



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
SEDE PRINCIPAL

Evaluación de la Resistencia Mecánica de una Mezcla Asfáltica Tibia sustituyendo parcialmente el agregado pétreo grueso por agregado reciclado de concreto (ARC).
Diana Alexandra Jiménez Ariza y Juan Andrés Castillo Siatame. Universidad Santo Tomás (Colombia). 2023

**Evaluación de la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica tibia sustituyendo
parcialmente el agregado pétreo grueso, por agregado reciclado de concreto
(ARC)**

Diana Alexandra Jiménez Ariza

Juan Andrés Castillo Siatame

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Infraestructura Vial

Bogotá, D.C, Colombia

Junio de 2023

**Evaluación de la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica tibia sustituyendo
parcialmente el agregado pétreo grueso, por agregado reciclado de concreto
(ARC)**

Diana Alexandra Jiménez Ariza

Juan Andrés Castillo Siatame

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Infraestructura Vial

Director de tesis:

Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana M.SC, PH.D.

Codirector(a):

Ing. Wilson Arias Rojas M.SC., PH.D.

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Infraestructura Vial

Bogotá, Colombia

Junio de 2023

Agradecimiento

Queremos expresar un agradecimiento profundo a nuestros padres, que siempre han estado allí para nosotros, le agradecemos por todo el amor dado, su apoyo emocional y por ser una fuente de motivación constante en nuestra vida personal y profesional.

Yo Diana Alexandra Jiménez Ariza quiero expresar mi amor a mis hijos y esposo por su paciencia y comprensión durante los largos días y noches en los que estuve trabajando en mi tesis, y por ser mi inspiración para alcanzar mis objetivos académicos.

Yo Juan Andrés Castillo Siatame quiero expresar mi profundo amor a mi esposa que siempre me acompaña durante estos últimos 6 años de mi vida. Asimismo, queremos expresarle a nuestro director de tesis el más sincero agradecimiento por guiarnos y apoyarnos en todo momento. Su experiencia y conocimientos se constituyeron en elementos claves para desarrollar de forma eficiente nuestra investigación y así poder cumplir con los objetivos planteados. Estamos muy agradecidos por su dedicación y compromiso con nuestro proyecto, y siempre valoraremos su contribución en nuestra formación profesional.

Índice

pág.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIV
RESUMEN	XV
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 planteamiento y motivación	1
1.2 objetivos	2
1.3 síntesis	3
2. MARCO REFERENCIAL.....	4
2.1 Marco teórico	4
2.1.1. Aspectos generales de pavimentos.	4
2.1.2 Clases de pavimentos	5
2.1.3 Concreto asfáltico	6
2.1.4 Generalidades sobre mezclas asfálticas tibias	11
2.1.4.1 Metodologías más comunes utilizadas en la fabricación de mezclas tipo WMA	11
2.1.4.2 Proceso de selección de una mezcla asfáltica tibia.....	11
2.1.4.3 Ventajas de emplear esta tecnología en comparación con las mezclas HMA.....	11
2.1.5 Residuos de construcción y demolición (RCD).....	12
2.1.6 Tratamiento de los RCD	12
2.1.7 Aditivo husil	13
2.1.8 Caracterización del cemento asfáltico.....	13
2.1.8.1 Ductilidad de materiales asfálticos (inv.e – 702).....	13
2.1.8.2 Penetración de los materiales bituminosos (inv.e – 706)	14

2.1.8.3 Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) (inv.e – 707).....	14
2.1.8.4 Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta cleveland (inv.e – 709).....	14
2.1.8.5 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (inv.e – 712).....	15
2.1.8.6 Solubilidad de los materiales asfálticos (inv.e – 713)	15
2.1.8.7 Índice de penetración de los cementos asfálticos (inv.e – 724)	15
2.1.9 Ensayos de caracterización para el agregado pétreo y ACR	16
2.1.9.1 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado (inv. e-122).....	16
2.1.9.2 Determinación del límite líquido de los suelos (inv. e-125).....	16
2.1.9.3 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (inv. e-126)	17
2.1.9.4 Equivalente de arena de suelos y agregados finos (inv. e-133).....	17
2.1.9.5 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”) por medio de la maquina de los ángeles (inv. e-218).....	18
2.1.9.6 Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4”) por abrasión e impacto de la maquina de los ángeles (inv. e-219)	18
2.1.9.7 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato sodio o de magnesio (inv.e – 220).....	18
2.1.9.8 Densidad,relativa (gravedad específica) y absorción del grado fino (inv.e – 222).....	19
2.1.9.9 Densidad, relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (inv.e – 223).....	19
2.1.9.10 Determinación del valor del 10% de finos (inv.e – 224).....	20
2.1.9.11 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (inv.e – 227)	20
2.1.9.12 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (inv.e – 230).....	20
2.1.9.13 Valor de azul de metileno en agregados finos (inv.e – 235).....	21

2.1.9.14 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro - deval (inv.e – 238).....	21
2.1.9.15 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (inv.e – 239)	21
2.1.10 Ensayos de laboratorio	21
2.1.10.1 Ensayo marshall (inv. e-748).....	22
2.1.10.2 Ensayo de tracción indirecta (inv. e-725).....	23
2.1.10.3 Ensayo módulo resiliente obtenido bajo carga cíclica (inv. e-749)	23
2.1.10.4 Ensayo cántabro de pérdida por desgaste (inv. e – 760).....	23
2.2 Marco contextual.....	24
2.3 Marco legal.....	25
2.3.1 Resolución número 0472 de 2017.....	25
2.3.2 Resolución número 1257 de 2021.....	25
2.3.3 Resolución número 1115 de 2012.....	26
2.3.4 Resolución número 715 de 2013.....	26
2.3.5 Decreto número 586 de 2015.....	26
2.3.6 Resolución número 932 de 2015.....	26
2.4 Marco conceptual.....	27
2.4.1 WMA.....	27
2.4.2 Residuo de concreto y demolición rcd	27
2.4.3 Agregados de concreto reciclado acr	27
2.4.4 Agregados naturales o pétreos	28
2.4.5 Mezclas asfálticas modificadas	28
2.4.6 MCD-19	28
3. ESTADO DEL ARTE	29
3.1 Mezclas tibias.....	29

3.2 Aditivo husil	34
3.3 ACR	40
4. METODOLOGÍA	45
4.1 Revisión bibliográfica	45
4.2 Materiales	45
4.3 Caracterización de los materiales	47
4.3.1 Ensayos caracterización cemento asfáltico	47
4.3.2 Ensayos caracterización agregado natural y ACR	48
4.3.3 Modificación del asfalto con el aditivo y su caracterización	49
4.4 Granulometría de la mezcla	52
4.4.1 Dosificación mezcla tipo MDC-19 convencional y modificada	53
4.4.2 Dosificación de mezcla tipo MDC-19 convencional y modificada según el porcentaje óptimo del asfalto.	54
4.5 Diseño de mezclas	55
4.5.1 Mezcla convencional MDC-19 sin aditivo	55
4.5.2 Mezcla convencional MDC-19 y aditivo HUSIL	56
4.5.3 Mezcla modificada sustituyendo 21% y agregado grueso por ACR	56
4.5.4 Mezcla modificada sustituyendo el 21% y agregando grueso por ACR y aditivo HUSIL	56
4.6 Ensayos realizados	58
4.6.1 Ensayo marshall	58
4.6.2 Ensayo tracción indirecta	59
4.6.3 Ensayo desgaste por cántabro	59
4.6.4 Ensayo módulo resiliente	59
4.7 Mezclas analizadas según ensayos de laboratorio	60
4.8 Diseño metodológico	61
4.9 Metodología del marco lógico	62

4.10 Informes técnicos y documento final	63
4.11 Metodología para hacer el análisis estadístico anova	64
5. RESULTADOS	65
5.1 Análisis resultados de caracterización de materiales	65
5.1.1 Resultados de caracterización del cemento asfáltico	65
5.1.2 Resultados de la caracterización del agregado natural y ACR	67
5.2 Análisis resultados de laboratorio.....	70
5.2.1 Análisis de resultados obtenidos del ensayo marshall	70
5.3 Análisis estadístico de la varianza anova ensayo marshall.....	75
5.3.1.1 Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes secos.....	78
5.3.1.2 Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes húmedos	79
5.3.1.3 Potencial daño por humedad.....	80
5.3.2 Análisis estadístico de la varianza anova ensayo tracción indirecta	82
5.3.3 Análisis de resultados obtenidos del ensayo por desgaste de cántabro.....	83
5.3.4 Análisis estadístico de la varianza anova ensayo desgaste por cántabro	84
5.3.5 Análisis de resultados obtenidos del ensayo modulo resiliente	86
5.3.6 análisis estadístico de la varianza anova ensayo modulo resiliente	87
6. CONCLUSIONES	89
7. RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pavimento flexible y sus capas.	6
Figura 2. Resultado prueba modulo resiliente.	29
Figura 3. Valores ITS para muestras secas y acondicionadas.	30
Figura 4 . Relación de resistencia a la tracción de mezclas con diferente contenido de escoria de cobre.	30
Figura 5. Graduación promedio de agregados de cuatro mezclas (porcentaje de aprobación).	31
Figura 6. Comparación entre módulo resiliente (MR).	33
Figura 7. resistencia a la tracción indirecta en seco.	33
Figura 8. Grietas longitudinales HMA versus WMA.	34
Figura 9. Grietas transversales HMA versus WMA.	34
Figura 10. Evolución de vacíos de aire mezcla modificada (HUSIL/AC = 0,75%, 1%, 2%, 3%) y sin modificar (HUSIL/AC = 0%) Mezclas de HMA-19.	35
Figura 11. Evolución de la estabilidad y el flujo de mezcla modificada (HUSIL/AC = 0,75%, 1%, 2%, 3%) y mezclas de HMA-19 sin modificar (HUSIL/AC = 0%).	36
Figura 12. Evolución del módulo de resiliencia a 15° C (HMA-19 y WMA-19).	36
Figura 13. Módulo resiliente. a) MDC-19, b) WMA-19.	38
Figura 14. Deformación permanente.	38
Figura 15. Resistencia a fatiga.	39
Figura 16. Agregado Pétreo Tamizado de CONCRESCOL S.A.	45
Figura 17. Agregado Pétreo Tamizado de CONCRESCOL S.A.	46
Figura 18. Asfalto espumado producto de mezclarlo con el aditivo a 80°C durante un minuto.	46
Figura 19. Curva Granulométrica Agregado Pétreo.	53
Figura 20. Metodología proyecto de investigación.	61

Figura 21. Registro fotográfico caracterización –agregados.....	67
Figura 22. Registro Fotográfico, caracterización del agregado natural y ACR.....	69
Figura 23. Resultados ensayo Marshall.....	73
Figura 24. Registro Fotográfico ensayo Marshall.....	75
Figura 25. Resultados ensayo Tracción Indirecta.	81
Figura 26. Resultados ensayo Desgaste por Cántabro.	84
Figura 27. Resultados ensayo Módulo resiliente Frecuencia 2.5Hz, 5 Hz y 10 Hz.	87

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría de mezcal de concreto asfáltico.	7
Tabla 2. Pautas para tener presente en el diseño de concreto asfáltico (Ensayo Marshall).	8
Tabla 3. Agregados para concreto asfáltico y sus mínimos requisitos de calidad.	9
Tabla 4. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas MDC-19 y WMA-19.	37
Tabla 5. Ensayos de Caracterización del Cemento Asfaltico según la Normatividad INVIAS (2022).	47
Tabla 6. Ensayos de Caracterización de materiales según la Normatividad INVIAS.	48
Tabla 7. Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL.	50
Tabla 8. Caracterización reológica del asfalto CA 60-70, Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL.	50
Tabla 9. Caracterización reológica del asfalto modificado (HUSIL/CA=1 %), Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL.	51
Tabla 10. Análisis granulométrico de una mezcla asfáltica MDC-19.	52
Tabla 11. Dosificación de los agregados para las mezclas convencionales y modificadas con ACR.	54
Tabla 12. Dosificación de las mezclas convencionales y modificadas con ACR de acuerdo con sus respectivos porcentajes óptimos de asfalto.	55
Tabla 13. Plan de ensayos de laboratorio mezcla MDC-19.	57
Tabla 14. Ensayos mecánicos según la Normatividad INVIAS.	58
Tabla 15. Ensayos y mezclas Utilizadas en la investigación.	60
Tabla 16. Metodología Marco Lógico de la Investigación.	62
Tabla 17. Caracterización Cemento Asfaltico.	66
Tabla 18. Caracterización agregado natural.	67
Tabla 19. Resultados diseño mezcla con el contenido óptimo de asfalto.	71

Tabla 20. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Marshall.	76
Tabla 21. Tracción indirecta de las mezclas en condición seca.....	78
Tabla 22. Tracción indirecta de las mezclas en condición húmeda.	79
Tabla 23. Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las cuatro mezclas estudiadas en condición seca y condición húmeda.	80
Tabla 24. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Tracción Indirecta.....	82
Tabla 25. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Desgaste por Cántabro.	85
Tabla 26. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Modulo Resiliente.....	88

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A MARSHALL (INV. E-748-13).....	98
Anexo B Tracción indirecta (INV. E-725-13).	101
Anexo C Desgaste cantabro (INV. E-760-13).	102
Anexo D Módulo resiliente (INV. E-749-13)	103
Anexo E Memorias de cálculo y ensayo de laboratorio	104

RESUMEN

Hoy en día, las mezclas densas en caliente tienen algunos inconvenientes considerables. Su fabricación a altas temperaturas implica un elevado consumo de energía y una notable contaminación ambiental. Además del elevado costo de fabricación estos problemas han conducido a buscar opciones viables eficaces y razonables para reducir los impactos ambientales.

Asimismo, la explotación desmedida de agregados naturales también causa un impacto negativo en la conservación del entorno natural. Por lo tanto, resulta interesante utilizar los agregados de concreto reciclado (ACR) para sustituir de forma parcial los elementos como los agregados pétreos que conforman la mezcla asfáltica.

En este contexto, el presente estudio se ejecutó un periodo experimental donde se valoró el resultado de una mezcla asfáltica tibia reciclada. Esta mezcla se fabricó mediante la incorporación del aditivo HUSIL al asfalto, así como el remplazo parcial del 21% de las fracciones gruesas (tamices de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ") del agregado pétreo por ACR. El ACR fue obtenido en una planta de separación de residuos autorizada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en Bogotá D.C. Se llevaron a cabo pruebas de carga monotónica, como los ensayos Marshall y tracción indirecta y pruebas de carga dinámica, que incluyeron el módulo resiliente y el desgaste por cántabro. Para la elaboración de las mezclas se utilizó asfalto CA 60-70, y el agregado natural procedió de la planta de asfalto CONCRESCOL S.A.

De acuerdo con las respuestas obtenidas, se puede pensar que se obtiene un desempeño más eficiente puesto que reduce la temperatura de mezcla en 25°C, utilizar el aditivo HUSIL y reemplazar el 21% de la fracción gruesa del agregado pétreo por ACR (sustituyendo los tamices de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "). Bajo estas condiciones, este producto presenta un incremento significativo en su dureza, tanto en carga monotónica como dinámica. Además, presenta una elevada resistencia al efecto causado por la humedad y una mejor capacidad para resistir deformaciones permanentes en relación con la mezcla de control.

Palabras Claves: Agregado de concreto reciclado, mezcla asfáltica modificada, mezcla asfáltica tibia, HUSIL.

Abstract

Hot-dense mixes today have some considerable drawbacks. Its manufacture at high temperatures implies a high energy consumption and considerable environmental pollution. In addition to the high manufacturing cost, these problems have led to the search for viable, effective and reasonable options to reduce environmental impacts.

Likewise, the excessive exploitation of natural aggregates also causes a negative impact on the conservation of the natural environment. Therefore, it is interesting to use recycled concrete aggregates (ACR) to partially replace elements such as stone aggregates that make up the asphalt mix.

In this context, the present study carried out an experimental period where the result of a recycled warm asphalt mix was evaluated. This mixture was manufactured by incorporating the HUSIL additive to the asphalt, as well as the partial replacement of 21% of the coarse fractions ($\frac{1}{2}$ " and $\frac{3}{4}$ " sieves) of the stone aggregate by ACR. The ACR was obtained in a waste separation plant authorized by the Urban Development Institute (IDU) in Bogotá D.C. Monotonic load tests were carried out, such as the Marshall and indirect tensile tests and dynamic load tests, which included the resilient modulus and Cantabrian wear. For the preparation of the mixtures, CA 60-70 asphalt was used, and the natural aggregate came from the CONCRESCOL S.A. asphalt plant.

According to the answers obtained, it can be thought that a more efficient performance is obtained since it reduces the mixing temperature by 25°C, using the HUSIL additive and replacing 21% of the coarse fraction of the stone aggregate with ACR (replacing the $\frac{1}{2}$ " and $\frac{3}{4}$ " sieves). Under these conditions, this product presents a significant increase in its hardness, both in monotonic and dynamic load. In addition, it presents a high resistance to the effect caused by humidity and a better capacity to resist permanent deformations in relation to the control mixture.

Keywords: Recycled concrete aggregate, modified asphalt mix, warm asphalt mix, HUSIL.

1. INTRODUCCIÓN

En el lapso del tiempo, últimamente se ha despertado un gran interés por el empleo de concreto reciclado en mezclas asfálticas como una alternativa sostenible en la construcción de estructuras de pavimentos. Estos agregados reciclados, derivados a partir de la trituración de concreto o residuos de construcción, brindan ventajas desde la óptica técnica como desde la ambiental. En este contexto, se puede resaltar un impacto positivo, de los agregados de concreto reciclado tienen a nivel ambiental.

En el área de construcción de obras civiles se enfrenta a desafíos significativos puesto que debe disminuir los residuos y presencia de carbono. Por ende, los agregados de concreto reciclado (ACR) han surgido como una alternativa para solucionar estos problemas ambientales, permitiendo que sean reutilizados en una nueva elaboración de elementos para la construcción.

Este estudio analizó, mediante ensayos mecánicos, la conveniencia de la utilización de los ACR como agregados pétreos, sustituyendo un 21% de las fracciones gruesas de una mezcla asfáltica MDC-19. Asimismo, se utilizó un aditivo denominado HUSIL, el cual ayudó a reducir la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas. Bajo estos parámetros, se fabricaron briquetas de mezclas convencionales y modificadas a temperaturas que oscilan entre los 150°C y 125°C, a las cuales se les realizaron los ensayos Marshall, Tracción Indirecta, Desgaste por Cántabro y Módulo Resiliente para verificar su comportamiento.

1.1 Planteamiento y motivación

El continuo crecimiento de las obras civiles conduce a un incremento importante en la solicitud de elementos de materiales de construcción, como los agregados pétreos empleados en la elaboración de mezclas de concreto y asfalto. Sin embargo, la extracción de agregados pétreos para satisfacer esta demanda tiene impactos ambientales negativos, porque se presenta evidencias donde hay afectación de ecosistemas y de la biodiversidad presente.

En este contexto, los agregados de concreto reciclado han surgido como una alternativa prometedora y sostenible. Estos materiales se obtienen del reciclaje de residuos de construcción, lo que reduce la necesidad de extraer nuevos recursos naturales y ayuda en la gestión de

residuos. Por otro lado, la elaboración de las mezclas asfálticas densas en caliente genera un gran impacto ambiental debido a las altas temperaturas a las que se fabrican, lo cual requiere un alto consumo de energía y genera un problema significativo en la emisión de gases contaminantes.

Por lo anterior, es necesario realizar estudios sobre la conveniencia en la reutilización de los agregados de concreto reciclado (ACR) en vez de sustitutos de los agregados naturales en una mezcla asfáltica MDC-19, analizando su comportamiento bajo carga monotónica, daño por humedad, desgaste por cántabro y capacidad para resistir deformaciones bajo carga. Asimismo, se necesita investigar las mezclas asfálticas tibias (MAT) como estrategia para reducir la producción de gases que contaminan el medio ambiente porque requieren un gran consumo de energía por parte de las plantas asfálticas al fabricar las mezclas densas en caliente.

Por esta razón y teniendo en cuenta los argumentos mencionados en los párrafos anteriores, cabe preguntarse: ¿Las mezclas asfálticas tipo MDC-19 fabricadas a menor temperatura con el aditivo HUSIL y modificadas granulométricamente al sustituir parcialmente el agregado grueso de origen natural por agregados de concreto reciclado (ACR) ofrecen mayor resistencia mecánica que una mezcla convencional?

1.2 Objetivos

La presente investigación tiene por objetivo principal evaluar la resistencia bajo carga monotónica y cíclica, el daño por humedad y el desgaste por abrasión que experimenta una mezcla asfáltica tibia cuando se sustituye parcialmente el agregado grueso de origen natural por reciclado de concreto (ACR). Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Determinar el plan de pruebas y ensayos de laboratorio, así como las dosificaciones de sustitución, para determinar las cantidades de ACR y los métodos que se usarán para evaluar su comportamiento.
- Caracterizar los materiales que se utilizarán para la elaboración de la mezcla asfáltica tibia y realizar pruebas y ensayos de laboratorio sobre la mezcla tipo MDC-19, con y sin sustitución parcial del agregado natural por ACR y con adición del aditivo HUSIL, midiendo la respuesta bajo ensayos dinámicos y monotónicos.
- Analizar estadísticamente los resultados obtenidos de la fase experimental considerando el método de varianza ANOVA.

1.3 Síntesis

En la actual investigación, a diferencia de las investigaciones relacionadas con Mezclas tibias, ACR y HUSIL, se sustituyó una fracción del agregado pétreo natural (fracción gruesa) por ACR, cuyo fin fue producir una mezcla asfáltica que no afecte tanto al medio ambiente

El Capítulo 1, hace referencia a una breve introducción del proyecto investigativo, donde se describe el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la tesis. Luego, en el Capítulo 2, se presentó el marco referencial, donde se describió el marco teórico, legal, contextual y conceptual con el objetivo ubicar el lector en el tema investigativo. Posteriormente, en el Capítulo 3, se llevó a cabo la revisión bibliográfica relacionada con las mezclas asfálticas tibias (MAT), los agregados de concreto reciclado (ACR) y el empleo del aditivo HUSIL. Después, en el Capítulo 4, se evidencia el método empleado para dar cumplimiento al objetivo general y objetivos específicos de la presente investigación. El quinto capítulo detalla los resultados obtenidos durante la fase experimental, presentado con un análisis específico. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de la investigación, las recomendaciones y posteriormente se mencionan la respectiva bibliografía.

2. MARCO REFERENCIAL

A continuación, el lector encontrará un sustento teórico representado en el marco teórico, conceptual y legal, que dará una mayor claridad al presente documento.

2.1 Marco Teórico

El objetivo principal al desarrollar este marco teórico fue brindar un panorama completo y riguroso a partir de una revisión de literatura, que investigó de forma analítica de los resultados obtenidos. En definitiva, este marco teórico constituyó el punto de partida esencial para profundizar, analizar y aportar nuevos conocimientos al campo de estudio en cuestión. Inicialmente, se comenzó realizando una investigación teórica en lo referente a la temática de los pavimentos y sus clases, para continuar con aspectos relacionados con el concreto asfáltico, generalidades sobre mezclas asfálticas tibias, ACR, sus tratamientos, aditivo HUSIL, ensayos de laboratorio y su descripción según la norma INVIAS.

2.1.1. Aspectos generales de pavimentos.

La estructura vial está conformada por el pavimento, este se caracteriza porque está elaborado con materiales selectamente seleccionados que conforma unas capas de forma horizontal y sobrepuestas una sobre la otra, la construcción de las mismas se realiza de forma técnica sobre una subrasante, de tal manera que facilita la circulación de los vehículos y demás medios de transporte. El pavimento debe ser elaborado de tal forma que sea capaz de soportar grandes cargas, es decir, debe poder transmitirla a las capas inferiores de forma equitativa de tal manera que los esfuerzos sean distribuidos uniformemente y no se afecte las características generales del pavimento, pero al mismo tiempo sea capaz de ofrecer una superficie externa cómoda para que los vehículos puedan transitar sin dificultad alguna. (Cardoso y Dhir, 2016)

De acuerdo con Olaya Ortiz y Moreno Salazar (2020) hay diferentes normas por ejemplo el AASHTO, IDU o el INVIAS, para poder revisar el reglamento normativo de construcción a cumplir en este caso el de pavimentos de acuerdo con el sitio de construcción; en el país, generalmente se utiliza la de INVIAS o las señaladas por el IDU, pero se tiene como referente principal las indicadas por AASHTO.

2.1.2 Clases de pavimentos

En lo referente a los pavimentos, ellos se subdividen en las siguientes clases:

- ✓ Pavimento flexible
- ✓ Pavimento Articulado
- ✓ Pavimento Rígido
- ✓ Pavimento Semirrígido

A continuación, se hace referencia a pavimentos flexibles puesto que en documento se centrará en él.

- ✓ Pavimentos flexibles

Según lo indica Rondon y Reyes (2015)

Este tipo de pavimentos, de acuerdo Rondon y Reyes (2015) son “estructuras conformadas por una capa asfáltica” ,p. 395. Los agregados pétreos junto con el material asfáltico conforman una mezcla llamada capa asfáltica o de rodadura; esta capa, a la vez se sostiene en otras capas conformadas por un material de carácter granular especialmente compactado y que se conocen con los nombres de base, subbase y subrasante. Esta última capa corresponde al terreno natural que es sujeto a mejoras para así lograr una estructura y adecuación del pavimento.

La figura 1, evidencia la estructura típica de un pavimento flexible con sus capas

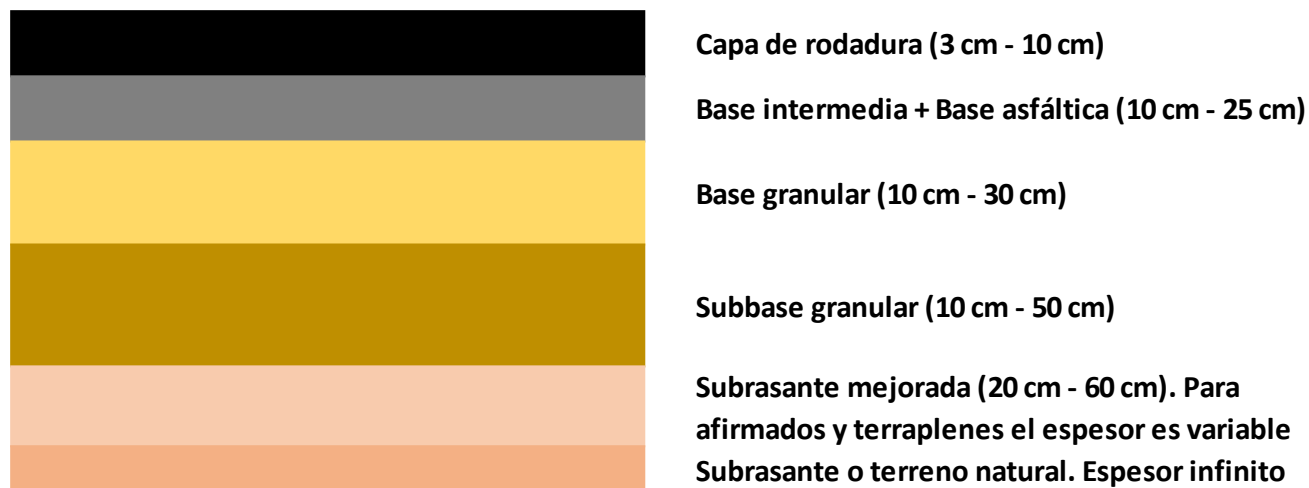


Figura 1. Pavimento flexible y sus capas.

Fuente: Rondón, Q, H.A Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. (2015)

2.1.3 Concreto Asfáltico

De acuerdo a Rondon y Reyes (2015), el INVIAS (2022), artículo 450-13, señala que en Colombia se identifican las mezclas; MDC (mezclas densas en caliente), MSC (mezclas semidensas en caliente), MGC (mezclas gruesas en caliente) y MAM (mezclas de alto módulo). En términos generales estas mezclas están conformadas por agregados pétreos caracterizados por la mezcla de cemento asfáltico con partículas sólidas que evidencian en una granulometría, partículas sólidas de diversos tamaños correspondientes a (finos, gravas, llenante mineral y arenas). “Estas mezclas deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (fabricarse entre 140 y 190 °C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto) y se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen (entre 3% a 9% por lo general)”, p. 26. En la tabla 1, se evidencia los requisitos de granulometría que debe cumplir el agregado pétreo en la elaboración de mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 1. Granulometría de mezcal de concreto asfáltico.

Tamiz		Porcentaje que pasa							
Normal	Alternativo	MDC-25	MDC-19	MDC-10	MSC-25	MSC-19	MGC-38	MGC-25	MAM-25
37.5 mm	1 1/2"	-	-	-	-	-	100	-	-
25.0 mm	1"	100	-	-	100	-	75-95	100	100
19.0 mm	3/4"	80-95	100	-	80-95	100	65-85	75-95	80-95
12.5 mm	1/2"	67-85	80-95	-	65-80	80-95	47-67	55-75	65-80
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100	55-70	65-80	40-60	40-60	55-70
4.75 mm	No 4	43-59	49-65	65-87	40-55	40-55	28-46	28-46	40-55
2.00 mm	No 10	29-45	29-45	43-61	24-38	24-38	17-32	17-32	24-38
425 µm	No 40	14-25	14-25	16-29	9-20	9-20	7-17	7-17	10-20
180 µm	No 80	8-17	8-17	9-19	6-12	6-12	4-11	4-11	8-14
75 µm	No 200	4-8	4-8	5-10	3-7	3-7	2-6	2-6	6-9

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Normas de Ensayos de Materiales para carreteras. Bogotá. INVIAS 2022

Según Rondon y Reyes (2015), se debe realizar un ensayo Marshall (AASHTO T 245, INV. E-748-13), teniendo presente los criterios de la tabla 2, en los casos donde el material presente un tamaño máximo de partícula del agregado pétreo es inferior a 1". Véase la tabla 2.

Tabla 2. Pautas para tener presente en el diseño de concreto asfáltico (Ensayo Marshall).

Características		Norma de ensayo INV	MDC, MSC, MGC			MAM
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima (N)		E-748	5000	7500	9000	15000
Flujo (mm)*		E-748	2-4	2-4	2-3.5	2-3
Estabilidad/Flujo (KN/mm)		E-748	2-4	3-5	3-6	-
Vacíos con aire (Va)(%)	Rodadura	E-736, 799	3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia		4-8	4-8	4-7	4-6
	Base		-	5-8	5-8	4-6
Vacíos en los agregados (VAM)(%)	Mezclas 0	E-799	≥13	≥13	≥13	-
	Mezclas 1		≥14	≥14	≥14	≥14
	Mezclas 2		≥15	≥15	≥15	-
	Mezclas 3		≥16	≥16	≥16	-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%) para rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75
Relación llenante/asfalto efectivo en peso		E-799	0.8-1.2			1.2-1.4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor crítico			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm		E-741	7.5	7.5	7.5	7.5
*Mezclas asfálticas modificadas con polímeros podrán presentar un valor de flujo hasta de 5.0 mm siempre y cuando la relación estabilidad/flujo cumpla con los valores especificados						

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Normas de Ensayos de Materiales para carreteras. Bogotá. INVIAS 2022

A continuación, se presentan las siguientes consideraciones adicionales para el diseño de este tipo de mezcla:

- ✓ La resistencia a tracción de la mezcla (INVIAS, 2022, INV. E-725-13, AASHTO T 283) en curado húmedo debe ser al menos 80% de la alcanzada bajo condición seca.
- ✓ El ensayo de resistencia a la deformación plástica mediante la pista de laboratorio (INVIAS, 2022, INV. E-756-13, NLT 173) no debe superar los 15 $\mu\text{m}/\text{min}$. Se utilizan estas mezclas en zonas donde se evidencia una temperatura media anual mayor a 24 °C. Ni mayor de 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ para regiones con temperaturas hasta de 24 °C. Ello cuando las capas de rodadura e intermedia, se empleen en vías con bajos volúmenes de tránsito y para MAM.

✓ El módulo resiliente (INVIAS, 2022, INV. E-749-13, ASTM D 4123) de MAM, sobre muestras previamente envejecidas según AASHTO R-30, debe ser superior a 104 MPa para una temperatura ambiente de 20 °C y una frecuencia de carga de 10 Hz

De otra parte, se debe tener presente los requisitos mínimos de calidad, evidenciados en la tabla 3, para agregados pétreos y el cemento asfáltico y que se emplean en la producción de mezclas de concreto asfálticos.

Tabla 3. Agregados para concreto asfáltico y sus mínimos requisitos de calidad.

Ensayo	Método	NT1	NT2	NT3
Agregado grueso				
Resistencia al desgaste en la máquina de Los Angeles, 500 revoluciones	INV. E-218, 219	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx Base: 35% máx	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 35% máx Base: 35% máx
Micro Deval	INV. E 238	-	Rodadura: 25% máx. Intermedia: 30% máx Base: 30% máx	Rodadura: 20% máx. Intermedia: 25% máx Base: 25% máx
10% de finos en seco	INV. E 224	-	-	Rodadura: 110 KN mín Intermedia: 90 KN mín Base: 75 KN mín
10% de finos relación húmedo/seco	INV. E 224	-	-	Rodadura: 75 KN mín Intermedia: 75KN mín Base: 75 KN mín

Continuación tabla 3

Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	INV. E 220	18% máx	18% máx	18% máx
Caras fracturadas: 1 cara	INV. E 227	Rodadura: 75% mín. Intermedia: 60% mín	Rodadura: 75% mín. Intermedia: 75% mín Base: 60% mín	Rodadura: 85% mín. Intermedia: 75% mín Base: 60% mín
Caras fracturadas: 2 cara	INV. E 227	-	Rodadura: 60% mín	Rodadura: 70% mín
Coeficiente de pulimento	INV. E 232	Rodadura: 0.45 mín	Rodadura: 0.45 mín	Rodadura: 0.45 mín
Partículas planas y alargadas	INV. E 240	10% máx	10% máx	10% máx
Contenido de impurezas	INV. E 227	0.5% máx	0.5% máx	0.5% máx
Agregados Medio y fino				
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	INV. E 220	18% máx	18% máx	18% máx
Angularidad	INV. E 239	Rodadura: 40% mín. Intermedia: 35% mín	Rodadura: 45% mín. Intermedia: 40% mín Base: 35% mín	Rodadura: 45% mín. Intermedia: 40% mín Base: 35% mín
Índice de plasticidad	INV. E 125, 126	No plástico	No plástico	No plástico
Equivalente de arena	INV. E 133	50% mín	50% mín	50% mín
Azul de metileno*	INV. E 235	10% máx	10% máx	10% máx
Cubrimiento de los agregados asfálticos en presencia del agua hirviendo	INV. E 757	Reportar	Reportar	Reportar
Método Riedel Weber para agregados finos	INV. E 774	Índice mínimo= 4	Índice mínimo= 4	Índice mínimo= 4

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Normas de Ensayos de Materiales para carreteras. Bogotá. INVIAS 2022.

2.1.4 Generalidades sobre mezclas asfálticas tibias

En esta parte, se encuentra un resumen, referente a mezclas asfálticas tibias, basado en el libro publicado por (Rondon y Reyes, 2015).

2.1.4.1 Metodologías más comunes utilizadas en la fabricación de mezclas tipo WMA

Según Rondon y Reyes (2015) las dos metodologías más usadas son:

- Espumar el asfalto.
- Modificar el asfalto con aditivos.

2.1.4.2 Proceso de selección de una mezcla asfáltica tibia

Según Rondon y Reyes (2015) el proceso de selección de una mezcla asfáltica tibia se tiene que analizar las siguientes consideraciones.

- El valor de los aditivos.
- Capacidad que se tiene de la planta de producción o fabricación de la mezcla.
- Modificaciones requeridas para usar con éxito la mezcla asfáltica tibia con los equipos de laboratorios disponibles.
- Datos de rendimientos.

2.1.4.3 Ventajas de emplear esta tecnología en comparación con las mezclas HMA

A continuación, según Ulloa Calderón (2011) se presentan las siguientes ventajas a esta metodología.

- Disminución de la utilización de combustible para la fabricación de mezclas asfálticas.
- Mayor manejabilidad en la compactación de la mezcla asfáltica.
- Reducción de gases en la fabricación.
- Eliminación del envejecimiento prematuro del ligante.

2.1.5 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Hoy en día, los residuos de construcción y demolición (RCD) ocupan el primer puesto como los residuos que se producen a nivel mundial. En el país, se producen según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios 32.580 toneladas/día de residuos sólidos, incrementándose en un 0.89 % con relación al año 2020.

Los residuos que se generan en una construcción, demolición o en una rehabilitación de una obra sin interesar su tipo o su carácter privado o público; son los que se conocen como RCD. Cabrera, Gómez, y Almaral (2017). Sin embargo, Fatta, D; Papadopoulos, A, Avramikos, E; Sgourou, K. Moustakas, F (2003) señala que una maneja de clasificar a nivel internacional los RCD es clasificandolos según su procedencia en:

- Materiales de excavación: tierra, arena, grava, rocas, etc.
- Construcción y mantenimiento de obras civiles: asfalto, arena, grava y metales, etc.
- Materiales de demolición: bloques de hormigón, ladrillos, yeso, porcelana y cal-yeso.

Según esta categorización las tierras de excavación limpias, se encuentran ubicadas en los RCD Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 de España (Ministerio del Medio Ambiente Español, 2001)

2.1.6 Tratamiento de los RCD

Se debe tener presente el aprovechamiento eficientemente los RCD a nivel industrial puesto que se puede usar en pavimentos y la conformación del concreto. Una de las características se basa en que a través de un proceso de trituración se puede producir un agregado grueso; que, a su vez, puede ser utilizado en la conformación del concreto, y en pavimentos en general. Anantha Rama y Lokeshwari (2010). Además, se debe tener presente que es posible que al analizar la composición del RCD se encuentren materiales como ladrillos, materiales cerámicos y concreto, materiales que pueden ser reutilizados. Por ello se debe diseñar un plan de triturado de los mismos de tal forma que su tamaño este acorde con la normatividad vigente de Colombia de tal manera que la industria de la construcción reduzca la explotación masiva de los recursos naturales. (Pacheco, Rondón y Sánchez, 2017)

2.1.7 Aditivo HUSIL

El HUSIL se utiliza como un modificador de las mezclas asfálticas, proporcionando beneficios de resistencia a la fatiga, resistencia al envejecimiento, elasticidad y reducción de la susceptibilidad térmica. Además, este aditivo ayuda a incrementar la durabilidad y la vida útil de las carreteras y pavimentos.

El uso del HUSIL en las mezclas asfálticas ha demostrado ofrecer ventajas significativas en términos de rendimiento y sostenibilidad, porque permite el aprovechamiento de materiales reciclados, como el hule proveniente de neumáticos desechados y mejora las propiedades del asfalto convencional.

El HUSIL empleado en este estudio fue (suministrado por el Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana), el cual espuma el asfalto haciendo que la viscosidad se reduzca e incrementando sus propiedades adherentes aptas para la mezcla con el agregado pétreo.

El grupo de investigación Topovial ha vinculado a los estudiantes Arzayus y Carrillo (2016) del Proyecto Curricular para optar al título de ingeniero topográfico con el propósito de llevar a cabo el trabajo de grado que evalúe la resistencia bajo carga monotónica de mezclas tibias utilizando HUSIL como aditivo, empleando la granulometría de las mezclas tipo MDC-10, MDC-19 y MDC-25 según la normativa del INVIAS 2013. Además, este grupo de investigación ha realizado estudios documentados en el artículo "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente con un residuo de polietileno de baja densidad" (Rondón, Hugo; Fernández, Wilmar; Castro, William, 2007).

2.1.8 Caracterización del cemento asfáltico

A continuación, se describirán los ensayos (según la norma INVIAS) de caracterización que se realizaron en el cemento asfáltico empleados para la fabricación de las briquetas.

2.1.8.1 Ductilidad de materiales asfálticos (INV.E – 702)

Su objetivo fue determinar la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida. Este ensayo consistió en someter una probeta del material bituminoso a un ensayo de tracción, bajo circunstancias normales de velocidad y temperatura, en un baño de agua. La

ductilidad se determinó midiendo la longitud máxima en cm que se estira la probeta cuando se produce la rotura. Este ensayo es importante porque permitió medir las propiedades a tensión de los materiales asfálticos utilizados para determinar si el producto que se usa cumple con las especificaciones exigidas. (Instituto Nacional de Vías, 2022).

2.1.8.2 Penetración de los materiales bituminosos (INV.E – 706)

El propósito es determinar la consistencia del material asfáltico sólidos o semisólidos en el cual, el único componente es el asfalto. Este método consistió en derretir una muestra del material y se procedió a enfriar de manera controlada. Después se empleó un penetrómetro con una aguja y se procedió a penetrar la muestra bajo unas condiciones especificadas. Este ensayo además permitió medir la consistencia de la muestra a la temperatura de ensayo. Cuando hay altos valores de penetración quiere decir que la consistencia es más blanda (Instituto Nacional de Vías, 2022).

2.1.8.3 Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro) (INV.E – 707)

La finalidad fue determinar la densidad y la densidad relativa de los materiales bituminosos empleando un picnómetro. Se utilizó un picnómetro y se puso la muestra en dicho picnómetro. El volumen remanente fue llenado con agua para después llevarlo a una temperatura de ensayo y determinar su masa. La densidad de la muestra se estableció a partir de la masa del material y de la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno. Este ensayo fue importante porque los valores de la densidad fueron usados para realizar conversiones de unidades de volumen a masa y para hacer correcciones en las medidas de volumen. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.8.4 Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INV.E – 709)

Tuvo como finalidad determinar los puntos de inflamación, de combustión de la mezcla asfáltica se empleó una copa de Cleveland. La copa se llenó con el material, aumentando la temperatura

primero rápido y luego a una rata constante a medida que este se aproximó al punto de inflamación. Para determinar el punto de combustión, se continuó con la aplicación de la llama hasta que se hizo arder con una llama sostenida, por lo menos durante 5 segundos. Este ensayo fue muy importante toda vez que el punto de inflamación dio una medida de la posibilidad de presencia de sustancias altamente volátiles e inflamables en un producto que no es relativamente volátil o inflamable. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.8.5 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (INV.E – 712)

Este ensayo permitió determinar el punto de ablandamiento de mezclas asfálticas utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada. Se utilizó dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de latón, se procedió a calentar en un baño líquido, mientras cada disco soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento es el valor medio de las temperaturas cuando los dos discos se ablandan lo suficiente. Es importante considerar el punto de ablandamiento porque la mayoría de los productos bituminosos son materiales viscoelásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura en especial, sino que se muestran gradualmente más blandos y menos viscosos a medida que la temperatura aumenta. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.8.6 Solubilidad de los materiales asfálticos (INV.E – 713)

Este ensayo buscó determinar el grado de solubilidad en tricloroetileno de materiales asfálticos. El procedimiento consistió en disolver la muestra en tricloroetileno y se pasó por medio de una almohadilla de fibra de vidrio. El material insoluble fue lavado, secado y pesado. Este método es importante porque permitió medir la solubilidad del asfalto en tricloroetileno. La parte que es soluble mostró los constituyentes cementantes activos del asfalto. (Instituto Nacional de Vías, 2022).

2.1.8.7 Índice de penetración de los cementos asfálticos (INV.E – 724)

Su objetivo determinar el índice de penetración del asfalto, primero se determinaron los valores de la penetración a 25°C y el punto de ablandamiento con anillo y bola para proporcionar un

criterio de medida de la susceptibilidad térmica de los materiales asfálticos. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9 Ensayos de caracterización para el agregado pétreo y ACR

Se llevó a cabo ensayos de caracterización tanto para el material natural como para el ARC, considerando que el objetivo fue reemplazar el 21% de los agregados gruesos naturales con Agregado de Concreto Reciclado. A continuación, son enumerados los ensayos de caracterización (de acuerdo con la norma INVIAS) que se realizaron para los materiales empleados en la fabricación de las briquetas.

2.1.9.1 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado (INV. E-122)

Su objetivo es establecer a nivel del laboratorio el porcentaje de agua (humedad), por masa, suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. Este ensayo fue importante porque el porcentaje de agua es una de las variables más significativas de algunos materiales y se utiliza para establecer correlaciones con el comportamiento de los suelos. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.2 Determinación del Límite Líquido de los Suelos (INV. E-125)

Su finalidad fue determinar el límite líquido del material, para esto se desarrollan dos métodos para preparar la muestra, el primero por vía húmeda y el segundo método por vía seca. Para realizar este ensayo se analizó la muestra de suelo para eliminar cualquier porción de material retenido en el tamiz No 40. Para determinar el límite líquido se hicieron varios intentos, en el cual una parte del material se esparce sobre una cazuela de bronce dividida en dos partes por un ranurador, permitiendo que los dos lados divididos con material fluyan como producto de los golpes recibidos por la caída continua de la cazuela sobre una base normalizada.

Su relevancia fue significativa, porque el límite líquido permitió determinar la clasificación del suelo y contribuye a la caracterización de una porción de suelo fino. El límite líquido, junto al límite plástico y el índice de plasticidad, pudo utilizarse en conjunto con otras propiedades del material para instaurar correlaciones en aspectos puramente ingenieriles, como la compactibilidad y la

permeabilidad, los procesos de contracción y crecimiento entre otros. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.3 Limite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos (INV. E-126)

Su objetivo fue determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los materiales, este método solo se pudo realizar con una parte de material que pasa el tamiz No 40. Este ensayo se realizó presionando de forma continua una pequeña parte del suelo húmedo, formando rollos de 3.2 mm (1/8") de diámetro hasta que el contenido de agua se reduce a un estado en el cual se genera el agrietamiento y/o desmembramiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja cuando se forman los rollos sin que estos se agrieten o desmoronen.

Este método es muy importante porque al igual que en la determinación del índice líquido el límite plástico se utilizó para determinar la clasificación de suelos finos y contribuye a la determinación de estos. Este límite junto con el límite líquido y el índice de plasticidad se usan en otra medida para analizar la permeabilidad, compresibilidad, resistencia al corte, procesos de expansión y contracción entre otras. (Instituto Nacional de Vías, 2022).

2.1.9.4 Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos (INV. E-133)

Su finalidad fue establecer bajo condiciones normalizadas, los porcentajes relativos de polvo y muestras de apariencia arcillosa que se encuentren en los agregados finos de tamaño inferior a 4,75 mm. La prueba fue realizada utilizando un volumen normalizado de material o agregado fino junto con una pequeña cantidad de solución floculante se puso en un cilindro de plástico graduado y se agitó con el fin de que las partículas de arena pierdan cobertura de material arcilloso o parecido. Después el material ensayado es irrigado, usando una cantidad específica de floculante, para forzar a que el material arcilloso quede en suspensión sobre la arena. Posteriormente de un tiempo de sedimentación se procedió a establecer las alturas del material arcilloso y fino floculado y de la arena en el cilindro. El equivalente de arenas fue la relación de alturas entre la arena y la arcilla la cual se expresa en porcentaje.

La importancia de este ensayo fue especificar el valor mínimo del equivalente a arena, con el objeto de limitar la cantidad de finos perjudiciales en un agregado. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.5 Resistencia a la Degradación de los Agregados de Tamaños Menores de 37.5 mm (1 ½") por Medio de la Maquina de los Ángeles (INV. E-218)

Su finalidad fue medir la resistencia a la degradación de los materiales gruesos de tamaño menor a 37.5 mm mediante la máquina de los Ángeles. El método se realizó por medio de una combinación de acciones que incluye abrasión, impacto y molienda en un tambor rotatorio que contiene un número específico de esferas metálicas, a medida que gira el tambor una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas arrastrándolas hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, generando así un efecto de impacto y trituración. Posteriormente se retiró el contenido del tambor y se tamizó la porción del material para medir la degradación en forma de un porcentaje de pérdida de agregados. Este ensayo es muy importante porque se pudo determinar el porcentaje de pérdida del material por degradación. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.6 Resistencia a la Degradación de los Agregados gruesos de Tamaños mayores de 19 mm (3/4") por abrasión e impacto de la Maquina de los Ángeles (INV. E-219)

Su objetivo es determinar la resistencia a la degradación de agregados gruesos mayores de 19 mm, por medio de la máquina de los ángeles. La técnica se realizó por medio de combinaciones de labores que incluye abrasión, impacto y molienda en un tambor rotatorio que contiene 12 de esferas metálicas. Básicamente en el mismo procedimiento y análisis del ensayo descrito en el numeral anterior. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.7 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato sodio o de magnesio (INV.E – 220)

Su meta fue establecer la resistencia del material cuando deban aguantar la intemperie en concretos y otras aplicaciones. Este ensayo se realizó sumergiendo el material en repetidas

ocasiones en soluciones saturadas de sulfato de sodio, después se seca en un horno. La fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal después que la inmersión de la muestra, este procedimiento simuló la expansión del agua por congelamiento. El procedimiento fué importante porque muestra una valoración preliminar de la solidez de los agregados a utilizar en la elaboración de concretos y para otros propósitos. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.8 Densidad, relativa (gravedad específica) y absorción del grado fino (INV.E – 222)

Este procedimiento determinó la densidad promedio de una cantidad agregados finos, la densidad relativa y la absorción del agregado fino. Primero se sumergió en agua la muestra durante un tiempo de 24 ± 4 h para ir llenando sus poros permeables. Después se retiró del agua y las partículas del agregado se secó superficialmente y se estableció su masa. Luego se determinó su volumen. Finalmente, la muestra se secó en el horno y se estableció su masa seca. Usando los valores de las masas ya determinadas y utilizando una serie de fórmulas, se calculó la densidad, a densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.

Este procedimiento fue muy importante toda vez que determinó que la gravedad específica fue la variable generalmente utilizada para calcular el volumen que ocupa el agregado en mezclas como las de concreto hidráulico y concreto asfáltico. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.9 Densidad, relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso (INV.E – 223)

Este método determinó densidad promedio de una cantidad de agregados gruesos, la densidad relativa y la absorción del agregado grueso. Primero al sumergir en agua la muestra durante un tiempo de 24 ± 4 h y proceder a llenar sus poros permeables, se retira luego el agua y las partículas del agregado se secan superficialmente para establecer su masa. Luego se determinó su volumen. Finalmente, la muestra se secó en el horno y se estableció su masa seca. Usando los valores de las masas ya determinadas y utilizando una serie de fórmulas, se calculó la densidad, a densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado. Como se pudo analizar el método fue exactamente el mismo del numeral anterior, lo que conlleva a que se diferencien solo en el tipo de material a utilizar. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.10 Determinación del valor del 10% de finos (INV.E – 224)

Su objetivo fue determinar la resistencia mecánica de un agregado grueso por aplastamiento cuando la muestra se sometió a un esfuerzo de compresión estableciendo la fuerza requerida para que el agregado produzca un 10% de finos. Este ensayo realiza una compactación en un cilindro mecánico una muestra de agregado grueso, aplicándole golpes con una varilla, el procedimiento se hizo con varias cargas a compresión, con la finalidad de saber cuál es la carga en la que se produce un 10% de finos. Este ensayo fue muy importante porque contribuye a evaluar la conducta de un agregado pétreo al ser sometido a degradación mecánica. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.11 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV.E – 227)

Su meta fue establecer el porcentaje en masa y por conteo del agregado grueso que tienen un número determinado de caras fracturadas. Este método fue importante porque permite maximizar la resistencia al corte, aumentando la fricción entre las partículas del agregado. Otro propósito de este ensayo fue dar una estabilidad a los agregados utilizados en tratamientos superficiales y obtener mayor fricción a los agregados utilizados en la construcción de capas de rodadura. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.12 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INV.E – 230)

Su objetivo fue determinar los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados que se van a emplear. Este ensayo se realizó dividiendo la muestra en porciones. Para el índice de aplanamiento las porciones utilizan tamices de barras paralelas. Las partículas que atraviesen el tamiz se consideran planas, para el índice de alargamiento cada porción se analizó empleando un calibrado de longitudes, el cual tiene barras verticales. Se consideró que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas. Este ensayo fue muy importante porque se detectó la forma de las partículas, las partículas de forma defectuosa suelen generar algún inconveniente en la construcción de carreras. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.13 Valor de azul de metileno en agregados finos (INV.E – 235)

El ensayo determinó el valor de azul de metileno de la fracción fina que pasa el tamiz No 4. Este ensayo fue realizado añadiendo dosis menores de una solución de azul de metileno a una muestra en agua. Posteriormente se analizó la absorción de solución colorante por parte del material, por medio de una prueba de coloración para detectar la presencia de colorante libre. Este ensayo fue importante porque con él, se pudo estimar la cantidad de arcilla perjudicial en la muestra. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.14 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro - Deval (INV.E – 238)

El ensayo tuvo como fin evaluar la resistencia a la abrasión de un agregado grueso por medio del aparato Micro-Deval. Se realizó una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. La muestra se puso en un recipiente de acero de 20 cm de diámetro, con 2 litros de agua y una carga abrasiva. Este se rota a 100 rpm por 2 horas. Después se lavó la muestra y se secó en el horno. Finalmente, la pérdida fue la cantidad de muestra que pasa el tamiz No 16. El aparato Micro-Deval fue muy importante toda vez que tiene como función determinar la pérdida por abrasión de agregado grueso cuando haya agua. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.9.15 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (INV.E – 239)

El proceso tuvo como objetivo determinar el contenido de vacíos de una muestra de agregado fino no compactada. El contenido de vacíos proporcionó un indicio de angulosidad y textura superficial del material. Este ensayo fue importante porque provee el contenido porcentual de vacíos bajo condiciones estándar, los que van relacionados según la forma de las partículas y la textura del material. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.10 Ensayos de laboratorio

Se ejecutaron 4 ensayos con la finalidad de examinar y comprender las propiedades y el comportamiento mecánico de las cuatro formulaciones de mezclas. Por esta razón y mediante la

realización de ensayos, se buscó obtener una comprensión profunda, rigurosa del desempeño y las características de las diferentes mezclas propuestas; ello, permitió optimizar su uso en futuras aplicaciones y proyectos. Además, los resultados obtenidos fueron comparados y analizados para evaluar aspectos favorables y desfavorables de cada diseño, así como para identificar posibles áreas de mejora y optimización.

Enseguida, se realiza la descripción detallada de cada prueba realizada.

2.1.10.1 Ensayo Marshall (INV. E-748).

En él se buscó en primera medida determinar el contenido óptimo de asfalto, mediante un análisis gráfico de las variables de los efectos resultantes de esta prueba. Así mismo, se buscó evaluar la resistencia a la deformación plástica del espécimen de las mezclas asfálticas. Estos especímenes con una forma cilíndrica y de 102 mm de diámetro son sometidos a una carga monotónica con el equipo Marshall. Es preciso indicar que el proceso relacionado en este informe se puede utilizar solo a mezclas fabricadas con cemento asfáltico y agregados naturales que no superen un tamaño máximo o igual a 25,4 mm (1"). (Instituto Nacional de Vías, 2022)

El ensayo Marshall en mezclas asfálticas es de vital importancia, porque permitió determinar aspectos cruciales como la estabilidad, el flujo, la densidad y el contenido de vacíos. Estos análisis fueron esenciales para la realización de mezclas asfálticas de alta calidad y en la evaluación de la eficacia de la compactación en campo.

En el marco de esta investigación, se realizó el ensayo Marshall de las cuatro mezclas asfálticas propuestas. Es importante mencionar que, para la mezcla convencional MDC-19, se realizó un análisis adicional con la finalidad de evaluar el contenido óptimo de asfalto. Dicha información se empleó para optimizar las otras tres mezclas a estudiar.

A través del ensayo Marshall, se buscó obtener datos valiosos sobre el rendimiento de las distintas mezclas asfálticas, lo que permitió ajustar sus propiedades para garantizar un desempeño adecuado en aplicaciones prácticas. Además, los efectos resultantes sirvieron para identificar las particularidades específicas de cada mezcla y establecer comparaciones entre ellas, lo cual facilitará la elección de la mejor opción para diferentes situaciones y necesidades.

2.1.10.2 Ensayo de tracción indirecta (INV. E-725)

Definió un procedimiento orientado a evaluar muestras de concreto asfáltico con la finalidad de determinar el impacto del agua en su resistencia a la tracción indirecta. Este método permitió evaluar el daño causado por humedad en mezclas asfálticas, elaboradas tanto con aditivos mejoradores de adherencia como sin ellos.

Para llevar a cabo este ensayo, se dividió las muestras en dos grupos. El primero se mantuvo en condiciones secas, mientras que el segundo se sometió a una saturación parcial con agua. De esta manera, se pudo comparar el comportamiento de ambos conjuntos de especímenes y se analizó el influjo del agua en la resistencia a la tracción indirecta del material; la cual se estableció por la prueba de tracción indirecta. El porcentaje daño por humedad se determinó por el vínculo entre el subgrupo húmedo y el subgrupo con los especímenes secos. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.10.3 Ensayo módulo resiliente obtenido bajo carga cíclica (INV. E-749)

Este ensayo se llevó a cabo utilizando briquetas elaboradas en laboratorio o recuperadas de mezclas asfálticas de pavimentos existentes. El objetivo principal fue evaluar los parámetros del módulo resiliente, utilizando una prueba de tensión indirecta con carga cíclica.

El proceso consistió en aplicar cargas de compresión mediante ondas de forma de semiseno inverso. Estas cargas se aplicaron de manera vertical y se evaluaron deformaciones recuperables horizontales y verticales obtenidas. Tomando como partida estas mediciones, se determinaron los valores de la relación de Poisson resiliente.

Este ensayo reviste gran importancia, porque permitió medir la calidad relativa de los materiales utilizados, lo mismo que obtener datos clave de diseño y evaluación de estructuras de pavimentos. Además, puede emplearse para analizar efectos de la temperatura y la carga sobre el módulo resiliente, proporcionando información valiosa para optimizar la funcionalidad de las mezclas asfálticas en diversas condiciones. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.1.10.4 Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste (INV. E – 760).

Su finalidad fue encontrar el valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas, donde se utilizó la máquina de los Ángeles. En la prueba se empleó mezclas usadas en laboratorio y para

su control en obra. Inicialmente, se fabricó una briqueta tipo Marshall compactada con 75 golpes por cara, introduciéndose en la briqueta en la máquina de los Ángeles a una temperatura determinada. Posteriormente se le dio vueltas y se sacó la briqueta, que durante el ensayo por desgaste fue perdiendo parte de los agregados ubicados en su superficie, después se pesó la muestra y como resultado se obtuvo un valor de la pérdida por desgaste, expresada en tanto por ciento de la masa inicial.

Este ensayo fue muy importante, toda vez que las capas de rodadura son mezclas tienen un contenido alto de vacíos con aire, permitiendo la filtración rápida del agua lluvia a las zonas laterales ubicadas afuera de la vía. Las investigaciones dan como resultado que la falla se da por disgregación, por la falta de cohesión de la mezcla asfáltica para poder resistir la acción abrasiva del tránsito. Es por ello, que se desarrolló el presente ensayo para evaluar la resistencia de la mezcla ante este tipo de deterioro. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.2 Marco Contextual

Esta investigación es efectuada en Bogotá, por los estudiantes de la Maestría en Infraestructura Vial de la Universidad Santo Tomás, como modalidad para optar al título de Magíster en Infraestructura Vial.

Para evaluar la resistencia bajo carga monotónica y cíclica, el daño por humedad, y al desgaste por abrasión de una mezcla asfáltica tibia al ser sustituido la fracción gruesa del agregado natural al 21% y con tamiz de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ y ser reemplazado por ACR, se usaron 81 briquetas. A estas muestras se les realizaron pruebas para poder caracterizar los materiales que conforman la mezcla convencional y la modificada; además, teniendo presente las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 INVIAS. Los ensayos fueron realizados siguiendo las normas:

- ✓ Ensayos Marshall: INV E-748-13
- ✓ Ensayos de tracción indirecta: INV E-725-13
- ✓ Ensayos de módulo resiliente: INV E-749-13
- ✓ Ensayos de desgaste Cántabro: INV E-760-13

2.3 Marco Legal

En este contexto, se procedió a describir las especificaciones técnicas, normas, leyes y/o decretos que se analizó en este documento, los cuales indican el manejo, la regulación y los procedimientos relacionados con los residuos de construcción. Por consiguiente, es esencial conocer la normativa, porque esto permitió establecer la base legal que justificó la meta del presente estudio investigativo.

2.3.1 Resolución Número 0472 de 2017

Esta resolución se expidió por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y tuvo como objetivo establecer las disposiciones para la gestión integral de los Residuos de Construcción y pudo aplicar tanto para las personas naturales como para las personas jurídicas que generen, transporten o dispongan de los Residuos de Construcción generadas en las obras civiles. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)

2.3.2 Resolución Número 1257 de 2021

Esta resolución se expidió por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y modificó la Resolución Número 0472 de 2017, de esta actualización se destaca lo siguiente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)

- ✓ Actualizó definiciones de “Almacenamiento”, “Gran Generador de RCD”, “Simbiosis Industrial”, y “Receptor”.
- ✓ Modificó las condiciones para el aprovechamiento de RCD, el cual posibilitó su desarrollo en plantas fijas o móviles o a través de un receptor.
- ✓ Consagró límites mínimos para el manejo ambiental en los lugares definitivos para la ubicación residuos de Construcción, p.3
- ✓ Reguló el programa de manejo ambiental de residuos de Construcción y Demolición y las obligaciones de los generadores de estos, p. 4.
- ✓ Dispuso las metas de aprovechamiento de los Residuos de Construcción y Demolición, p. 4

2.3.3 Resolución Número 1115 de 2012

Esta resolución fue realizada por la secretaria Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá la cual tuvo como primicia adoptar las pautas técnicas ambientales para el aprovechamiento en el capital de los Residuos de Construcción y demolición. (Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldía Mayor de Bogota, 2012)

2.3.4 Resolución Número 715 de 2013

Esta resolución se expidió por parte de la secretaria Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá y modifica la Resolución Número 1175 de 2012, en el sentido de establecer como RCD no susceptibles de aprovechamiento los siguientes: (Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldia Mayor de Bogotá, 2013, artículo 1, p. 1)

- ✓ Materiales aprovechables contaminados con residuos peligrosos.
- ✓ Materiales que por su estado no pueden aprovecharse.
- ✓ Residuos peligrosos: Estos tipos de residuo primero deben ser identificados y manejados de acuerdo con los protocolos establecidos para cada caso.
- ✓ Otros residuos con normas específicas como el Amianto, Asbesto Cemento, Electrónicos, Biosanitarios, entre otros.

2.3.5 Decreto Número 586 de 2015

Fué expidió por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá y tuvo como objetivo principal adoptar “el modelo eficiente y sostenible de gestión de los escombros en la ciudad de Bogotá – RCD”, p. 1 el cual buscó reincorporar estos materiales en distintos procesos constructivos de la ciudad por medio del uso de “herramientas y su implementación a través de líneas programáticas en un corto, mediana y largo tiempo”, p. 9. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2015)

2.3.6 Resolución Número 932 de 2015

Esta resolución se expidió por parte de la Secretaria Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá y modificó la Resolución Número 1115 de 2012, estableció “las obligaciones de los grandes generadores y poseedores de los RCD” artículo 5, estas obligaciones fueron las siguientes: (Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldia Mayor de Bogotá, 2015, artículo 5)

- ✓ Registrarse ante esta Secretaría por una sola vez en la página web y reportar mensualmente en el aplicativo web de RCD de la Secretaría Distrital de Ambiente las cantidades de RCD dispuestos y/o aprovechados.
- ✓ Para el desarrollo de las obras que generen volúmenes de RCD mayores a 1.000 m³ o que su área construida supere los 5.000 m², previo a iniciar actividades, se deberá elaborar, registrar y enviar en la página WEB de la Secretaría Distrital de Ambiente, el Plan de Gestión de RCD en obra.
- ✓ El Plan de Gestión de RCD contendrá los siguientes aspectos: Datos generales de la obra, Manejo de los RCD en obra, Reporte de cantidades de material de construcción usado en la obra, Reporte de los residuos de construcción y demolición –RCD- generados en obra, Estimación de costos del manejo de RCD, Indicadores de seguimiento de gestión RCD, entre otros.

2.4 Marco Conceptual

En este marco conceptual, se abordaron conceptos fundamentales para el desarrollo del presente documento, los cuales proporcionaron una mejor comprensión de los temas a investigar.

2.4.1 WMA

Corresponde a una Mezcla Asfáltica Tibia. Se identifica por las siglas en inglés como WMA. Se define como mezcla que se caracteriza por ser realizada a través de diversas técnicas que tienen como finalidad disminuir la temperatura de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica en caliente sin que esta modifique mucho las propiedades de la mezcla resultante. (Rondón Quintana, León Vergara y Fernández Gómez, 2017)

2.4.2 Residuo de Concreto y Demolición RCD

Según la Alcaldía Mayor de Bogotá “los RCD son todos los restos sólidos que salen después de realizar una obra en casa o de las actividades de demolición, excavación, construcción y/o reparación de las obras civiles” (Alcaldia Mayor de Bogotá., 2021, p. 1.)

2.4.3 Agregados de Concreto Reciclado ACR

El agregado de concreto reciclado (ACR) es un concreto utilizado en otras épocas en las actividades civiles de demolida y que si no se reutilizara no sería más que escombros. Este material usualmente es utilizado como base o subbase para estructuras de pavimento u rehabilitación de estructuras existentes, entre otras aplicaciones. (Grupo Argos, s.f)

2.4.4 Agregados Naturales o pétreos

Son partículas minerales granulares que en gran medida, utilizadas para la base, subbase y relleno en las carreteras. Estos agregados además son combinados con material cementante para formar concretos para bases, subbases y estructuras de drenaje. (EddyHrbs, 2011).

2.4.5 Mezclas Asfálticas Modificadas

Estas resultan de la adición de un “aditivo modificador, puede ser polímero o no polímero, cuya adición puede modificar sus propiedades finales como la cohesión, susceptibilidad a la temperatura, el envejecimiento, respuesta elástica entre otros”, p.16 . (Forigua y Orjuela, 2014)

2.4.6 MCD-19

MDC-19 significa “mezcla asfáltica densa en caliente y termina en el número 19 porque el agregado granular tiene un tamaño máximo de 19 mm. Este tipo de mezcla se usa generalmente para construir capas de rodadura en vías con tráfico medio y alto” (CTU, 2019, p. 1).

3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presenta las principales investigaciones efectuadas sobre las mezclas tibias. Además, se destacan progresos realizados en la utilización del ACR (agregado reciclado de concreto). Por último, se menciona los estudios donde se utiliza el aditivo HUSIL.

3.1 Mezclas tibias

Ziari, Moniri, Imaninasab, y Nakhaei (2019) realizaron un estudio en el que sustituyeron el agregado de piedra caliza de una mezcla asfáltica tibia por escoria de cobre (CS), con el objetivo de reutilizar este material como agregado para reducir la energía y la cantidad de contaminantes liberados durante la producción del asfalto. La respuesta obtenida en las pruebas efectuadas, como la resistencia a la tracción indirecta, el módulo de elasticidad, número flujo, ensayo de pista de ruedas, indicaron que el 20% de CS en las mezclas asfálticas tibias WMA mejora el módulo de elasticidad, la estabilidad Marshall y la resistencia a la formación de surcos y grietas. Además, tiene un efecto positivo sustancial en la susceptibilidad a la humedad. A continuación, se muestran las graficas donde se evidencian estas conclusiones.

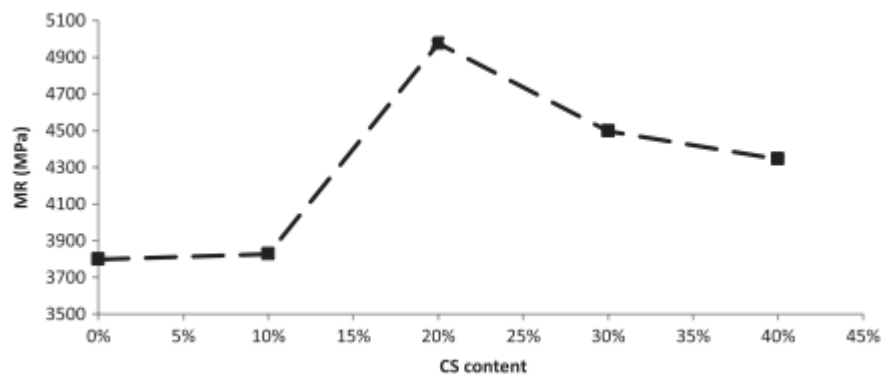


Figura 2. Resultado prueba modulo resiliente.

Fuente: Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt

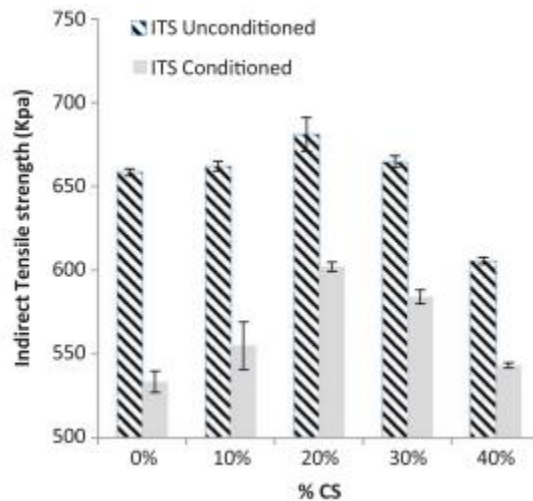


Figura 3. Valores ITS para muestras secas y acondicionadas.

Fuente: Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt

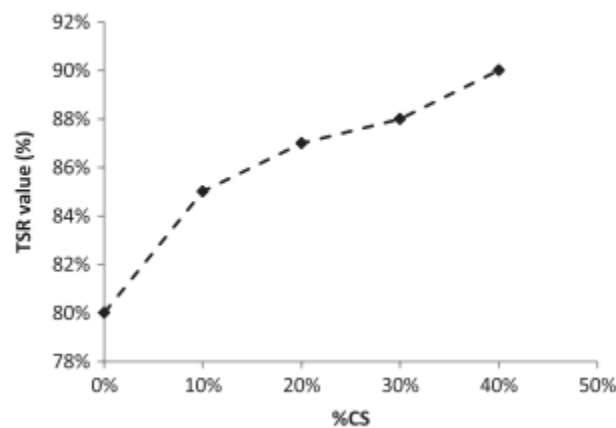


Figura 4. Relación de resistencia a la tracción de mezclas con diferente contenido de escoria de cobre.

Fuente: Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt

Asimismo, Materu, Shalaby y Ghazy (2021) realizaron una investigación con la finalidad de establecer la efectividad de aditivos químicos comunes sobre las propiedades de las mezclas asfálticas tibias WMA a través de programas de pruebas de campo y laboratorio. Se utilizaron tres porcentajes (0.3, 0.5 y 0.7% en peso del cemento asfáltico), sin cambiar fórmula de mezcla de obra (ver figura 4). Entre los diferentes porcentajes de aditivos utilizados, el 0.5% tuvo un mejor

desempeño general en comparación con el 0.3% y el 0.7% de otras mezclas asfálticas tibias. Por ejemplo, prueba de sensibilidad a la humedad del 0.5% indicó la mayor relación resistencia a la tracción; en consecuencia, el daño por humedad fue menor. De igual manera, se realizó el ensayo del módulo resiliente donde se concluyó que las mezclas tibias y la mezcla caliente fueron similares. Por lo anterior, la rigidez de las mezclas no se vio alteradas con la adición del aditivo químico. Finalmente, entre las distintas dosis usadas para las mezclas tibias, el 0,5% fue la que tuvo mejor comportamiento y mayor rigidez.

Tamaño del tamiz (mm)	Aprobado (%)				Especificación	
	HMA	0,3% AMM	0,5% AMM	0,7% AMM	Mín (%)	Máx. (%)
20.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
16.00	100.0	100.0	99,2	100.0	99	100
12.50	92,8	94,8	94,5	94,6	–	–
10.00	78,5	86,6	80,9	82.2	70	88
5.00	56,6	66,7	60,8	64,4	55	70
2.50	47.2	55.1	51.0	55.1	40	60
1.25	37,8	43,8	40,9	44,6	25	50
0,63	24.7	28.3	26.6	29.2	15	40
0.315	11.6	12.6	12.4	13.6	5	28
0,16	4.8	5.0	5.1	5.6	4	11
0,08	3.4	3.5	3.6	4.0	3	7
Contenido triturado	90%	89%	89%	91%	60% mínimo	

Figura 5. Graduación promedio de agregados de cuatro mezclas (porcentaje de aprobación).

Fuente: Effects of dosage of warm mix asphalt additive on stiffness, cracking susceptibility, and moisture sensitivity characteristics

Por otro lado, Rughooputh, Beeharri y Qasrawi (2020) Buscaron disminuir la temperatura generada por la mezcla convencional para fabricar una mezcla asfáltica tibia (WMA) mediante el uso de un aditivo, así como la incorporación de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en las mezclas. La idoneidad de un aditivo a base de cera, bajo condiciones climáticas tropicales, fue evaluada a través de pruebas de laboratorio estándar con dosificaciones variadas del aditivo a diferentes temperaturas de producción y con contenidos distintos de RAP. Los resultados experimentales mostraron que el aditivo se puede utilizar en una dosificación económica y eficiente del 2%, en masa del ligante asfáltico, para disminuir la temperatura de producción de la mezcla asfáltica de 160°C a 140°C, con un incremento costo neto del 1.6% por tonelada, mientras que la adición de RAP en la mezcla asfáltica tibia WMA en un 25% logró obtener propiedades

similares a las del asfalto utilizado comúnmente. La reducción de 20°C en la temperatura y la incorporación de RAP disminuyeron el peligro de exposición de las personas que están expuestas a humos y proporcionaron un mejor entorno de trabajo en climas tropicales.

Las posibles alternativas que los autores recomiendan para una mezcla WMA, son:

- ✓ Implementar en nuevas estructuras de pavimento para carreteras.
- ✓ Utilizar en obras de rehabilitación.

Finalmente, los autores recomiendan que no se debe utilizar la repavimentación de estructuras de pavimento ya existentes más de una vez, asimismo, se debe realizar el fresado junto con los ensayos respectivos antes de aplicar la instalación de la capa de superficie. De igual manera, se pueden usar para parches cuando la vía es de difícil acceso debido a las bajas temperaturas.

Shi, Fan, Wang, Zhao y Che (2020), analizaron el influjo de un aditivo de mezcla tibia de surfactante en el rendimiento convencional del asfalto no modificado. El efecto del aditivo sobre la microestructura del asfalto se estudió a través de un análisis espectral infrarrojo (IR). Concluyendo que el aditivo genera un pobre influjo de penetración lo mismo que en las características de viscosidad-temperatura y ductilidad del asfalto; el resultado indica que el aditivo no reduce viscosidad. Por otra parte, en el análisis espectral IR, se muestra que no existe reacción entre el asfalto y el aditivo y que solo se genera una mezcla física. Asimismo, al agregar al asfalto un aditivo surfactante se obtiene una mezcla más uniforme y compactante a temperaturas inferiores, lo que ahorra el consumo de energía.

El-Hakim, Epps, Epps Martin y Arámbula-Mercado (2021), realizaron un estudio cuya finalidad fue analizar la susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica tibia WMA utilizando tanto la caracterización en laboratorio como el rendimiento sobre el terreno en correlación con las mezclas asfálticas en caliente (HMA). Los ensayos de laboratorio incluyeron: módulo de elasticidad (MR), ensayo de tracción indirecta y ensayo de seguimiento ruedas de Hamburgo. Los hallazgos de laboratorio evidenciaron pequeñas diferencias entre la resistencia a la tracción en seco y en húmedo y el MR de mezclas HMA y WMA. La evaluación del comportamiento sobre el terreno demostró que la mezcla WMA era la que presentaba menos grietas transversales y reflejadas, mientras que la HMA se comportaba mejor en lo que respecta a las grietas transversales y longitudinales. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas en dicha investigación.

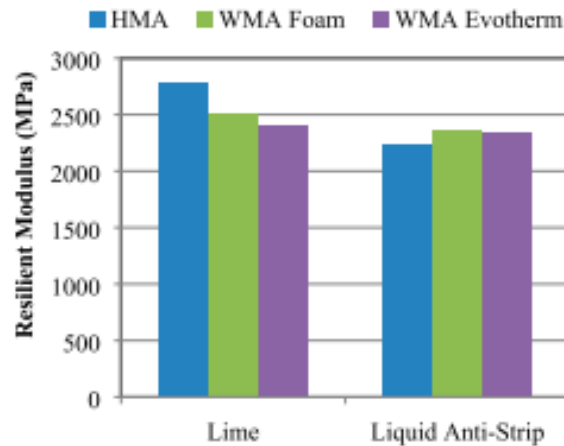


Figura 6. Comparación entre módulo resiliente (MR).

Fuente: Laboratory and field investigation of moisture susceptibility of hot and warm mix asphalts

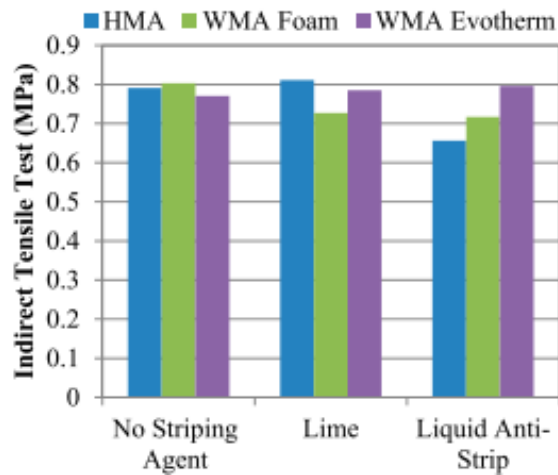


Figura 7. resistencia a la tracción indirecta en seco.

Fuente: Laboratory and field investigation of moisture susceptibility of hot and warm mix asphalts

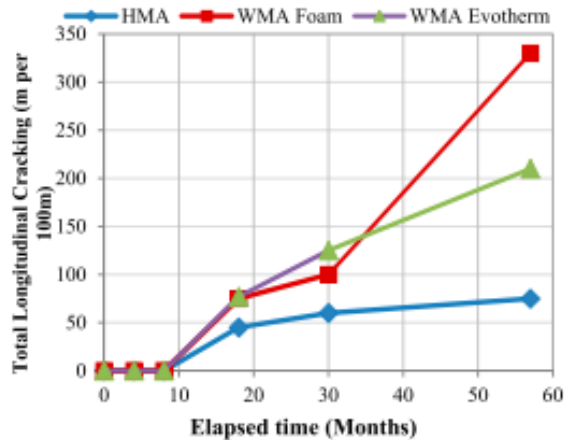


Figura 8. Grietas longitudinales HMA versus WMA.

Fuente: Laboratory and field investigation of moisture susceptibility of hot and warm mix asphalts

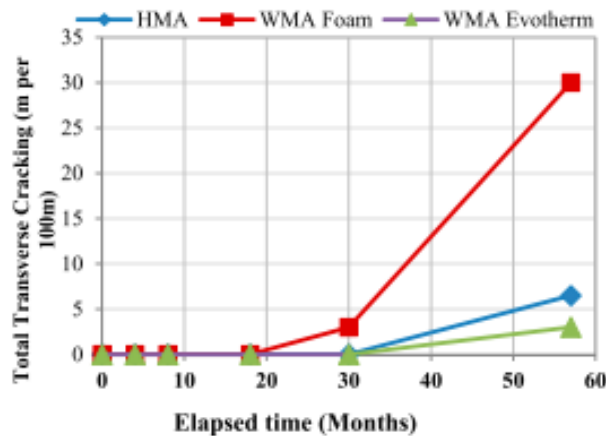


Figura 9. Grietas transversales HMA versus WMA.

Fuente: Laboratory and field investigation of moisture susceptibility of hot and warm mix asphalts

En seguida, se hace alusión a los principales estudios referentes al aditivo HUSIL.

3.2 Aditivo Husil

A continuación se describen las principales y mas relevantes estudios relacionadas con el aditivo Husil, el cual se busco implementar en la presente investigación como posible aditivo para reducir la fabricación de una mezcla densa en caliente en 25°C.

Rondon Quintana, Fernandez Gomez y Zafra Mejia (2016) realizaron una fase experimental con la finalidad de establecer una comparación entre una mezcla asfáltica tibia (MAT) con relación a una mezcla densa en caliente HMA. Las mezclas tibias se modificaron al adicionar el aditivo líquido espuma el asfalto. En la actualidad el aditivo se halla en proceso de patente. Por lo anterior, en las mezclas utilizadas se midieron la resistencia a las cargas monotónicas y dinámicas, la resistencia al daño por humedad a través de los ensayos Marshall, el módulo resiliente y la deformación permanente. Se concluyó que el aditivo reduce la temperatura de la mezcla densa en caliente en 30°C, además de contribuir a una apropiada trabajabilidad y composición volumétrica de la mezcla asfáltica tibia. Finalmente, las mezclas WMA demostraron mayor resistencia bajo carga monótona. A continuación, se muestra las gráficas que sustentan lo descrito anteriormente.

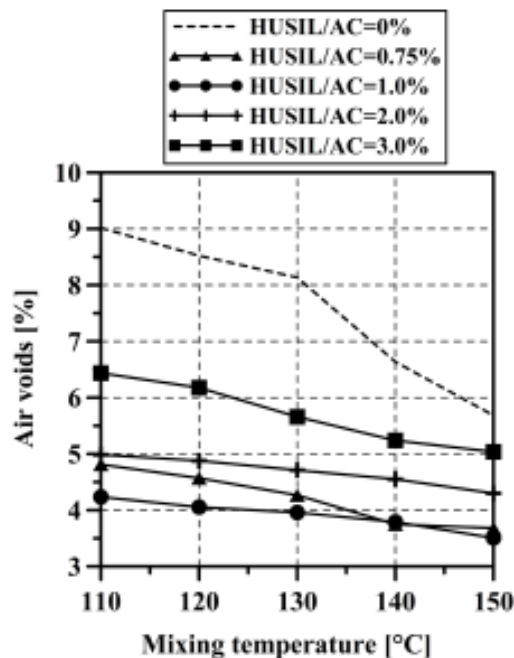


Figura 10. Evolución de vacíos de aire mezcla modificada (HUSIL/AC = 0,75%, 1%, 2%, 3%) y sin modificar (HUSIL/AC = 0%) Mezclas de HMA-19.

Fuente: Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder

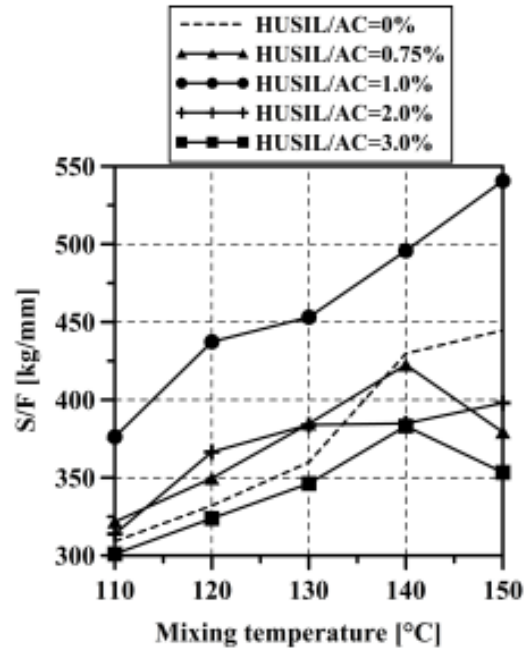


Figura 11. Evolución de la estabilidad y el flujo de mezcla modificada (HUSIL/AC = 0,75%, 1%, 2%, 3%) y mezclas de HMA-19 sin modificar (HUSIL/AC = 0%).

Fuente: Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder

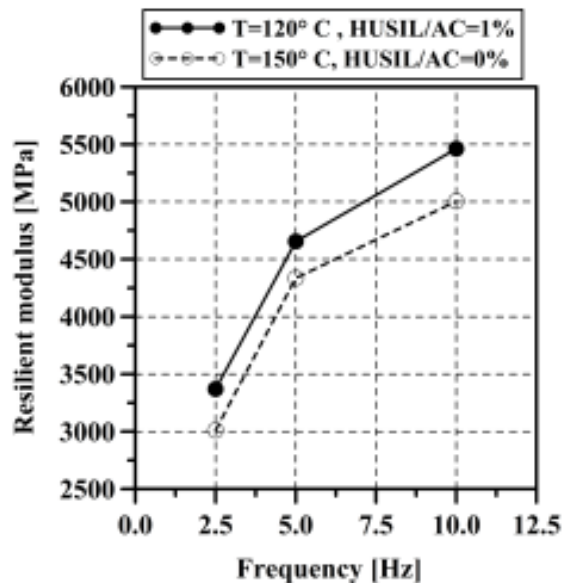


Figura 12. Evolución del módulo de resiliencia a 15° C (HMA-19 y WMA-19).

Fuente: Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder

Como complemento, un artículo de Rondón Quintana, León Vergara y Fernández Gómez (2017) evaluó y comparó la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica tibia con una mezcla asfáltica en caliente cuando son fabricadas a escala real en una planta de asfalto. Se realizaron ensayos Marshall, tracción indirecta, módulo resiliente, deformación permanente y resistencia a la fatiga. Por consiguiente, en la producción de la mezcla asfáltica tibia se utilizó un aditivo que espuma el asfalto. Por otra parte, las mezclas en caliente se fabricaron entre 150°C - 140°C y las mezclas tibias a temperatura de 120°C – 110°C. Como resultado general, se concluyó; la mezcla asfáltica tibia tiene un mejor comportamiento que la mezcla en caliente, a pesar de que la mezcla tibia fue fabricada 30°C menos. Lo anterior, se puede evidenciar con la siguiente tabla y graficas extraídas del documento de referencia.

Tabla 4. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas MDC-19 y WMA-19.

Mezcla	TM(C)	HUSIL/CA	Estabilidad	Flujo	E/F	vacíos en la Mezcla%
		%	N	mm	KN/mm	
Sin sumergir						
MDC-19	150	0	12243	3,70	3,31	3,3
WMA-19	120	1	11891	3,52	3,38	3,2
Sumergidas en agua durante 6 meses						
MDC-19	150	0	7464	4,19	1,78	3,3
WMA-19	120	1	8840	4,49	1,97	3,2

Fuente: Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto

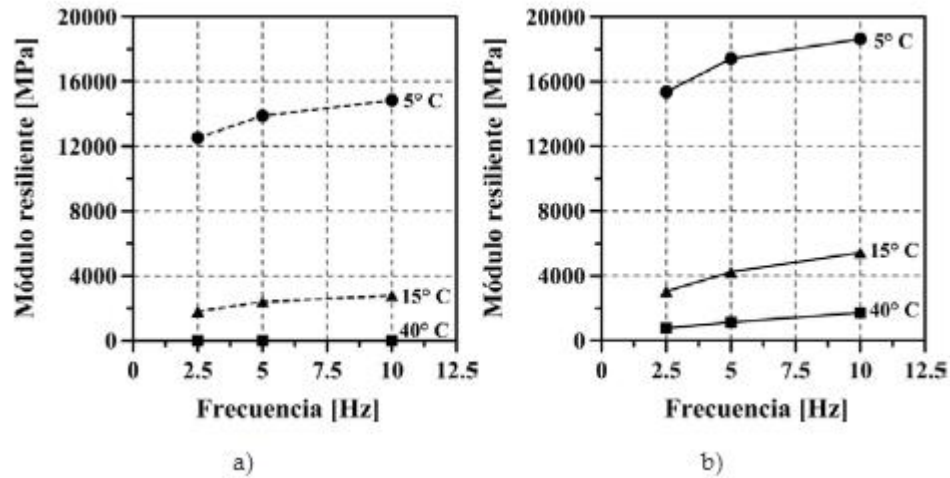


Figura 13. Módulo resiliente. a) MDC-19, b) WMA-19.

Fuente: Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto

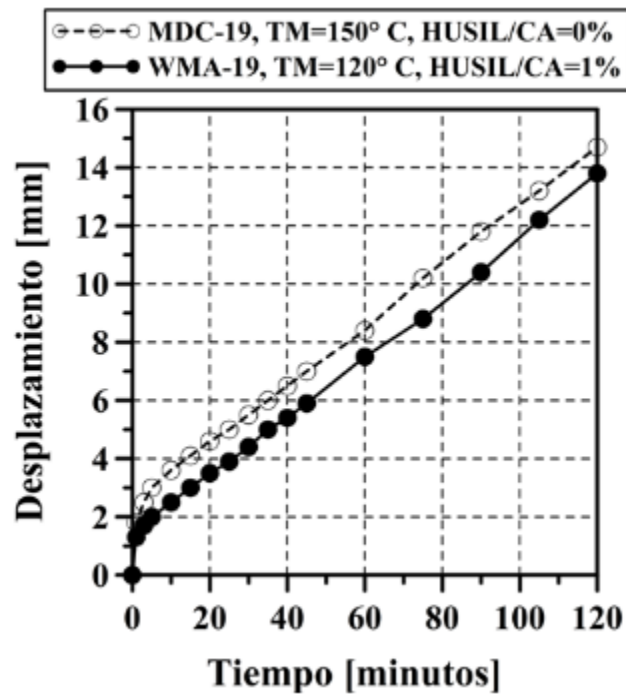


Figura 14. Deformación permanente.

Fuente: Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto

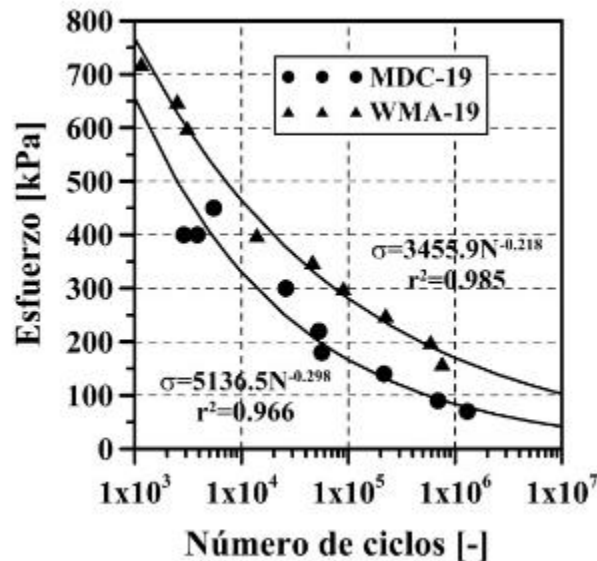


Figura 15. Resistencia a fatiga.

Fuente: Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto

Arzayus y Carrillo (2016), modificaron una mezcla asfáltica en caliente con el aditivo HUSIL y un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD), donde realizaron mediciones de resistencia bajo carga monótona y el posible impacto favorable al medio ambiente, toda vez que al agregar polímeros altera de forma adecuada las propiedades del asfalto, disminuyendo la temperatura de fabricación. Se realizaron ensayos Marshall a las mezclas con y sin el aditivo HUSIL, lo cual dio como resultado que la mezcla modificada con el aditivo tuvo un incremento en la rigidez y mayor resistencia a la deformación.

Asimismo, Rodríguez Rojas y Sánchez Morales (2016) modificaron una mezcla densa en caliente, adicionándole el aditivo denominado HUSIL, el cual no era conocido por las plantas encargadas de producir asfalto, con el objetivo de disminuir temperatura de fabricación y disminuir generación de gases y el riesgo para la salud de los trabajadores que se encontraban cerca a los gases producidos por el asfalto. Además, se reemplazaron los agregados naturales de la mezcla por escoria de alto horno, cuyo material venía de procesos de tratamiento de hierro para ser reutilizado como material granular para reducir los costos en cuanto a la adquisición del material pétreo. Por consiguiente, se analizaron la estabilidad, el flujo y las relaciones volumétricas,

evidenciando que el HUSIL como la escoria de alto horno se pueden utilizar como sustancia que disminuyen la temperatura y de costos en las mezclas asfálticas tibias.

Del mismo modo, Ruiz (2018) evaluó la resistencia bajo carga monótona, el daño por humedad y la alteración constante de una mezcla asfáltica tibia reutilizada cuando se adiciona un aditivo denominado HUSIL y del remplazo parcial el elemento natural por una escoria de alto horno. Teniendo en cuenta los hallazgos obtenidos, se estableció que el mejor resultado se da al disminuir la temperatura de la mezcla en 30°C, al usar el aditivo HUSIL y sustituye la fracción gruesa del agregado natural por escoria de alto horno en un 12,5% (reemplazo del tamiz de $\frac{3}{4}$ "). En consecuencia, la mezcla incrementa su rigidez, lo mismo que la resistencia al daño por humedad y en la resistencia a las deformaciones permanentes respecto a la mezcla convencional.

Asimismo, Rincon Villamil y Sanabria Reina (2017), compararon la resistencia bajo carga monotónica del Concreto Asfáltico (MDC-19) y el concreto asfáltico modificado (MDC-19) con el aditivo líquido HUSIL y la sustitución del llenante mineral (filler) por "CALAMINA". Se concluyó que la mayor resistencia y rigidez se obtuvo cuando se adiciona el aditivo en una proporción del 1% con relación a la masa del asfalto y se sustituye con llenante mineral por Calamina.

En seguida, se hace alusión a los principales estudios relacionados con ACR.

3.3 ACR

De igual manera Daquana, Yang, Guoqiang, Qi, Fan y Xingyi (2018), evaluaron la factibilidad de utilizar ACR en mezclas asfálticas. En esta investigación, se prepararon ACR grueso y ACR fino como reemplazo parcial de los agregados pétreos de una mezcla asfáltica. Se determinaron las características mecánicas y el desempeño de las mezclas asfálticas que contenían diferentes porciones de ACR, basándose en los ensayos de laboratorio. Los efectos determinaron que, en la proporción que aumenta nivel de ACR en la mezcla, también aumenta el contenido óptimo de asfalto y además, la densidad aparente de la mezcla disminuye. Las mezclas modificadas que contenían un 40% de ACR grueso o un 20% de ACR fino mostraron un comportamiento satisfactorio. Finalmente, la mezcla modificada que contenía un 40% de ACR fino tuvo mayor contenido de asfalto; sin embargo, arrojó un mejor desempeño en relación con la mezcla convencional, excepto por la mala resistencia en la deformación permanente.

Por otra parte, Bastidas Martínez, Rondón Quintana, Contreras Zartha, Forero Castaño y Rojas Rozo (2021), analizaron pertinencia a la implementación del ACR en una mezcla asfáltica en caliente en relación con algunas características físico-mecánicas, teniendo presente tres parámetros:” i) sustitución de la fracción gruesa, ii) fina y iii) 100% de la granulometría del agregado convencional (AC). En este sentido, se evaluó la resistencia bajo carga monotónica, la resistencia al daño por humedad y el desgaste por cántabro”, p.75. El primer parámetro aumenta la tracción indirecta de la mezcla; sin embargo, se requiere aumentar el contenido de asfalto. El segundo parámetro empleado evidenció una reducción considerable en la resistencia bajo carga monotónica, y el tercer parámetro obtuvo comportamiento satisfactorio ante cargas monotónicas. Sin embargo, se requiere aumentar el contenido óptimo de asfalto. Asimismo, el incremento ACR en la mezcla aumenta la pérdida por desgaste cántabro.

Recientemente Elmagarhe, Lu, Alharthai, Alamri y Elnihum (2022) realizaron un estudio de los efectos de dos materiales de desechos provenientes de la construcción y la industria, como el agregado de concreto reciclado (ACR) y las cenizas volantes, respectivamente, en una mezcla asfáltica. Para los ensayos, se utilizaron diferentes combinaciones de ACR como reemplazo parcial del agregado pétreo, además de distintas dosificaciones de cenizas volantes como reemplazo del relleno mineral. El objetivo fue analizar la estabilidad Marshall, la resistencia a la tracción indirecta, el daño por humedad, la pérdida por cántabro y la macrotextual. Los resultados obtenidos demostraron que la incorporación del ACR o las cenizas volantes en la mezcla de estudio tuvo un ligero efecto de reducción de los vacíos con aire, la permeabilidad y la macrotextura. Cuando se sustituye el 10% de los agregados pétreos por ACR en la mezcla, se reduce la estabilidad y la resistencia al daño por humedad. Sin embargo, al sustituir el relleno mineral por las cenizas volantes ayudó a compensar el impacto negativo que tuvo la adición del 10% de ACR, y se obtuvieron unos niveles comparables a los de la mezcla convencional.

De igual manera Xiong Xu, y otros (2022), presentaron una revisión bibliográfica sobre estudios anteriores del material ACR aplicado a pavimentos asfálticos. Posteriormente, se analizaron las principales diferencias entre los ACR y los agregados naturales en términos de características principales. Luego, se discutió la viabilidad de incorporar el ACR en mezclas asfálticas para evaluar su rendimiento en este tipo de combinaciones. Durante estas discusiones, se identificaron los siguientes hallazgos:

- ✓ Las propiedades mecánicas de los ACR no son tan eficaces como las propiedades de los agregados naturales debido a los vacíos causados por el mortero adherido, lo cual resulta en valores altos de absorción de agua.
- ✓ Los métodos para eliminar el mortero adherido son efectivos y ayudan a mejorar la calidad de los ACR.
- ✓ La durabilidad de la mezcla asfáltica con ACR depende del diseño de la mezcla y del mejoramiento del material de concreto reciclado.
- ✓ Es necesario calcular cuantitativamente los beneficios ambientales y económicos del ACR utilizado en la mezcla asfáltica para futuros estudios científicos.
- ✓ Es probable que el uso adecuado del ACR ayude a generar beneficios ambientales si se logran los rendimientos deseados del pavimento.
- ✓ Se deben considerar futuras consideraciones sobre cómo reciclar y reutilizar los ACR para mezclas asfálticas.

En conclusión, el estudio evidencia que el empleo del ACR en mezclas asfálticas es un método prometedor para sustituir el agregado natural en este tipo de mezclas. Finalmente, para la futura utilización del ACR, debe explorarse la conveniencia de utilizar algún aditivo que pueda mejorar las características de esta clase de mezcla modificada ACR.

Además, Bastidas Martinez, Reyes Lizcano y Rondon Quintana (2022), presentan evidencias de la situación actual del empleo del ACR en el uso de mezclas asfálticas, principalmente las mezclas en caliente. Se destaca en esta revisión bibliográfica que el ACR tiene un gran potencial para fabricar mezclas asfálticas, porque gran parte de los estudios revisados sobre mezclas modificadas cumplen con la mayoría de las normas establecidas en las especificaciones de construcción, especialmente para vías con reducida circulación de vehículos. Teniendo presente la literatura revisada, se pudo establecer estas conclusiones:

Las propiedades de los ACR deseables en estos materiales para que puedan ser usados como agregado natural en la elaboración de una mezcla asfáltica son:

- La forma y geometría de sus partículas, que permiten un esqueleto granular compacto.
- Las partículas de los ACR no presentan material orgánico, lo que permite una mejor unión entre el agregado y el material ligante asfáltico.

- Los ACR presentan buena compatibilidad con el ligante asfáltico. Por otra parte, sus principales limitaciones están ligadas a una menor dureza y resistencia a la fractura en relación con los agregados naturales.

En la mayoría de los estudios, los ACR cumplen con la normatividad para un nivel de tránsito bajo.

En la gran mayoría de estudios se concluye que es mejor reemplazar solo la parte gruesa del agregado natural por ACR, no obstante, otros estudios reportan que la mejor opción es reemplazar la fracción fina.

Por otra parte, Bastidas, Reyes y Rondón (2022), presentaron investigación sobre el nivel de conocimiento existente sobre el empleo de agregados de concreto reciclado (ACR) en la elaboración de mezclas asfálticas, especialmente de mezclas asfálticas en caliente (HMA). Se analizaron aspectos ambientales, beneficios y restricciones en el empleo del ACR como sustituto del agregado natural (NA) en mezclas asfálticas. Sin embargo, no se pudo establecer un lineamiento de comportamiento porque las características del ACR son muy heterogéneas. Por otra parte, se destaca en la literatura que los ACR tienen un amplio potencial para su utilización en la producción de mezclas asfálticas, debido a que un gran nivel de investigaciones evidencia que estos materiales dan cumplimiento a la normatividad establecida en lo referente a la calidad de construcción principalmente de vías con reducido volumen de tránsito.

Finalmente, Ortega Cuan y Paternina Medina (2012) describen algunos métodos para la producción de mezclas asfálticas tibias, estos métodos son:

- ✓ Fabricación de mezclas asfálticas tibias mediante la utilización de aditivos

Este método implementa el uso de un aditivo, el cual se puede aplicar en la planta de mezclado o directamente al ligante. Este método es económico, toda vez que no se requiere de grandes inversiones en la planta asfáltica.

- ✓ Sistema a base de espuma por medio de Zeolitas

En este método la mezcla bituminosa se espuma aumentando su volumen y a una temperatura a 130°C se añade la zeolita y el agua es añadida en forma de vapor, el principal beneficio es que mejora el impacto generado por las altas temperaturas, toda vez que este método de fabricación de la mezcla asfáltica es producido a 130°C.

✓ Sistema a base de espuma – Planta de doble tambor

Uno de los efectos generados por este método en la fabricación de mezclas asfálticas tibias es que reduce la temperatura de producción de la mezcla entre 10°C a 30°C, lo que implica desventajas con relación a otros métodos, toda vez que la reducción de la temperatura no sería considerable si se compara con otros métodos.

✓ Sistema de doble envuelta – Shell WAM foam

Este método se implementó en el año 1997, y permite la disminución de fabricación de la temperatura de la mezcla hasta de 60°C, permitiendo ser una mezcla más amigable con el medio ambiente, además de que esta mezcla tiene un comportamiento similar a la de una mezcla asfáltica en caliente.

✓ Sistema basado en emulsión

La principal ventaja de este método es que la mezcla asfáltica se reduce a temperatura de producción entre 50°C a 75°C, permitiendo tener una considerable reducción de fabricación en la temperatura de la mezcla.

4. METODOLOGÍA

En seguida, se describen las secciones que deben cumplirse para ejecutar el presente estudio, sin antes mencionar que la investigación realizada tiene un enfoque experimental, puesto que se realizaron ensayos de laboratorio a las mezclas utilizadas en la investigación, asimismo se realizaron ensayos de caracterización de los materiales utilizados. (agregados naturales, ACR, cemento asfáltico) y las mezclas asfálticas.

4.1 Revisión bibliográfica

En el proceso de desarrollo de proyecto se efectuó la revisión bibliográfica a fin de tener una mayor claridad en la temática a investigar.

4.2 Materiales

Se utilizó el cemento asfáltico CA 60-70 producido en Barrancabermeja por ECOPETROL. Esta elección se basó en su amplia disponibilidad y uso generalizado en el país para la elaboración de mezclas de concreto asfáltico. Por su parte, el agregado pétreo utilizado fue suministrado por la planta de asfaltos CONCRESCOL S.A, el ACR proviene de la planta de Reciclados Industriales de Colombia y el aditivo HUSIL, fue proporcionado por el Ingeniero Hugo Alexander Rondón Quintana.

El agregado pétreo provino de la planta de asfaltos CONCRESCOL S.A, (véase la Figura 16).



Figura 16. Agregado Pétreo Tamizado de CONCRESCOL S.A.

Fuente: Los autores

ACR proviene de la planta de Reciclados Industriales de Colombia (véase, Figura 17).



Figura 17. Agregado Pétreo Tamizado de CONCRESCOL S.A.

Fuente: Los autores

El aditivo HUSIL fue proporcionado por el Ing. Hugo Alexander Rondón Quintana. Dicho aditivo se comporta como una zeolita sintética, el cual es un material inorgánico que no es inflamable y de acuerdo con "Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals", es considerado como un material amigable con el medio ambiente puesto que no es un material contaminante. Tiene valores de pH entre 10 y 12, no es cancerígeno o teratogénico. (Rondón Quintana y Gómez, 2017),



Figura 18. Asfalto espumado producto de mezclarlo con el aditivo a 80°C durante un minuto.

Fuente: Tesis ingeniero Jairo Fernando Ruiz

4.3 Caracterización de los materiales

En esta etapa se caracterizó los materiales (agregado pétreo, ACR, y cemento asfáltico CA 60-70, con y sin el aditivo HUSIL) utilizados en las mezclas asfálticas que son objeto de análisis y teniendo presente las pautas enunciadas por el INVIAS (2022) en su artículo 400-13.

4.3.1 Ensayos Caracterización cemento asfáltico

Véase la Tabla 5, donde se indican los ensayos de acuerdo con la norma INVIAS de caracterización que se realizaron al cemento asfáltico empleados en este presente estudio. Los ensayos fueron descritos en el capítulo 2.1.8, Ensayos de caracterización cemento asfáltico.

Tabla 5. Ensayos de Caracterización del Cemento Asfáltico según la Normatividad INVIAS (2022).

ENSAYO	OBJETO
INV.E – 702	Determinar la ductilidad de los materiales asfálticos
INV.E – 706	Determinar la penetración de los materiales bituminosos
INV.E – 707	Determinar la densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro)
INV.E – 709	Determinar los puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland
INV.E – 712	Determinar el punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)
INV.E – 713	Determinar la solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno
INV.E – 724	Determinar el índice de penetración de los cementos asfálticos

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras normatividad INVIAS (2022)

4.3.2 Ensayos Caracterización Agregado natural y ACR

En la tabla 6 se presenta los ensayos caracterización que se realizaron a los agregados naturales y el ACR empleado en el presente estudio. Los ensayos fueron descritos en el capítulo 2.1.9, Ensayos de caracterización agregado natural y ACR.

Tabla 6. Ensayos de Caracterización de materiales según la Normatividad INVIAS.

ENSAYO	OBJETO
INV.E – 122	Determinación del contenido de humedad
INV.E – 125	Determinación del límite líquido de los suelos
INV.E – 126	Determinación límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
INV.E – 133	Equivalente de arena de suelos y agregados finos
INV.E – 218	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños <37,5mm (1 1/2") y >19 mm (3/4") por medio de la máquina de los ángeles
INV.E – 219	
INV.E – 220	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio
INV.E – 222	Gravedad específica y absorción de agregado fino
INV.E – 223	Gravedad específica y absorción de agregados gruesos
INV.E – 224	Determinación del valor de 10% finos
INV.E – 227	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso
INV.E – 230	Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras
INV.E – 235	Valor del azul de metileno en agregados finos
INV.E – 238	Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-deval
INV.E – 239	Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados- angularidad

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras normatividad INVIAS

4.3.3 Modificación del asfalto con el aditivo y su caracterización

Se realizó la modificación de las mezclas convencionales (agregado natural y cemento asfáltico) y las mezclas modificadas (ACR y cemento asfáltico) utilizando el aditivo Husil con el fin de reducir 25°C la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas. Hay que aclarar que la caracterización se obtuvo de Rondón, León y Fernández (2017), p. 22, donde se indica lo siguiente:

Este aditivo, al mezclarse a temperaturas entre 80°C y 120°C con cemento asfáltico (CA), ha demostrado ser amigable con el medio ambiente y compatible con los CA producidos en Colombia (CA 60-70 y CA 80-100). El CA se modificó con el aditivo químico HUSIL empleando una temperatura de mezcla de 80° C. Esta temperatura fue escogida con base en la experiencia ya adquirida con el aditivo por el grupo de investigación TOPOVIAL de la Universidad Distrital y con el fin de asegurar un mezclado homogéneo de ambos materiales. Igualmente, dicho grupo de investigación realizó una fase de caracterización reológica del asfalto modificado a altas e intermedias temperaturas de servicio, empleando un Reómetro Dinámico de Corte (DSR – Dynamic Shear Rheometer, INV. E-750-13). Como resultado de los ensayos se obtuvo el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). También se midió el grado de desempeño (PG) de los asfaltos a altas e intermedias temperaturas de servicio

Tabla 9 se puede observar los resultados que indicó el grupo de investigación TOPOVIAL evidenciando la elección del 1% de HUSIL como porcentaje añadido al CA 60-70. En la tabla 7 se observa que:

- ✓ El aditivo incrementó la gravedad específica de la mezcla asfalto-aditivo a medida que incrementa el contenido de HUSIL.
- ✓ El asfalto modificado con el aditivo incrementó su resistencia a inflamarse a altas temperaturas.
- ✓ El aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto y las mayores rigideces se presentan cuando el aditivo se agrega en proporciones de HUSIL/CA= 0.75% y 1.0%.

- ✓ La ductilidad disminuye de manera lógica porque el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado luego de que éste ha espumado. (Rondón, León, & Fernández, 2017), p. 163

Tabla 7. Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL

HUSIL/CA [%]	Peso específico [-]	Penetración [mm/10]	Punto de ablandamiento [°C]	Ductilidad [cm]	Punto de Inflamación [°C]
0.0	1,012	62.5	52.5	142.5	326
0.5	1,023	48.8	53.3	87.5	333
1.0	1,030	41.3	52.5	49.0	343
2.5	1,032	43.2	49.0	46.5	354
5.0	1,034	48.3	48.3	65.5	384
7.5	1,036	50.1	47.7	68.5	390
10.0	1,045	52.3	47.4	80.0	404

Fuente: Rondón, León y Fernández. 2017

Tabla 8. Caracterización reológica del asfalto CA 60-70, Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL.

Temperatura [°C]	Frecuencia[rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 no envejecido					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1,00	1,00
70	10	89	453	0,453	0,453
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
52	10	83	11062	11,15	10,98
58	10	85	4276	4,29	4,26
64	10	87	1701	1,70	1,70

Continuación tabla 8

CA 60-70 envejecido en RTFOT + PAV					
16	10	44	14266000	20537	9910
19	10	45	10193000	14415	7208
22	10	47	6659000	9105	4870

Fuente: Rondón, León y Fernández. 2017

Tabla 9. Caracterización reológica del asfalto modificado (HUSIL/CA=1 %), Caracterización del CA 60-70 modificado con HUSIL.

Temperatura [°C]	Frecuencia[rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 modificado con HUSIL/CA=1%. no envejecido					
64	10	67	2358,3	2,57	2,16
70	10	69	1280,5	1,37	1,20
76	10	70	888,2	0,95	0,83
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
64	10	72,4	8685	9,11	8,28
70	10	76,3	4072	4,19	3,96
76	10	79,8	1899	1,93	1,87
CA 60-70 modificado con HUSIL/CA=1%. envejecido en RTFOT					
16	10	31,5	11700000	22392	6113
19	10	32,6	8570000	15907	4617
22	10	33,9	6150000	11027	3430

Fuente: Rondón, León y Fernández. 2017

Durante los últimos años se ha venido estudiando el aditivo HUSIL por parte del Ingeniero Hugo Alexander Rondón y el grupo de investigación Topovial de la Universidad Distrital, lo que ha llevado como conclusión que el uso de HUSIL en las mezclas asfálticas fabricadas “han experimentado un buen comportamiento cuando son sometidas a cargas monotónicas y alta temperatura de servicio (ensayo Marshall), así como pruebas de caracterización dinámica (ley de fatiga, módulo resiliente, deformación permanente) y reológica (pruebas que ayudan a entender la forma como se deforman y fluyen los materiales bajo carga), de resistencia al envejecimiento y al daño por humedad”. (Rondón, León y Fernández, 2017, p. 157)

4.4 Granulometría de la mezcla

En la Tabla 9 obsérvese los porcentajes de distribución de partículas utilizados para la mezcla analizada (MDC-19). Estos valores cumplen con las normas establecidos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS (2022).

Tabla 10. Análisis granulométrico de una mezcla asfáltica MDC-19.

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa	% Retenido	Límites	
(")	(mm)			Inferior	Superior
3/4"	19,00	100,0	0,0	100	100
1/2"	12,50	87,5	12,5	80	95
3/8"	9,50	79,0	8,5	70	88
4	4,75	57,0	22,0	49	65
10	2,00	37,0	20,0	29	45
40	0,43	19,5	17,5	14	25
80	0,18	12,5	7,0	8	17
200	0,075	6,0	6,5	4	8
Fondo		0	6,0		

Fuente: Los autores

Según se evidencia en la curva granulométrica de la Figura 19, la mezcla estudiada (MDC-19) se halla en las pautas que se encuentran en las normas técnicas del INVIAS. Por lo tanto, los

agregados pétreos utilizados en el estudio están dentro de las pautas mínimas para ser aplicados en una mezcla asfáltica MDC-19.

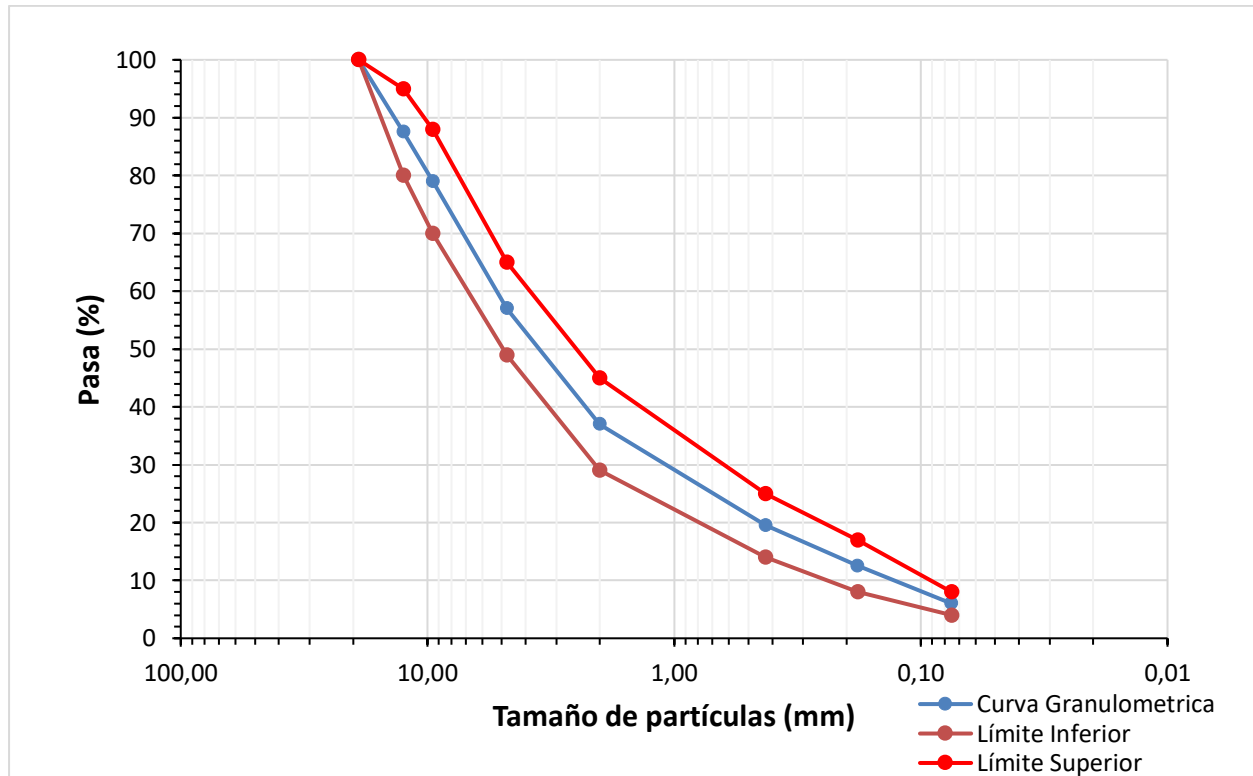


Figura 19. Curva Granulométrica Agregado Pétreo.

Fuente: Los autores

4.4.1 Dosificación mezcla tipo MDC-19 convencional y modificada

Se determinó la cantidad de masa a utilizar por cada porcentaje de asfalto los cuales fueron de 4.5%, 5%, 5.5% y 6% para las mezclas de diseño. En la tabla 11 se presentan las dosificaciones para cada una de las mezclas fabricadas con relación a los porcentajes utilizados y mencionados en el presente subcapítulo.

Tabla 11. Dosificación de los agregados para las mezclas convencionales y modificadas con ACR.

	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%
TAMIZ	Mezcla convencional y Modificada	Mezcla convencional y Modificada	Mezcla convencional y Modificada	Mezcla convencional y Modificada
3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	143,3	142,5	141,8	141,0
3/8"	97,4	96,9	96,4	95,9
4	252,1	250,8	249,5	248,2
10	229,2	228,0	226,8	225,6
40	200,6	199,5	198,5	197,4
80	80,2	79,8	79,4	79,0
200	74,5	74,1	73,7	73,3
FONDO	68,8	68,4	68,0	67,7
TOTAL	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fuente: Los autores

4.4.2 Dosificación de mezcla tipo MDC-19 convencional y modificada según el porcentaje óptimo del asfalto.

Después de terminar las pruebas con los agregados naturales y el cemento asfáltico (con y sin modificación), se hicieron 3 briquetas compactadas a 75 golpes por cada cara a una temperatura de compactación entre 130°C – 140°C para cada porcentaje de asfalto (4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%) con el objetivo de hacer el diseño Marshall de las mezclas convencionales de referencia. Para producir estas mezclas, la temperatura de fabricación sin el aditivo HUSIL y con el aditivo HUSIL fueron de 150°C y 125°C.

En la Tabla 12, se evidencian las dosificaciones escogidas de acuerdo con los porcentajes óptimos de asfalto establecidos.

Tabla 12. Dosificación de las mezclas convencionales y modificadas con ACR de acuerdo con sus respectivos porcentajes óptimos de asfalto.

TAMIZ	[mm]	% PASA	% RETENIDO	CONVENCIONAL (5%)	MODIFICADA CON ACR (5,5%)
				60 g de CA	66 g de CA
3/4"	19	100	0	0,0	0,0
1/2"	12,5	87,5	12,5	142,5	141,8
3/8"	9,5	79	8,5	96,9	96,4
4	4,75	57	22	250,8	249,5
10	2	37	20	228,0	226,8
40	0,43	19,5	17,5	199,5	198,5
80	0,18	12,5	7	79,8	79,4
200	0,075	6	6,5	74,1	73,7
FONDO		0	6	68,4	68,0
TOTALES			100	1140,0	1134,0

Fuente: Los autores

4.5 Diseño de mezclas

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron cuatro diseños de mezclas asfálticas. El primer diseño fue una mezcla convencional o de control. El segundo diseño fue una mezcla convencional con la adición del aditivo HUSIL para disminuir la temperatura de fabricación 25°C menos. El tercer diseño fue una mezcla modificada, en la que se reemplazó las partículas de ½" y 3/4" del agregado natural por ACR. Por último, se desarrolló una mezcla similar a la anterior, pero con la adición del aditivo HUSIL también con el objetivo de disminuir la temperatura de fabricación 25°C menos. A continuación, se detalla cada diseño de la mezcla:

4.5.1 Mezcla Convencional MDC-19 sin aditivo

Esta mezcla se fabricó con los materiales convencionales que tiene una mezcla asfáltica en caliente MDC-19, los cuales son: agregado pétreo no mayor a 19mm y cemento asfáltico, asimismo, la temperatura de fabricación de esta mezcla fue de 150°C.

4.5.2 Mezcla Convencional MDC-19 y aditivo HUSIL

Para la fabricación de esta mezcla se utilizó agregados pétreos convencionales y cemento asfáltico, la diferencia con *la mezcla* citada en el literal 4.5.1 es que se le aplicó un aditivo llamado HUSIL para reducir la temperatura de fabricación 25°C menos. Por lo anterior, la temperatura de producción de esta mezcla fue de 125°C. La correspondencia entre el contenido de HUSIL y CA fue de HUSIL/CA=1% con relación a la masa del CA. Este porcentaje se seleccionó en función de los resultados previos que realizó el grupo de investigación TOPOVIAL.

4.5.3 Mezcla Modificada sustituyendo 21% y agregado grueso por ACR

En esta mezcla se utilizó el material ACR como sustituto de la fracción gruesa de los tamices ½" y ¾" del agregado natural, para verificar su comportamiento. Asimismo, se utilizó el cemento asfáltico convencional y fue fabricada a una temperatura de 150°C.

4.5.4 Mezcla Modificada sustituyendo el 21% y agregando grueso por ACR y aditivo HUSIL.

Esta mezcla fue modificada con la adición del aditivo HUSIL para reducir su temperatura de fabricación, asimismo se modificó el 21% de los agregados gruesos del material pétreo por los agregados de concreto reciclado (ACR) y finalmente, esta mezcla fue producida a temperatura de 125°C.

En la Tabla 13 se evidencia que para la mezcla convencional sin el aditivo se hicieron 36 briquetas, para la mezcla convencional con el aditivo, mezcla modificada sin y con el aditivo se fabricaron 15 briquetas por cada una.

Tabla 13. Plan de ensayos de laboratorio mezcla MDC-19.

TIPO DE MEZCLA	ENSAYO	CANTIDAD (UN)	TOTAL (UN)
MDC-19 CONVENCIONAL (100% de agregados pétreos naturales)	MARSHALL (4 contenidos de asfalto y 3 muestras por cada contenido) para conseguir el porcentaje de asfalto óptimo	24	36
	TRACCIÓN INDIRECTA (Se realizan 3 pruebas en seco y 3 pruebas en húmedo)	6	
	MODULO RESILIENTE (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
	CÁNTABRO (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
MDC-19 CONVENCIONAL (100% de agregados pétreos naturales y adición del aditivo HUSIL)	MARSHALL (contenido óptimo de asfalto y 3 muestras)	3	15
	TRACCIÓN INDIRECTA (Se realizan 3 pruebas en seco y 3 pruebas en húmedo)	6	
	MODULO RESILIENTE (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
	CÁNTABRO (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
MDC-19 MODIFICADA (Sustituyendo el 21% de los agregados pétreos gruesos por ACR)	MARSHALL (contenido óptimo de asfalto y 3 muestras)	3	15
	TRACCIÓN INDIRECTA (Se realizan 3 pruebas en seco y 3 pruebas en húmedo)	6	
	MODULO RESILIENTE (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
	CÁNTABRO (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
MDC-19 MODIFICADA (Sustituyendo el 21% de los agregados pétreos gruesos por ACR y adición de aditivo HUSIL)	MARSHALL (contenido óptimo de asfalto y 3 muestras)	3	15
	TRACCIÓN INDIRECTA (Se realizan 3 pruebas en seco y 3 pruebas en húmedo)	6	
	MODULO RESILIENTE (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
	CÁNTABRO (Se utilizarán 3 briqueta)	3	
		Total	81

Fuente: Los autores

4.6 Ensayos realizados

Los ensayos fueron descritos en el capítulo 2.1.10, llamado ensayos de laboratorio, en la Tabla 14, se ven los ensayos mecánicos según normativa Instituto Nacional de Vías (2022) que se desarrollaron durante el presente estudio.

Tabla 14. Ensayos mecánicos según la Normatividad INVIAS.

ENSAYO	OBJETO
INV.E – 748	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall
INV.E – 725	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de Tracción Indirecta
INV.E – 749	Ensayo de tensión indirecta para determinar el Módulo Resiliente de mezclas asfálticas
INV.E – 760	Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo Cántabro de Perdida por desgaste

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras normatividad INVIAS

4.6.1 Ensayo Marshall

Después de haber realizado los respectivos ensayos de caracterización a los materiales pétreos, agregados de concreto reciclado y a los cementos asfálticos, se hicieron tres briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, con el objetivo de hacer el diseño Marshall de la mezcla asfáltica MDC-19 convencional (sin aditivo HUSIL, sin reemplazo de agregados naturales por ACR; HUSIL/CA=0%, ACR=0%). La dosificación de las mezclas se presenta en la Tabla 10. “Dosificación de los agregados para las mezclas convencionales y modificadas con ACR” y para su fabricación, se utilizaron temperaturas de producción y compactación de las briquetas a 150°C y 140°C respectivamente.

4.6.2 Ensayo Tracción Indirecta

Este ensayo se realizó a la mezcla convencional y a las otras tres mezclas (Mezcla convencional modificada con HUSIL, mezcla modificada reemplazando agregado natural por ACR con y sin HUSIL), las cuales mostraron un mejor rendimiento en el ensayo Marshall. Cada mezcla fue evaluada bajo condición seca (3 muestras por cada mezcla) y saturada (3 muestras por cada mezcla, sumergidas en agua por un mes). Con los resultados del ensayo se estableció la relación entre la condición saturada y seca (TIS/TID) con el objetivo de valorar además el daño por humedad. Este ensayo de tracción indirecta fue descrito en el numeral 2.2.10.2

4.6.3 Ensayo Desgaste por Cántabro

Al igual que el ensayo descrito en el numeral 4.6.2 este ensayo se realizó a las mismas mezclas, en consecuencia, se fabricaron probetas tipo Marshall (compactadas con 50 golpes por cara) y se introdujeron a la máquina de ensayo de los Ángeles. Posteriormente, se pesó las probetas y como resultado se obtuvo el valor en porcentaje de la pérdida por desgaste.

4.6.4 Ensayo Módulo Resiliente

Este ensayo se realizó para determinar el comportamiento de las mezclas bajo carga dinámica, y se hicieron para las mismas mezclas descritas en el numeral 4.6.2, por otro lado, las mezclas que se fabricaron con el aditivo HUSIL fueron producidas a 25°C por debajo de la temperatura de la mezcla convencional. De igual forma, la proporción del aditivo fue de 1% con relación a la masa del asfalto. El aditivo fue adicionado simultáneamente con la mezcla de asfalto y los agregados siguiendo las recomendaciones de los estudios previos. Para llevar a cabo el ensayo de módulo resiliente se fabricaron tres briquetas Marshall por cada mezcla analizada. Posteriormente, las muestras estuvieron sometidas a temperatura de ensayo de 20°C y frecuencia de carga de (2.5, 5.0 y 10.0 Hz)

4.7 Mezclas analizadas según ensayos de laboratorio

Se analizaron las diferentes mezclas realizadas y se determinaron los tipos de mezclas para cada ensayo. El ensayo Marshall, el ensayo a tracción indirecta, el ensayo por Cántabro y el Módulo Resiliente. En la Tabla 15 se muestran los tipos de mezclas realizadas.

Tabla 15. Ensayos y mezclas Utilizadas en la investigación.

	ENSAYOS	ENSAYO MARSHALL	TRACCIÓN INDIRECTA	DESGASTE PR CÁNTABRO	MODULO RESILIENTE
MEZCLAS	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C (SIN HUSIL)	SI	SI	SI	SI
	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C + HUSIL	SI	NO	NO	NO
	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C (SIN HUSIL)	SI	NO	NO	NO
	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C + HUSIL	SI	SI	SI	SI
	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C (SIN HUSIL)	SI	SI	SI	SI
	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	SI	NO	NO	NO
	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C (SIN HUSIL)	SI	NO	NO	NO
	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C + HUSIL	SI	SI	SI	SI

Fuente: Los autores

4.8 Diseño Metodológico

Para establecer de manera adecuada la metodología del proyecto de investigación, se diseñó el siguiente enfoque, que presenta una secuencia ordenada de los procesos a desarrollar con el propósito de alcanzar el objetivo final del estudio. Dicha metodología se muestra en la figura 20.

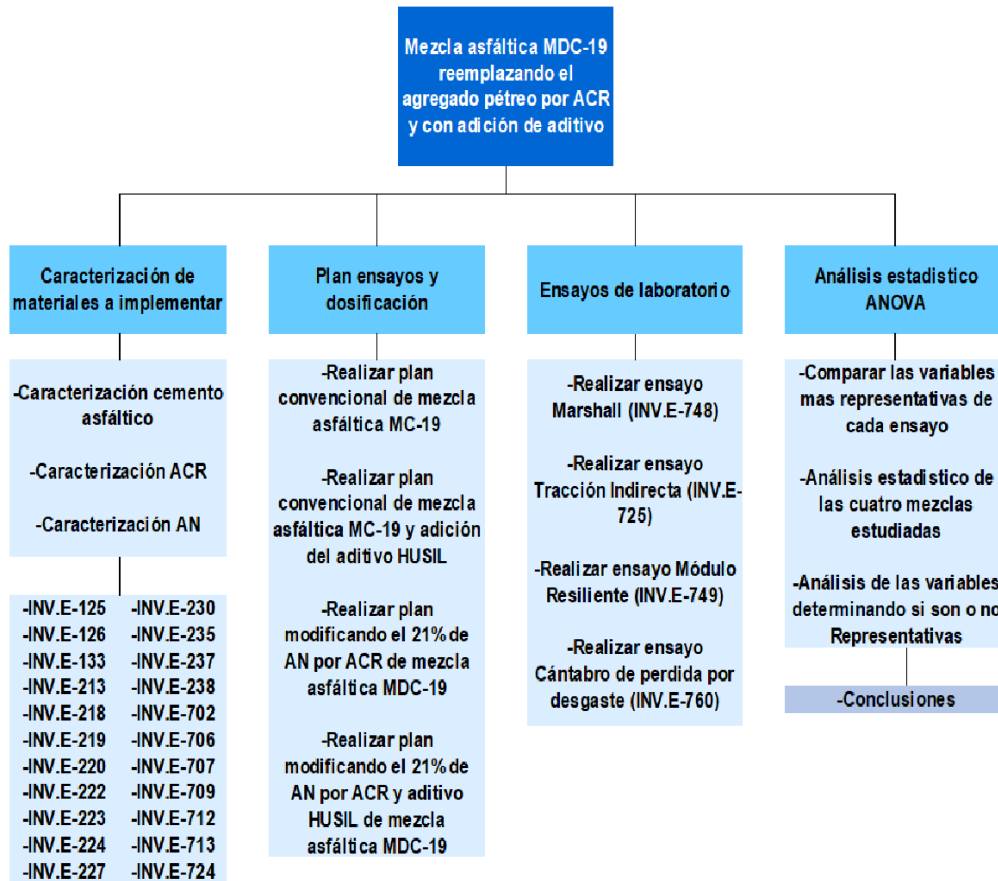


Figura 20. Metodología proyecto de investigación.

Fuente: Los autores

4.9 Metodología del marco lógico

Se empleó la metodología del Marco Lógico, dado que es un instrumento eficaz para conducir el proceso de diseño, implementación y valoración de una investigación. Su propósito principal radica en alinear las metas, las acciones a desarrollar y los recursos empleados en el estudio. (Ortegón, Pacheco y Prieto, 2015)

Esta metodología resulta útil para guiar y enfocar los aspectos fundamentales descritos en los objetivos específicos de la presente investigación. En seguida, se puede apreciar una tabla donde se detalla las acciones, recursos necesarios para alcanzar las metas establecidas en este documento.

Tabla 16. Metodología Marco Lógico de la Investigación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACCIÓN	RECURSOS
Caracterizar los materiales empleados en la elaboración de la mezcla asfáltica tibia y el componente de material tipo ACR utilizado en la sustitución de la fracción gruesa, siguiendo las especificaciones definidas por el Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2022).	Realización de ensayos de laboratorio para caracterizar los materiales utilizados en las mezclas, como: CA, AN, ACR y HUSIL.	- Laboratorio Universidad Católica – Asesoramiento del Director de Tesis - Asesoramiento del Laboratorista
Diseñar preliminarmente las mezclas para los estudios de resistencia de una mezcla tibia modificada con y sin sustitución del 20% de agregados gruesos por ACR, añadiendo un aditivo llamado Husil para reducir la temperatura de fabricación de la mezcla.	Establecer y calcular la dosificación de las 4 mezclas y el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla convencional para continuar con los ensayos estipulados en la presente investigación: - Mezcla Convencional - Mezcla Convencional con aditivo Humil - Mezcla Modificada con ACR - Mezcla Modificada con ACR y Husil	- Laboratorio Universidad Católica y conocimientos de los autores relacionados con el tema investigativo - Asesoramiento del Director de Tesis
Estimar el comportamiento de mezclas asfálticas en tibio con diferentes dosificaciones de ACR mediante pruebas y ensayos de laboratorio sobre la mezcla tipo MDC-19 con y sin sustitución parcial del agregado natural por ACR, y con adición del aditivo HUSIL, midiendo la respuesta bajo ensayos dinámicos y monotónicos.	Realizar ensayos de laboratorio para determinar la resistencia de las mezclas en estudio, incluyendo: - Ensayo Marshall - Ensayo de Tracción Indirecta - Ensayo de Módulo Resiliente - Ensayo de Desgaste Cántabro	- Laboratorio Universidad Católica - Asesoramiento del Director de Tesis - Asesoramiento del Laboratorista
Comparar los resultados de las diferentes dosificaciones de la normativa vigente para elaborar y recomendar su uso en posibles estructuras de pavimento.	Comparar el análisis de resultados de los ensayos a realizar en la presente tesis, brindando recomendaciones y conclusiones sobre estos resultados.	- Asesoramiento del Director de Tesis - Revisión Bibliográfica

Fuente: Los autores.

La línea de investigación se enfocó en caracterizar las propiedades de resistencia y rigidez de los materiales usados en infraestructuras viales, por medio de ensayos de laboratorio especializados. El objetivo fue determinar parámetros mecánicos confiables que faciliten el análisis avanzado de problemas complejos en obras viales.

En la presente investigación, la gestión del conocimiento se sustentó en la evaluación del empleo de agregados reciclados de concreto en el diseño de mezclas asfálticas tibias, con la finalidad de mitigar el impacto ambiental generado por estos materiales. Para ello, se tuvo en cuenta las indicaciones de calidad emitidos por la normativa INVIAS.

El área de investigación del proyecto se centró en la reutilización de materiales en procesos constructivos de infraestructura vial. Dentro de este ámbito, se buscó identificar materiales alternativos y establecer antecedentes técnicos y metodologías procedimentales para su reutilización y aplicación en la construcción de infraestructuras viales. Para lograr esto, se evaluó y analizó las propiedades físicas, químicas, mecánicas y dinámicas de los materiales, comparándolos con mezclas y estructuras convencionales.

En resumen, la investigación abordó la caracterización de las propiedades de resistencia y rigidez de los materiales empleados en infraestructuras viales y exploró el empleo de agregados reciclados de concreto en el diseño de mezclas asfálticas tibias. El proyecto contribuyó a la gestión del conocimiento en la reutilización de materiales en procesos constructivos, evaluando y analizando sus propiedades en comparación con las alternativas convencionales, y siguiendo las normativas de calidad establecidas por INVIAS.

4.10 Informes técnicos y documento final

A lo largo de la investigación se realizaron los escritos correspondientes para publicar y divulgar los resultados obtenidos, los cuales se basaron en la búsqueda de bibliografía y los resultados que se obtuvieron de la fase experimental. Durante este proceso se envió periódicamente informes al director del trabajo de grado para su revisión (reportes parciales de avance y cálculos obtenidos) y el presente documento final incluye el análisis de los resultados y las conclusiones de la investigación.

4.11 Metodología para hacer el Análisis Estadístico ANOVA

Para determinar estadísticamente la similitud o diferencia de las mezclas estudiadas, se realizaron los siguientes pasos:

- ✓ Definir la hipótesis: Se estableció dos hipótesis para empezar con el análisis estadístico, en la cual la primera hipótesis se aceptaba que las mezclas tuvieran similitud entre sí, y la segunda hipótesis se rechazaba, es decir que las mezclas tenían diferencias por lo que no tenían similitud alguna.

- ✓ Recolectar los datos: Después de haber establecido las dos hipótesis probables, se procedió a la recolección de los datos para empezar el análisis estadístico, con base en los resultados determinados en los diferentes ensayos realizados en la presente investigación.

- ✓ Realizar el análisis ANOVA: Se procedió a realizar el análisis estadístico determinando las sumas de cuadrados, grados de libertad y las medias cuadráticas.

- ✓ Calcular el valor de la probabilidad: Con el análisis estadístico realizado en el ítem anterior, se procedió a analizar la probabilidad de aceptar la hipótesis nula. Es decir, una probabilidad menor al 5% indica que las mezclas tienen diferencias estadísticamente hablando entre sí.

- ✓ Análisis de los resultados: Como se mencionó anteriormente, si la probabilidad es menor al 5% hay indicios de que las mezclas sean diferentes, por el contrario, cuando la probabilidad aumenta y es mayor al 5% no existe suficiente evidencia para establecer las posibles diferencias de las muestras analizadas.

- ✓ Presentar los resultados: Finalmente, se procede a mostrar todos los resultados determinados para poder establecer la probabilidad de que las mezclas sean o no sean iguales en términos de estadística. Analizando también, la región de aceptación entre las mezclas.

Finalmente, se utilizó el tipo de Anova unidireccional porque está diseñado principalmente para permitir la prueba de igualdad entre tres o más medidas.

5. RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados y el análisis correspondiente a los cuatro objetivos específicos mencionados previamente: Caracterización de los materiales empleados en la fabricación de las mezclas asfálticas, diseño de las mezclas asfálticas, realización de pruebas y ensayos, análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas y comparación de los resultados obtenidos mediante los ensayos Marshall, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Desgaste por Cántabro.

Es importante destacar que, para el desarrollo y análisis de este capítulo, se utilizó la normatividad (INVIAS 2022).

5.1 Análisis Resultados de caracterización de materiales

Para alcanzar el primer objetivo específico, se llevó a cabo y se analizó los resultados obtenidos en la caracterización de los diversos materiales empleados en la presente investigación. Estos incluyen el cemento asfáltico, los agregados pétreos, el agregado de concreto reciclado y el aditivo denominado HUSIL.

5.1.1 Resultados de caracterización del cemento asfáltico

Tabla 17 se muestra los ensayos de caracterización realizados y los resultados obtenidos, así como los criterios de aceptación de la normatividad INVIAS (2022), los cuales indicaron si los resultados obtenidos cumplen con el criterio mínimo de aceptación de este material.

Tabla 17. Caracterización Cemento Asfáltico.

Ensayo			Norma INV.	Resultado	Criterio de aceptación (INVIAS 2022)		Cumplimiento
					Mín.	Máx.	
Ductilidad (25°C, 5 cm/min) - (cm)			E-702	140	100	-	SI
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) (0,1 mm)			E-706	65	60	70	SI
Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (g/cm ³)			E-707	1.024	-	-	-
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland (°C)			E-709	278	230	-	SI
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos			E-712	48	48	54	SI
Solubilidad en tricloroetileno (%)	E-713	99.98	99	-			SI
Índice de penetración	E-724	-1.1	-1.2	+0.6			SI

Fuente: Los autores

Por lo anterior, En la Tabla 17 se puede evidenciar que los criterios mínimos establecidos en la norma INVIAS (2022) para el cemento asfáltico cumple con todos los parámetros para utilizarse en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente. A continuación, se muestra algunas fotos donde se puede ver la caracterización del material.

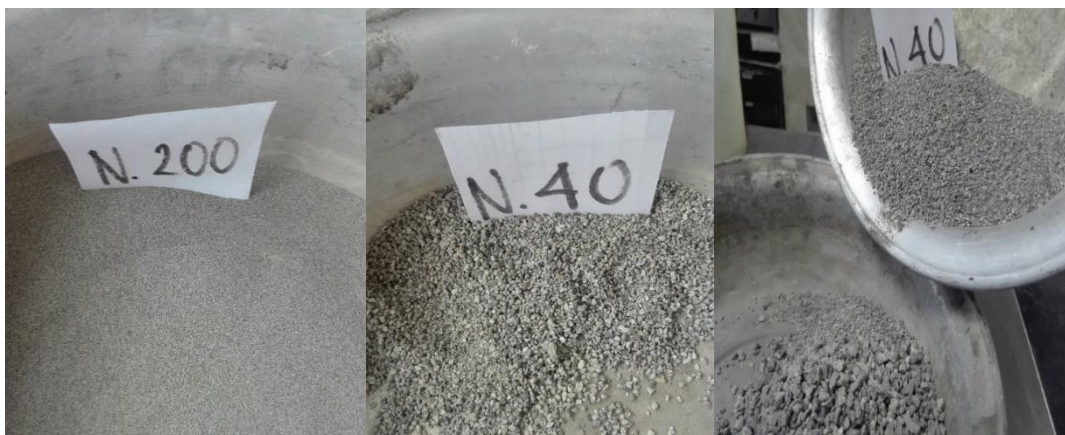


Figura 21. Registro fotográfico caracterización –agregados.

Fuente: Los autores

5.1.2 Resultados de la caracterización del agregado natural y ACR

El agregado natural usado para el estudio de las mezclas asfálticas provino de la planta de asfaltos CONCRESCOL S.A. y el ACR empleado de la Planta Reciclados Industriales de Colombia S.A, a continuación, en la Tabla18, se presentan los resultados de caracterización de ambos materiales.

Tabla 18. Caracterización agregado natural.

Ensayo	Norma INV.	Resultado AN	Criterio de aceptación (INVIAS 2022)	Cumplimiento	Resultado ACR	Criterio de aceptación (INVIAS 2022)	Cumplimiento
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, 500 revoluciones	E-218	21%	Max 25%	SI	33,20%	Max 25%	NO
	E-219						
Micro Deval	E-238	9.2%	Max 20%	SI	25.3%	Max 20%	NO

Continuación tabla 18

10% de finos en seco	E-224	243,32 KN	Min 110 KN	SI	*	*	*
10% de finos relación húmedo/seco	E-224	89.6%	Min 75%	SI	*	*	*
Pérdida de ensayo de solidez en sulfato de magnesio	E-220	5.3%	Max 18%	SI	*	*	*
Gravedad específica g/cm3	E-222	2.60	-	-	2.49	-	-
Gravedad específica g/cm3	E-223	2.63	-	-	2,455	-	-
Índice de Aplanamiento	E-230	18%	-	-	*	*	*
Índice de Alargamiento	E-230	26%	-	-	*	*	*
Caras fracturadas: 1 cara	E-227	93%	Min 85%	SI	93%	Min 85%	SI
Caras fracturadas: 2 caras	E-227	89%	Min 70%	SI	*	*	*

Agregado Fino							
Índice de Plasticidad %	E-125	No plástico	No plástico	-	No plástico	No plástico	-
	E-126						
Equivalente de arena	E-133	58%	Min 50%	SI	*	*	*
Contenido de vacíos agregados finos	E-239	48%	Min 45%	SI	*	*	*
Azul de metileno	E-235	3.7%	Max 10%	SI	*	*	*
Pérdida de ensayo de solidez en sulfato de magnesio	E-220	5.4%	Max 18%	SI	*	*	*

Fuente: Los autores

*Estos ensayos no se realizaron, toda vez que se hicieron los principales ensayos para el cálculo del Gs del material modificado

Con base en los resultados obtenidos en la tabla 18 se puede evidenciar que:

- ✓ **Los criterios mínimos establecidos en la norma INVIAS (2022)**, el agregado natural cumple con todos los parámetros para utilizarse en el diseño de una mezcla asfáltica. No obstante, el ACR no cumple con los criterios mínimos exigidos de los ensayos de Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, 500 revoluciones y del Micro Deval. Aquí hay algunas explicaciones por la que los ACR no cumplen con los ensayos mencionados:
- ✓ **Calidad del agregado:** El agregado de concreto reciclado puede contener impurezas o contaminantes que afectan su resistencia al desgaste.
- ✓ **Contenido de material blando:** Los agregados de concretos reciclados pueden contener una alta proporción de materiales blandos, como cemento endurecido o partículas de mortero que no se eliminaron por completo durante el proceso de reciclaje. Estos materiales blandos se desprenden más fácilmente durante las pruebas de desgaste, lo que da como resultado una mayor pérdida de masa y una menor resistencia al desgaste.
- ✓ **Propiedades químicas:** Los residuos presentes en los agregados de concretos reciclados pueden reaccionar químicamente con los componentes del hormigón, debilitando la estructura y reduciendo su resistencia al desgaste.



Figura 22. Registro Fotográfico, caracterización del agregado natural y ACR.

Fuente: Los autores

5.2 Análisis resultados de laboratorio

Con relación al cumplimiento de uno de los objetivos específicos, se analizaron los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo durante la investigación. A continuación, se mencionan los cuatro tipos de mezclas asfálticas empleadas en los ensayos.

- ✓ CA 60-70 Convencional (5%) a 150°C
- ✓ CA 60-70 Convencional (5%) a 125°C
- ✓ CA 60-70 ACR. (5,5%) a 150°C
- ✓ CA 60-70 ACR (5,5%) a 125°C

5.2.1 Análisis de resultados obtenidos del ensayo Marshall

En este ensayo, se determinó el contenido óptimo de asfalto para las mezclas convencionales y modificadas con ACR y el aditivo Husil, mediante la realización de pruebas que emplearon cuatro diferentes contenidos de asfalto (4.5%, 5%, 5.5% y 6%). Se fabricaron briquetas a dos temperaturas distintas: la primera a 150°C y la segunda a 125°C. Con este ensayo, se evaluaron seis variables, que son:

- ✓ Estabilidad
- ✓ Flujo
- ✓ Relación estabilidad/flujo
- ✓ Porcentaje de vacíos con aire
- ✓ Porcentaje de vacíos en los agregados
- ✓ Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

Los ensayos realizados proporcionaron información que permitió llevar a cabo un análisis detallado de las seis variables descritas anteriormente y establecer las diferencias de las mezclas asfálticas fabricadas a 150°C y 125°C. Por lo anterior, en la Tabla 19 se presenta un análisis de

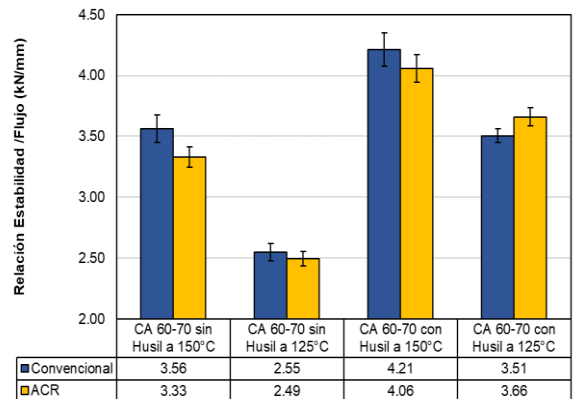
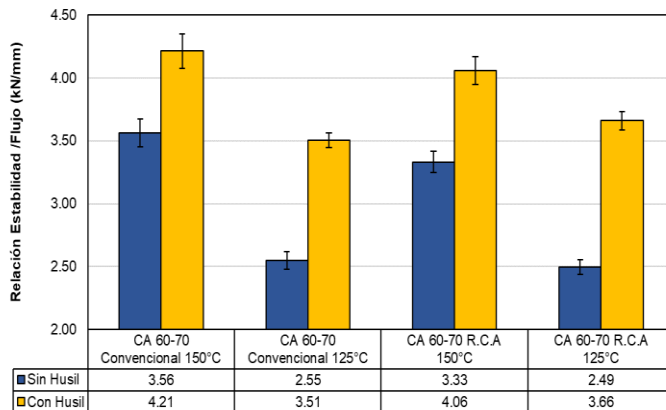
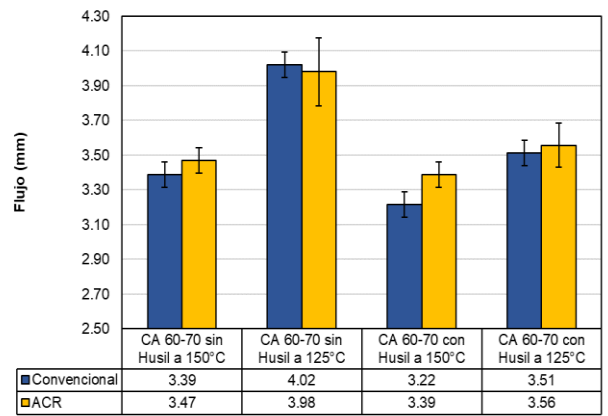
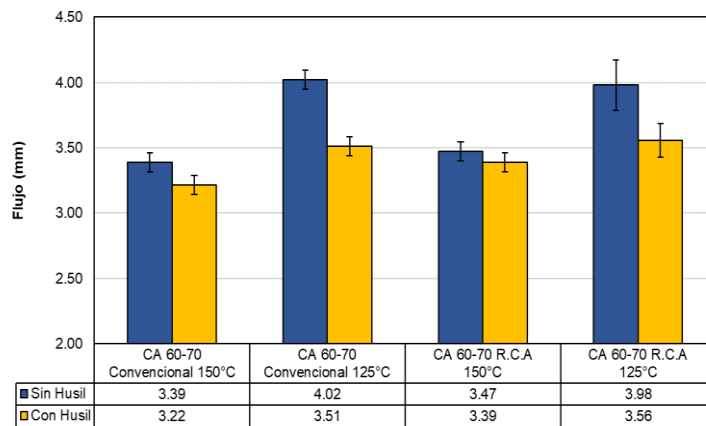
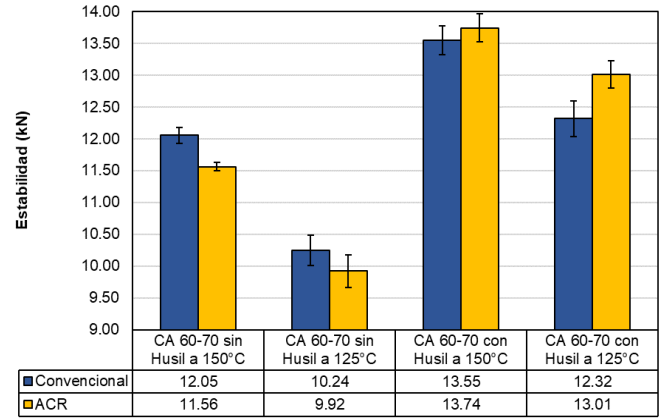
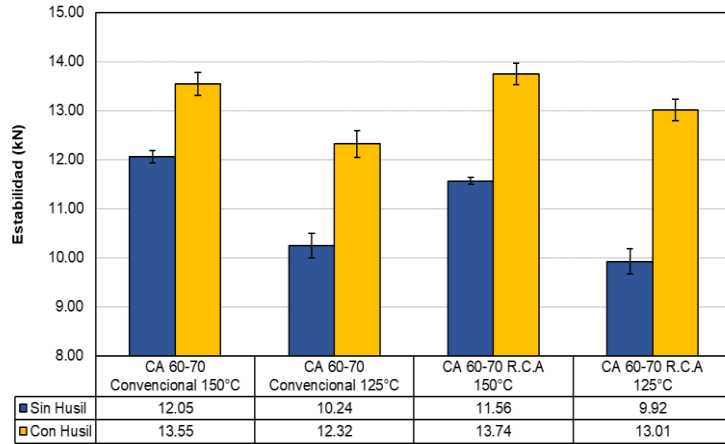
cada variable evaluada para comprender el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas con y sin la adición del aditivo Husil.

Tabla 19. Resultados diseño mezcla con el contenido óptimo de asfalto.

Tipo de mezcla MDC-19	CA [%]	Estabilidad corregida [N]	E/F Corregida [kN/mm]	Flujo [mm]	Vacíos [%]	VAM [%]	VFA [%]
CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C (SIN HUSIL)	5	12055	3,56	3,39	4,16	15,51	73,19
CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C + HUSIL	5	13546	4,21	3,22	2,83	14,34	80,26
CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C (SIN HUSIL)	5	10245	2,55	4,02	6,99	18,01	61,16
CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C + HUSIL	5	12315	3,51	3,51	4,87	16,13	69,82
CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C (SIN HUSIL)	5,5	11562	3,33	3,47	5,19	17,29	70,02
CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	5,5	13740	4,06	3,39	3,37	15,70	78,57
CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C (SIN HUSIL)	5,5	9920	2,49	3,98	8,76	20,41	57,08
CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C + HUSIL	5,5	13008	3,66	3,56	5,00	17,13	70,79

Fuente: Los autores

En la Figura 23, se muestran los resultados del ensayo Marshall:



Continuación de la figura 23

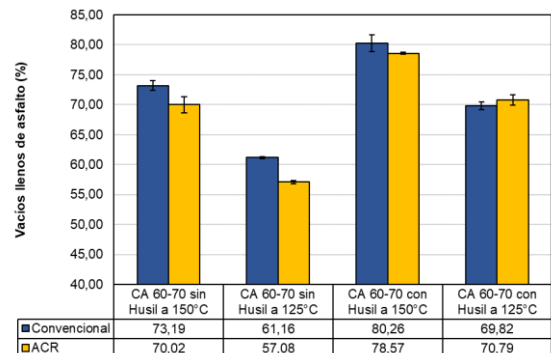
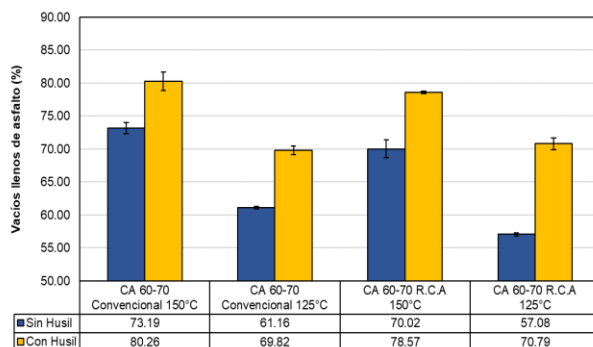
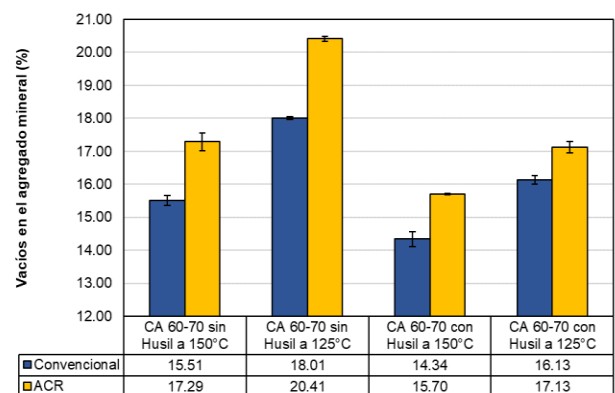
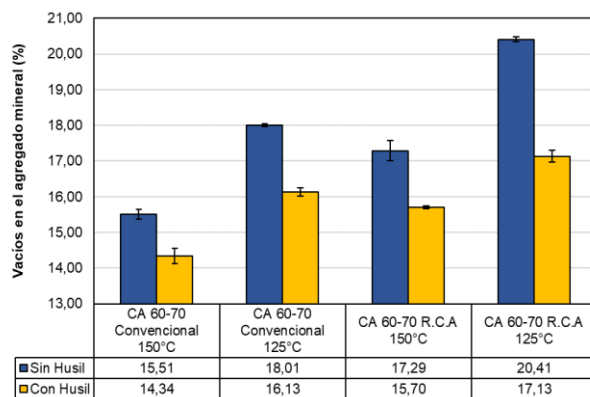
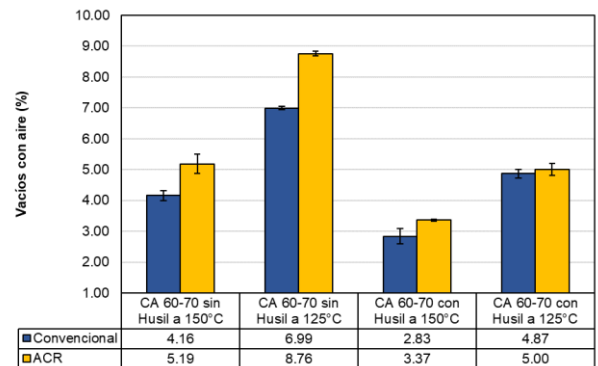
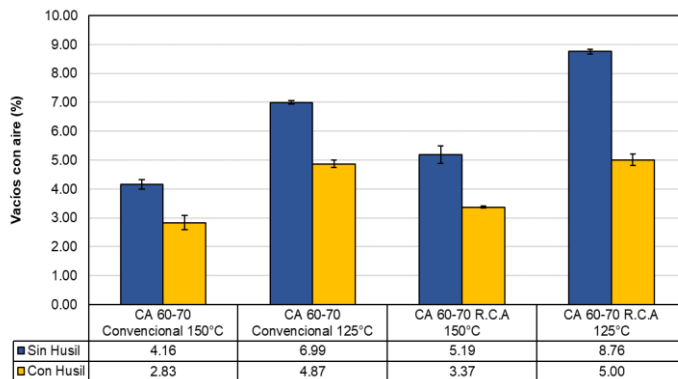


Figura 23. Resultados ensayo Marshall.

Fuente: Los autores

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 23, se puede indicar que:

- ✓ La relación Estabilidad/Flujo (E/F) de las mezclas asfálticas se ve afectada por la temperatura de fabricación y la presencia del aditivo Husil. Las mezclas fabricadas a una temperatura de 150°C muestran una mayor relación E/F en comparación con las mezclas fabricadas a 125°C. Esto indica que las mezclas a temperaturas más altas son más resistentes a la deformación permanente y la fisuración bajo carga repetida.
- ✓ El aditivo Husil tiene un efecto positivo en la relación E/F de las mezclas. En las mezclas convencionales y modificadas sin Husil, la relación E/F es más baja, lo que indica una menor resistencia a la deformación y fisuración.
- ✓ Los ACR disminuyen la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas sin el aditivo, esto debido a la presencia de mortero adherido sobre el ACR donde pudo afectar negativamente los parámetros de resistencia ya que este mortero se desprendió durante la aplicación de la carga monotónica en el ensayo.
- ✓ El aditivo HUSIL disminuye el contenido de vacíos con aire, independientemente el material utilizado (Agregado natural o ACR), lo que significa que el aditivo aumenta la densidad, resistencia y durabilidad de la mezcla.
- ✓ Los ACR aumentan el contenido de vacíos con aire de todas las mezclas realizadas, toda vez que los agregados de concreto reciclado tienen mayor capacidad de absorción de asfalto que los agregados naturales, por lo que estos materiales al ser recubiertos de asfalto pueden tener menor capacidad de compactación, y como resultado pueden generar más espacios vacíos con aire.
- ✓ Los vacíos con aire aumentan a medida que se disminuye la temperatura de las mezclas asfálticas, por lo que las mezclas fabricadas a una temperatura de 125°C muestran mayor contenido de vacíos con aire en comparación con las mezclas fabricadas a 150°C. Esto indica que las mezclas a temperaturas más bajas son menos resistentes, tienen mayor susceptibilidad a la infiltración de agua y mayor deformación permanente.

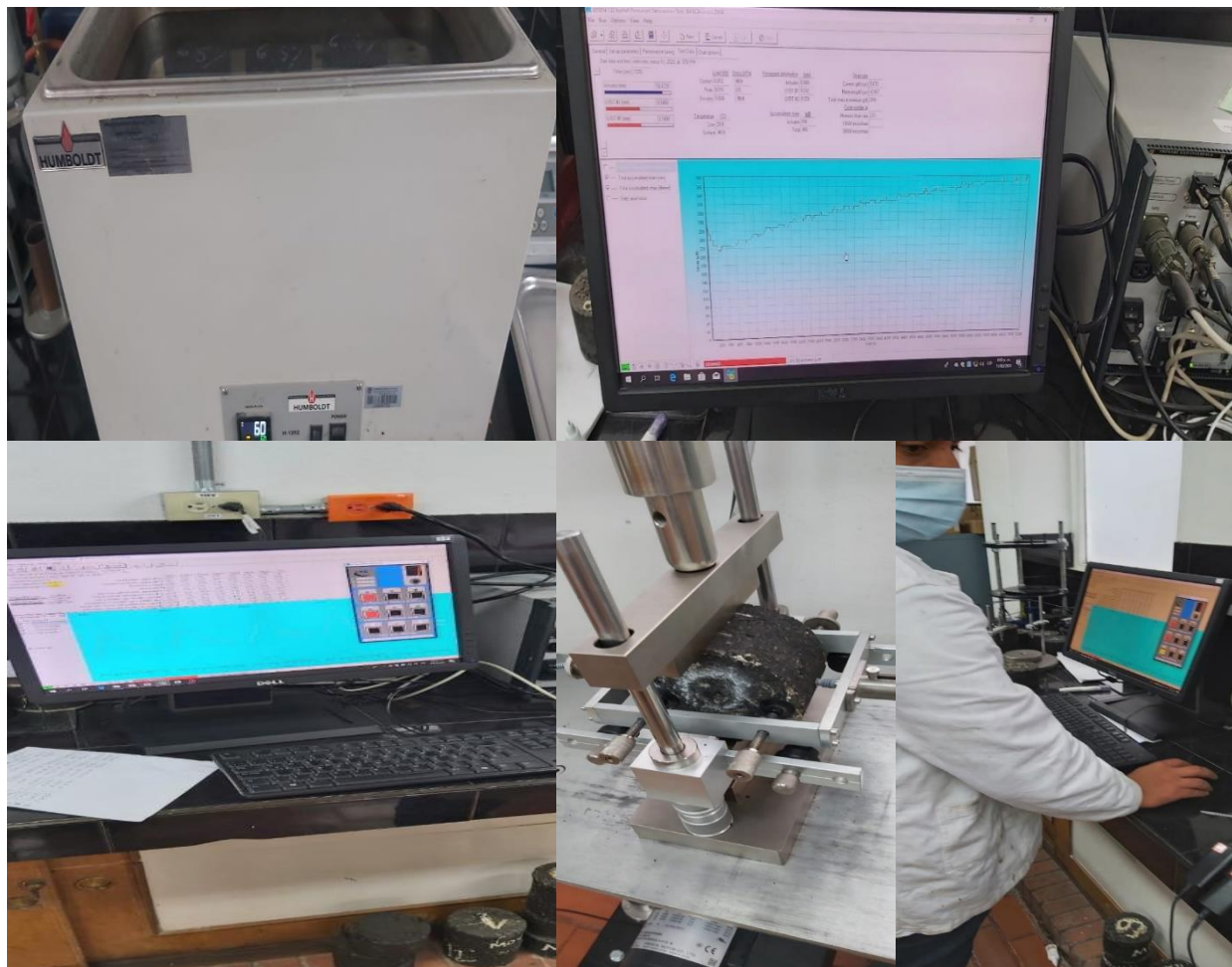


Figura 24. Registro Fotográfico ensayo Marshall.

Fuente: Los autores

5.3 Análisis estadístico de la Varianza ANOVA ensayo Marshall

Con el fin de revisar las similitudes de las mezclas analizadas, se llevó a cabo el análisis estadístico mediante el método ANOVA. Este análisis permitió determinar si había alguna diferencia significativa entre las distintas mezclas estudiadas en términos de las variables dependientes analizadas. La utilización de este método dio como resultado evaluar si las diferencias observadas en las muestras son resultado del azar o si existen diferencias

significativas entre las mezclas. De esta manera, se pudo obtener información valiosa que permitió identificar las mezclas con mejores características y, en consecuencia, tomar decisiones más acertadas en cuanto a la selección de materiales y su aplicación en la construcción de pavimentos. A continuación, en la siguiente tabla se muestra el resumen de los datos estadísticos determinados para poder establecer si las variables analizadas son similares o por el contrario son distintas.

Tabla 20. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Marshall.

ANÁLISIS DE VARIANZA ENSAYO MARSHALL							
<i>Variable</i>	<i>Por criterio</i>	<i>Mezcla 1</i>	<i>Mezcla 2</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Análisis ANOVA</i>
Estabilidad	Por el material	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	1,11	0,35	7,71	Se acepta la hipótesis
		CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C (SIN HUSIL)	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C (SIN HUSIL)	2,50	0,19	7,71	Se acepta la hipótesis
Flujo	Por el Aditivo	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C (SIN HUSIL)	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	2,00	0,23	7,71	Se acepta la hipótesis
	Por el Material	CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 150°C (SIN HUSIL)	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C (SIN HUSIL)	2,00	0,23	7,71	Se acepta la hipótesis
		CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C (SIN HUSIL)	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C (SIN HUSIL)	0,13	0,74	7,71	Se acepta la hipótesis
		CA 60-70 CONVENCIONAL (5%) 125°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C + HUSIL	0,25	0,64	7,71	Se acepta la hipótesis

Continuación tabla 20

Relación Estabilidad/Flujo	Por el Material	CA 60-70 CONVENCION AL (5%) 150°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	2,26	0,21	7,71	Se acepta la hipótesis
		CA 60-70 CONVENCION AL (5%) 125°C (SIN HUSIL)	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C (SIN HUSIL)	1,02	0,37	7,71	Se acepta la hipótesis
Vacíos con aire	Por el Material	CA 60-70 CONVENCION AL (5%) 125°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C + HUSIL	0,95	0,38	7,71	Se acepta la hipótesis
Vacíos llenos de asfalto	Por el Material	CA 60-70 CONVENCION AL (5%) 150°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 150°C + HUSIL	4,13	0,11	7,71	Se acepta la hipótesis
		CA 60-70 CONVENCION AL (5%) 125°C + HUSIL	CA 60-70 R.C.A. (5,5%) 125°C + HUSIL	2,51	0,19	7,71	Se acepta la hipótesis

Fuente: Los autores

Según la tabla 20, las mezclas que tuvieran similitudes en cuanto a la relación estabilidad/flujo fueron la mezcla convencional sin HUSIL y la modificada sin HUSIL a 125°C, y la convencional con HUSIL y la modificada con HUSIL a 150°C, teniendo como probabilidad un 37% y 21% respectivamente, lo que significa que hay probabilidad de obtener una F calculada (El valor F se puede utilizar para determinar si la prueba es estadísticamente significativa) igual o mayor que la F crítica bajo la hipótesis nula. Asimismo, las únicas mezclas que dieron similares según el análisis estadístico de la variable vacíos con aire fue la mezcla convencional con HUSIL y la modificada con HUSIL a 125°C, con una probabilidad del 38%.

5.3.1 Análisis de resultados obtenidos del ensayo a Tracción Indirecta

Con este ensayo se logró evaluar las mezclas asfálticas al daño por humedad de cada muestra.

5.3.1.1 Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes secos

En la Tabla 21, se muestra los resultados de los especímenes en condición seca de las cuatro mezclas estudiadas para el presente documento.

Tabla 21. Tracción indirecta de las mezclas en condición seca.

NO CONDICIONADA - SECA				
Tipo de mezcla	especímenes	Lectura de carga (N)	Resistencia a la tensión (KPa)	Promedio de la resistencia a la tensión (Kpa)
CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	1	9960	978,19	986,16
	2	10210	1005,90	
	3	9890	974,37	
CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	1	10030	989,72	1002,54
	2	10330	1017,72	
	3	10120	1000,17	
RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	1	10230	1004,71	1002,26
	2	9980	977,09	
	3	10420	1024,97	
RCA - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	1	10430	1027,57	1025,40
	2	10520	1036,44	
	3	10290	1012,19	

Fuente: Los autores

Se evidencia que al reducir la temperatura de fabricación con la adición del aditivo HUSIL las mezclas experimentan un aumento en la resistencia a la tensión en los especímenes secos, lo que significa que el aditivo ayuda a mejorar la capacidad de la mezcla asfáltica para soportar cargas de tracción y resistir la deformación bajo estas cargas.

De otra parte, las mezclas con ACR evidenciaron un incremento en la resistencia a la tensión de los especímenes secos, en consecuencia, las mezclas con este material tienen una mayor

capacidad para resistir el agrietamiento y la deformación bajo carga, lo que se traduce en una mayor durabilidad y vida útil de la carretera.

5.3.1.2 Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes Húmedos

A continuación, se presentan los resultados de la tracción indirecta de las cuatro mezclas asfálticas estudiadas en condiciones húmedas. En la tabla 22 se muestra los valores de resistencia a la tensión obtenidos para cada tipo de mezcla, así como el promedio de la resistencia a la tensión de cada muestra.

Tabla 22. Tracción indirecta de las mezclas en condición húmeda.

CONDICIONADA - SUMERGIDO				
Tipo de mezcla	Especímenes	Lectura de carga (N)	Resistencia a la tensión (KPa)	Promedio de la resistencia a la tensión (Kpa)
CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	1	9200	904,97	914,97
	2	9260	910,87	
	3	9430	929,05	
CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	1	9550	939,39	949,10
	2	9740	961,10	
	3	9610	946,78	
RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	1	9820	964,44	954,12
	2	9720	951,64	
	3	9650	946,26	
RCA - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	1	9880	974,92	985,34
	2	10100	993,50	
	3	10040	987,59	

Fuente: Los autores

Al igual que en los especímenes secos, se observa al disminuir la temperatura de fabricación con la adición del aditivo HUSIL, las mezclas presentan un incremento en la resistencia a la tensión de los especímenes sumergidos. De igual manera, las mezclas modificadas con ACR aumentaron la resistencia a la tensión de los especímenes.

5.3.1.3 Potencial daño por humedad

La Tabla 23 se presenta un resumen de los resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las cuatro mezclas estudiadas en condición seca y condición húmeda.

Tabla 23. Resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las cuatro mezclas estudiadas en condición seca y condición húmeda.

Tipo de mezcla MDC-19	CA (%)	Resistencia Condición seca (TID) (kPa)	Resistencia condición húmeda (TIS) (kPa)	Relación (TIS/TID) - (%)
CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	5	986,16	914,97	92,78%
CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	5	1002,54	949,10	94,67%
RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	5,5	1002,26	954,12	95,20%
RCA - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	5,5	1025,40	985,34	96,09%

Fuente: Los autores

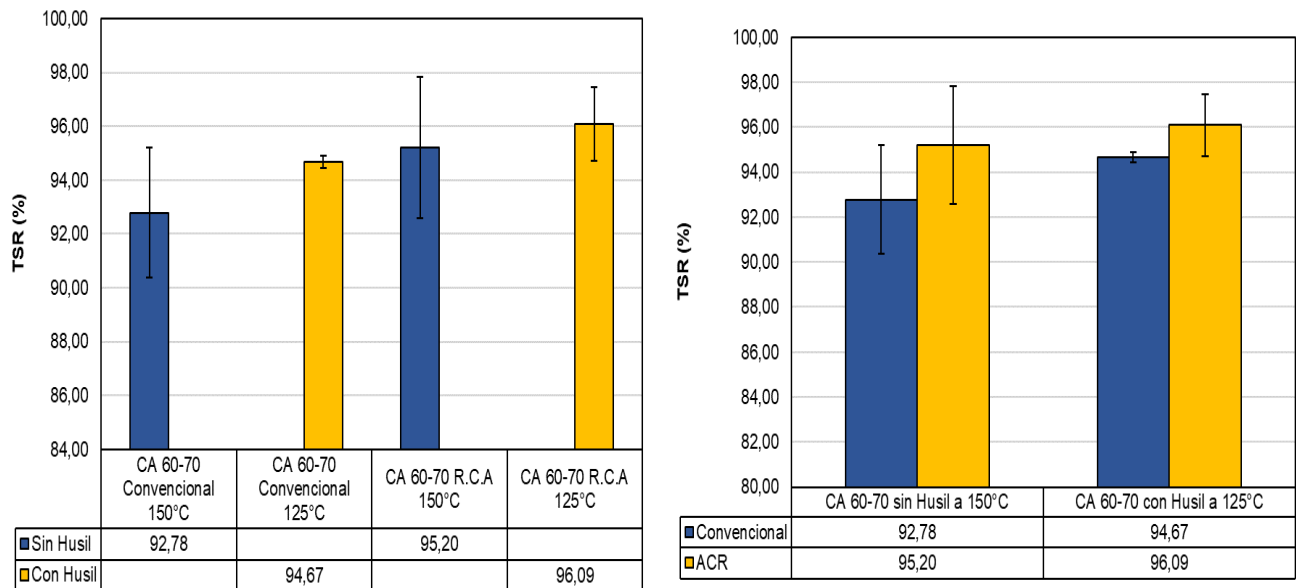


Figura 25. Resultados ensayo Tracción Indirecta.

Fuente: Los autores

Por lo anterior, se evidencia que, al reducir la temperatura de fabricación, junto con la adición del aditivo HUSIL, las mezclas aumentaron la relación de resistencia a la tensión. De igual manera, las mezclas modificadas con el ACR presentan el mismo comportamiento (Aumento de la relación de resistencia a la tensión).

En las mezclas convencionales, a 150°C (sin Husil), el TSR es de 92.78%, mientras que a 125°C con Husil, el TSR aumenta a 94.67%. Esto indica que el uso de Husil en mezclas convencionales a menor temperatura mejora el parámetro TSR, mostrando un mejor desempeño en términos de resistencia a la tensión.

En cuanto a las mezclas con agregados ACR, a 150°C (sin Husil), el TSR es de 95.20%, y a 125°C con Husil, el TSR incrementa a 96.09%. Por lo tanto, el aditivo Husil también mejora el parámetro TSR en las mezclas con agregados ACR a menor temperatura.

Al comparar las mezclas convencionales y ACR, se puede observar que las mezclas ACR presentan un TSR más alto en las condiciones analizadas. Esto indica que las mezclas con

agregados ACR podrían tener un mejor desempeño en términos de relación de resistencia a la tensión.

5.3.2 Análisis estadístico de la Varianza ANOVA ensayo Tracción Indirecta

Como se puede apreciar en la tabla 24, todas las mezclas dieron parecidas, esto quiere decir que no existe diferencias estadísticamente hablando entre sí, lo que genera que todas las mezclas tienen un comportamiento similar frente al daño por humedad. En conclusión, las mezclas estudiadas dan una alta capacidad de resistencia a la humedad y son menos susceptibles a la descomposición o desgaste provocado por la presencia de agua.

Tabla 24. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Tracción Indirecta.

ANÁLISIS DE VARIANZA VARIABLE DAÑO POR HUMEDAD						
<i>Por criterio</i>	<i>Mezcla 1</i>	<i>Mezcla 2</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Análisis ANOVA</i>
Por el Aditivo	CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	1,78	0,25	7,71	Se acepta la hipótesis
	RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	RCA - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	0,26	0,64	7,71	Se acepta la hipótesis
Por el Material	CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	1,40	0,30	7,71	Se acepta la hipótesis
	CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	RCA - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	3,20	0,15	7,71	Se acepta la hipótesis

Fuente: Los autores

Por lo anterior, las muestras que tuvieron mayor probabilidad fueron las mezclas modificadas con ACR con y sin aditivo HUSIL con un 0.64, esto significa que hay un 64% de probabilidad de obtener una F calculada igual o mayor que la F crítica bajo la hipótesis nula. En otras palabras,

si la probabilidad es 0.64, es más probable que la diferencia observada entre los grupos se deba al azar y no a una diferencia real en las medias poblacionales.

En el contexto de ANOVA, es común establecer un nivel de significancia como 0,05 (5%) para determinar la hipótesis nula. Si la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significación, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que no hay diferencia significativa entre los grupos.

Por lo tanto, una probabilidad de 0,64 indica que no hay pruebas suficientes para rechazar la hipótesis nula y sugiere que la diferencia observada entre los grupos se debe al azar.

5.3.3 Análisis De Resultados Obtenidos Del Ensayo Por Desgaste De Cántabro

Se realizó el análisis de los resultados determinados en el ensayo por desgaste de Cántabro para las mezclas convencionales y modificadas con el fin de determinar su comportamiento mecánico.

Con este ensayo se logró determinar la resistencia al desgaste de los agregados a la abrasión y al desgaste producido por las cargas vehiculares para las cuatro mezclas asfálticas estudiadas. En la figura 26 se puede observar que el aditivo HUSIL y la reducción de temperatura en 25°C mejora la resistencia a la abrasión y al desgaste, toda vez que en comparación con las mezclas sin el aditivo estas resultan tener mayor deterioro. Así mismo, se aprecia que la mezcla convencional fabricada a 125°C con el aditivo HUSIL es la que menor desgaste tiene, siendo esta la más indicada en cuanto a mayor resistencia y desgaste. Por lo que esta mezcla podría ser beneficiosa en términos de seguridad y durabilidad de la mezcla. En consecuencia, un bajo desgaste a la abrasión puede dar un indicio de que la mezcla pueda ser de alta calidad y adecuada para su aplicación, sin dejar de lado que no solo se debe analizar este resultado sino otras variables de la mezcla que puedan garantizar la calidad del pavimento.

Por otro lado, las mezclas con ACR tienen mayor desgaste a la abrasión, esto debido a que los ACR a veces tienen mayor abrasión y una menor resistencia a la fractura que los materiales convencionales utilizados en la fabricación de las mezclas asfálticas. Por lo que estas mezclas con ACR podría tener un mayor índice de desgaste por cántabro que las mezclas convencionales. No obstante, esto dependerá en gran medida de la calidad del agregado, el porcentaje sustituido de material granular por el ACR y la técnica utilizada en la mezcla entre otros factores.

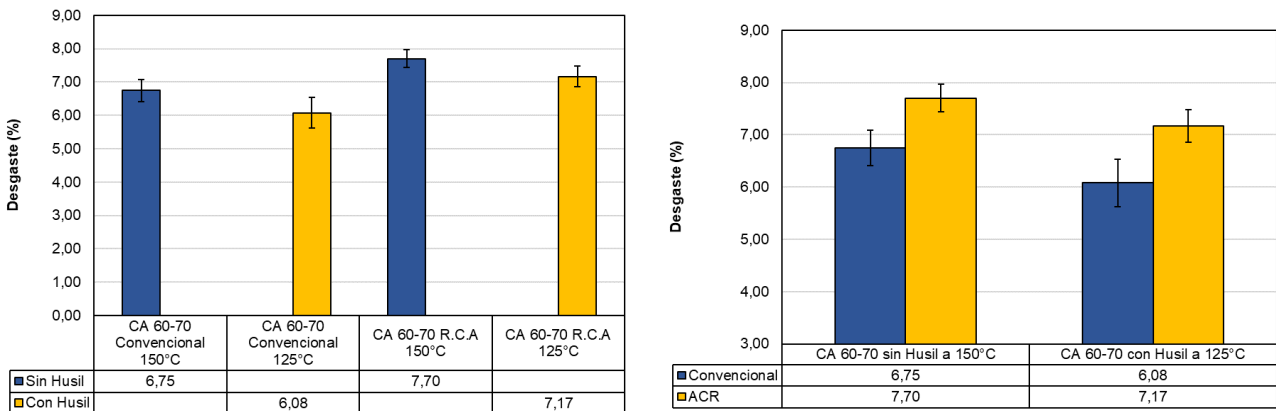


Figura 26. Resultados ensayo Desgaste por Cántabro.

Fuente: Los autores

5.3.4 Análisis estadístico de la Varianza ANOVA ensayo Desgaste por Cántabro

Como se puede evidenciar en la tabla 25, las mezclas convencionales y modificadas con y sin el aditivo dieron similares, esto significa que el aditivo independientemente de la temperatura y el material utilizado, hacen que las mezclas tengan un comportamiento estadísticamente hablando similar, lo que genera que no existan diferencias entre estas. Por el contrario, cuando se compara las mezclas estadísticamente por medio del material ACR y AN, existen diferencias las cuales concluyen que estas mezclas no tienen comportamientos similares entre sí, lo que implica que los materiales hacen que estas tengan un comportamiento diferente en este ensayo.

Tabla 25. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Desgaste por Cántabro.

ANÁLISIS DE VARIANZA VARIABLE DESGASTE POR CANTABRO						
<i>Por criterio</i>	<i>Mezcla 1</i>	<i>Mezcla 2</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Análisis ANOVA</i>
Por el Aditivo	CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	4,20	0,11	7,71	Se acepta la hipótesis
	ACR - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	ACR - 5.5% (125°C; Con HUSIL)	5,12	0,09	7,71	Se acepta la hipótesis

Fuente: Los autores

En conclusión, según la tabla 25, las mezclas convencionales y modificadas comparadas con el aditivo dieron similares, aunque con probabilidades de muestras no significativas al límite, toda vez que, si bien las probabilidades son mayores al nivel de significancia del 5%, estas probabilidades calculadas por el método ANOVA son del 11% y 9%, las cuales son muy cercanas al nivel de significancia. Aun así, estadísticamente no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

5.3.5 Análisis de resultados obtenidos del ensayo Modulo Resiliente

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio realizado durante el ensayo de Módulo Resiliente a las diferentes mezclas analizadas.

En la Figura 27 se observa que, al disminuir la temperatura de mezcla a 125°C, emplear el aditivo y sustituir la fracción gruesa del agregado natural por ACR en 21% (reemplazo del tamiz de 3/4" y 1/2"), la mezcla experimenta, con respecto a la convencional, un incremento en rigidez bajo carga cíclica para frecuencias de 2,5 Hz, 5 Hz y 10 Hz, lo que indica que la temperatura y el aditivo ayudan a que la mezcla asfáltica independientemente del material utilizado tenga mayor rigidez y resistencia a deformaciones bajo cargas repetitivas. Esto significa que la mezcla asfáltica será capaz de soportar las cargas cíclicas y recuperar su forma original después de la carga.

Así mismo, la mezcla fabricada a 150°C con ACR y sin el aditivo hace que se reduzca el módulo resiliente, esto debido a que los ACR tienen una mayor porosidad y una menor densidad que los agregados naturales. Esto puede resultar en un mayor contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, lo que contribuye a una disminución del módulo resiliente. De igual manera, el ACR puede tener una menor adherencia con el asfalto si se compara con el agregado pétreo, esto podría deberse a la presencia de mortero residual o la presencia de aditivos en el hormigón reciclado.

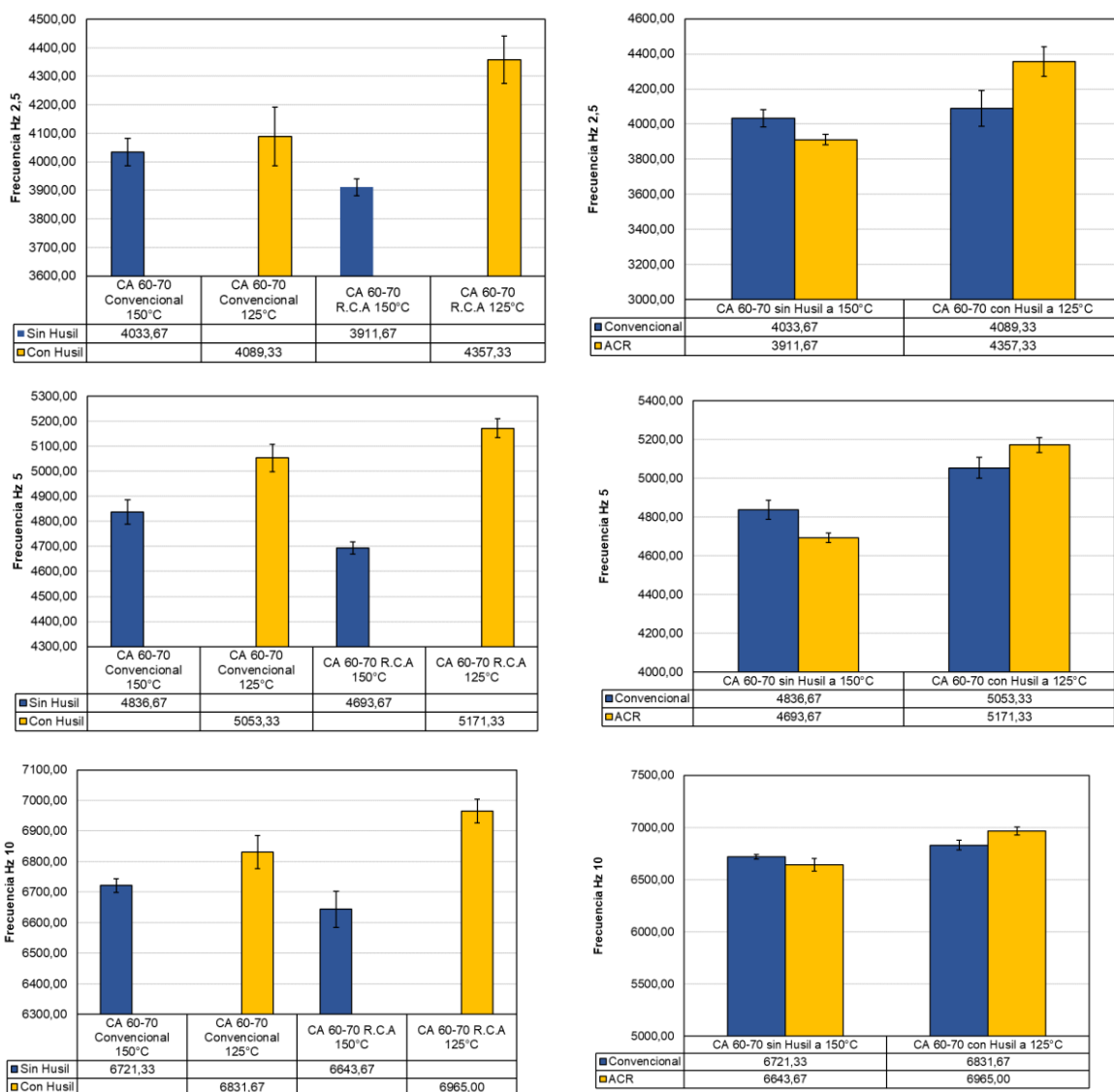


Figura 27. Resultados ensayo Módulo resiliente Frecuencia 2.5Hz, 5 Hz y 10 Hz.

Fuente: Los autores

5.3.6 Análisis estadístico de la Varianza ANOVA ensayo Modulo Resiliente

Como se puede observar en la tabla 26, se deduce las siguientes consideraciones:

- ✓ El aditivo HUSIL ayuda a que la mezcla convencional independientemente de la temperatura de fabricación no tenga variación ni cambios significativos en su comportamiento a una frecuencia de 2,5 Hz, lo que significa que las propiedades del AN junto con el aditivo ayudan a estabilizar la mezcla ya sea fabricada a 150°C o a 125°C.
- ✓ A una frecuencia de 10 Hz la mezcla se comporta de manera similar independientemente del material utilizado, lo que quiere decir que las mezclas tienen rigideces parecidas y su capacidad para resistir deformaciones bajo cargas repetidas son similares, ya sea si se utiliza agregado naturales o ACR

Tabla 26. Análisis Estadístico ANOVA ensayo Modulo Resiliente

ANÁLISIS DE VARIANZA ENSAYO MODULO RESILIENTE							
<i>Frecuencia</i>	<i>Por criterio</i>	<i>Mezcla 1</i>	<i>Mezcla 2</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	<i>Análisis ANOVA</i>
2,5 Hz	Por el Aditivo	CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	CONVENCIONAL - 5.0% (125°C; Con HUSIL)	0,72	0,44	7,71	Se acepta la hipótesis
10 Hz	Por el Material	CONVENCIONAL - 5.0% (150°C; Sin HUSIL)	RCA - 5.5% (150°C; Sin HUSIL)	4,51	0,10	7,71	Se acepta la hipótesis

Fuente: Los autores

En consecuencia, según la tabla 26, las mezclas convencional a 150°C sin HUSIL y la convencional a 125°C con HUSIL tienen una alta similitud, ya que la probabilidad es del 44%, esto significa que este porcentaje es mucho mayor al nivel de significancia del 5%, asimismo, en un nivel más bajo de probabilidad pero siendo aun mayor que el nivel de significancia, las mezclas convencional y modificada a 150°C sin HUSIL son estadísticamente similares, por lo que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

6. CONCLUSIONES

✓ El aditivo HUSIL ha demostrado ser muy efectivo cuando se incorpora en una proporción del 1% en relación a la masa del asfalto, permitiendo con esto, que se reduzca el volumen de vacíos con aire de las diferentes mezclas estudiadas y hace que incremente la rigidez del asfalto.

✓ Los ACR reducen la resistencia a la relación estabilidad/flujo, por el contrario, el aditivo HUSIL aumenta la resistencia a la carga monotónica, por lo tanto, el aditivo Husil aumenta la resistencia a las cargas monotónicas y la rigidez de la mezcla.

✓ Con el aditivo se logró, disminuir la temperatura de fabricación de las mezclas en 25°C y la respuesta al desempeño de la mezcla fue mejor, debido a que se obtuvo un material con mayor resistencia a la tracción indirecta y al daño por humedad (en comparación con la mezcla de control) para sustitución de la fracción gruesa del agregado natural por ACR. Por lo anterior, las mezclas con la adición del aditivo Husil tienen mayor durabilidad y resistencia al agua que las mezclas convencionales y modificadas a mayor temperatura.

✓ El aditivo HUSIL y la reducción de temperatura de fabricación 25°C menos disminuyó el desgaste por cántabro. Por el contrario, los ACR incrementan en las mezclas asfálticas dichos desgastes lo que implica que las mezclas con este material reciclado se desgastan más que las mezclas convencionales, lo que conlleva en una menor durabilidad del pavimento.

✓ Al reducir la temperatura a 125°C y aplicarle el aditivo HUSIL, las mezclas presentaron una mayor rigidez bajo carga cíclica. Por otro lado, la mezcla con ACR sin aditivo disminuyó su módulo resiliente, esto al ser más porosas; sin embargo, al ser mezclada y fabricada con el aditivo HUSIL a 125°C esta mezcla aumentó su rigidez en comparación con la mezcla convencional producida a la misma temperatura.

✓ El aditivo logró que se fabricaran mezclas asfálticas tibias 25°C menos y la respuesta a su desempeño en todos los ensayos fueron igual o superior a las mezclas convencionales fabricadas a 150°C.

✓ Las mezclas asfálticas tibias y fabricadas con el aditivo Husil demostraron tener un comportamiento adecuado en cuanto a la resistencia bajo cargas cíclicas y modulo resiliente, lo que genera que puedan ser utilizadas en la producción de asfalto en las plantas. Conllevando a una mejora en las emisiones de gases y en el impacto al medio ambiente que generan producir mezclas tradicionales a altas temperaturas.

✓ Los resultados de las pruebas realizadas en diversas mezclas asfálticas muestran diferencias notables en aspectos clave como estabilidad, relación E/F, flujo, contenido de vacíos y VFA. Al examinar estos resultados y realizar un análisis estadístico ANOVA más específico, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La incorporación de ACR y HUSIL en la producción de mezclas asfálticas tibias mejora significativamente su estabilidad y relación E/F. El ANOVA indica que estas diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), lo que sugiere una mayor resistencia ante cargas y deformaciones sin desintegrarse.
- Las mezclas que incluyen el aditivo HUSIL presentan un menor contenido de vacíos en comparación con aquellas sin dicho aditivo, lo que se traduce en una mayor durabilidad. El análisis ANOVA confirma que esta diferencia es estadísticamente significativa ($p < 0.05$).
- Las mezclas con ACR poseen un mayor porcentaje de vacíos en los agregados pétreos (AP) respecto a las mezclas convencionales. El ANOVA también muestra que esta diferencia es estadísticamente significativa ($p < 0.05$).
- Las mezclas con ACR en comparación con las mezclas convencionales son estadísticamente significativas, por el contrario, si comparamos las mezclas con la adición del aditivo Husil estas dan muy similares independientemente del material utilizado.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un análisis reológico detallado de las propiedades del asfalto modificado con el aditivo, con el objetivo de evaluar parámetros como la resistencia al envejecimiento, la resistencia al agrietamiento debido a la carga y la temperatura, así como la resistencia al ahuellamiento.
- ✓ Realizar estudios de impacto ambiental que evalúen el efecto del uso del aditivo HUSIL y de los ACR en la fabricación de mezclas asfálticas (emisión de gases, uso de materiales producto de desecho y consumo de energía, entre otros).
- ✓ Es necesario llevar a cabo una etapa de caracterización química y mineralógica de las mezclas modificadas sustituyendo el 21% del agregado natural por ACR y el aditivo HUSIL, con el objetivo de evaluar cómo dicha composición afecta a las propiedades medidas en las mezclas asfálticas.
- ✓ Desarrollar metodologías de diseño y construcción específicas para mezclas asfálticas tibias que contengan ACR y HUSIL, con el fin de garantizar la correcta implementación y rendimiento a lo largo de su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldia Mayor de Bogotá D.C. (29 de 12 de 2015). Decreto 586 de 2015. Bogotá, Colombia.
- Anantha Rama, V., & Lokeshwari, M. (2010). Management of construction and demolition waste. *Journal of Environmental Research and Development*, 51(1), 1-9.
- Arzayus, C., & Carrillo, D. (2016). Evaluación De La Resistencia Bajo Carga Monotónica De Una Mezcla Asfáltica Tibia Modificada Con Husil Y Un Desecho De Polietileno De Baja Densidad (PEBD). Bogotá.
- Bastidas Martinez, J. G., Reyes Lizcano, F. A., & Rondon Quintana, H. A. (2023). Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review.
- Bastidas Martínez, J. G., Rondón Quintana, H. A., Contreras Zartha, L., Forero Castaño, S., & Rojas Roza, L. (2021). "Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75-84.
- Bastidas, J., Reyes, F., & Rondón, H. (2022). Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures. *Journal of traffic and transportation engineering (english edition)*, 9(5), 725-741.
- Biro, S. G. (2009). Midrange temperature rheological properties of warm asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(7).
- Bonaquist, R. (2011). Mix design practices for warm mix asphalt. NCHRP Report 691.
- Cabrera, F., Gómez, S. J., & Almaral, S. (2017). Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a. *Científica ingeniería y desarrollo*, 35(1).
- Cardoso, R. J., & Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review", *Waste management*, 49, 131-145.
- CTU. (2019). CTU. Recuperado el 5 de Marzo de 2020, de <http://ctu.com.co/mezcla-asfaltica-mdc-19/>

- Daquana, S., Yang, T., Guoqiang, S., Qi, P., Fan, Y., & Xingyi, Z. (2018). Performance evaluation of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 422-428.
- EddyHrbs. (5 de Junio de 2011). *Apuntes Ingeniería Civil* . Recuperado el 24 de Marzo de 2020, de <https://www.ingenierocivilinfo.com/2011/06/agregados-petresos.html>
- El-Hakim, R., Epps, J., Epps Martin, A., & Arámbula-Mercado, E. (2021). Laboratory and field investigation of moisture susceptibility of hot and warm mix asphalts. *International journal of pavement engineering*, 22(11), 1389–1398.
- Elmagarhe, A., Lu, Q., Alharthai, M., Alamri, M., & Elnihum, A. (2022). Performance of Porous Asphalt Mixtures Containing Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash. *Materials*, 1-16.
- Fatta, D; Papadopoulos, A, Avramikos, E; Sgourou, K. Moustakas, F. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece-an existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling*, 81-91.
- Forigua, E. j., & Orjuela, E. P. (2014). Bogotá.
- Hearon, A. y. (2008). Laboratory evaluation of warm asphalt properties and performance. Reston: Airfield and Highway Pavements.
- Huang, Y. (2004). Pavement design and analysis. Second Edi, (2 ed.). Pearson Education, Inc.
- Instituto Nacional de Vías. (06 de 05 de 2022). Normas de ensayo de materiales para carreteras. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- Koenders, B., Stoker, D., Bowen, C., De Groot, P., & Larsen, O. D. (2000). Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. Barcelona: Eurasphalt & Eurobitume.
- Materu, Salvatory; Shalaby, Ahmed; Ghazy, Ahmed. (2021). Effects of dosage of warm mix asphalt additive on stiffness, cracking susceptibility, and moisture sensitivity characteristics. *Canadian Science publishing*, 48, 1295-1303.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (28 de 02 de 2017). Resolución Numero 0472 de 2017. Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (23 de 11 de 2021). Resolución Numero 1257 de 2021. Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio del Medio Ambiente Español. (2001). BOE 166 Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001–2006. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente.
- Ortegón, E., Pacheco, J. F., & Prieto, A. (2015). Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Santiago de Chile, Chile.
- Pacheco, C. A., Rondón, H. A., & Sánchez, E. (s.f). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. Ingeniería y Desarrollo Universidad del Norte, 35(2), 552.
- Rincon Villamil, J. S., & Sanabria Reina, Y. L. (2017). Modificación del concreto asfáltico (MDC-19) con la sustitución del llenante mineral por calamina y la incorporación del aditivo “husil”. Colombia.
- Rodriguez Rojas, N., & Sanchez Morales, J. J. (2016). Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo criterios técnicos y medioambientales. Colombia.
- Rondon Quintana, H. A., Fernandez Gómez, W. D., & Zafra Mejía, C. A. (2016). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia usando un aditivo Químico para espumar el asfalto. (78), 129-138.
- Rondón Quintana, H. A., León Vergara, O. I., & Fernández Gómez, W. D. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto. Ingeniería y Desarrollo, 35(1), 152-173.
- Rondon, H. A., León, O., & Fernández, W. (2017). Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant. Ingeniería y desarrollo, 35, 154.
- Rondon, H., & Reyes, F. (2015). Pavimentos materiales, construcción y diseño. Ecoe Ediciones.

- Rondón, H., Fernández, W. D., & Zafra, C. (July -december de 2017). Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder. *Revista de la facultad de ingeniería Universidad de Antioquia*(78), 129-138.
- Rondón, H., León, & Fernández. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto. *Ingenieria y Desarrollo*, 35(1), 152-173.
- Rondón Quintana, L. V., & Gómez, F. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto. *Journal of traffic and transportation engineering (english edition)*, 35(1), 8.
- Rondón, Hugo; Fernández, Wilmar; Castro, William. (2007). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente con un residuo de polietileno de baja densidad.
- Rughooputh, Reshma; Beeharry, Rahul; Qasrawi, Hisham. (2020). Warm mix asphalt for better sustainability under tropical climate. *International journal of pavement engineering*, 21(1), 1-8.
- Ruiz, I. F. (2018). Evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de una mezcla asfáltica tibia fabricada con sustituciones parciales de agregado pétreo por escoria de alto horno. Colombia.
- Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldia Mayor de Bogotá. (26 de 09 de 2012). Resolución Numero 1115 de 2012. Bogotá, Colombia.
- Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldia Mayor de Bogotá. (30 de 05 de 2013). Resolución Numero 715 de 2013. Bogotá, Colombia.
- Secretaria Distrital de Ambiente Alcaldia Mayor de Bogotá. (09 de 07 de 2015). Resolución 00932 de 2015. Bogotá, Colombia.
- Shi, J., Fan, W., Wang, T., Zhao, P., & Che, F. (2020). Evaluation of the Physical Performance and Working Mechanism of Asphalt Containing a Surfactant Warm Mix Additive. *Hindawi*, 14.

- Soto, J. Y. (2004). Maintenance of porous wearing courses by using warmopen- graded mixes with polymer modified medium setting emulsions. Vienna: Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress, .
- Vaitkus, A. Č. (2009). Analysis and Evaluation of Possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4(2), 80-86.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A and Perveneckas, Z. (2009). Analysis and Evaluation of Possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4(2), 72-76.
- Xiao, F., Zhao, W., & Gandhi, T. Y. (2010). Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures.
- Xiong Xu, Yi Luo, Anand Sreeram, Qiaoyun Wu, Guofu Chen, Shukai Cheng, y otros. (2022). Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review. Journal of Cleaner Production, 344(130893).
- Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R., & Nakhaei, M. (2019). Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt. International journal of pavement engineering, 20(7), 775–781.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo A MARSHALL (INV. E-748-13)

El ensayo descrito tiene como objetivo principal medir la resistencia y la composición de una mezcla de concreto asfáltico. La resistencia se mide mediante los parámetros de estabilidad y flujo, mientras que la composición se evalúa a través de parámetros como el porcentaje de vacíos, el contenido de asfalto y agregados, entre otros. Además, este ensayo se utiliza para diseñar mezclas densas y en caliente, determinando el contenido óptimo de asfalto.







Anexo B Tracción indirecta (INV. E-725-13).

Este ensayo se centra en evaluar la resistencia a la tracción de una briqueta a una temperatura de 25 °C cuando se somete a una carga monotónica en compresión. Para lograr que la muestra falle por tracción, se aplica la carga de acuerdo con lo mostrado en la Figura. Además, el ensayo se utiliza para evaluar el efecto del agua en la resistencia a la tracción indirecta cuando las briquetas se sumergen en agua.



Anexo C Desgaste cantabro (INV. E-760-13).

Este parámetro se utiliza para medir la rigidez de las mezclas asfálticas cuando se someten a cargas cíclicas con períodos de receso entre cada carga, simulando las condiciones de un pavimento.



Anexo D Módulo resiliente (INV. E-749-13)

Este parámetro se utiliza para medir la rigidez de las mezclas asfálticas cuando se someten a cargas cíclicas con períodos de receso entre cada carga, simulando las condiciones de un pavimento.



Anexo E Memorias de Cálculo y Ensayo de Laboratorio