



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON RAP
ESTABILIZADAS CON CAL HIDRATADA Y CEMENTO.

Autores: Viviana Bermeo & Hugo Machado

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., 2024

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON RAP ESTABILIZADAS CON CAL HIDRATADA Y CEMENTO

**VIVIANA ALEXANDRA BERMEO TISOY
HUGO FERNEY MACHADO BRICEÑO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, COLOMBIA**

2024



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON RAP
ESTABILIZADAS CON CAL HIDRATADA Y CEMENTO.

Autores: Viviana Bermeo & Hugo Machado

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., 2024

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON RAP
ESTABILIZADAS CON CAL HIDRATADA Y CEMENTO**

**VIVIANA ALEXANDRA BERMEO TISOY
HUGO FERNEY MACHADO BRICEÑO**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
MAGISTER EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

DIRECTOR:

PROF. JUAN MIGUEL SÁNCHEZ DURÁN

CODIRECTOR:

PROF. CARLOS EDUARDO TORRES ROMERO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, COLOMBIA**

2024



Agradecimientos

El presente proyecto se dedica principalmente a Dios Todopoderoso, mis padres, Elizabeth Briceño Medina y Fernando Machado Ortiz, mi hermosa hija Isabella Machado Romero, a nuestro tutor, Juan Miguel Sánchez quien con mucho entusiasmo ha participado y hecho seguimiento a la presente investigación, finalmente y de acuerdo al verso Hebreos 10:36-39 NVI “Ustedes necesitan perseverar para que, después de haber cumplido la voluntad de Dios, reciban lo que él ha prometido” Te agradezco padre todo poderoso por permitir cumplir el sueño de un escalón más en mi vida profesional.

Hugo Ferney Machado Briceño

La culminación del trabajo realizado por un peldaño más a nivel educativo que representa el presente documento, es el fruto de la vida que nos da un Dios Todopoderoso en su infinita sabiduría y fortaleza otorgada para caminar con paso firme en los objetivos trazados de enriquecer el hacer profesional. En ese caminar agradezco con el corazón a mis padres, Aura Niria Tisoy Chilito y Carlos Enrique Bermeo Ruiz quienes con su apoyo incondicional fueron el sostén que me permitió conectarme 100% con la vida educativa; a mi amado y bello hijo Einer Andrés Portilla Bermeo quien ha sido más fuerte que yo esperando con paciencia cada momento en familia e incluso alentando este momento del deber cumplido; a mi paciente pareja Jhoan Sebastián Fajardo García por su espera y escucha aun cuando no entendiera lo que le estaba diciendo, a mi exjefe Jorge Andrés Arcos Caicedo y jefe Doris Mutumbajoy Lucero quienes otorgaron sin objetar los permisos laborales para hacer esto posible, por su puesto y sin menor importancia al ingeniero Juan Miguel Sánchez Duran, director de trabajo de grado, quien con su conocimiento y asesoría oriento la ruta para la terminación de la presente investigación.

Viviana Alexandra Bermeo Tisoy



Evaluación de mezclas asfálticas en frío con RAP estabilizadas con cal hidratada y cemento

Resumen

El crecimiento acelerado de las ciudades, así como de la población incrementa de manera paralela la demanda de recursos que suplan las necesidades habitacionales, laborales, recreativas, entre otras, que requieren de un buen sistema de transporte. Si bien, en la actualidad desde el Ministerio de Medio Ambiente de la mano con el Ministerio de Transporte, se hace alusión un poco más intrusiva de la infraestructura verde y de los modos de transporte a los que se debe migrar para un ambiente más sostenible, no se puede dejar de lado los sistemas con los que ya se cuentan para trasladarse de un lugar a otro y que requieren atención urgente para su mantenimiento y rehabilitación. En este sentido, el presente documento analiza un nuevo uso de los materiales que ya cumplieron un primer ciclo de vida, tal y como se realiza desde los años 50 en Estados Unidos y Europa, precisamente en Francia con el asfalto de repavimentado en frío denominado 'Emulsión Grava' de acuerdo con (Day, Lancaster, & McKay, 2019), fuera de la estructura de soporte del pavimento: base o subbase; como lo es la capa de rodadura; aplicado a Colombia de características especiales por el comportamiento climático. Se resalta, que no es el primer estudio realizado en el país, y que ya han sido adelantados incluso aplicaciones a escala en vías de las ciudades de Bogotá, Medellín y San Andrés a fin de evaluar su comportamiento; no obstante, el estudio verifica a nivel experimental en laboratorio pruebas que permiten aportar a la bibliografía de esta tecnología para una mezcla en frío adicionada con agregados vírgenes y de uso como capa de rodadura, diferente a los estudios principalmente realizados sobre mezclas en caliente.

Palabras clave: Pavimentos reciclados, cal, cemento, emulsión, sostenibilidad



Evaluation of cold asphaltic mixes with RAP stabilized with hydrated lime and cement

Abstract

The accelerated growth of cities, as well as of the population, increases in parallel the demand for resources to meet the needs of housing, work, recreation, among others, which require a good transportation system. Although the Ministry of the Environment, together with the Ministry of Transportation, is currently making more intrusive allusions to green infrastructure and the modes of transportation to which we must migrate for a more sustainable environment, we cannot leave aside the systems that we already have to move from one place to another and that require urgent attention for their maintenance and rehabilitation. In this sense, this document will deal with the proposal to make a new use of materials that have already completed their first life cycle, as it has been done since the 50's in Europe and North America; applied to our region with special characteristics due to its climatic behavior. It should be noted that this is not the first study carried out in the country, and that scale applications have already been carried out on roads in the cities of Bogotá, Medellín and San Andrés in order to evaluate their behavior; however, the scope of the proposal is to contribute to the bibliography of this technology for a cold mix added with virgin aggregates and for use as a wearing course, different from the studies mainly carried out on hot mixes.

Keywords: Recycled pavements, lime, cement, emulsion, sustainability

Índice

	Pág.
Resumen	III
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Lista de símbolos y/o abreviaturas y/o acrónimos	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. OBJETIVOS.....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivos específicos	4
4. MARCO NORMATIVO	5
4.1 Caracterización de materiales.....	5
4.1.1.1 Pavimento asfáltico reciclado - RAP	5
4.1.1.2 Agregados pétreos de adición	6
4.1.2. Emulsión asfáltica.....	8
4.2 Método de diseño	9
4.3 Ensayos de laboratorio para mezclas asfálticas en frio con RAP y modificadas	9
5. ESTADO DEL ARTE.....	11
6. METODOLOGÍA	17
7. RESULTADOS.....	26
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	35
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	45

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1. Ruta metodológica propuesta. Descripción: RAP es la sigla de pavimento asfáltico reciclado. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	21
Figura 2. Curva granulométrica muestra 1 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	27
Figura 3. Curva granulométrica muestra 2 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	28
Figura 4. Curva granulométrica muestra 3 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	28
Figura 5. Curva granulométrica agregado de adición. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del agregado de adición frente a la franja establecida por la norma INV E 461. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	29
Figura 6. Gráficas de variación de la resistencia frente al contenido de emulsión. Descripción: Comportamiento de la resistencia seca y húmeda de las mezclas elaboradas a partir de diferentes contenidos de emulsión y su respectiva resistencia conservada. Fuente: Elaboración propia, 2024.....	31
Figura 7: Análisis gráfico diseño inmersión – compresión. Fuente: Elaboración Propia 2024....	37
Figura 8 Resultados de los ensayos de modulo resiliente por compresión diametral para la muestra patrón y las tres muestras modificadas. Fuente: Elaboración propia 2024.....	38
Figura 9: Resultados ensayo Cántabro, perdida por desgaste promedio de tres evaluaciones. Fuente: Elaboración propia 2024.....	39
Figura 10: Resultados ensayo inmersión compresión para muestra control y muestras modificadas. Fuente: Elaboración propia 2024.....	40
Figura 11: Resultados ensayo de tracción indirecta a muestra patrón y muestras modificadas. Fuente: Elaboración propia 2024.....	41

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ensayos de caracterización del RAP. Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.....	6
Tabla 2. Ensayos de caracterización de los agregados pétreos. Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.	7
Tabla 3. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas. Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.	8
Tabla 4. Criterios de resistencia para el diseño de mezcla en frío con RAP. Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.	9
Tabla 5. Ensayos de laboratorio para evaluación de la mezcla asfáltica diseñada patrón frente a las modificadas. Fuente: Elaboración propia, 2023.	10
Tabla 6: Usos de la emulsión asfálticas catiónica de acuerdo al tipo de emulsión. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	12
Tabla 7: Características de la Cal Tipo N - Fuente CALCO de Colombia	18
Tabla 8: Especificaciones técnicas del cemento de uso general - Fuente Grupo Argos	18
Tabla 9: Especificaciones técnicas emulsión asfáltica CRL-1- sobre la emulsión. Descripción: Resultados de ensayos sobre la emulsión según ficha técnica de INCOASFALTOS. Fuente: INCOASFALTOS.....	19
Tabla 10. Contenido y/o tipo de materiales para la investigación. Descripción: Para cada material esencial en el diseño de la mezcla se deberán tener en cuenta las consideraciones aquí contenidas. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	21
Tabla 11. Metodología por objetivos y actividades de acuerdo a la ruta propuesta. Descripción: Las actividades relacionan las propiedades a tener en cuenta en el análisis de comportamiento de las mezclas. Fuente: Elaboración propia, 2022.	23
Tabla 12. Porcentaje de asfalto. Descripción: Porcentaje de asfalto obtenido de los ensayos de extracción del RAP. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	26
Tabla 13. Resultados de caracterización de material pétreo de adición. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra de material pétreo virgen. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	30

Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión simple. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024.....	31
Tabla 15: Resistencia a la compresión seca y húmeda (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024.	32
Tabla 16: Resistencia a la tensión en condición seca y húmeda. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024.....	32
Tabla 17: Perdida por desgaste cántabro. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024	33
Tabla 18: Combinaciones y/o número de mezcla. Descripción: Contiene las combinaciones de aditivos según porcentaje de participación en la muestra modificada de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024.....	33
Tabla 19: Resistencia a la compresión en seco y en húmedo (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024.....	34
Tabla 20: Resistencia a la tensión en seco y en húmedo. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024	34
Tabla 21: Perdida por desgaste Cantabro. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024	34



UNIVERSIDAD
SANTOTOMAS
SEDE PRINCIPAL

EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO CON RAP
ESTABILIZADAS CON CAL HIDRATADA Y CEMENTO

Autores: Viviana Bermeo & Hugo Machado

Maestría en Infraestructura Vial

Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., 2024

Lista de símbolos y/o abreviaturas y/o acrónimos

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

NTC: Norma Técnica Colombiana

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PNVIR: Plan Nacional de Vías para la Integración Regional

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement o pavimento asfáltico reciclado

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de la malla vial en las zonas rurales ha crecido considerablemente en los últimos años bajo las políticas del gobierno nacional de conectar los centros poblados con infraestructura adecuada que permita el transporte de pasajeros, así como de carga; no es indiferente la situación en las ciudades donde el crecimiento poblacional demanda la extensión del territorio 'habitacional' mediante la urbanización. Esto repercute directamente en el consumo de materiales naturales para la producción de la construcción; sumado a la vigencia alcanzada de la infraestructura vial en específico que requiere mantenimiento y/o rehabilitación en muchos casos, generando desechos de residuos que continúan llenando los acopios de materiales denominados Residuos de Construcción y Demolición RCD y Pavimento Asfáltico Reciclado RAP, entre otros; que impactan negativamente el paisaje por su acumulación así como por la implicación al no ser utilizados, y continuar demandando recursos vírgenes del medio natural.

En este sentido, el incremento de pavimento asfáltico reciclado o RAP por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), sin una destinación útil se convierte en un problema de orden social y ambiental que debe ser atendido desde la multidisciplinariedad con el objeto de reducir los volúmenes de acopio del mencionado material, que permitan reducir la contaminación visual, el uso productivo de los espacios recuperados, y el aporte a la conservación de las fuentes de materiales, como lo es el medio ambiente. En la ciudad de Bogotá, los depósitos de RAP a cargo del IDU ascienden a un volumen de 8000 m³ según (Burgos, 2015) y fueron 'caracterizados' a través de una muestra representativa, empleada para el diseño y realización de ensayos de laboratorio tanto de la mezcla patrón como de las muestras modificadas, con cal hidratada y cemento hidráulico; a fin de analizar el comportamiento, así como el desempeño de estas frente al uso como carpeta de rodadura.

El estudio, basado en el análisis de ensayos de laboratorio, evaluó la viabilidad de utilizar el RAP como agregado pétreo mejorado con aditivos (cal hidratada y cemento) en una mezcla asfáltica en frío para la ciudad de Bogotá. Esta evaluación se realizó considerando los porcentajes de material definidos para el diseño de mezcla, utilizando emulsión asfáltica y RAP, en vías de tráfico liviano.

2. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura vial y la ingeniería de pavimentos han evolucionado incorporando nuevas tecnologías que permiten reutilizar los materiales de las capas asfálticas deterioradas de manera económica y eficiente, aumentando incluso la estabilidad y durabilidad de las vías construidas como lo indica (Bouron, Hammoum, Ruat, Métais, & Lesueur, 2021) en su estado del arte respecto del asfalto poroso modificado con cal en la ciudad de Holanda o, (Wang, Wang, Guo, Wang, & Li, 2020) al referirse a la modificación de las características superficiales del RAP como efectivas.

En este sentido, es necesario concebir estructuras de pavimento con materiales que garanticen un óptimo rendimiento y funcionamiento durante su periodo de diseño y disminuyan la necesidad de ejecución de actividades de mantenimiento, llevando a buen término las estructuras de pavimento, sin llegar a condiciones de falla que impliquen la rehabilitación e incluso reconstrucción de vías de forma anticipada.

De acuerdo con el Plan Nacional de Vías para la Integración Regional – PNVIR del 03/08/2018, la infraestructura vial terrestre del país está conformada por 16.968 Km (9,2%) de red primaria, 45.137 Km (21,9%) de red secundaria y 142.284 Km (68,9%) de red terciaria. (transporte, 2018); estas últimas con tan solo un 6% con rodadura pavimentada, de los cuales solo una cuarta parte se encuentra en buen estado. *Cifras sostenidas en el reporte de Transporte en cifras del año 2021 del Ministerio de Transporte.*

Es de resaltar que en países de Europa e incluso en los Estados Unidos ha sido ampliamente utilizado el RAP en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en frío, así mismo, se cuenta con avances en los estudios de estas nuevas tecnologías; mientras que para Colombia apenas se está investigando, desarrollando e implementando su uso.

De esta manera, sumadas las condiciones actuales de las carreteras y la sobre explotación de materiales vírgenes, así como la necesidad de generar nuevos conceptos para el desarrollo sostenible en Colombia, se ve con relevancia la reutilización de materiales recuperados aún en condiciones de uso aprovechables, como el RAP, incorporando en la fabricación de las nuevas

mezclas asfálticas agentes estabilizantes como la cal hidratada y el cemento, que permitan su uso en la construcción de capas de rodadura para vías de tráfico liviano.

Teniendo en cuenta que en Colombia es cada vez mayor el acopio de material producto del fresado de las capas asfálticas comúnmente denominado RAP por su sigla en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), es conveniente profundizar en nuevos usos para su aprovechamiento, además del de las mezclas asfálticas en caliente, que sólo incorporan el RAP en bajos porcentajes y requieren un alto consumo de agregados vírgenes y energía para su fabricación.

En este caso se evalúa una mezcla asfáltica en frío (elaborada a temperatura ambiente con RAP 'modificado', emulsión asfáltica y agregados de adición) para vías de bajo tránsito en la ciudad de Bogotá, en aras de analizar el comportamiento al incorporar estabilizantes como la cal hidratada y el cemento que han demostrado mejorar características como la rigidez, adherencia, deformación permanente y durabilidad en mezclas asfálticas para estudios en países de Europa y Asia, así como en Estados Unidos.

La presente investigación se desarrolla en alineación con los objetivos del desarrollo sostenible, que buscan mecanismos u acciones que propendan la eficiencia en el uso de los recursos, que genere mejoras ambientales al medio y considere la sostenibilidad de las acciones, a través de la satisfacción de las necesidades del presente, sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones (ONU Bruntland Commission, 1987), como aporte inicial a un trabajo amigable ambientalmente en la ciudad de Bogotá.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la mezcla asfáltica en frío con agregados de pavimentos asfálticos reciclados (RAP) modificada con adición de cal hidratada y cemento para uso en vías de bajo tránsito vehicular a partir de ensayos de laboratorio.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales que integran la mezcla asfáltica según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS.
- Diseñar una mezcla asfáltica en frío con material de pavimentos asfálticos reciclados como muestra de control bajo el método inmersión compresión siguiendo el procedimiento del método Marshall.
- Evaluar la mezcla asfáltica en frío con material de pavimentos asfálticos reciclados, modificada con diferentes porcentajes de adición de cal hidratada y cemento.
- Analizar el aporte de los materiales adicionados a la mezcla asfáltica en frío diseñada.

4. MARCO NORMATIVO

La investigación se desarrolla a luz de la normatividad vigente de alcance nacional reglamentada por el Instituto Nacional de Vías INVIAS en su versión 2013, como entidad responsable de la regulación técnica relacionada con la infraestructura del modo de transporte carretero, específicamente para los fines del proyecto que abarcan los siguientes capítulos:

- ✓ Caracterización de materiales: pavimento asfáltico reciclado RAP, agregados pétreos (gruesos y finos según aplique), emulsión asfáltica.
- ✓ Método de diseño.
- ✓ Ensayos de laboratorio para mezclas asfálticas en frío con RAP y modificadas.

4.1 Caracterización de materiales

A continuación, se relaciona el alcance de la caracterización de los materiales a emplear en función de la fuente. Esto define la realización de los ensayos en el marco de la investigación, que vincula los proveedores de materiales certificados, el suministro de la caracterización de los insumos adquiridos a la luz de la normatividad empleada en el estudio; INVIAS.

4.1.1.1 Pavimento asfáltico reciclado - RAP

El Instituto de Desarrollo Urbano de la ciudad de Bogotá implemento a través de la resolución 1115 del 26 de septiembre del 2012 emitida por la Secretaria Distrital de Ambiente, y *por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital*, artículo 4 parágrafo 2; consideración como ítem de evaluación dentro de los procesos de contratación pública de obras de infraestructura, el uso de material reciclado en un porcentaje superior al 5% (y hasta el 25% con incrementos anuales del 5%) del peso total o volumen total de material usado en la obra.

El material resultante del fresado de la carpeta de rodadura de pavimento asfáltico para ser empleado en un nuevo uso debe ser caracterizado a la luz de su nueva naturaleza; esto es, a través de procesos en el laboratorio de suelos y pavimentos se deben determinar las características de su estado actual respecto a; contenido de asfalto, contenido de humedad y

granulometría como datos mínimos de evaluación. No obstante, recomiendan (Zarabanda & Méndez, 2016), determinar el grado de envejecimiento del material a fin de prever correcciones a la mezcla asfáltica por contenido de asfalto, así como la participación porcentual del RAP con agregado pétreo. Para la investigación se realizaron los ensayos de caracterización definidos en la norma 461 Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos; que de acuerdo con la tabla 1 a una muestra representativa de los agregados reciclado deben cumplir la presente franja granulométrica para una mezcla con un porcentaje de RAP del 25% y el restante con material de adición.

Material	Tamiz (mm / U.S. Standard)							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	¾ Pulgada	¾ Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Pasa tamiz (%)								
Agregado pétreo de reciclaje, ajustado con material de adición cuando se requiera	100	75 – 100	65 – 100	45 – 75	30 – 60	20 – 45	10 – 30	5 – 20

Tabla 1. Ensayos de caracterización del RAP. Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.

El material reciclado puede ser obtenido de carpetas de rodadura de pavimento de mezclas elaboradas en caliente o mezclas elaboradas en frío; así mismo, puede ser reciclado al momento del uso conocido como IN SITU, u obtenido de acopios de este material. En el proyecto será utilizado material proporcionado por el Instituto de Desarrollo Urbano -IDU- de la ciudad de Bogotá previamente acopiado y fresado de pavimentos con mezclas densas en caliente.

4.1.1.2 Agregados pétreos de adición

Como parte de la elaboración del diseño de mezcla el procedimiento fundamenta su desarrollo en el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos con los cuales se alcanzará la curva granulométrica establecida en el artículo 461 de las especificaciones generales de construcción y las normas de ensayos de materiales del INVIAS. En este sentido, para la investigación objeto del presente documento, los ensayos de caracterización para los agregados pétreos de adición componen los puntualizados en la tabla 2.

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito		
		NT-1	NT-2	NT-3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%). (Nota).	E-218	40	40	40
Degradación en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	-	30	25
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos:	E-224			
- Valor en seco, mínimo (kN)		-	-	70
- Relación húmeda/seco, mínimo (%)		-	-	75
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%):	E-220			
- Agregado grueso		18	18	18
- Agregado fino		18	18	18
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo.	E-235	10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2	2	2
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%).	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%): una cara/dos caras.	E-227	50/-	50/-	50/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%).	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca en el artículo 330, Base granular, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	80	80	100
Adhesividad, gradación combinada				
Resistencia conservada inmersión-compresión, mínimo (%).	E-622	50	50	50

Tabla 2. Ensayos de caracterización de los agregados pétreos.

Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.

El agregado pétreo de adición será obtenido de la cantera certificada extraído del río Guayuriba kilómetro 21 vía Villavicencio, Acacias (Meta), que cuenta con los documentos legales y ambientales de explotación y comercialización.

4.1.2. Emulsión asfáltica

Definida la emulsión asfáltica según el manual de normas de ensayos de materiales para carreteras del INVIAS como una mezcla de partículas dispersas de cementos asfáltico en una solución acuosa de agua y emulsificante, que deberá tener un aspecto homogéneo para su uso. La emulsión asfáltica a utilizar en la investigación corresponde a una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta (CRL-1 (2012) o CRL-57 (2022)) en cumplimiento de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, Artículo 411-22 Suministro de Emulsión Asfáltica Catiónica, tabla 411-1 (ver tabla 3), así como la clasificación en función del uso (Otálora, 2012); mezcla densa y/o mezcla en vía (3% a 6% de vacíos).

Ensayos sobre la emulsión	Norma de ensayo	Tipo de rotura (Nota)											
		Rápida				Media		Lenta					
		CRR-60		CRR-65		CRM-65		CRL-40		CRL-57		CRL-57h	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Destilación: - Contenido de asfalto residual (%) - Contenido de aceite (%)	INV E-762	60	-	85	-	65	-	40	-	57	-	57	-
		-	3	-	3	-	12	10	20	-	-	-	-
Contenido de agua (%)	INV E-761	-	40	-	35	-	35	-	50	-	43	-	43
Viscosidad: - Saybolt-Furol a 25 °C (s) - Saybolt-Furol a 50 °C (s)	INV E-763	20	100	-	-	-	-	-	50	20	200	20	100
		-	-	100	400	50	450	-	-	-	-	-	-
Estabilidad durante el almacenamiento: - Sedimentación a 24 h (%) - Sedimentación a los 5 días (%)	INV E-764	-	1	-	1	-	1	-	-	-	1	-	1
		-	5	-	5	-	5	-	10	-	5	-	5
Tamizado Retenido tamiz de 0,850 mm (nro. 20) (%)	INV E-765	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
Demulsibilidad (%)	INV E-766	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rotura en ensayo de mezcla con cemento (%)	INV E-770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0
Carga eléctrica de la partícula	INV E-767	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva	
pH	INV E-768	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Índice de rotura	UNE-EN 13075-1	Reportar											
Cubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento: - Con agregado seco - Con agregado seco y acción del flujo de agua - Con agregado húmedo - Con agregado húmedo y acción del flujo de agua	INV E-769	-	-	-	-	Buena Satisfactoria		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	Satisfactoria Satisfactoria		-	-	-	-	-	-
Ensayos sobre el residuo de destilación													
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s) (0,1 mm) - Asfalto residual duro (ARD) - Asfalto residual blando (ARB)	INV E-706	-	-	-	-	100	250	200	300	-	-	60	100
		60	100	60	100	-	-	-	-	60	100	-	-
		100	250	100	250	-	-	-	-	100	250	-	-
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min) (cm)	INV E-702	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INV E-713	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-

Nota: el tipo de rotura se establece de acuerdo con lo indicado en las normas de ensayo ASTM D244 e INV E-767.

Tabla 3. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas.

Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.

4.2 Método de diseño

El diseño de una mezcla asfáltica en frío con pavimento asfáltico reciclado modificado en Colombia cuenta con una variación del método Marshall conocido como, Método Inmersión – Compresión respaldado mediante la norma de ensayos de materiales para carreteras INV E-622-13, que mide la pérdida de resistencia a la compresión producida por la acción del agua sobre la mezcla elaborada en los moldes (4 in de espesor y 4 in de diámetro, en lugar de 2.5 in de espesor y 4 in de diámetro en el Marshall original) ajustados donde se construyen las probetas, y compara las resistencias obtenidas entre probetas curadas en seco, y probetas sometidas a la acción del agua; esta comparación corresponde a un índice denominado resistencia conservada.

No obstante, al igual que el diseño Marshall el método inmersión compresión determina el contenido óptimo teórico de emulsión (no asfalto), para una granulometría específica de material reciclado con adición de agregados pétreos vírgenes ensayando series de probetas con distintos contenidos de emulsión que finalmente son sometidas a ensayos de compresión simple como se mencionó en seco y por vía húmeda. Dentro del proceso también se deberán determinar otras propiedades como; contenido de vacíos, masa unitaria seca máxima y humedad óptima a fin de garantizar el correcto proceso constructivo en el caso de la investigación de las probetas y se compararán resultados de cara a la metodología de la universidad de Illinois.

Parámetro	Norma de ensayo INV	Valor
Resistencia de probetas curadas en seco R_s , mínimo (MPa).	E-622	2,0
Resistencia conservada tras curado húmedo $R_c = R_h/R_s$, mínimo (%).		75

Tabla 4. Criterios de resistencia para el diseño de mezcla en frío con RAP.
Fuente: Especificaciones INVIAS 2022.

4.3 Ensayos de laboratorio para mezclas asfálticas en frío con RAP y modificadas

Para la evaluación de la mezcla bajo un comportamiento mecánico se ejecutaron tanto a la muestra de control como a las mezclas modificadas, los laboratorios presentados en la tabla 5.

Prueba de laboratorio	Norma	Mezcla control (MAF con RAP)	Mezcla modificada 1 (MAF con RAP modificado 1.5% Cal + 1.5% Cemento)	Mezcla modificada 2 (MAF con RAP modificado 1.0% Cal + 2.0% Cemento)	Mezcla modificada 3 (MAF con RAP modificado 2.0% Cal + 1.0% Cemento)
Resistencia a la tracción indirecta - En seco - En húmedo	INV E-725	X	X	X	X
Cántabro	INV E-760	X	X	X	X
Módulo Resiliente	ASTM D4123-82	X	X	X	X
Inmersión-Compresión	INV E-747	X	X	X	X

Tabla 5. Ensayos de laboratorio para evaluación de la mezcla asfáltica diseñada patrón frente a las modificadas. Fuente: Elaboración propia, 2023.

5. ESTADO DEL ARTE

Es conocido que una de las tecnologías empleadas para el mejoramiento de las vías son las mezclas asfálticas, entre las que se clasifican de acuerdo con la temperatura de preparación y colocación en; calientes, tibias y frías. Específicamente, para la revisión bibliográfica fueron abordadas investigaciones, documentos y normativa para las mezclas asfálticas frías catiónicas que parte con referencias de los años 1950 en Francia donde fue trabajado el asfalto reperfilado en frío denominado 'Emulsión Grave'; tal fue el crecimiento del uso de emulsiones catiónicas bituminosas que en 1962, llegó al 50% de las toneladas fabricadas y, en 1971 lo fueron más del 92%, iniciando la migración a España e Irlanda el uso de estos materiales (Day, Lancaster, & McKay, 2019), que en el año de 1974 logró la estandarización por SETRA (Francia) para climas cálidos y secos.

En paralelo, la crisis del petróleo de 1973 en Estados Unidos por costos y conservación de energía incrementó el uso de mezclas recicladas de 50 mil toneladas a 25 millones a 1980 (Díaz, 2005), mezclas que impulsaron la nueva forma ecológica de mejorar la malla vial. En el año de 1993 en el estado de Illinois (Dragos et. al. 2020), fue construido un sector vial experimental de 366m con la base en RAP compacto de 20.3 cm; del cual fue concluido que las propiedades mecánicas son comparables al agregado convencional, esto fue exitoso para la investigación. Al igual que el logro alcanzado en Escocia, con la acreditación 'Materiales de revestimiento en frío permanentes' lograda en 1996 para el agregado asfáltico de 20mm llamado Tayset que, además resalta la característica de alcanzar tiempos de almacenamientos de hasta tres semanas (Day et al, 2019), favorable para intervenciones en lugares remotos.

De acuerdo con (Otálora, 2012) el consumo de emulsiones asfálticas a la luz de los registros histórico entre los años 2002 y 2005 a nivel mundial, son liderados por Estados Unidos con una tendencia creciente en el uso de este tipo de materiales seguido de Francia y México, con consumos superiores a las 500 mil toneladas usadas principalmente en riegos con gravilla, riesgos de adherencia, lechadas asfálticas y en cuarta y quinta posición las mezclas asfálticas y recicladas respectivamente. Colombia para los registros alcanza un consumo de 18 mil toneladas en el puesto 23 del ranking presentado por (Otálora, 2012)

A continuación, se presentan los usos de la emulsión asfálticas catiónica de acuerdo al tipo de emulsión (Otálora, 2012), actualizado según las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 del INVIAS.

Emulsiones asfálticas	Riesgos de liga	Tratamientos superficiales	Sello arena asfalto	Mezclas abiertas	Micro aglomerados en frío	Mezcla densa	Bases estabilizadas	Mezcla en vía	Riego de imprimación
CRR-60	X	X	X						
CRR-65	X	X	X						
CRM-65				X	X				
CRL-40				X	X				
CRL-57						X	X	X	X
CRL-57h						X	X	X	X

Tabla 6: Usos de la emulsión asfálticas catiónica de acuerdo al tipo de emulsión. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Emulsión catiónica (C) de rotura (R: rápida, M: media, L: lenta); con porcentaje de asfalto en emulsión (60, 65, 40, 57) de alta estabilidad (h). Anteriormente, definido por el INVIAS con un numero indicativo del contenido de ligante residual (0,1, 2), que igualmente presentaba el contenido de asfalto residual en su requerimiento normativo.

Para el año 2005 un estudio en España (Díaz, 2005), utilizo como agregado de la mezcla asfáltica en frio con emulsión de fabricación in situ, 100% RAP, y diferentes composiciones del contenido óptimo de emulsión + agua a un 4.5% (determinado mediante ensayos) y diferentes contenidos de cemento (1.0%, 2.0%, 3%) y cal (0.5%, 1.0%, 1.5%), los cuales fueron evaluados en probetas independientes para cada contenido; determinando bajo una carga estática de 6 toneladas que; el cemento y la cal no mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas con emulsión, puesto que produce una reducción de la resistencia a la tracción indirecta, al volver las mezclas más frágiles en presencia de cal y más rígidas en presencia del cemento. No obstante, (Díaz, 2005) también hace mención que el tratamiento depende de la calidad del árido a reciclar, así como la correcta corrección requerida en la mezcla y un periodo de maduración

que pudiera con una técnica adecuada no descartar el uso de los materiales RAP. Situación contraria a las ventajas presentadas de la cal como modificador multifuncional del asfalto, que según (España, 2011); presenta métodos de adición y especificaciones para uso beneficioso en el asfalto.

En continuidad con la línea del tiempo, para un estudio realizado por (Albayati, 2012) en Bagdad - Irak, se encontró que las mezclas de concreto asfáltico modificadas con cal hidratada presentaban mejores características frente a la acción de la fatiga y la deformación permanente; donde, los pavimentos sometidos a altas temperaturas y mezclas con bajo contenido de llenantes y exceso de arenas, provocaba un deterioro prematuro de estas. En este sentido, el estudio que incorporo diferentes porcentajes de cal hidratada (0%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3%) como remplazo del relleno mineral de las mezclas de concreto asfáltico, encontró resultados favorables para las propiedades mecánicas de cara a una menor susceptibilidad a la humedad, así como un alto módulo resiliente.

Recientemente, en Rumania Dragos et. al. (2020), habló de la técnica de reciclaje en frío in situ con el uso de RAP de más de 20 años de vida útil para la rehabilitación estructural de todas las capas, teniendo en cuenta entre otros los resultados de Bohdan y Piotr (2019), que indicaron la no conveniencia de utilizar mezclas de reciclado en frío con emulsión y cemento en la carpeta de rodadura; pues no resiste la abrasión de los vehículos que la transiten. En este sentido, en las instalaciones de investigación de pavimentos (LIRA) fueron sometidos diferentes tipos de estructuras a pruebas durante dos años entre las cuales se encontraba una con base en RAP. El objeto, tener la línea base para un nuevo método de diseño. Como resultados fue evidenciado un mejor comportamiento al ahuellamiento (comportamiento estructural satisfactorio), sin el logro del nuevo método por la variabilidad de los materiales en función de la fuente.

Si bien se indicó que la revisión bibliográfica relacionaría únicamente las mezclas de asfalto en frío, es de resaltar de Chen et. al., 2020, las recomendaciones de mezclado, para lo que indica que, realizar la preparación o mezcla de cemento en específico, antes de agregar emulsión asfáltica no es propicio para la mejora de las propiedades mecánicas. Por lo que sugiere que el cemento y la emulsión asfáltica se mezclen completamente antes del contacto entre el agregado y el mortero para lograr el rendimiento óptimo de la mezcla reciclada en frío; o inclusive aplicar

primero la emulsión asfáltica a fin de garantizar que en la zona interfacial se genere una microestructura de mayor resistencia. Resultados alineados a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas por (Xi'An Shaanxi, 2013), que demostraron que el cemento puede hidratarse con la fase acuosa del asfalto emulsión y mejorar el rendimiento de la mezcla de emulsión reciclada. Esto es, depende del tipo y el contenido de aditivos químicos. Se presentan varias recomendaciones para la selección de materiales químicos, con base en el análisis de imágenes ESEM (DU. S) 2015.

Retomando la revisión de la evolución de la emulsión asfáltica y su uso con material RAP para el mejoramiento de vías, los estudios revisados a excepción de (Díaz, 2005) cuentan con soportes experimentales del funcionamiento del RAP como agregado de mezclas asfálticas y en específico para mezclas asfálticas en frío. Otro estudio en China (Wang, Wang, Guo, Wang, & Li, 2020), bajo la premisa del envejecimiento del asfalto, evaluó mediante la aplicación de cal hidratada, cemento y silano (cada uno de manera independiente); la modificación de las características superficiales del RAP en función de la adherencia que demostró en laboratorio, los aportes en beneficio no solo de la adherencia sino también un 3% de mejoría en las propiedades mecánicas con el silano y una mejor resistencia inicial y resistencia al daño por efecto del agua con el cemento; concluyendo así la efectividad de los aditivos para este tipo de agregados reciclados. Se resalta que, entre más envejecido se encuentre el pavimento asfáltico reciclado, más rígido será el asfalto y peores sus propiedades físicas a mejorar. De ahí la importancia de conocer el grado de envejecimiento del RAP y su asfalto residual.

Cabe agregar, una importante parte del proceso la compactación de la cual se investigaron los efectos de tres procedimientos diferentes en laboratorio (compactaciones por métodos: giratorios, estáticos y Marshall) sobre el rendimiento volumétrico de mezclas recicladas en frío in situ CIR (Orosa, Pasandín y Pérez, 2021). En resumen, al observar las propiedades volumétricas obtenidas de los tres diferentes métodos de compactación de laboratorio estudiados, se puede decir que el sistema de compactación giratoria resultó ser el método de prueba de compactación más adecuado para la producción de muestras CIR y la caracterización en el laboratorio; también es el más cómodo y versátil, y permite monitorizar el proceso de compactación durante su ejecución. En cuanto a la evaluación de las propiedades volumétricas, tanto los procedimientos de densidad aparente por dimensiones como la muestra sellada dieron resultados muy similares,

alcanzando la densidad objetivo para el mismo rango de giros. Sin embargo, fue el método seco el que arrojó resultados más consistentes con los logrados en el campo.

(Bouron, Hammoum, Ruat, Métais, & Lesueur, 2021) presentaron los resultados de campo de la autopista A84 en Normandía (Francia), tras la construcción de cinco secciones de pavimentos con mezcla asfáltica mejorada con cal hidratada (0.5%, 1.5%) y sin cal, para un tráfico de 15.000 veh/día con 15% de vehículos pesados, un 15% de RAP, 4.4% de betún 35/50; durante un periodo de uso de 5 años; del cual pudo concluir que; el uso de mezcla asfáltica con RAP adicionada con cal hidratada, reduce el envejecimiento del asfalto, disminuye la creación de asfáltenos, aumenta la resistencia al daño por humedad, y presenta un ligero mejoramiento de las propiedades mecánicas (módulo normalizado, ángulo de fase, fatiga normalizada, pendiente de fatiga). Esto se suma al informe presentado por García A (2015) que, afirma las ventajas del uso modificador multifuncional de la cal (resultados más favorables de 1.0% a 1.5% del peso total de agregados pétreos) sobre las mezclas asfálticas respaldado en experiencias de uso en Estados Unidos que mostraron una vida útil 38% mayor. De igual manera Alizadeh y Modarres (2019) afirman que la cal, así como la emulsión asfáltica funcionan y aportan de forma independiente a mezclas recicladas, para su caso adicionadas con hasta un 10% de arcilla sin afectación negativa de las muestras.

Ahora bien, cabe resaltar que el RAP al ser un material variable en función del tiempo, uso, diseño inicial, la acción de factores ambientales, el tráfico real, ente otras; se hace necesario utilizar RAP de una sola fuente o buscar alternativas que permitan homogenizar las diferentes fuentes. Tal como lo indico Montañez et. al. (2020) en su estudio para nuevas mezclas asfálticas en caliente con uso de RAP, donde recomienda realizar pruebas de desempeño y diseños aplicados a esas características que implican diferentes tipos de mezclas; necesarios para incrementar la confiabilidad, calidad y durabilidad del material empleado en carreteras, así como para identificar los límites del contenido de RAP en las fórmulas de trabajo.

La Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos presenta según (Burgos, 2015); el porcentaje de RAP utilizado en proyectos viales de diferentes estados de este país para los años 2007 y 2008 los cuales varían desde un 10% a 50% de contenido de RAP, y para los cuales se cuenta con parámetros físicos y mecánicos que normatizan su uso tales a través de las siguientes

propiedades: peso unitario, contenido de humedad, contenido de asfalto, penetración del asfalto, viscosidad absoluta, peso unitario compacto y CBR.

Para el caso de Colombia, estudios para el uso de RAP con emulsiones asfálticas catiónicas se realizan en proyectos de investigación a escala desde el año 2012 por parte del Instituto de Desarrollo Urbano IDU de la ciudad de Bogotá que a través de la resolución 1115 del 2012 resuelve, la inclusión en la etapa de estudios y diseños, la revisión y proyección para el uso y reutilización de materiales reciclados o generados por las etapas constructivas y de desmantelamiento. Aunque, previamente fueron desarrollos artículos normativos IDU secciones 450 y 454 del 2005 y actualizadas a 2011, referidas a temas de reciclado de pavimentos asfálticos en sitio con emulsión asfáltica y, con cemento; el uso de estos materiales RAP aún no tiene su auge dado el desconocimiento de su comportamiento variable de cara a otros países. Paralelamente, INVIAS cuenta con los artículos 461 y 622 de 2012 concernientes al uso de material reciclado en frío y diseño de mezclas asfálticas en frío respectivamente.

Según el documento de (RAMOS & ÁLVAREZ, 2022), entre las ciudades de Bogotá autopista a Villavicencio, Sibaté – Soacha (Cundinamarca), Puerto López – Puerto Gaitán (Meta), Manizales – Mesones (Caldas); Medellín – Santuario, Urumita – Dabeiba, Mutatá – Chigorodó (Antioquia), Cali – Loboguerrero, Tuluá – Buga (Valle del Cauca), Bucaramanga – Pamplona y, Pamplona – Cúcuta (Norte de Santander); cuentan con tramos de pavimentos asfálticos reciclados siendo la técnica de reciclaje en frío la más empleada. Se resalta que de acuerdo a lo indicado por Patiño et al (2015), una mezcla de hasta 40% RAP resiste deformaciones permanente y agrietamientos por fatiga; porcentajes superiores no entregan mezclas de comportamiento normativo; tal como indico (Díaz, 2005) y Arias (2019) para mezclas de asfalto con 100% RAP, donde las características mecánicas se ven afectadas en resistencia principalmente.

6. METODOLOGÍA

A fin de alcanzar los objetivos propuestos de caracterización, diseño, evaluación y análisis de los materiales de una mezcla asfáltica en frío compuesta por un porcentaje de RAP modificado con aditivos (cal hidratada y cemento) construida en laboratorio, para uso en vías de bajos volúmenes vehiculares en la ciudad de Bogotá; la metodología de trabajo aplicada a la investigación se divide en diferentes etapas. Etapa cero, revisión bibliográfica de estudios similares realizados en el mundo con variación de resultados y hasta nivel regional que, si bien ha contado con algunos avances en el ámbito de la investigación, estos se han realizado prioritariamente para mezclas en caliente. Aquí se establece el estado del arte del tema de estudio con una contextualización histórica de los avances realizados por otros investigadores quienes recomendaron continuar con estudios que permitan normalizar el uso de este tipo de materiales.

Primera etapa, identificación de las fuentes de materiales sobre las cuales se fundamenta el desarrollo de ensayos de laboratorio, con foco en los centros de acopio de RAP del IDU para la ciudad de Bogotá, canteras autorizadas ambientalmente para la obtención del material pétreo de adición, así como de la emulsión asfáltica de cumplimiento con las especificaciones técnicas vigentes. Los ensayos se realizarán a la luz del diseño AASHTO bajo la normatividad del Instituto Nacional de Vías - INVIAS para un nivel de tráfico NT1 (Número de ejes equivalentes de 8.2 Ton que pasan por el carril de diseño en el periodo de diseño menor a 500 000), para una temperatura promedio de 13°C; con un gradiente que puede ir de los 20°C al medio día, hasta los 5°C en las madrugadas, según la ficha climatológica para Bogotá del IDEAM.

Segunda etapa, caracterización y ensayos de los materiales identificados relacionados en el capítulo normativo. En esta etapa se realiza la caracterización a cada uno de los componentes que integran la mezcla asfáltica modificada en frío, entre ellos, la cal hidratada quien es utilizada como adición a los agregados gruesos es Tipo N, de la empresa CALCO-Cales de Colombia S.A., en presentación de sacos de 10Kg y según especificación técnica así:

CARACTERISTICA	FORMULA	ESPECIFICACION	METODO
Hidróxido de Calcio Disponible	Ca (OH) ₂	Min 85%	NTC-1398
Óxido de Calcio disponible	CaO	Min 64%	NTC-1399

CARACTERISTICA	FORMULA	ESPECIFICACION	METODO
Residuos Insolubles en HCl	N/A	Max. 5,0%	Interno
Perdidas por Calcinación a 1000°C	N/A	Max. 27,0%	Interno

Tabla 7: Características de la Cal Tipo N - Fuente CALCO de Colombia

Otro material utilizado en la presente investigación es el cemento, de uso general, de la empresa Argos y en presentación de sacos de 1 kg, 5 kg, 25 kg y 50 kg, este material al igual que la cal es adicionada sobre los materiales gruesos de la mezcla asfáltica en frío, y presenta las siguientes especificaciones técnicas:

PARÁMETROS FÍSICOS		NORMA DE ENSAYO	NTC 121 TIPO UG
Finura	Blaine, min. (cm2/gr)	NTC 33	A
	Retenido Tamiz 45 μm (%)	NTC 294	A
Cambio de longitud por autoclave, expansión, máx. (%)		NTC 107	0.80
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat	No menos de, minutos No más de, minutos	NTC 118	45
		NTC 118	420
Contenido de Aire en Volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx.		NTC 4927	0.020
RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN (MPa)			
3 días		NTC 220	8.0
7 días		NTC 220	15.0
28 días		NTC 220	24.0

Tabla 8: Especificaciones técnicas del cemento de uso general - Fuente Grupo Argos

Por otro lado el material utilizado como ligante será la emulsión asfáltica quien para la presente investigación y de acuerdo al estado del arte será una emulsión asfáltica de rompimiento lento tipo CRL-1, dicha emulsión asfáltica es fabricada por la empresa INCOASFALTOS y por lo general su presentación son tambores metálicos de 25 kg, se destaca que para el suministro de la misma debido a su presentación y de acuerdo a la necesidad de la presente investigación, se optó por comprar a la empresa ASFALTEMOS de la ciudad de Ibagué quien brindo el servicio de presentación de 5 Galones, a continuación se ilustran las especificaciones técnicas del producto:

ENSAYO SOBRE LA EMULSIÓN	UND	NORMA INVIAS	CRL - 1	
			MIN	MAX
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	s	E-763	20	200
Contenido de agua en volumen	%	E-761	-	43

ENSAYO SOBRE LA EMULSIÓN	UND	NORMA INVIAS	CRL - 1	
			MIN	MAX
Estabilidad en almacenamiento - Sedimentación a 24 horas	%	E-764	-	1
Estabilidad en almacenamiento - Sedimentación a 5 días	%	E-764	-	5
Destilación - Contenido de asfalto residual	%	E-762	57	-
Destilación - Contenido de aceite o disolventes				
Tamizado - Retenido tamiz No. 20 (850 µm)	%	E-765	-	0,1
Rotura mezcla con cemento	%	E-770	-	
Carga de partícula	%	E-767	positiva	
Ph	%	E-768	-	6
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACION (E-771-13)				
penetración (25 °C, 100 gr, 5 s)	0,1 mm	E-706	60	100
			100	250
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712	N/A	
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702	40	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	97,5	-
Recuperación Elástica por Torsión @ 25 °C	%	E-727	N/A	

Tabla 9: Especificaciones técnicas emulsión asfáltica CRL-1- sobre la emulsión. Descripción: Resultados de ensayos sobre la emulsión según ficha técnica de INCOASFALTOS. Fuente: INCOASFALTOS

Como componente estrella de la presente investigación está el RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), tomado de diferentes zonas de mantenimiento vial de Bogotá D.C el cual es almacenado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en zonas de acopio de ALAMOS y SIBATE, para conocer el porcentaje de asfalto se realiza el ensayo de extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos (INV -E-732/13) método A, para tres diferentes muestras a fin de obtener un valor promedio, así mismo se realiza ensayo de análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas INV-782/13 a fin de contar con la curva granulométrica de la muestra. Finalmente, se realiza la caracterización de los materiales vírgenes que se pretenden adicionar a la mezcla y se procede a la siguiente etapa.

Tercera y cuarta etapa, diseño y elaboración de la mezcla de control y modificaciones con aditivos cal hidratada + cemento en diferentes proporciones, una con más porcentaje de cal y menos porcentaje de cemento y otra muestra, con menos porcentaje de cal y más porcentaje de cemento; esto es, tres mezclas en total; una muestra patrón y dos muestras modificadas. El método de diseño para la mezcla asfáltica en frío con RAP corresponde a la norma INV-E-622 del INVIAS denominada inmersión – compresión y es una derivación del método Marshall que en función de la resistencia permite la obtención del contenido óptimo de ligante asfáltico. No obstante, de acuerdo con el resultado, serán verificadas las metodologías de la universidad de Illinois, así como la metodología que recomienda el instituto del asfalto para la obtención de contenido óptimo de ligante asfáltico.

Quinta y sexta etapa, evaluación mediante ensayos de laboratorio para el análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica en frío con RAP y las modificadas. El RAP será tratado como material pétreo con aporte de ligante asfáltico debidamente evaluado. Finalmente, tras el análisis de los resultados obtenidos estos se registran en alcance a los objetivos propuestos, así como la realización de recomendaciones en alcance a una futura continuidad de la investigación por otros actores.

5.1 Ruta metodológica de investigación

En el presente numeral se describen los alcances y limitaciones en cada una de las etapas de la ruta metodológica propuesta para el desarrollo de la investigación mostrada de manera esquemática en la figura 1 y de los cuales se resalta la importancia de contar con la caracterización los materiales esenciales en la investigación, esto es; el RAP considerado como material pétreo que aporta asfalto residual, agregado pétreo de adición a fin de obtener la curva granulométrica establecida en la norma INV E 461, emulsión asfáltica, cemento y cal hidratada inicialmente consideradas como parte del llenante en el diseño de mezcla a elaborar, los porcentajes de estos últimos propuestos se verificaran a la luz de la muestra patrón (ver tabla 10).

Material	Contenido
RAP	25%

Material	Contenido
Agregado de adición	75%
Emulsión asfáltica	CRL-57 ó CRL -1
Cal hidratada	1.0%, 1.5%, 2.0%
Cemento hidráulico	2%, 1.5%, 1.0%

Tabla 10. Contenido y/o tipo de materiales para la investigación. Descripción: Para cada material esencial en el diseño de la mezcla se deberán tener en cuenta las consideraciones aquí contenidas. Fuente: Elaboración propia, 2023.

La ruta metodológica presenta los hitos de control de manera ordenada que serán argumentados desde la realización de los ensayos requeridos validados normativamente y que permitirán dar alcance a los objetivos propuestos tal como se observa en la figura 1.

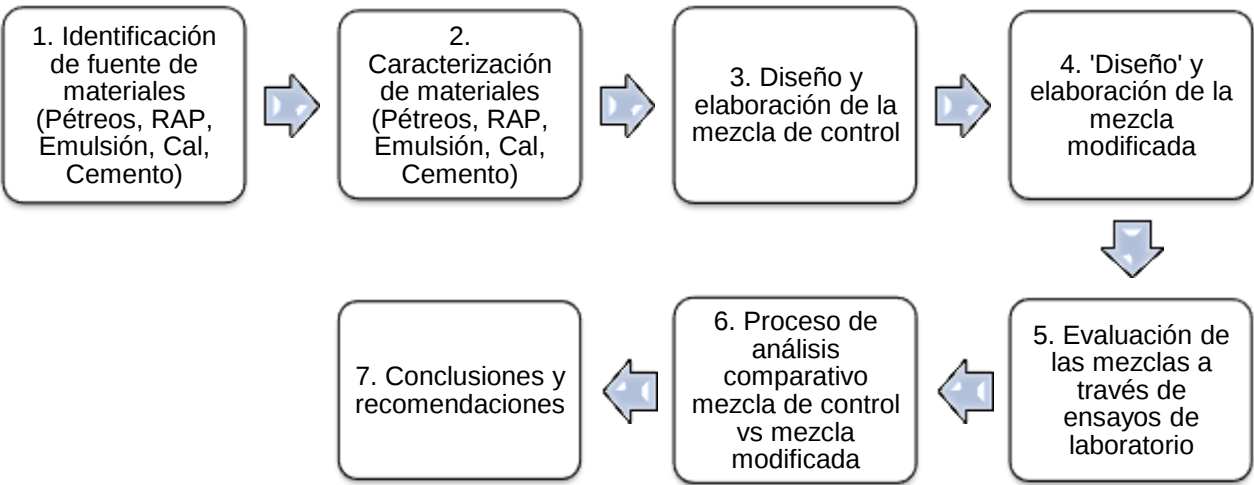


Figura 1. Ruta metodológica propuesta. Descripción: RAP es la sigla de pavimento asfáltico reciclado. Fuente: Elaboración propia, 2022.



No	Objetivo	Actividades
1.	Caracterizar los materiales que integran la mezcla asfáltica según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS prioritariamente.	1.1. Obtener del IDU la cuantificación de los materiales reciclados RAP para la ciudad de Bogotá, así como las muestras representativas de: i) RAP, ii) Agregado pétreo virgen o de adición, iii) Emulsión asfáltica, iv) Cal hidratada, v) Cemento hidráulico. 1.2. Caracterización de materiales mediante la elaboración de ensayos de laboratorio (Norma INVIAS): - Granulometría por tamizado - Límites de Atterberg - Contenido de asfalto - Índices de aplanamiento y alargamiento - Contenido de vacíos - Caras fracturadas - Contenido de humedad - Peso unitario - Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles - Desgaste en Micro-Deval - Equivalente de arena
2.	Diseñar una mezcla asfáltica en frío con material de pavimentos asfálticos reciclados como muestra de control bajo el método inmersión compresión siguiendo el método Marshall	2.1. Bajo el método inmersión compresión siguiendo el método Marshall y en cumplimiento de la normatividad INVIAS se diseñará la mezcla con concreto asfáltico reciclado para un porcentaje del 25% de RAP que cumpla la distribución granulométrica establecida en el artículo 461 del INVIAS - Reciclado de Pavimento Asfáltico en Frío en el lugar empleando Ligantes Bituminosos. (5 muestras cada una con 6 probetas, para determinar el contenido óptimo de ligante). Esto, como muestra patrón o base del análisis a realizar. 2.2. Caracterización física y mecánica de la muestra patrón para las siguientes propiedades: - Gravedad específica bulk - Resistencia a la compresión en seco y en húmedo (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada - Resistencia a la tensión en seco y en húmedo - Adherencia (Cántabro)
3.	Evaluar la mezcla asfáltica en frío con material de pavimentos asfálticos reciclados, modificada con diferentes porcentajes de adición de cal hidratada más cemento	3.1. Con la mezcla patrón caracterizada, se ajusta el diseño de la mezcla asfáltica para uso como capa de rodadura modificada con los siguientes aditivos: una muestra con mayor porcentaje de cal hidratada y menos porcentaje de cemento, y otra muestra inversa, con menor porcentaje de cal hidratada y mayor porcentaje de cemento hidráulico; estas dos; con al menos tres porcentajes diferentes de contenido de aditivo cada uno, que serán adicionados

No	Objetivo	Actividades
		sobre los agregados reciclados inicialmente, agua de pre envuelta, cal hidratada y seguido la mezcla de emulsión con cemento. 3.2. Caracterización física y mecánica de las muestras modificadas para las siguientes propiedades físicas y mecánicas: - Gravedad específica bulk - Resistencia a la compresión en seco y en húmedo (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada - Resistencia a la tensión en seco y en húmedo - Adherencia (Cántabro)
4.	Analizar el aporte de los materiales adicionados a la mezcla asfáltica en frío con RAP diseñada.	4.1. Realizar el análisis de las propiedades evaluadas mediante ensayos de laboratorio, así como el comportamiento general de cada muestra de mezcla de asfalto reciclado modificado a la luz del uso previsto en vías de bajos volúmenes de tráfico en la ciudad de Bogotá. 4.2. Concluir los aportes, pendientes y recomendaciones para el uso de este tipo de mezclas, así como para el estudio en general.

Tabla 11. Metodología por objetivos y actividades de acuerdo a la ruta propuesta.
Descripción: Las actividades relacionan las propiedades a tener en cuenta en el análisis de comportamiento de las mezclas. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para el proceso de obtención del contenido de emulsión en la elaboración de la mezcla asfáltica, será revisado el método de diseño propuesto por la universidad de Illinois a fin de verificar a la luz de resultados más acordes a la estandarización de mezclas integradas por componentes tradicionales; en este sentido se describen el método de diseño por inmersión – compresión del INVIAS y el método de Illinois, sin que signifique el desvío de la normatividad INVIAS.

Método de diseño Inmersión – Compresión

La metodología propuesta en el Instituto Nacional de Vías INVIAS a través de su norma INV E 622 para el diseño para mezclas en frío con o sin agregados reciclados con emulsión asfáltica, evalúa la pérdida de resistencia a la compresión que se produce por la acción del agua tras comparar probetas curadas al aire y probetas sometidas a la acción del agua. El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

- 1) Ensayos de los agregados, incluyendo el RAP. Granulometría, humedad, contenido de asfalto.
- 2) Ensayos de la emulsión asfáltica.
- 3) Cantidad de emulsión: Determinación del contenido óptimo teórico de emulsión en función de la superficie específica que depende del tamaño del agregado (ecuación 622.1 de la norma INV E 622). Por norma INV E 622 el tipo de emulsión a utilizar es la CRL56 o CRL-1.
- 4) Contenido teórico y óptimo de fluidos de compactación: Se deberá determinar la humedad óptima teórica de compactación del agregado y su peso unitario máximo, el porcentaje de agua de emulsión y junto a la humedad natural, se evaluarán diferentes contenidos de agua de pre envuelta (óptima) hasta obtener una mezcla manejable, de curado adecuado con un cubrimiento que permita alcanzar el intervalo CTF – 1.0% y CTF. Una vez con este valor (contenido óptimo de fluidos de compactación, este permanece constante y se empieza a variar la cantidad de emulsión que implica el cambio de agua que ella aporta. Elaboradas las probetas se dejan 24 horas en el molde, a quienes se les determina la gravedad específica y pasan a curado en seco por 14 días (3 probetas de cada porcentaje) y curado en seco por 7 días seguido de curado por inmersión durante 7 días más. Terminado el curado se ensayan a compresión axial de acuerdo con la norma INV E 622.
- 5) Selección del contenido óptimo de asfalto: Con el cálculo de la resistencia conservada para todas las probetas, se selecciona el contenido óptimo de emulsión tomando como referencia la resistencia mínima a compresión y conservada que establezca los criterios de diseño.

Método de diseño Illinois

La metodología propuesta en la universidad de Illinois para el diseño para mezclas en frío se deriva del diseño de mezclas Marshall modificado, con el fin de preparar mezclas a temperatura ambiente. El método entrega como resultado el porcentaje de emulsión requerido para una mezcla resistente con la estabilidad requerida sin una deformación permanente excesiva o rotura por fatiga, así como resistente a los efectos del agua. El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

- 1) Ensayos de los agregados: A fin de determinar la conveniencia de su uso con emulsiones asfálticas.
- 2) Ensayos de la emulsión asfáltica: A fin de determinar las propiedades de la emulsión de cara a la normatividad aplicable.

- 3) Cantidad de emulsión: Con un porcentaje aproximado, se evalúan diferentes contenidos de emulsión y recubrimiento para determinar la conveniencia, cantidad de emulsión y agua requerida en la premezcla. Es de resaltar que por norma INV E 622 el tipo de emulsión a utilizar es la CRL56.
- 4) Humedad de compactación: Con el porcentaje de asfalto aproximado y el agua de premezcla, se elaboran las mezclas y se airean a varios contenidos de humedad, la mezcla se compacta dentro de moldes Marshall para luego ser curadas en seco durante un día y ensayadas en estabilidad Marshall modificado. Con la humedad de compactación, se repite la elaboración de mezclas con variación del porcentaje de asfalto. Se deberá determinar la densidad Bulk, estabilidad Marshall modificada y flujo (curado 3 días).
- 5) Selección del contenido óptimo de asfalto: Se elige el contenido óptimo de asfalto como el porcentaje de emulsión a la cual la mezcla de pavimento satisface de la mejor manera todos los criterios de diseño.

7. RESULTADOS

A la luz del procedimiento establecido en la metodología se presentarán los resultados de cada paso efectuado para la elaboración y posterior análisis del diseño de mezcla con RAP y emulsión asfáltica frente a su uso para vías con bajos volúmenes de tránsito y la disminución de los centros de acopio de RAP. El diseño de mezcla proyectado de acuerdo con las investigaciones realizadas indica que, a mayor porcentaje de utilización del RAP, menor es el cumplimiento de las propiedades exigidas normativamente lo que refleja menor tiempo en el periodo de vida de la mezcla. Patiño et al (2015), recomienda no superar en las mezclas asfálticas el 40% RAP; otros investigadores con resultados alentadores en ganancia de resistencia y comportamiento adecuado frente a la acción del agua utilizan porcentajes inferiores, por lo que el presente estudio utilizará un contenido de RAP como material pétreo del 25% y el restante 75% se trabaja con material virgen de adición de la cantera certificada extraído del río Guayuriba kilómetro 21 vía Villavicencio, Acacias (Meta), con la cual se ajusta la curva granulométrica indicada en la norma INV E 461 – Franja granulométrica de los agregados reciclados en frío empleando ligantes bituminosos, se resalta que el reciclado no necesariamente será in situ, sino que podrá ser elaborado en planta y trasladado hasta el punto de intervención final, conocida la capacidad de almacenamiento de este tipo de mezclas.

En este sentido, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados, así como de los procedimientos efectuados para las actividades propuestas.

7.1 Caracterización del RAP

Se realiza la extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente para pavimentos de acuerdo con la norma INV E 732-13 método A, a tres muestras de RAP tomadas de los acopios de Sibaté (Cundinamarca), obteniendo los siguientes resultados.

Muestra	Porcentaje de asfalto (%)
RAP 1	4.3
RAP 2	4.6
RAP 3	4.4

Tabla 12. Porcentaje de asfalto. Descripción: Porcentaje de asfalto obtenido de los ensayos de extracción del RAP. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Resultados que se representan en un promedio igual a **4.43%** de porcentaje de asfalto en el RAP analizado. Este valor será considerado en el diseño de la mezcla asfáltica con la proporción 25% de RAP y 75% de agregado virgen de adición, al cual se le sumarán diferentes porcentajes de la llenante integrado de cal hidratada y cemento hidráulico, que finalmente permitirá identificar el comportamiento mecánico entre las mezclas elaboradas.

Producto de la extracción de las muestras de RAP son obtenidas las curvas granulométricas a continuación presentadas en función de la franja de distribución recomendada por la norma INV E 461-13.

Muestra de RAP 1

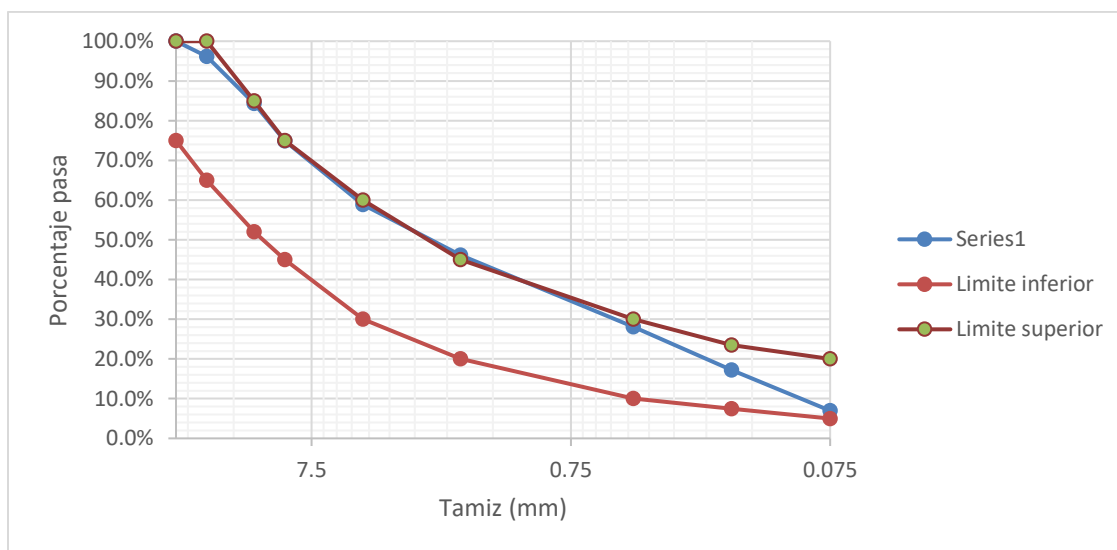


Figura 2. Curva granulométrica muestra 1 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Muestra de RAP 2

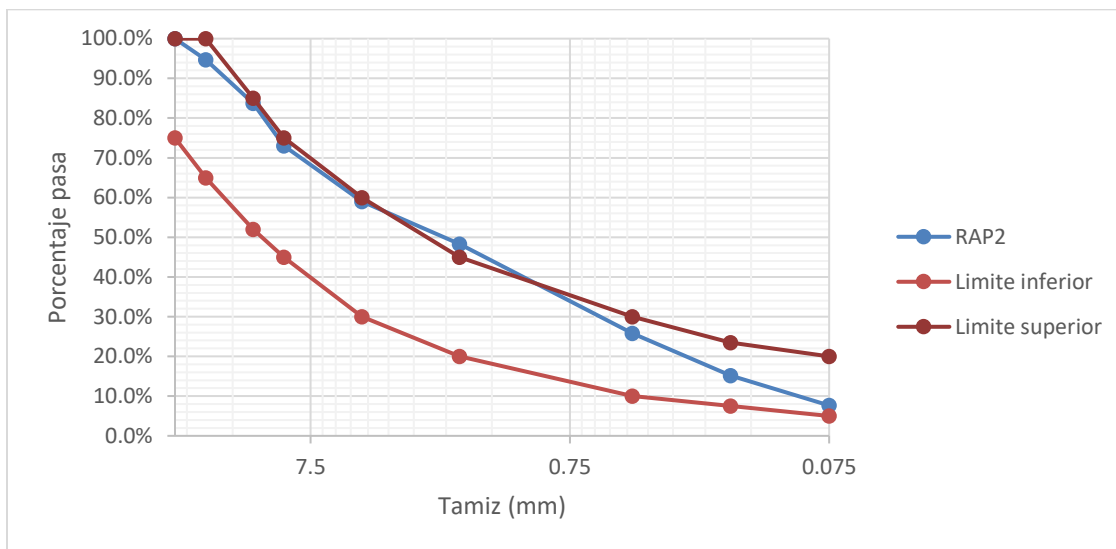


Figura 3. Curva granulométrica muestra 2 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Muestra de RAP 3

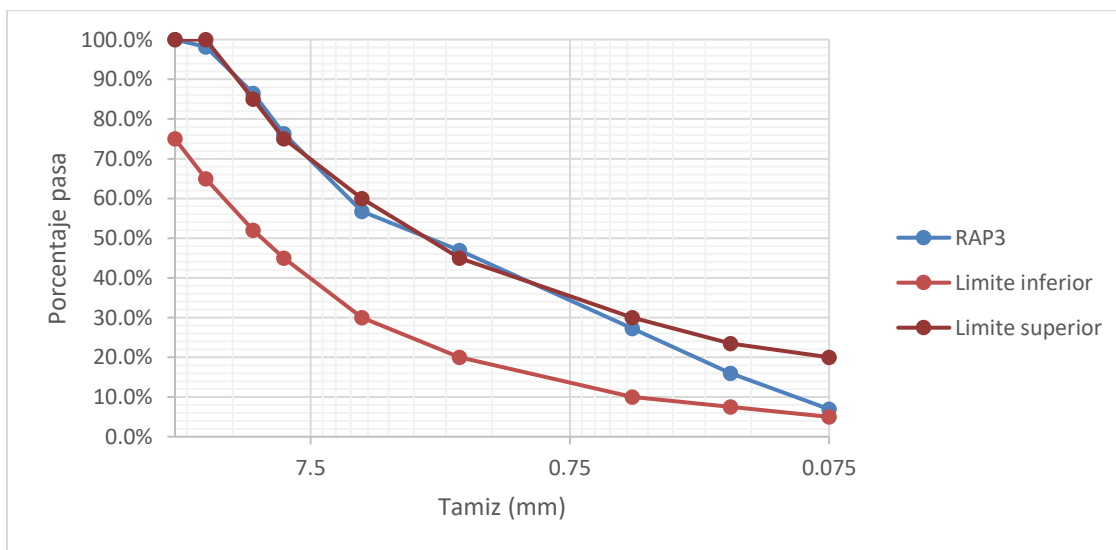


Figura 4. Curva granulométrica muestra 3 de RAP. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del RAP frente a la franja establecida por la norma INV E 461.
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Se observa curvas granulométricas gradadas dentro de la franja de distribución recomendada por la norma INV E 461-13 para la proporción que aportara como material pétreo el RAP.

7.2 Caracterización del Agregado Pétreo de Adición

Bajo norma INV E 213-13 se realiza el ensayo de análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos al material de adición a emplear para la mezcla asfáltica con emulsión asfáltica.

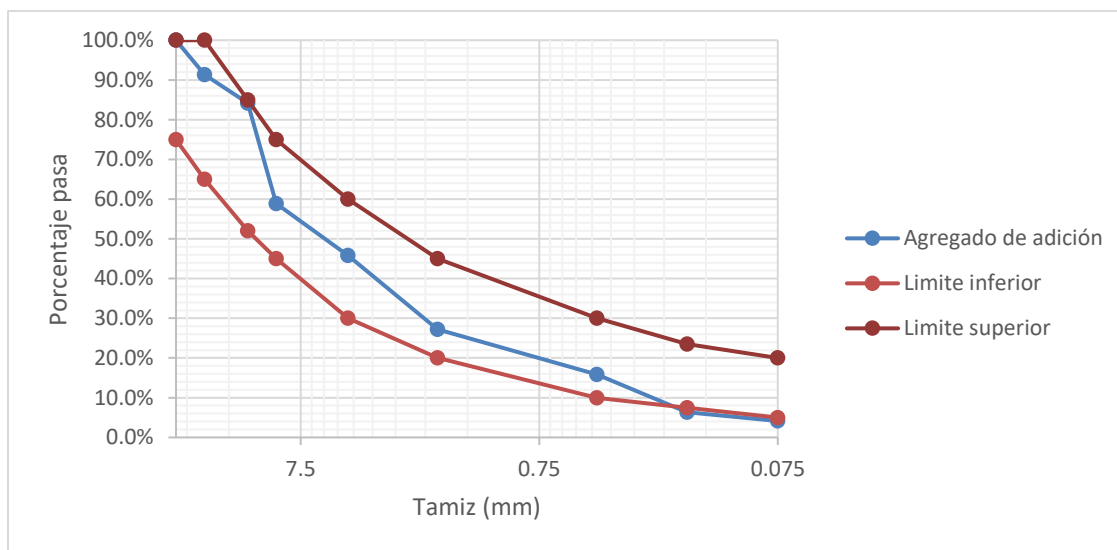


Figura 5. Curva granulométrica agregado de adición. Descripción: Comportamiento curva granulométrica del agregado de adición frente a la franja establecida por la norma INV E 461. Fuente: Elaboración propia, 2023.

Otros ensayos de caracterización del agregado de adición realizados corresponden a los presentados en la tabla 13.

Ensayo	Norma	Referencia Artículo 440-22	Resultado
Limite liquido	INV E 125-13	N/A	NL
Limite plástico	INV E 126-13	N/A	NP
Índice de plasticidad	INV E 126-13	NP	NP
Vacíos del agregado fino sin compactar - Angularidad	INV E 239-13	Mín. 35% Base Mín. 40% Intermedia Mín. 45% Rodadura	45%



Ensayo	Norma	Referencia Artículo 440-22	Resultado
Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles	INV E 218-13	Máx. 25% Rodadura Máx. 35% Intermedia Máx. 35% Base	19.8%
Desgaste por abrasión con Micro Deval	INV E 238-13	Máx. 20% Rodadura Máx. 25% Intermedia Máx. 25% Base	7.8%
Valor de 10% finos	INV E 224-13	Vr. seco Mín. 90 kN Rel. H/S Mín. 75%	223.7 kN 91%
Partículas fracturadas	INV E 227-13	Una cara Mín. 85% Dos caras Mín. 70%	97% 93%
Partículas planas y alargadas. Relación 5:1	INV E 240-13	Máx. 10%	5.5%
Equivalente de arena	INV E 133-13	Mín 50%	55%
Peso unitario seco	INV E 142-13	N/A	2.095 g/cm ³
Humedad óptima	INV E 142-13	N/A	6.6%

Tabla 13. Resultados de caracterización de material pétreo de adición. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra de material pétreo virgen.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

7.3 Emulsión Asfáltica

Identificada la emulsión asfáltica a emplear de la empresa INCOASFALTOS se selecciona para la emulsión de rotura lenta, los resultados de los ensayos que por control de calidad tiene la empresa y los cuales se presentaron en la tabla 7.

7.4 Diseño de la Mezcla por el Método Inmersión Compresión

Caracterizados los materiales se determina el contenido óptimo de emulsión para una mezcla de emulsión asfáltica, a partir de diferentes proporciones de la misma, para el caso del presente estudio, fueron elaboradas mezclas con emulsión asfáltica de rotura lenta CRL-1 en contenidos del 8%, 9%, 10%, 11% y 12%, seis probetas por cada contenido, debidamente compactadas y curadas tanto en seco como húmedo, para finalmente ser sometidas a rotura por compresión

simple, de donde se obtienen los valores de resistencia a la compresión en seco y resistencia a la compresión sometidas las probetas a inmersión en agua, así como el resultado del índice de resistencia conservada que se muestra a continuación (ver tabla 14).

Mezcla de emulsión asfáltica con un contenido de material pétreo combinado entre RAP 25% y vírgenes 75%.

Emulsión	Humedad de compactación	Peso seco (g)	Resistencia a la compresión seca Kg/cm2	Resistencia a la compresión húmeda Kg/cm2	Índice de resistencia conservada
8%	4.6	1750	26.01	13.33	51.2%
9%	4.6	1740	21.44	11.63	54.2%
10%	4.6	1730	22.52	12.08	53.6%
11%	4.6	1720	20.75	11.64	56.1%
12%	4.6	1710	16.75	10.27	61.3%

Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión simple. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra de material pétreo virgen y RAP.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

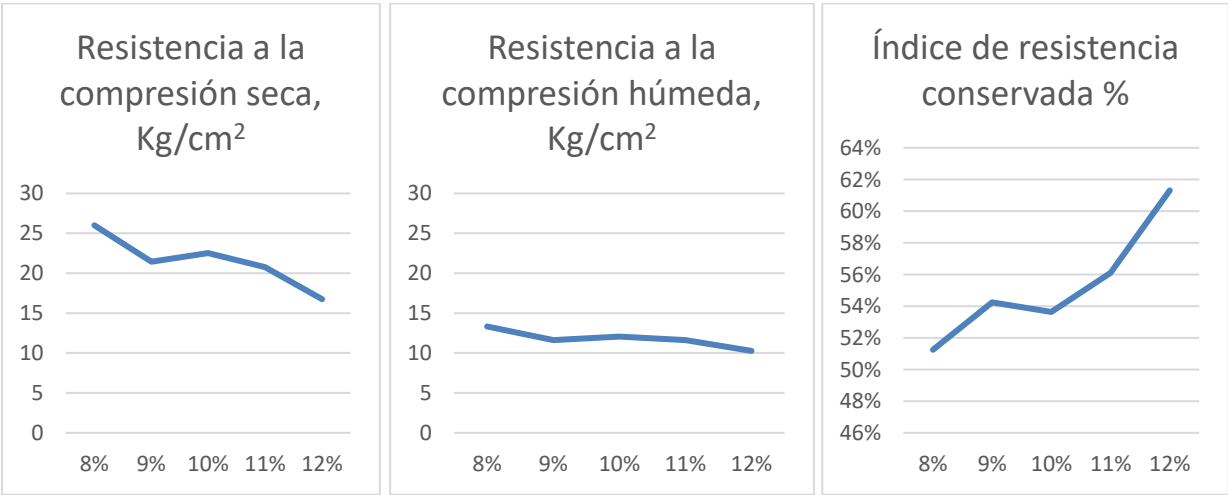


Figura 6. Gráficas de variación de la resistencia frente al contenido de emulsión. Descripción: Comportamiento de la resistencia seca y húmeda de las mezclas elaboradas a partir de diferentes contenidos de emulsión y su respectiva resistencia conservada.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

A mayor contenido de emulsión mayor conservación de la resistencia obtenida, que de manera independiente es inversamente proporcional la relación resistencia a la compresión simple – contenido de emulsión. En este sentido, si bien los resultados no cumplen los mínimos establecidos según la norma INV E 622-13 que indica para el contenido óptimo de emulsión de la mezcla una resistencia de las probetas en condición seca de 2500 kPa ó 25,5 kg/cm² y un índice de resistencia conservada del 75%, se avanza con la selección de contenido de emulsión del 10% correspondiente a un punto medio en el comportamiento de los resultados, para su verificación con adición de aditivos en el siguiente momento.

7.5 Caracterización física y mecánica de la muestra patrón

Fueron evaluadas las siguientes propiedades:

- Gravedad específica bulk
- Resistencia a la compresión seca y húmeda (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada

Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima seca, kN	Carga máxima húmeda, kN	Resistencia a la compresión simple seca, kgf/cm ²	Resistencia a la compresión simple húmeda kgf/cm ²	Índice de resistencia conservada
2.187	16.23	9.25	20.01	11.39	57%

Tabla 15: Resistencia a la compresión seca y húmeda (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024.

- Resistencia a la tensión en condición seca y húmeda

Resistencia a la tensión en seco, kPa	Resistencia a la tensión en seco, Psi	Resistencia a la tensión en húmedo, kPa	Resistencia a la tensión en húmedo, Psi	Relación de resistencia a la tensión
464.9	67.43	273.0	39.60	58.7%

Tabla 16: Resistencia a la tensión en condición seca y húmeda. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024

- Adherencia (Cántabro)

Porcentaje de pérdida Muestra 1	Porcentaje de pérdida Muestra 2	Porcentaje de pérdida Muestra 3
60.0%	48.1%	33.9%

Tabla 17: Perdida por desgaste cántabro. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a la muestra patrón de material pétreo virgen y RAP. Fuente: Elaboración propia, 2024

7.6 Caracterización física y mecánica de las muestras con combinaciones de aditivos

Con el resultado anterior, se evidencia la necesidad de mejorar las características físicas y mecánicas de este tipo de mezcla de emulsión asfáltica con un contenido de RAP y para lo cual, se utilizaron tres tipos de combinaciones de aditivos, que corresponden a cemento y cal, así:

Combinación y/o mezcla	Contenido de cemento	Contenido de cal
1	1.5%	1.5%
2	2.0%	1.0%
3	1.0%	2.0%

Tabla 18: Combinaciones y/o número de mezcla. Descripción: Contiene las combinaciones de aditivos según porcentaje de participación en la muestra modificada de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024

Muestras con contenidos diferentes de aditivo cada uno, que fueron adicionados sobre los agregados reciclados inicialmente, agua de pre envuelta, cal hidratada y seguido la mezcla de emulsión con cemento.

Fueron evaluadas las siguientes propiedades:

- Gravedad específica bulk
- Resistencia a la compresión en seco y en húmedo (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada

Cemento	Cal	Gravedad específica bulk a 25°C	Carga máxima (kN) seca	Carga máxima (kN) húmeda	Resistencia a la compresión simple (kgf/cm²) seca	Resistencia a la compresión simple (kgf/cm²) húmeda	Índice de resistencia conservada
1.5%	1.5%	2.229	18.27	12.41	22.54	15.30	68%

2.0%	1.0%	2.224	17.84	13.61	22.00	16.79	76%
1.0%	2.0%	2.219	19.56	14.33	24.13	17.68	73%

Tabla 19: Resistencia a la compresión en seco y en húmedo (daño por acción del agua), índice de resistencia conservada. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024

- Resistencia a la tensión en seco y en húmedo

Cemento	Cal	Resistencia a la tensión en seco, kPa	Resistencia a la tensión en seco, Psi	Resistencia a la tensión en húmedo, kPa	Resistencia a la tensión en húmedo, Psi	Relación de resistencia a la tensión
1.50%	1.50%	708.50	102.76	545.00	79.05	76.9%
2%	1%	746.80	108.31	551.00	79.92	73.8%
1%	2%	608.80	88.30	487.00	70.63	80.0%

Tabla 20: Resistencia a la tensión en seco y en húmedo. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024

- Adherencia (Cántabro)

Cemento	Cal	Porcentaje de pérdida 1	Porcentaje de pérdida 2	Porcentaje de pérdida 3
1.50%	1.50%	14.5%	8.1%	16.6%
2%	1%	24.9%	10.6%	12.9%
1%	2%	9.9%	10.3%	11.0%

Tabla 21: Perdida por desgaste Cantabro. Descripción: Resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras modificadas de material pétreo virgen, RAP, % de cal y % de cemento. Fuente: Elaboración propia, 2024

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En conclusión general, los hallazgos de esta investigación resaltan la importancia de la adición de cal y cemento en la formulación de mezclas asfálticas en frío, ya que no solo se aumentan el módulo resiliente, sino que también potencian la durabilidad y el desempeño de los pavimentos. Estos resultados pueden contribuir al desarrollo de materiales más eficientes y sostenibles, promoviendo prácticas constructivas que mejoren la vida útil de las infraestructuras viales, y para lo cual se recomienda tener en cuenta las siguientes premisas del presente estudio:

- La cal y el cemento empleados para el mejoramiento de las características mecánicas de la mezcla de emulsión asfáltica con RAP corresponde a materiales adicionados.
- El RAP corresponde a un material heterogéneo que varía en función de la edad, fuente y estado de afectación de su punto de obtención.
- El diseño de mezcla en el presente estudio corresponde a un diseño patrón (25% de contenido de RAP como material pétreo), con la modificación en adición de diferentes contenidos de los aditivos cal y cemento.
- El resultado del presente estudio busca y muestra el aumento de la durabilidad de las mezclas asfálticas en frío con RAP. Las diferentes combinaciones de cal y cemento, aportaron positivamente en los resultados al módulo resiliente, cántabro, resistencia conservada y tracción indirecta como se detalla en los resultados uno a uno de los ensayos.

8.1 Caracterización del RAP

En el presente proyecto de investigación se llevó a cabo la caracterización del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) a partir de tres muestras, cuyos porcentajes de asfalto fueron 4.3%, 4.6% y 4.4%. Los resultados indican que la muestra No. 2 presentó el mayor contenido de asfalto, lo que sugiere una mayor capacidad de adhesión y potencial para mejorar las propiedades de la mezcla reciclada.

8.2 Caracterización de material pétreo de adición

En este proyecto de investigación se llevó a cabo la caracterización del material pétreo, obteniendo una serie de resultados significativos que aportan información valiosa sobre su

comportamiento y calidad. La muestra analizada del material de adición mostró un porcentaje de vacíos del 45% en el ensayo de angularidad del agregado fino, lo que sugiere una considerable capacidad friccionante de este material. Este factor es crucial para evaluar su rendimiento en aplicaciones de construcción y pavimentación.

El desgaste obtenido en la máquina de Los Ángeles fue del 19.8%, y en el ensayo de Micro Deval fue del 7.8%. Adicionalmente, en el ensayo de 10% de finos se obtuvo un valor en seco de 223.7 kN y en la condición húmeda de 202.5 kN, para una relación húmedo/seco de 90.5%. Estos porcentajes indican que el material de adición presenta una buena resistencia al desgaste y dureza, lo que es fundamental para su durabilidad en condiciones de tráfico. Adicionalmente, el material tiene un 97% de partículas con una o más caras fracturadas y un 93% de partículas con dos o más caras fracturadas, lo que resalta que el material tiene una textura adecuada debido a un buen proceso de trituración, que contribuye a una buena adherencia y resistencia de las mezclas asfálticas.

El equivalente de arena de 55% indica que el material tiene una adecuada calidad en términos de limpieza y granulometría, mientras que el peso unitario de 2.095 g/cm³ es coherente con las características esperadas para este tipo de materiales. Finalmente, un contenido de humedad óptimo (w óptimo) del 6,6% proporciona información útil para el diseño de mezclas y el manejo del material en laboratorio y obra.

8.3 Diseño por inmersión compresión

El presente proyecto de investigación se centró en el diseño de inmersión y compresión de mezclas asfálticas utilizando emulsión asfáltica tipo CRL-1, con un contenido de RAP del 25%. Este porcentaje se seleccionó basándose en la literatura existente y en experiencias previas en investigaciones similares. A través de una serie de ensayos, se evaluaron diferentes porcentajes de contenido de emulsión asfáltica, específicamente 8%, 9%, 10%, 11% y 12%, para determinar su impacto en las propiedades mecánicas de la mezcla.

Los resultados obtenidos revelan que el contenido de emulsión del 8% presentó el mejor comportamiento en términos de resistencia a la compresión tanto en condición seca como húmeda. Esto sugiere que una menor cantidad de asfalto puede proporcionar una estructura más resistente en condiciones normales y húmedas. Sin embargo, el contenido de emulsión asfáltica del 12% destacó por su índice de resistencia conservada (Ver figura 7), lo que indica que, aunque

pueda haber una reducción en la resistencia inmediata, ofrece una mejor capacidad de retención de propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

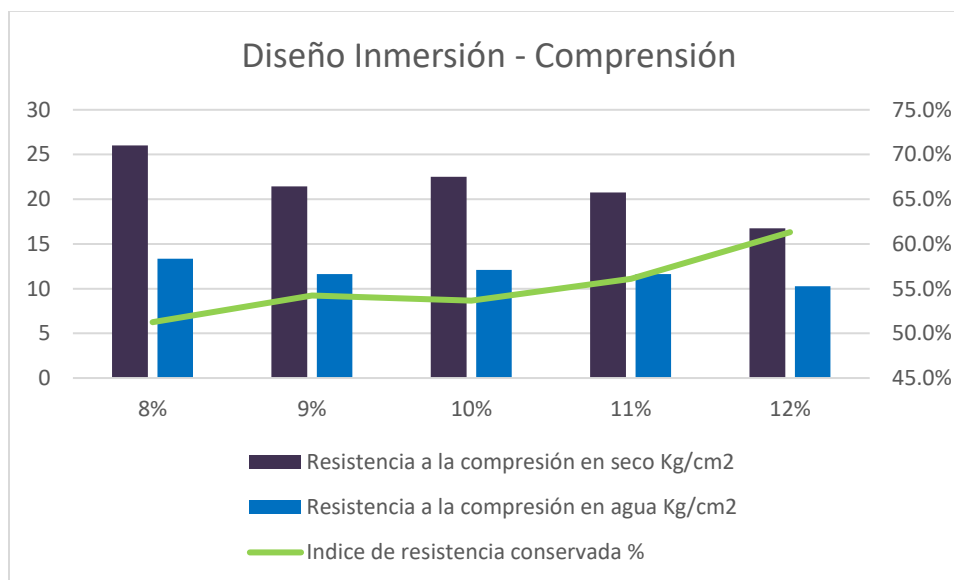


Figura 7: Análisis gráfico diseño inmersión – compresión. Fuente: Elaboración Propia 2024.

No obstante, lo anterior, hay que decir que con ningún contenido de emulsión se alcanzó el índice de resistencia conservada mínimo requerido por las especificaciones del 75%, como tampoco la resistencia a la compresión en seco que tiene por valor mínimo requerido en especificación 25.5Kg/cm². Por esta razón se escogió trabajar con un contenido emulsión promedio del 10% y adicionar cal y cemento a la mezcla en frío.

Estos hallazgos son fundamentales para la formulación de mezclas asfálticas más eficientes y sostenibles, ya que permiten optimizar el uso de materiales reciclados y emulsiones asfálticas, promoviendo una mejor gestión de recursos en la construcción de pavimentos. La investigación también sugiere que un equilibrio entre el contenido de asfalto y la proporción de RAP puede resultar en mezclas con un rendimiento mecánico adecuado, contribuyendo a la durabilidad y sostenibilidad de las infraestructuras viales.

En conclusión, el estudio resalta la importancia de realizar ensayos exhaustivos para encontrar el contenido óptimo de asfalto y adiciones en mezclas con RAP, lo que no solo mejora la calidad de los pavimentos, sino que también fomenta prácticas constructivas más responsables y sostenibles en la región.

8.4 Módulo Resiliente por compresión diametral

En el ensayo de módulo resiliente por compresión diametral, se evaluaron cuatro diferentes mezclas asfálticas en frío con distintas proporciones de cal y cemento. Los resultados obtenidos reflejan el impacto positivo de estas adiciones en las propiedades mecánicas de las mezclas (Ver figura 8).

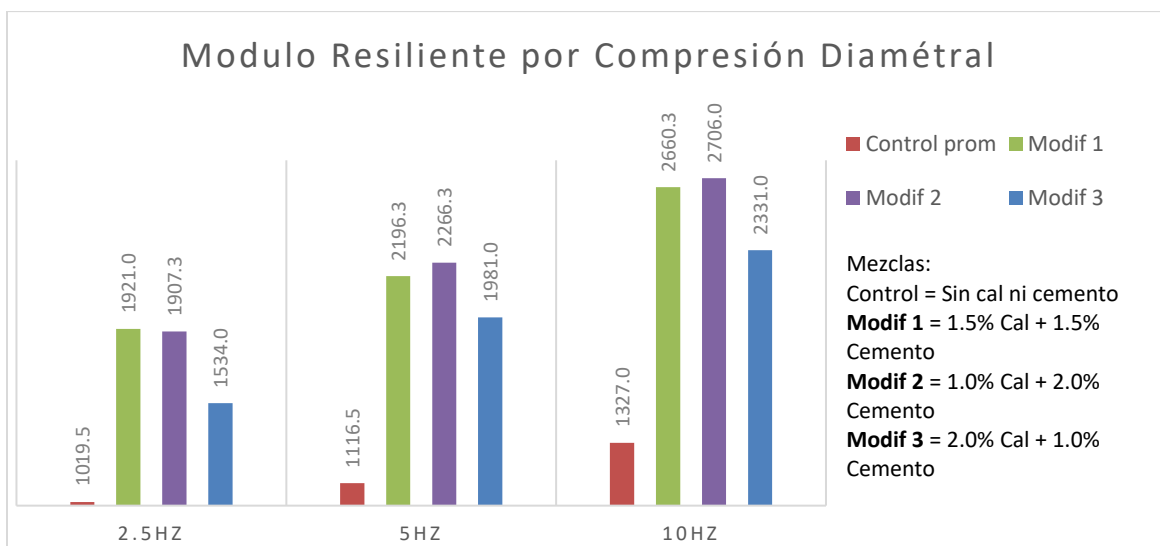


Figura 8 Resultados de los ensayos de modulo resiliente por compresión diametral para la muestra patrón y las tres muestras modificadas. Fuente: Elaboración propia 2024.

A 2.5 Hz, la muestra con 1.5% de cal y 1.5% de cemento logró el mejor resultado con un módulo resiliente de 1921 MPa. Sin embargo, a 5 Hz y 10 Hz, la muestra que demostró el mejor comportamiento fue la que contenía 1.0% de cal y 2.0% de cemento, alcanzando valores de 2266 y 2706 MPa, respectivamente. Esto indica que, a frecuencias más altas, la combinación de 1.0% de cal y 2.0% de cemento no solo aumenta la resistencia de la mezcla, sino que también proporciona una mayor estabilidad frente a cargas dinámicas. Es de resaltar que, la variación entre las combinaciones 1.5% de cal - 1.5% de cemento y 1.0% de cal - 2.0% de cemento ascienden hasta el 3%.

En conclusión, la mezcla con 1.0% de cal y 2.0% de cemento mostró un rendimiento superior en comparación con la muestra control elaborada solo con RAP, destacándose en términos de resistencia y durabilidad. Estos resultados subrayan la importancia de la formulación adecuada de mezclas asfálticas para optimizar su desempeño en aplicaciones prácticas. La investigación proporciona una base sólida para futuras optimizaciones en el uso de aditivos, promoviendo la construcción de pavimentos más eficientes y sostenibles.

8.5 Ensayo de desgaste Cántabro

En el ensayo de Cántabro, se evaluaron cuatro diferentes mezclas asfálticas con distintas adiciones de cal y cemento. Los resultados de los tres ensayos realizados para cada mezcla demostraron variaciones importantes (dispersión) en la resistencia a la abrasión.

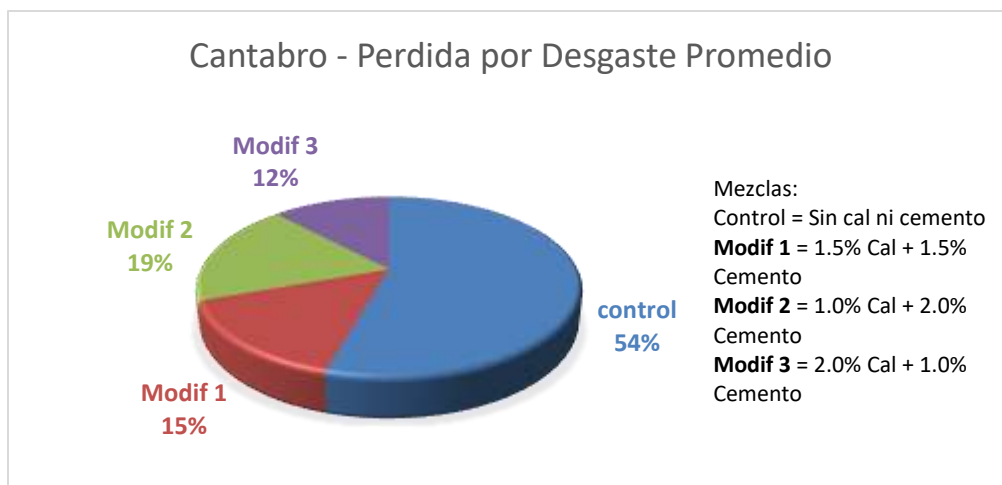


Figura 9: Resultados ensayo Cántabro, pérdida por desgaste promedio de tres evaluaciones.
Fuente: Elaboración propia 2024.

La muestra con 2.0% de cal más 1.0% de cemento presentó la menor pérdida de material (9,9 a 11,0%) después del ensayo y los resultados más consistentes. Las mezclas con 1.0% de cal más 2.0% de cemento, y 1,5% de cal más 1,5% de cemento tuvieron mayores pérdidas en promedio (Ver figura 9) y resultados más dispersos, aunque mucho menores que la mezcla de control sin cal ni cemento.

En conclusión, la muestra con mayor contenido de cal (2% de cal más 1.0% de cemento) demostró ser la más efectiva en términos de resistencia a la abrasión en general. Estos hallazgos son significativos para el diseño de mezclas asfálticas más duraderas y eficientes, resaltando la importancia de la formulación adecuada de aditivos para mejorar las propiedades de los materiales en aplicaciones de pavimentación.

8.6 Ensayo de Inmersión - compresión

El ensayo de inmersión y compresión permitió evaluar el comportamiento mecánico de cuatro diferentes mezclas asfálticas con distintas adiciones de cal y cemento.

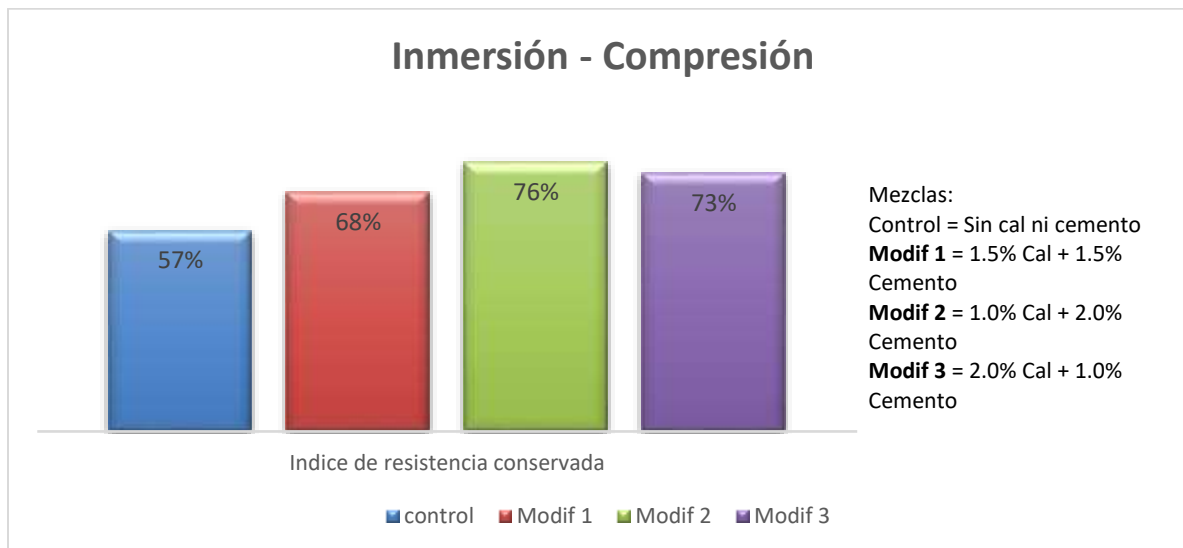


Figura 10: Resultados ensayo inmersión compresión para muestra control y muestras modificadas. Fuente: Elaboración propia 2024.

Los resultados obtenidos mostraron que la muestra con 1.0% de cal y 2.0% de cemento presentó el mejor rendimiento en términos de índice de resistencia conservada ($R_c=76\%$), alcanzando un incremento notable del 19% en comparación con la muestra control ($R_c=57\%$), que no contenía adiciones (Ver figura 10).

Este resultado indica que la combinación de cal y cemento en estas proporciones mejora significativamente la resistencia de la mezcla, lo cual es fundamental para garantizar la durabilidad y desempeño de los pavimentos ante condiciones de carga y humedad. La capacidad de esta mezcla para mantener su resistencia en condiciones de inmersión sugiere un potencial valioso para su aplicación en infraestructuras viales.

En conclusión, la adición de cal y cemento en proporciones de 1.0% y 2.0% respectivamente, demuestra ser una estrategia efectiva para optimizar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Estos hallazgos subrayan la importancia de la formulación adecuada de materiales en la construcción, lo que puede llevar a la implementación de prácticas más sostenibles y eficientes en el diseño de pavimentos.

8.7 Ensayo de Tracción indirecta en seco y húmedo

El ensayo de tracción indirecta, tanto en seco como en húmedo, permitió evaluar el comportamiento de cuatro diferentes mezclas asfálticas con distintas adiciones de cal y cemento.

Los resultados obtenidos revelaron que, en condiciones secas, la mezcla con 1.0% de cal y 2.0% de cemento mostró el mejor rendimiento, alcanzando una resistencia a la tensión de 746.8 kPa, significativamente superior a la muestra control, que presentó solo 464.9 kPa.

En cuanto al rendimiento en condiciones húmedas, la misma mezcla (1.0% de cal y 2.0% de cemento) también se destacó, logrando una resistencia a la tensión en condición húmeda de 551 kPa, frente a los 273 kPa de la muestra control. Esto evidencia que la adición de estos compuestos mejora notablemente la capacidad de las mezclas para resistir la tensión en diferentes condiciones ambientales (Ver figura 11).

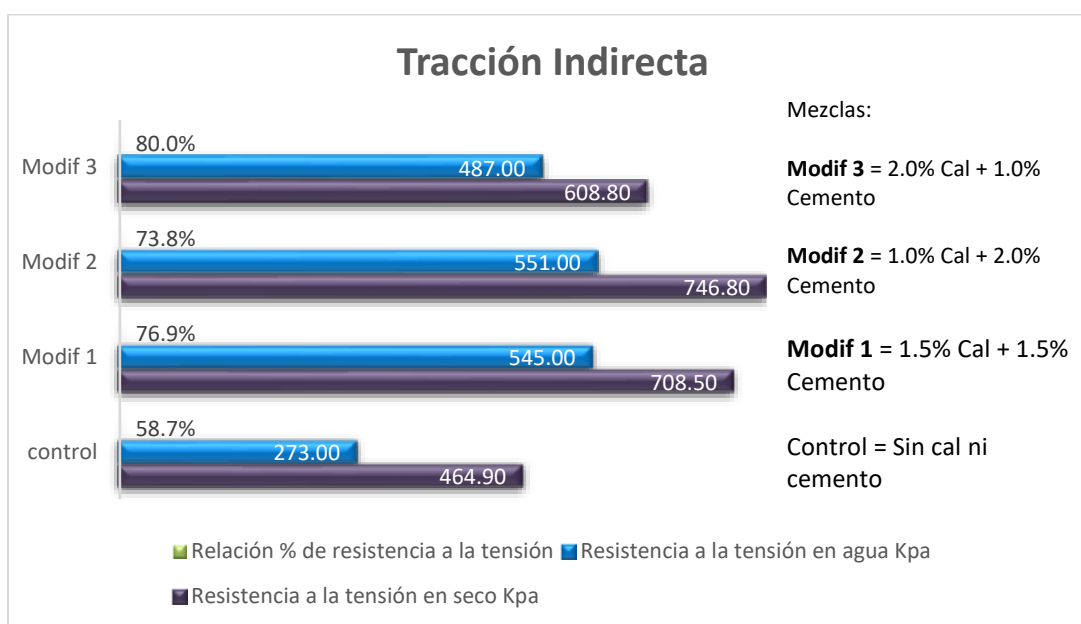


Figura 11: Resultados ensayo de tracción indirecta a muestra patrón y muestras modificadas.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Sin embargo, es importante señalar que, aunque la mezcla con 1.0% de cal y 2.0% de cemento mostró un comportamiento superior en resistencias en condiciones seca y húmeda, la mezcla con 2.0% de cal y 1.0% de cemento logró la mejor relación de resistencia a la tensión retenida, con un índice porcentual de 80%. Esto sugiere que, aunque ambas mezclas tienen ventajas, la optimización de las proporciones es esencial para alcanzar el mejor desempeño en cada contexto.

En conclusión, los hallazgos de este estudio resaltan la importancia de la formulación adecuada de mezclas asfálticas mediante la adición de cal y cemento, lo que no solo mejora la resistencia mecánica en seco y húmedo, sino que también contribuye a la durabilidad de las infraestructuras.

Estos resultados son fundamentales para futuras investigaciones y la aplicación práctica en la construcción de pavimentos más eficientes y sostenibles.

8.8 Recomendaciones para futuras investigaciones

Se recomienda llevar a cabo pruebas adicionales utilizando porcentajes iguales de adición de cal y cemento en las mezclas asfálticas en frío, específicamente con concentraciones del 2.0% de cal y 2.0% de cemento, 3.0% de cal y 3.0% de cemento, así como 4.5 % de cal y 4.5% de cemento. Esta metodología permitirá evaluar de manera más precisa el efecto de un aumento proporcional en la cantidad de estos aditivos sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad de las mezclas, proporcionando así datos valiosos que facilitarán una mejor comprensión del comportamiento de las mezclas asfálticas bajo diferentes condiciones de aplicación. Estos resultados podrían contribuir significativamente a optimizar las formulaciones y mejorar el rendimiento de las mezclas en proyectos de infraestructura.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar la utilización de otro tipo de emulsiones asfálticas según la norma INVIAS actual y profundizar sobre la adición de cal y cemento en mezclas asfálticas en frío. Específicamente, sería valioso evaluar la respuesta de las probetas elaboradas con otras emulsiones en el ensayo de Cántabro, con el fin de analizar el comportamiento de adherencia de las partículas. Comprender cómo las diferentes emulsiones influyen en la cohesión y resistencia a la abrasión de las mezclas permitirá obtener información crucial para optimizar su formulación y mejorar la durabilidad y desempeño de las mezclas asfálticas en diversas condiciones de uso. Esta evaluación puede proporcionar una base sólida para futuras aplicaciones en proyectos de infraestructura.

La utilización de diferentes emulsiones y contenidos de cal y cemento podrían hacer posible un aumento del porcentaje de adición de RAP en la preparación de mezclas asfálticas en frío. Este enfoque no solo contribuiría a disminuir la acumulación de este material, que proviene de vías en mal estado, sino que también permitiría aprovechar recursos reciclados de manera más eficiente. Además, al incrementar la proporción de RAP, se sugiere aumentar simultáneamente los porcentajes de adición de cal y cemento. Esta combinación podría resultar en una mejora significativa en la resistencia de las mezclas, lo que garantizaría un desempeño superior en las condiciones de tráfico y climáticas. Este enfoque no solo tiene beneficios ambientales, sino que también optimiza la calidad de las mezclas asfálticas para futuras aplicaciones en infraestructura.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . En *Control and Dynamic Systems Vol. 69* (págs. 133-180). San Diego: Academic Press.
- Albayati, A. H. (2012). *Mechanistic Evaluation of Lime-Modified Asphalt Concrete Mixtures*. baghdad, Iraq.
- Bouron, S., Hammoum, F., Ruat, H., Métais, P., & Lesueur, D. (2021). *Improving the durability of asphalt mixtures with hydrated lime: Field results from highway A84*. nantes, francia.
- Burgos, P. A. (2015). *Diagnóstico sobre el empleo de material asfáltico reciclado (RAP) en Bogotá*. Bogota.
- Day, D., Lancaster, I. M., & McKay, D. (2019). *Emulsion cold mix asphalt in the UK: A decade of site and laboratory experience*. Nynas UK AB, puerto de Ellesmere CH651AJ, Reino Unido: Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition),.
- Díaz, A. A. (2005). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS RECICLADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN INCORPORANDO DISTINTOS MATERIALES DE ADICIÓN*. Barcelona, España.
- España, A. N. (2011). *Cal hidratada Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos*. Madrid, España: european lime association.
- Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes. *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*. Seattle, WA, USA,.
- Otálora, M. A. (2012). *Estudio del Comportamiento de una mezcla asfáltica fabricada con emulsión*. Bogota D.C.
- RAMOS, O. M., & ÁLVAREZ, C. A. (2022). *ANÁLISIS APLICATIVO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN COLOMBIA*. SANTA MARTA.
- Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.
- TenSTEP. (s.f.). Recuperado el 14 de 12 de 2015, de Cuando ha terminado de crear los objetivos y alcance, regrese y asegúrese de que todos están alineados. No debe tener objetivos que hagan referencia a entregables no definidos en los postulados del alcance. Si no está construyendo lo suficiente para satis

transporte, m. d. (2018). *Plan nacional de vías para la integración regional*. Bogotá D.C.

Wang, Z., Wang, P., Guo, H., Wang, X., & Li, a. G. (2020). *Adhesion Improvement between RAP and Emulsified Asphalt by Modifying the Surface Characteristics of RAP*. China: Andrea Graziani.

Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser . *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.

Zarabanda, J. F., & Méndez, A. N. (2016). *CARACTERIZACIÓN DEL RAP E IDENTIFICACIÓN DE SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE*. Bogotá D.C.



ANEXOS

Anexo 1. Material granular utilizado para la investigación



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 2. RAP utilizado para la investigación



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 3. Emulsión asfáltica tipo CRL-1 utilizada para la elaboración de probetas



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 4. Cal y cemento utilizados para la investigación



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 5. Ensayo Extracción cuantitativa de asfalto



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 6. Clasificación pétreos - Retenidos por tamiz para Granulometría base



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 7. Clasificación pétreos - Retenidos por tamiz para granulometría base



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 8. Mezcla material granular



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 9. Dosificación de cemento y cal para muestras alteradas en diferentes porcentajes de cal y cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 10. Adición de cal y cemento sobre mezcla de material granular



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 11. Adición de emulsión asfáltica tipo CRL-1 sobre mezcla de pétreos, cal y cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 12. Mezcla material granular, cal, cemento, emulsión CRL-1, adición y mezcla con RAP



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 13. Mezcla material granular, cal, cemento, emulsión CRL-1 y RAP



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 14. Elaboración de probetas modificadas y estándar



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 15. Elaboración de probetas modificadas y estándar



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 16. Probeta 1.5% cal y 1.5% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



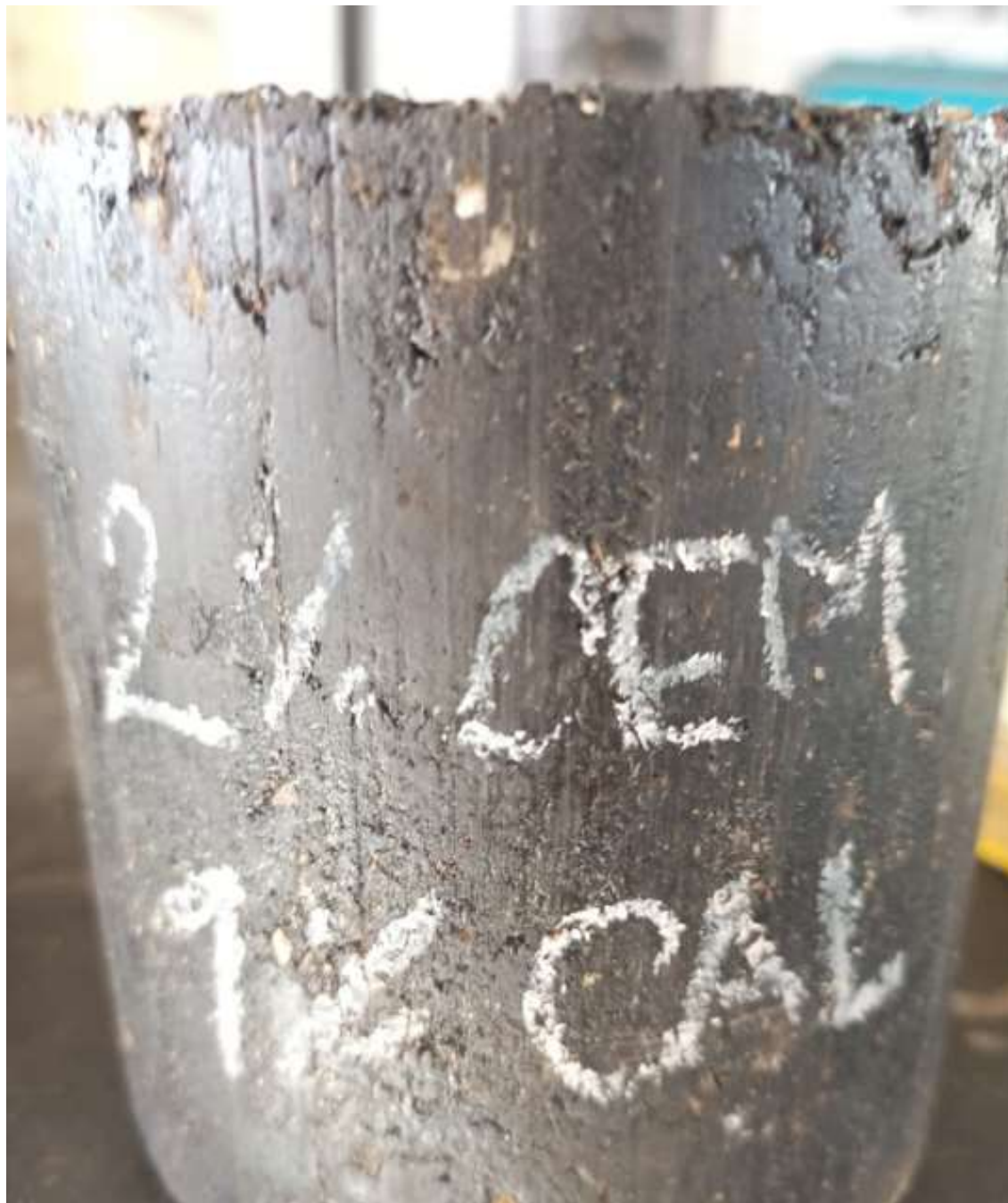
Anexo 17. Probeta 2 % cal y 1.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 18. Probeta 1 % cal y 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 19. Probeta estándar



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 20. Ensayo tracción indirecta en seco probeta 1.5% cal – 1.5% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 21. Ensayo tracción indirecta en seco probeta 2.0% cal – 1.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 22. Ensayo tracción indirecta en seco probeta 1.0% cal – 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 23. Probetas listas para inmersión en agua y posterior ensayo de tracción indirecta en condiciones seca y húmeda.



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 24. Probetas inmersas en agua para ensayo tracción indirecta.



Fuente: Autor(es) del Proyecto



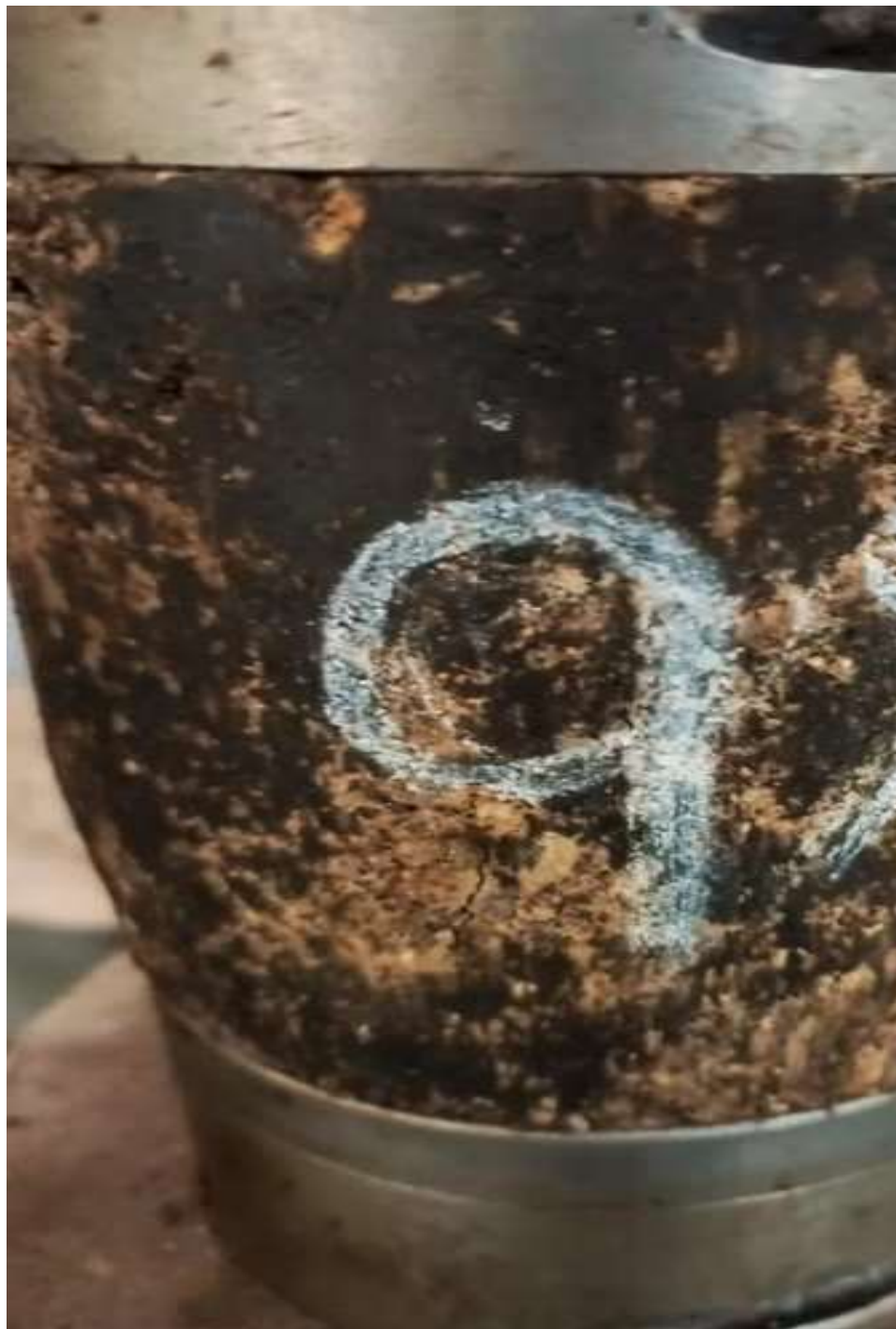
Anexo 25. Curado de probetas después de inmersión para ensayo tracción indirecta en húmedo



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 26. Ensayo tracción indirecta en húmedo probeta 1.0% cal – 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 27. Ensayo tracción indirecta en húmedo probeta 2.0% cal – 1.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 28. Ensayo tracción indirecta en húmedo probeta 1.5% cal – 1.5% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 29. Ensayo tracción indirecta en húmedo probeta estándar



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 30. Probetas listas para ingreso a máquina de los ángeles



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 31. Probeta no. 7 – resultado antes de ingresar a máquina de los ángeles 1.0%
cal - 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 32. Probeta no. 9 – resultado antes de ingresar a máquina de los ángeles 1.0% cal - 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 33. Probeta no. 1 – resultado antes de ingresar a máquina de los ángeles 1.5%
cal – 1.5% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 34. Máquina de los ángeles – ingreso de Probetas para resultado



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 35. Inicio de prueba cántabro sobre Probetas



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 36. Probeta No. 7, resultado final ensayo cántabro 1.0% cal – 2.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 37 Probeta No. 4, resultado final ensayo cántabro 2.0% cal – 1.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 38. Probeta No. 6, resultado final ensayo cántabro 2.0% cal – 1.0% cemento



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 39. Estado final probeta ingresadas a máquina de los ángeles



Fuente: Autor(es) del Proyecto



Anexo 40. Probeta después de ensayo Módulo Resiliente



Fuente: Autor(es) del Proyecto

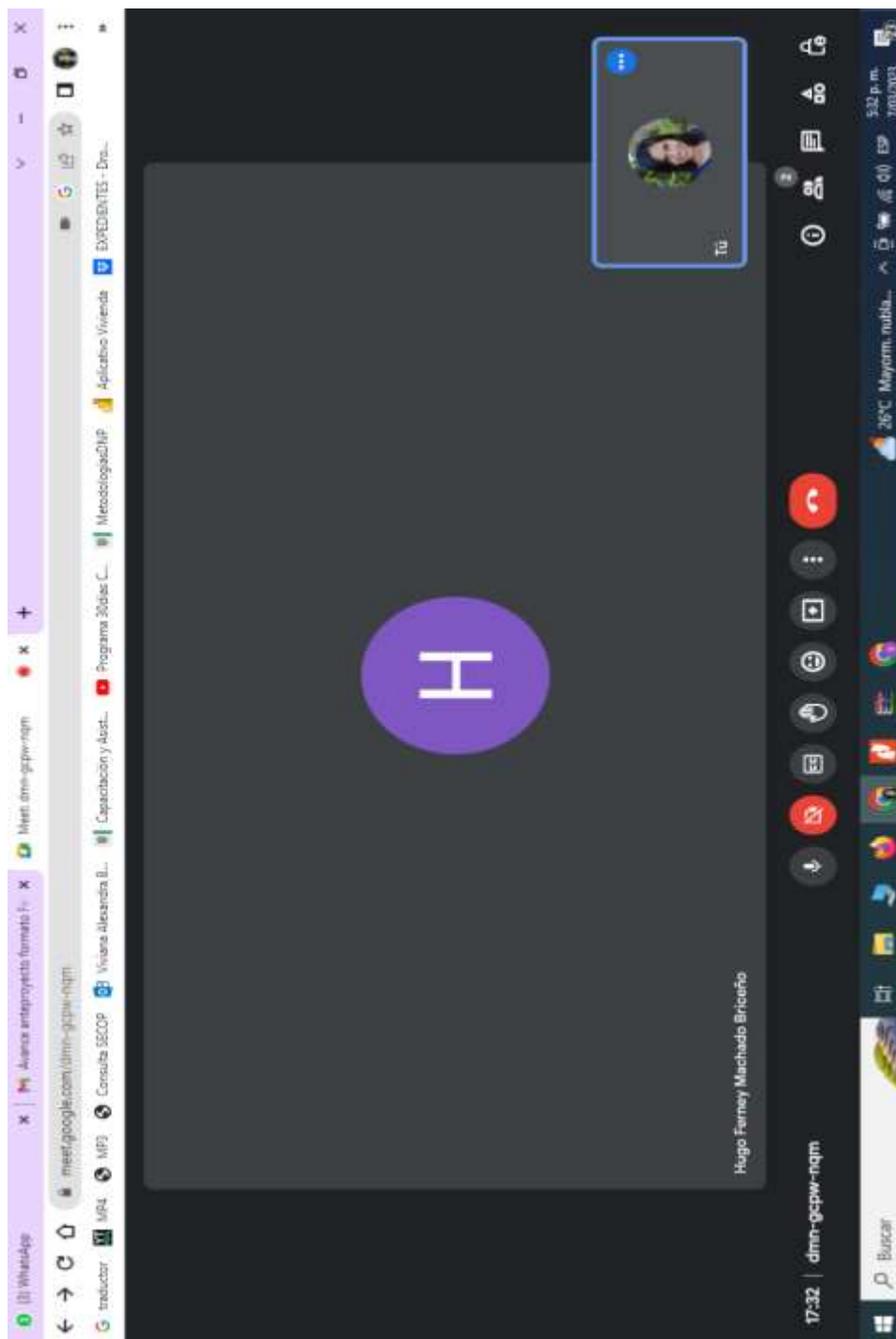


Anexo 41. Ensayo Módulo Resiliente probeta



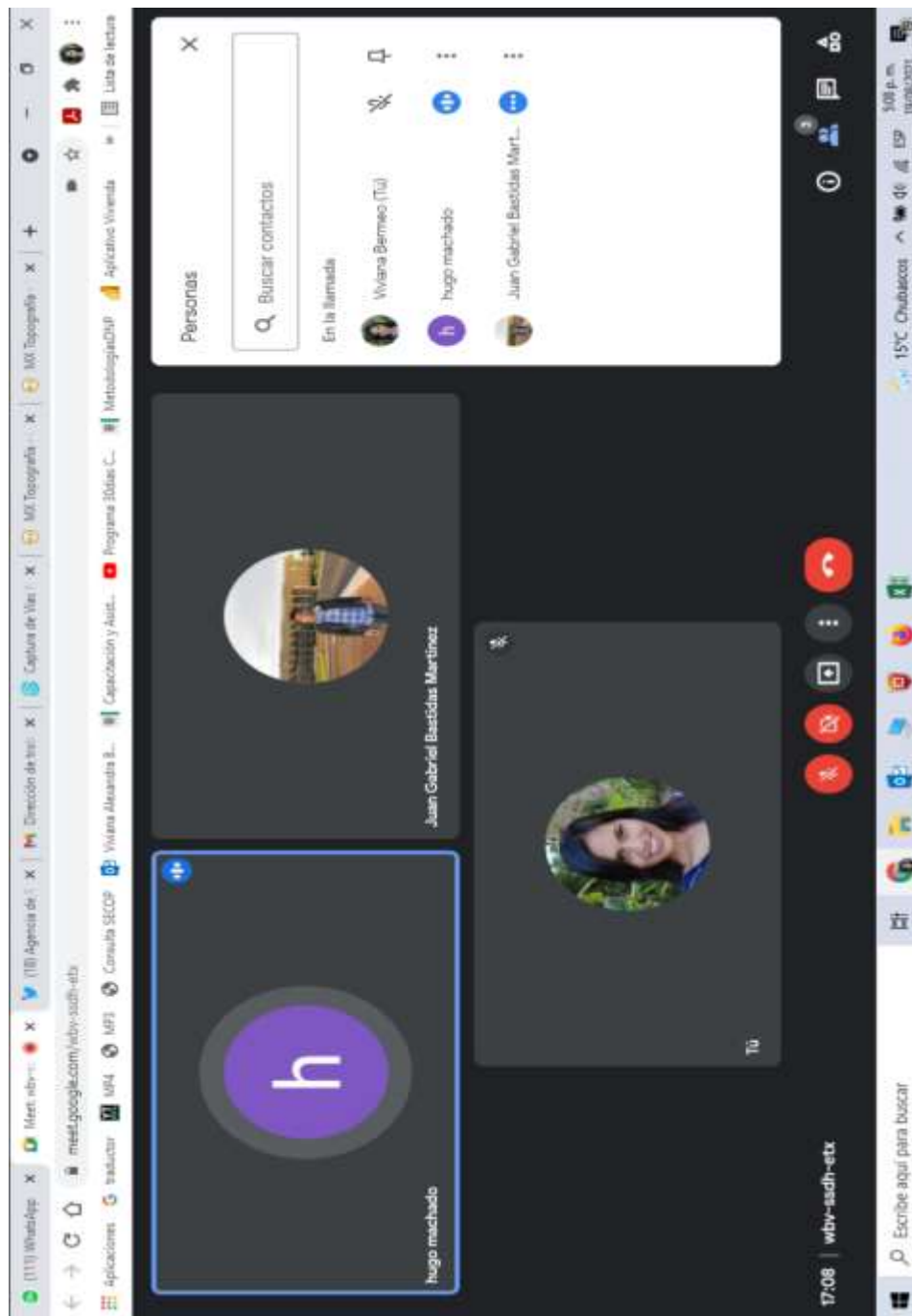
Fuente: Autor(es) del Proyecto

Anexo 42. Reunión virtual seguimiento investigación 07-03-2023



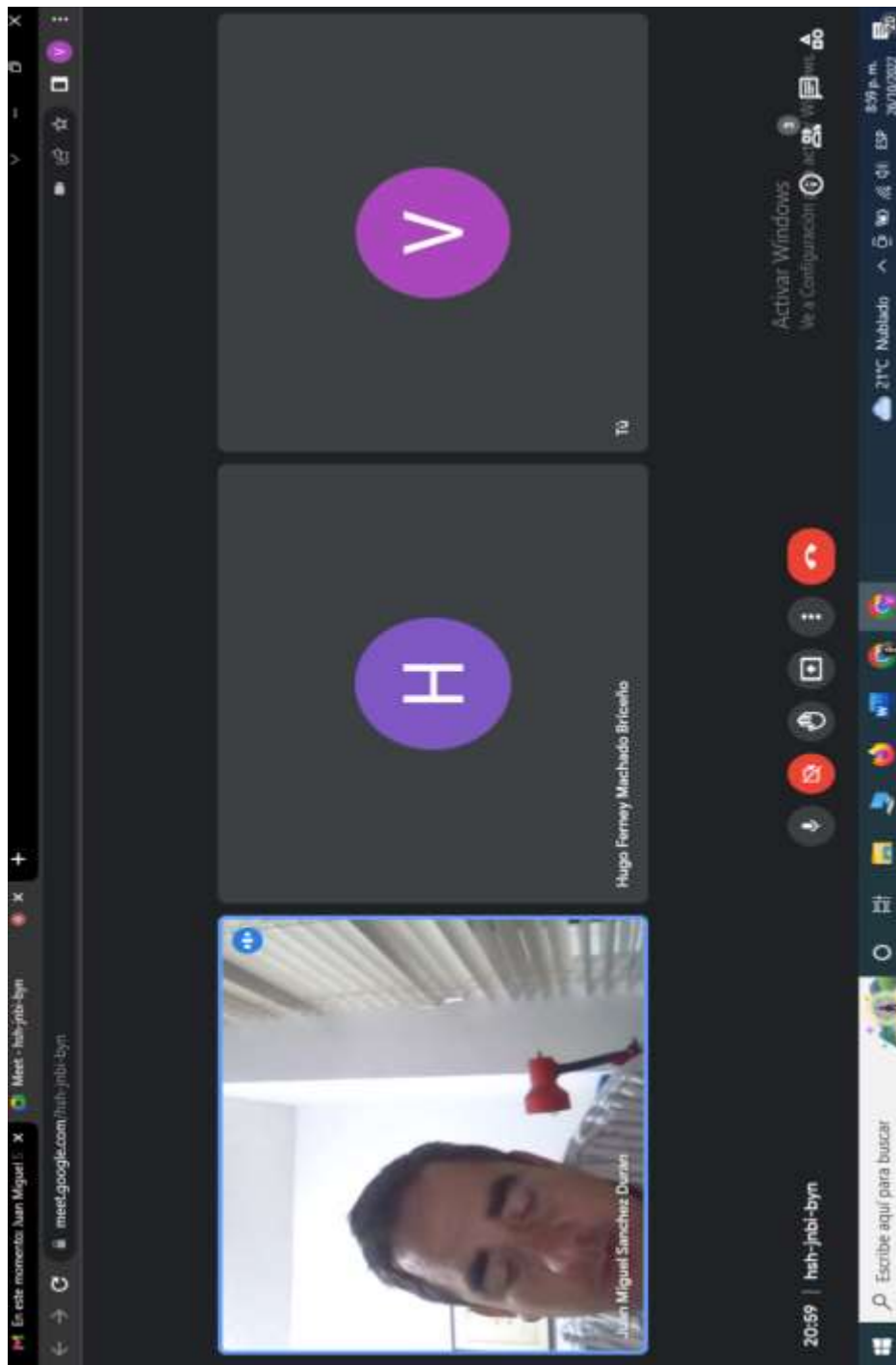
Fuente: Autor(es) del Proyecto

Anexo 43. Reunión virtual seguimiento investigación 19-08-2021



Fuente: Autor(es) del Proyecto

Anexo 44. Reunión virtual seguimiento investigación 26-10-2022



Fuente: Autor(es) del Proyecto