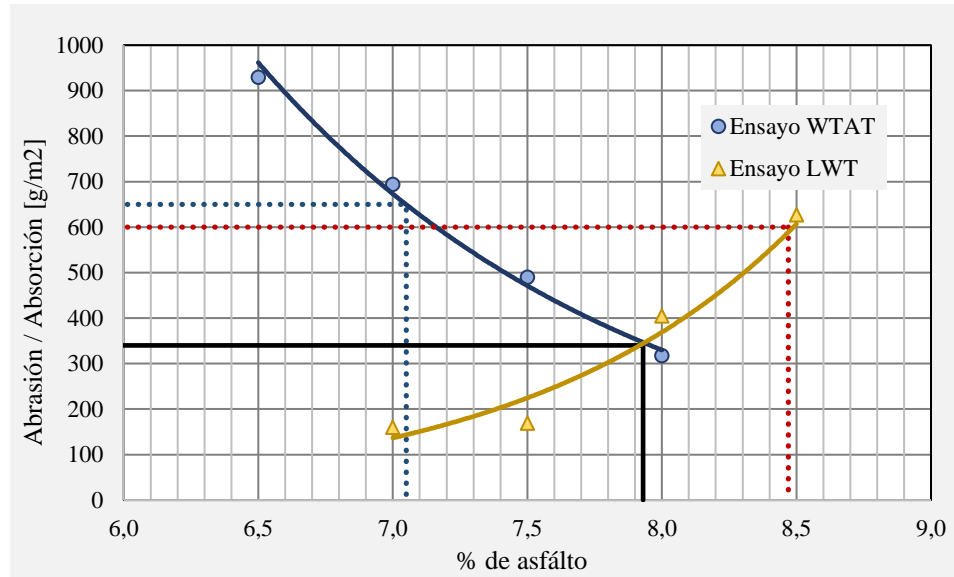
La especificación técnica en el artículo 433-22 del INVIAS permite un valor de absorción máximo de 600 [g/m<sup>2</sup>]. Por lo cual, la lechada asfáltica con emulsión asfáltica estándar debe contener un valor máximo de 8.0% de asfalto para cumplir requerimientos de absorción.

**6.1.5. Correlación de los ensayos de WTAT y LWT**

Con los ensayos ejecutados y los resultados obtenidos se estableció la representación gráfica de estos, Figura 11, generando una curva de tendencia para cada ensayo y determinando el punto de intersección de estas, punto al cual corresponde el contenido óptimo de asfalto de la lechada.

**Figura 11.**

*Curva de Abrasión y Absorción VS Contenido de asfalto de la lechada con emulsión estándar.*



Según se desprende de la representación gráfica de la Figura 11, el porcentaje de asfalto máximo que permite alcanzar la máxima absorción de arena admisible ( $600 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ) es de 8,5%, mientras que el porcentaje mínimo de asfalto que ocasiona la máxima abrasión o desgaste permitido ( $650 \text{ [g/m}^2\text{]}$ ) corresponde a 7,0%. Como resultado, el contenido óptimo de asfalto en la lechada es el siguiente:

- Contenido de asfalto residual óptimo 7.9%
- Concentración de asfalto en la emulsión 62.2%
- Contenido de emulsión óptima 12.7%

## 6.2. Ensayo de cohesión

Una vez establecido el óptimo de asfalto y las condiciones preliminares de mezclado, se procede a llevar a cabo nuevamente ensayos de manejabilidad de la mezcla, que permiten conocer a fondo el comportamiento de la mezcla. Realizando variaciones en cada uno de sus componentes

se puede establecer que factores benefician o afectan la respuesta de la lechada, dando un panorama más claro a la hora de realizar las aplicaciones de estas mezclas en campo.

Durante estos ensayos, se variaron uno a uno las proporciones de cada componente según lo requería la mezcla manteniendo constante el valor de humedad total previamente determinado. El objetivo era evaluar el comportamiento de la mezcla, verificar su consistencia y finalizar la definición de las condiciones de mezcla definitivas. La ejecución de estos ensayos se puede observar en la Figura 12.

### **Figura 12.**

*Ensayos de manejabilidad de la mezcla con el óptimo de asfalto*



Una vez definidas las condiciones de mezcla, se procedió a crear las pastillas para llevar a cabo el ensayo de cohesión. Este ensayo proporciona información sobre el momento en que se produce la rotura de la emulsión y la cohesión mínima requerida en la lechada asfáltica para permitir la apertura al tráfico de manera inmediata, la cual equivale a 20 [kg/cm].

Además, este ensayo permite llevar a cabo la clasificación de la lechada en términos de curado. Una mezcla se clasifica como de curado lento cuando su cohesión a los 30 minutos es inferior a 12 [kg/cm]. En el caso de las mezclas de curado rápido y apertura lenta, la cohesión supera los 12 [kg/cm] a los 30 minutos, pero es inferior a 20 [kg/cm] a los 60 minutos. Finalmente,

las mezclas de curado y apertura rápidos presentan una cohesión superior a 20 [kg/cm] a los 60 minutos. Al momento de clasificarla se brinda la información sobre cómo evoluciona el proceso de curado y fraguado de la mezcla a medida que transcurre el tiempo. Los resultados obtenidos en laboratorio se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Resultados de cohesión en función del tiempo*

Espécimen No.	Hora de elaboración	Hora de rotura	Hora de ensayo del espécimen	Cohesión [kg/cm]	Humedad [%]	Tiempo [min]
1	10:00	10:09	10:30	16	7.3	30
2	10:00	10:09	11:00	19	6.2	60
3	10:00	10:09	11:30	23	5.2	90
4	10:00	10:09	12:00	25	4.8	120
5	10:00	10:09	12:30	27	4.3	150

Como se observa en la tabla anterior, la mezcla diseñada se clasificaría como una lechada asfáltica de curado rápido y apertura lenta y su apertura al tráfico se podría dar a los 68 minutos posterior aplicación que sería el momento en que alcanza una cohesión igual a 20 [kg/cm].

### 6.3. Fórmula de trabajo

La fórmula de trabajo determinada para las condiciones óptimas de diseño y una temperatura ambiente se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Condiciones óptimas de mezclado.*

EMULSIÓN POR EMPLEAR	EMULSIÓN ESTÁNDAR CRL-1HM
Contenido de asfalto [%]	7.9
Contenido de emulsión al 62.2% de asfalto [%]	12.7
Agua de pre-envuelta y mezclado [%]	8.1
Contenido de cemento Portland [%]	1
Contenido de aditivo [%]	0
<b>Humedad total de mezclado [%]</b>	<b>12.9</b>
Tiempo de mezclado [min:seg]	3:00
Tiempo de rotura en laboratorio [min]	4.8

Es importante recalcar que estas condiciones óptimas de mezclado se presentan en un ambiente de laboratorio, donde la temperatura es controlada a 25°C, razón por la cual estas proporciones pueden presentar una variación al momento de su aplicación. Además, de acuerdo con las tolerancias permitida por la especificación técnica y en relación con el control del diseño, se estableció un intervalo de trabajo del asfalto residual, el cual deberá estar entre el 7.5% y el 8.4%.

### 7. Implementación del diseño en un caso práctico

El diseño de lechada asfáltica elaborado con la emulsión asfáltica estándar fue implementado en un caso práctico, específicamente en la intervención de la zona central de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Los Garzones, en Montería, Córdoba. En este proyecto, se aplicó un total de 40030 [m<sup>2</sup>] de lechada asfáltica bajo especificación de la Federal Aviation Administration (FAA); especificación técnica tipo II FAA P-626 (FAA., 2018). Siendo esta la especificación técnica que rige en el contexto aeroportuario.

Es importante destacar que, aunque esta lechada se ajusta a los requisitos de la especificación tipo LA-5 INV E 433 (INVIAS.,2022), que es su homóloga, la especificación FAA presenta algunas variaciones, principalmente en los criterios relacionados con el agregado pétreo. Sin embargo, el diseño se adaptó de manera adecuada a los requisitos de dicha especificación. Es por esto que en la Tabla 11 se expone el reporte de calidad de agregado así como los requisitos de las especificaciones técnicas antes mencionadas.

**Tabla 11.**

*Requisitos del agregado pétreo para especificaciones FAA e INVIAS.*

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN TECNICA DE REFERENCIA		REPORTE DE CALIDAD
	FAA P-626	INV E ART 433	
Desgaste en máquina de los ángeles, 100 revoluciones [%]	Máx: 35	Máx: 25	4.7
Desgaste en máquina de los ángeles, 500 revoluciones [%]			24.7
Equivalente de arena [%]	Mín: 45	Mín: 50	63
Azul de metileno	N.A.	Máx: 10	8
Solidez en sulfato de magnesio [%]	Máx: 25	Máx: 18	14.7
Caras fracturadas (Retenido en No. 4) [%]	N.A.	REPORTAR	100
Angularidad de la fracción fina [%]	N.A.	Mín: 45	46.5
Peso volumétrico suelto y seco [kg/m <sup>3</sup> ]	REPORTAR	REPORTAR	1627

Se observa que los requisitos en cuanto al agregado pétreo son más exigentes en lo que tiene que ver a la especificación técnica del INVIAS, esto se puede deber a las grandes sollicitaciones de servicio que presentan los pavimentos de los aeropuertos.

En la Figura 13 y Figura 14 se evidencia la aplicación de capas de lechada asfáltica, donde es de importancia recalcar que la totalidad de estas aplicaciones se realizaron en jornadas nocturnas, con temperaturas promedio del ambiente de 28°C y obteniendo tasas de aplicación entre los 7.8 y 8.5 [kg/m<sup>2</sup>]. Mientras que en la Figura 15 se exponen la mezcla aplicada como tramo de prueba posterior a dos días de servicio.

El proceso de instalación de la lechada asfáltica se llevó a cabo con equipos VSS Macropaver, los cuales cuentan con una tasa de producción de 1450 kg de lechada/min y una capacidad de carga de nueve metros cúbicos de agregado.

**Figura 13.**

*Lechada asfáltica recién aplicada en el aeropuerto Internacional Los Garzones, Montería.*



**Figura 14.**

*Proceso de instalación de la lechada asfáltica.*

**Figura 15.**

*Textura y acabado de la lechada posterior a 2 días de servicio.*



Es importante aclarar que el acabado y/o textura de la lechada asfáltica cambiará a medida del paso de las aeronaves, las cuales harán un proceso de compactación adicional y sellarán la mezcla aplicada.

En el componente práctico se presentaron variaciones significativas en las proporciones del diseño, sobre todo en los fluidos, requiriendo adicionar un aditivo retardante de rotura y aumentando el porcentaje de agua de pre-envuelta, lo cual aumentó la humedad total de la mezcla y retrasó la cohesión, por ende, la apertura al tráfico o puesta en servicio. Estas variaciones se presentan en la Tabla 12 y se puede concluir que se deben a las condiciones específicas de la zona de aplicación, como se mencionó anteriormente se contaba con temperaturas promedio de 28°C mientras que el proceso de diseño en laboratorio se realiza a una temperatura controlada de 25°C.

**Tabla 12.**

*Proporciones de la mezcla de diseño VS aplicado.*

MATERIA PRIMA	DISEÑO DE LABORATORIO	APLICADO EN OBRA
Contenido de asfalto [%]	7.5 - 8.4	7.5
Contenido de emulsión [%]	12.1 - 12.9	12.9
Agua de pre-envuelta y mezclado [%]	8.1	10.8
Llenante mineral [%]	1	1.1
Contenido de aditivo retardante [%]	0	1.3
<b>Humedad total de mezclado [%]</b>	<b>12.9</b>	<b>16.8</b>
Tiempo de mezclado [min:seg]	3:00	3:00
Tiempo de rotura [min]	4.8	6,25
Tasa de aplicación [kg/m <sup>2</sup> ]	8.14	8.0

A pesar de que el contenido de asfalto aplicado se encuentra en el rango mínimo, el contenido de emulsión se encuentra en el rango máximo, esto es debido a que en la producción de emulsión para la ejecución de la obra el contenido de asfalto en este varío, presentando un 58.5% de asfalto en emulsión, siendo menor en relación con el de diseño (61.2% de asfalto en la emulsión).

Como se observa en la Tabla 12 el contenido de asfalto residual aplicado en obra se encuentra en el lado seco del rango (7.5%); esto se debe a una decisión técnica teniendo en cuenta las altas condiciones climáticas durante la operación diaria de la zona intervenida, como se observan en la Figura 16 el pavimento podían alcanzar los 57°C a las 10:00 am, temperaturas que

pueden ocasionar una exudación del asfalto en la mezcla y un retraso en el curado de esta debido a que se consideran mezclas ricas en asfalto.

**Figura 16.**

*Temperatura del pavimento, medida a las 10:00 am con temperatura ambiente promedio de la zona.*



Las variaciones en las proporciones de la mezcla se pudieron presentar debido a las siguientes razones:

- Las variaciones en la temperatura ambiente, puesto que el diseño se implementó en laboratorio a 25°C, mientras que la temperatura promedio en el aeropuerto durante las aplicaciones fue de 28°C.
- Humedad del agregado. Durante el proceso de diseño, el agregado se considera completamente seco (%w = 0%), sin embargo, en la obra, este agregado contiene un cierto porcentaje de agua, incluso si es mínimo. Dicho contenido de humedad se incorpora en la mezcla como agua. No obstante, su efecto en la mezcla depende de

la capacidad de absorción del agregado, lo que determina si esa humedad contribuirá o no al comportamiento de la mezcla.

- La temperatura del pavimento existente, esta es una variable que no se tiene en cuenta al momento de diseñar y afecta considerablemente la aplicación de la mezcla.
- La masa de mezcla, cuando se realizan manejabilidades para determinar proporciones de mezcla se realiza con una masa de agregado fija de 400 [g], mientras que en la máquina aplicadora se trabajó con una producción entre los 1500 y 1600 [kg/min] de agregado. Por lo cual la cantidad de mezcla a trabajar puede afectar el comportamiento.

## 8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se logró con éxito el diseño de una emulsión asfáltica con Grano de Caucho Reciclado (GCR). Esta emulsión presenta una buena estabilidad al almacenamiento y el asfalto residual modificado presenta cualidades favorables de elasticidad y modificación del punto de ablandamiento. Sin embargo, su aplicación en lechadas asfálticas se ve obstaculizada por su incapacidad para cumplir con los requisitos de desgaste en el ensayo de abrasión WTAT (INVIAS, 2022).

No obstante, una mayor investigación podría explorar posibles soluciones; una vía consistiría en realizar un nuevo estudio para el diseño de lechadas asfálticas, implementando variaciones en el agregado pétreo, centrándose particularmente en su naturaleza o implementando mejoradores de adherencia. Tales variaciones podrían abordar los problemas de desgaste o desprendimiento presentados y que pueden derivarse de la compatibilidad entre la emulsión y el agregado pétreo. Alternativamente, un estudio adicional podría evaluar aplicaciones diferentes para esta emulsión, donde se podría analizar la impermeabilización, los riegos de liga o la estabilización de bases.

Además, se logró la implementación en el ámbito práctico de un diseño de lechada asfáltica, tipo LA-5 según INVIAS en su ART. 433-22 (INVIAS, 2022) o tipo II según especificación técnica FAA P-626 (FAA, 2018) con emulsión asfáltica estándar para estos productos, interviniendo la zona central de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional Los Garzones, en Montería, Córdoba. Cabe destacar que se presentaron variaciones significativas en las proporciones de mezclado debido a las exigencias climáticas de la zona.

En resumen, este proyecto ha brindado una valiosa oportunidad para abordar de manera efectiva el problema medioambiental que rodea a los NFU y su inadecuada disposición. Si bien la solución planteada por este proyecto no fue 100% acertada, se puede concluir que esta abre la puerta e invita a la implementación de soluciones innovadoras y sostenibles, que se ha demostrado anteriormente que es posible aprovechar los recursos reciclados y transformarlos en mejoras concretas en la infraestructura vial.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis o estudio para la implementación de la emulsión asfáltica con GCR diseñada en el presente proyecto en otros ámbitos, así como realizar un nuevo diseño de lechada asfáltica variando el agregado pétreo con el fin de descartar problemas de compatibilidad entre ellos.

Adicionalmente, se podrían explorar nuevas metodologías de diseño de lechadas asfálticas donde se incluyan variables como los factores climáticos de la zona a intervenir, puesto que, dependiendo de estas, las proporciones de mezclado pueden variar significativamente afectando el comportamiento de la mezcla y afectando las cantidades de materia prima en las posibles obras.

A pesar de los desafíos encontrados, el proyecto ha demostrado la viabilidad de aprovechar recursos reciclados para mejorar la infraestructura vial. Se sugiere seguir explorando enfoques sostenibles en la industria vial, fomentando la investigación y desarrollo de técnicas que contribuyan a la exhibición del medio ambiente y la calidad de las carreteras.

### Referencias Bibliográficas

- ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO*. (n.d.).
- Croteau, J. M., Davidson, J. K., & Perrone, P. (n.d.). *SURFACE SLURRY SEALING SYSTEMS IN CANADA: PERFORMANCE AND PRACTICE*.
- FAA. (2018). Ítem P-626. Tratamiento Superficial Tipo Lechada Asfáltica (Slurry Seal).
- Hernández, G., Rodríguez, R., Blanco, R., & Castaño, V. M. (1997). Mechanical Properties of the Composite Asphalt-Styrene-Butadiene Copolymer at High Degree of Modification. *International Journal of Polymeric Materials*, 35, 129–144.  
<https://doi.org/10.1080/00914039708039759>
- Herrera Moreno, Y. J. (2021). *Análisis Comparativo de los Parámetros para la Estabilidad y el Flujo de una Mezcla Asfáltica MDC-25 con una Mezcla Asfáltica MDC-25 Modificada con Grano de Caucho Reciclado*. 1–111.
- Ibarra, L., & Paba, I., (2022). DISEÑO DE LECHADA ASFÁLTICA CON EMULSIÓN MODIFICADA CON POLIMERO CRL-1hm. 1-14.
- INVIAS. (2012). *Art. 433. Lechada asfáltica*. 1–17.
- Capítulo 1 - Normas Invias Colombia - CAPÍTULO 1 – ASPECTOS GENERALES., (2012).  
<https://www.studocu.com/co/document/universidad-pontificia-bolivariana/mecanica-de-suelos/capitulo-1-1-normas-invias-colombia/12622758>
- INVIAS. (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*, 1–440.
- Jiménes Acuña, M. (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica)., Sibaja Obando, D. (Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica)., & Molina Zamora, D. (Laboratorio Nacional de Materiales y

Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica). (2008). *EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD EN LA APLICACIÓN DE SELLOS DE LECHADA ASFÁLTICA "SLURRY SEALS" EN COSTA RICA.*

Jiménes Acuña, M., Ulloa calderon, A., & Múnera Miranda, J. C. (n.d.). *GUÍA DE DISEÑO DE MEZCLA DE LABORATORIO PARA LOS SELLOS DE LECHADA ASFÁLTICA (SLURRY SEALS).*

Martínez-Gallego, M. C. (2017). *Análisis de contexto de los factores críticos y de éxito, que influyen en la creación de una plana de reciclaje de neumáticos fuera de uso para el Municipio de Yopal Casanare.* 112.

Morante, M. B. (2019). *Utilización de gránulos de caucho triturado de neumáticos fuera de uso en mezclas asfálticas en frío con emulsión y material fresado.* 122.  
[http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/16263/Tesis\\_Morante\\_Gomez\\_Mary\\_Belen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/16263/Tesis_Morante_Gomez_Mary_Belen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nazer, A., Honores, A., Chulak, P., & Pavez, O. (2019). Sustainable concrete based on out-of-use tire fibers. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(3), 723–729.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.03.17>

*Parque automotor registrado en RUNT | RUNT.* (2023). [https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor?field\\_fecha\\_de\\_la\\_norma\\_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2019](https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2019)

Pierini, C., Bracho, C., & Gonzáles, G. (2006). Formulation of asphalt emulsions with lignin derivatives and its behavior with mixtures of stony materials. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 29(2), 134–143.  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-)

07702006000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Quintana López, J. K. (2018). *MORTERO ASFÁLTICO O SLURRY SEAL COMO TRATAMIENTO SUPERFICIAL PARA PAVIMENTOS DE AFIRMADO TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL PRESENTADA POR.* Universidad Ricardo Palma.

Rd, R., C-, B., & Ellyn, G. (2010). Normas de rendimiento recomendadas para slurry seal de asfalto emulsionado. *Issa*.

*Slurry Surfacing - International Slurry Surfacing Association.* (n.d.). Retrieved May 18, 2023, from <https://www.slurry.org/page/Slurry>

Ulloa Duarte, J. (2002). *CONSERVACION DE PISTAS AEREAS CON LECHADAS ASFALTICAS MODIFICADAS CON POLIMERO. 1.*

### Apéndices

#### Apéndice A. Requisitos del agregado pétreo para lechadas asfálticas

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
<b>Dureza (O)</b>				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%)	E-218	25	25	25
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	25	20
<b>Durabilidad (O)</b>				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%)	E-220	18	18	18
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	10	10
<b>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</b>				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239	45	45	45
<b>Índice de Adhesividad (O)</b>				
Riedel-Weber, mínimo (Nota 2)	E-774	4	4	4

Nota: Requisitos del agregado para su uso en lechadas asfálticas. Tomado de “Artículo 433-22 del INVIAS, Tabla 433-1” (INVIAS, 2022)

#### Apéndice B. Gradaciones del agregado para lechadas asfálticas.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,180	0,075
	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 8	Nro. 16	Nro. 30	Nro. 50	Nro. 80	Nro. 200
Pasa tamiz (%)									
LA – 13	100	85 – 100	60 – 85	40 – 60	28 – 45	19 – 34	12 – 25	7 – 18	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
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	4 %			3 %				1 %	

Nota: Gradaciones del agregado para los diferentes tipos de lechadas asfálticas. Tomado de “Artículo 433-22 del INVIAS, Tabla 433-4” (INVIAS, 2022)

**Apéndice C. Cálculo de % teórico de asfalto por método de Duriez.**

**AGREGADO:** Rio chicamocha

$$FSE = \frac{2.5}{(D * d)^{\frac{1}{2}}}; \text{ Siedo } D = \text{ Diametro mayor [mm] y } d = \text{ Diametro menor [mm]}$$

TAMIZ	FSE	% RET PARCIAL	FSE x % RET PARCIAL
No. 4	0.371	3.5	1.2985
No. 8	0.743	25.6	19.0208
No. 10	1.146	0	0
No. 16	1.486	17.4	25.8564
No. 30	2.984	15	44.76
No. 40	2.728	0	0
No. 50	5.972	14	83.608
No. 80	10.904	8.1	88.3224
No. 100	11.884	0	0
No. 200	23.649	6.7	158.4483
P. 200	130	9.7	1261
<b>SUMA</b>		<b>100</b>	<b>1682.3144</b>

TIPO DE MEZCLA	NORMA	K
Lechada	LA-5	4.5 - 4.8

$$S = \frac{(\sum FSE * \%RET PARCIAL)}{100}$$

K: Coeficiente o modulo de riqueza 4.60  
 A: Factor de corrección por densidad 1.00  
 S: Superficie especifica del conjunto de agregados 16.82

$$\%L = K * (S * A)^{\frac{1}{5}}$$

% Asfalto residual (%L) 8.1

*Nota:* Cálculo del porcentaje teórico de asfalto por la metodología de Duriez. Tomado y adaptado de laboratorio de pavimentos de C.I. MPI LTDA.