

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Rudy Rangel Tamayo		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Wbeimar Alfonso Montagut Vargas		
CODIRECTOR (si aplica)	N/A		
TÍTULO DE LA TESIS	Diseño de mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 para su evaluación y comparación frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 bajo lineamientos norma INV-450, para climas cálidos implementados en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, del Consorcio Infraestructura Vial en Aguachica, Cesar		
TITULO EN INGLES			
RESUMEN (70 palabras)			
El presente trabajo diseña y compara las mezclas asfálticas msc-19 (semidensa, con cemento asfáltico modificado tipo iii) y mdc-19 (densa), bajo la norma inv-450, para climas cálidos, en el proyecto vial cesar - guajira. mediante el método marshall y ensayos de desempeño avanzado, se determinó que la msc-19 presenta mayor estabilidad, densidad y resistencia al ahuellamiento, por lo que se recomienda su implementación en el proyecto.			
RESUMEN EN INGLES			
This study designs and compares two asphalt mixtures—MSC-19 (semi-dense, using Type III modified asphalt cement) and MDC-19 (dense)—in accordance with the INV-450 standard, for use in hot climates on the Cesar-Guajira road project. Through the Marshall method and advanced performance testing, it was determined that the MSC-19 mixture exhibits superior stability, density, and rutting resistance; therefore, its implementation in the project is recommended.			
PALABRAS CLAVES	Diseño de mezcla asfáltica, Asfalto, MDC-19, MDC-25, comparación		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Asphalt mix design, Asphalt, MDC-19, MDC-25, comparison		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 132	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 19	CD-ROM: 0

Diseño de mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 para su evaluación y comparación frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 bajo lineamientos norma INV-450, para climas cálidos implementados en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, del Consorcio Infraestructura Vial en Aguachica, Cesar

Rudy Rangel Tamayo- 0172615

Proyecto del trabajo de grado

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Esp. Wbeimar Alfonso Montagut Vargas

04 de agosto de 2026

Índice

	Pagina
1. Diseño de mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 para su evaluación y comparación frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 bajo lineamientos norma INV-450, para climas cálidos implementados en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del Pacto Funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, del consorcio infraestructura vial en Aguachica, Cesar.....	10
1.1. Planteamiento del Problema	10
1.2. Formulación del Problema.....	11
1.3. Objetivos de Investigación.....	12
1.3.1. Objetivo General.....	12
1.3.2. Objetivos Específicos.....	12
1.4. Justificación	13
1.5. Delimitaciones	16
1.5.1. Delimitación Geográfica.....	16
1.5.2. Delimitación Temporal	20
1.5.3. Delimitación Conceptual	20
1.5.4. Delimitación Operativa.....	21
2. Marco referencial	23
2.1. Marco Histórico	23

2.2.	Marco Contextual.....	25
2.3.	Marco Conceptual.....	28
2.4.	Marco Teórico.....	36
2.5.	Marco Legal.....	37
3.	Diseño metodológico	41
3.1.	Tipo de investigación.....	41
3.2.	Población y Muestra	43
3.2.1.	Población.....	43
3.2.2.	Muestra	43
4.	Resultados: Diseño de mezcla asfáltica MSC-19	44
4.1.	Materiales.....	44
4.2.	Caracterización de los agregados combinados	45
4.3.	Elaboración de briquetas y ensayo Marshall	46
4.4.	Determinación del contenido óptimo de asfalto	47
4.5.	Resultados de la caracterización de los agregados combinados	48
4.6.	Gravedades específicas	48
4.7.	Empaquetamiento Bailey	49
4.8.	Curvas de Diseño Marshall.....	50
4.9.	Contenido óptimo de asfalto y parámetros de la fórmula de trabajo	53

4.10.	Ensayos de desempeño de la mezcla optima	54
4.10.1.	Susceptibilidad al agua (Tracción indirecta, INV E-725).....	55
4.10.2.	Resistencia a la deformación plástica (Rueda de Hamburgo, AASHTO T 324)	55
4.10.3.	Módulo dinámico (AASHTO T342).....	57
4.10.4.	Ley de fatiga (Flexión dinámica en viga INV E-748)	57
5.	Comparación de Resultados de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19	58
5.1.	Caracterización de materiales	58
5.2.	Cemento asfáltico.....	61
5.3.	Análisis Granulométrico	63
5.4.	Empaquetamiento Bailey	66
5.5.	Diseño Marshall	70
5.5.1.	Análisis comparativo por parámetros de diseño	78
5.6.	Ensayos de desempeño	82
5.6.1.	TSR-Resistencia conservada (%).....	83
5.6.2.	Resistencia a la deformación plástica- Rueda de Hamburgo.....	84
5.6.3.	Modulo dinámico	84
5.6.4.	Leyes de fatiga bajo flexión dinámica	85
6.	Análisis del desempeño, los costos y la adaptabilidad de las mezclas MSC-19 y MDC-19	85

6.1.	Análisis de desempeño de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19	85
6.2.	Análisis comparativo de costos unitarios de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19	86
6.3.	Análisis de la adaptabilidad de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19	93
7.	Retos presentados durante la ejecución del proyecto	94
8.	Conclusiones	95
9.	Recomendaciones	96
	Referencias.....	97
	Apéndices.....	104

Lista de tablas

Tabla 1 Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua para NT3	21
Tabla 2 Marco conceptual Colombia.....	37
Tabla 3 Caracterización de los agregados combinados	48
Tabla 4 Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica MSC-19	49
Tabla 5 Empaquetamiento Bailey	49
Tabla 6 Resultados de Briquetas de acuerdo al porcentaje de asfalto para diseño Marshall.....	50
Tabla 7 Contenido óptimo de asfalto y criterios de aceptación	54
Tabla 8 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta	55
Tabla 9 Caracterización de materiales	59
Tabla 10 Características y propiedades físicas de cemento asfáltico	62
Tabla 11 Análisis granulométrico.....	63
Tabla 12 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua....	65
Tabla 13 Análisis empaquetamiento Bailey MSC-19.....	66
Tabla 14 Tamices de control para mezclas de gradación fina	67
Tabla 15 Porcentajes de pasa en nuevos tamices de control para mezclas finas	68
Tabla 16 Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall	71

Tabla 17 Cuadro Marshall MSC-19.....	72
Tabla 18 Cuadro Marshall MDC-19	76
Tabla 19 Análisis Comparativo parámetro de diseño	79
Tabla 20 Ensayos de desempeño MDC-19 Vs MSC-19.....	82
Tabla 21 Pruebas de fatiga.....	85
Tabla 22 Análisis de precios unitarios mezcla asfáltica MDC-19.....	87
Tabla 23 Análisis de precios unitarios mezcla asfáltica MSC-19.....	88
Tabla 24 Comparativo de costos y variaciones de costos APU.....	89

Lista de figuras

Figura 1 Tramo Aguachica- Buturama del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”	17
Figura 2 Tramo Morrison- Pita Limón del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”	18
Figura 3 Tramo La Ye Barranca de Lebrija del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”	19
Figura 4 Planta de Producción de Aguas Claras del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”	20
Figura 5 Caracterización de materiales mediante ensayo de granulometría	46
Figura 6 Elaboración de Briquetas y ensayo Marshall	47
Figura 7 Curvas Diseño Marshall Contenido de asfalto 5.5%	51
Figura 8 Gravedad especifica Bulk de la mezcla vs Contenido de asfalto	52
Figura 9 Curva de gravedad especifica máxima (RICE)	52
Figura 10 Estabilidad Marshall vs Contenido de asfalto	53
Figura 11 Flujo Marshall vs Contenido de asfalto	53
Figura 12 Resistencia a la deformación plástica-Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)	56
Figura 13 Curva maestra de módulo dinámico (AASHTO T342, Ts=21.1°C)	57
Figura 14 Ley de fatiga- Flexión dinámica en viga (INV E-784)	58

Figura 15 Curva de Análisis Granulométrico	64
Figura 16 Estabilidad Marshall MDC-19 Vs MSC-19	78
Figura 17 Comparativo de costos por capítulo por APU	89
Figura 18 Valor porcentual por Ítems APU MSC-19	89
Figura 19 Valor porcentual por Ítems APU MDC-19	90

1. Diseño de mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 para su evaluación y comparación frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 bajo lineamientos norma INV-450, para climas cálidos implementados en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del Pacto Funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, del consorcio infraestructura vial en Aguachica, Cesar

1.1. Planteamiento del Problema

En el municipio de Aguachica en el departamento del Cesar, el Consorcio Infraestructura Vial actualmente ejecuta el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar” y es financiado por la Gobernación del Cesar, cuyo objetivo es mejorar la infraestructura vial de la región; en este proyecto para la pavimentación se está utilizando la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19, dicha mezcla ha demostrado su eficacia en diversos proyectos viales (Galeano Franco, 2021). Sin embargo, al utilizar un solo tipo de mezcla podría limitar el alcance y la optimización del proyecto, específicamente en climas cálidos donde las características del material son esenciales para determinar la durabilidad y el rendimiento de las vías (Pérez Otálora & Polanía Andrade, 2021).

A pesar de que la mezcla asfáltica MDC-19 cumple con los estándares requeridos en el proyecto, su uso exclusivo limita la exploración de otras alternativas que también podrían ajustarse a las condiciones particulares de la región (Narváez Veloza, 2024). Esta limitación en la diversidad de materiales no solo podría afectar la eficiencia del proyecto, sino que este proyecto propone la evaluación y comparación, también restringe la posibilidad de optimizar costos y mejorar el desempeño de la infraestructura vial en climas cálidos (Trujillo Chavarro, 2022). La

falta de alternativas evaluadas en el proyecto actual evidencia una posible falta en el análisis de opciones de mezcla asfáltica para entornos específicos como el de Aguachica.

Entre las alternativas no exploradas, la mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 se presenta como una opción potencial, regulada bajo el Artículo INV-450/22 “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico)” de las Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, mencionado posteriormente como INV-450 que también abarca la mezcla asfáltica MDC-19. Sin embargo, hasta el momento no se ha realizado una evaluación técnica comparativa entre ambas mezclas en las condiciones específicas del proyecto en Aguachica. Esta falta de evaluación deja sin respuesta preguntas clave sobre la funcionalidad, los costos y la durabilidad de la mezcla MSC-19 en comparación con la mezcla asfáltica MDC-19, lo que genera incertidumbre acerca de si se está eligiendo el mejor material para las condiciones del proyecto (Pérez Otálora & Polanía Andrade, 2021).

En consecuencia, la ausencia de un estudio comparativo que considere las condiciones climáticas y de tráfico de la región crea una necesidad urgente de análisis técnico (Narváez Veloza, 2024). Sin este análisis, el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar” podría verse limitado en su capacidad para implementar la mejor solución disponible para las condiciones específicas de Aguachica, lo que podría afectar tanto el rendimiento a largo plazo de las vías como la eficiencia económica del proyecto.

1.2. Formulación del Problema

¿Cómo se puede diseñar y evaluar una mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 y compararla con la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19, adaptadas a climas cálidos, en el marco del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira,

en el departamento del Cesar” del Consorcio Infraestructura Vial en Aguachica, Cesar, con el fin de ampliar el catálogo de materiales de pavimentación que ofrece la empresa, considerando la creciente demanda de soluciones adecuadas para la infraestructura vial de la región?.

1.3. Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 para evaluarla y compararla frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 bajo lineamientos norma INV-450, para climas cálidos implementados en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar” del Consorcio Infraestructura Vial en Aguachica, Cesar.

1.3.2. Objetivos Específicos

Identificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales constitutivos disponibles y caracterizarlos, para su uso en mezclas asfálticas conforme a la normatividad vigente.

Diseñar la mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 siguiendo los métodos normativos y especificados asegurando el cumplimiento de la norma INV-450 para climas cálidos.

Valorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas semidensa tipo MSC-19 y densa tipo MDC-19 mediante pruebas de laboratorio, para compararlas entre sí.

Contrastar el desempeño, los costos y la adaptabilidad de las mezclas MSC-19 y MDC-19 al clima cálido, y proponer recomendaciones para su aplicación en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”.

1.4. Justificación

Este proyecto propone la evaluación y comparación de la mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19 frente a la mezcla asfáltica densa tipo MDC-19, reguladas por la norma INV-450, para su aplicación en climas cálidos como el del municipio de Aguachica, Cesar. La realización de este análisis es esencial para ampliar el catálogo de soluciones viales y seleccionar materiales más adaptados a las condiciones específicas de la región (Hernández Valencia, 2019). La mezcla MSC-19, con sus características únicas, presenta una alternativa que podría llegar a optimizar los costos y mejorar la durabilidad de las vías frente a las condiciones climáticas de la región (Berrío Alzate, 2017).

Este proyecto busca ofrecer una solución efectiva y rentable para pavimentar vías en zonas de climas cálidos; respondiendo a las necesidades identificadas en estos entornos. Al examinar ambos tipos de mezclas asfálticas, se obtendrá información que permitirá tomar decisiones técnicas y con mayor precisión (Fandiño Sánchez, Ramos Reyes, & Torres Latorre, 2014). La finalidad de este enfoque técnico es abordar los desafíos actuales del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, para así lograr mejorar la calidad de las obras viales de este tipo y aumentar la sostenibilidad del pavimento a largo plazo. La implementación de la mezcla MSC-19 podría llegar a ofrecer una opción más adecuada que pueda llegar a incluir una reducción de costos de producción y un aumento de la resistencia de las vías ante condiciones climáticas adversas tales como las presentes en clima cálido (Yela Jaramillo, 2022), garantizando su durabilidad y calidad.

Además, al ejecutar lo que se plantea en este proyecto se contribuirá significativamente al conocimiento técnico en la selección de materiales asfálticos para proyectos de infraestructura en climas cálidos como el caso de Aguachica y en toda la región de Cesar y más allá (Berrío Alzate,

2017). Al evaluar la viabilidad de la mezcla MSC-19, el Consorcio Infraestructura Vial no solo optimizará los recursos, sino que también ofrecerá soluciones más sostenibles y eficientes que pueden replicarse en otros proyectos viales de características similares tales como condiciones climáticas, niveles de tránsito NT3 (Hernández Valencia, 2019).

La presente investigación surge de la necesidad de desarrollar y validar una alternativa de mezcla asfáltica que, además de responder a las condiciones particulares de clima cálido del departamento del Cesar, pueda constituirse en una solución técnica para futuros proyectos de infraestructura vial. El diseño de la MSC-19 fue desarrollado durante la ejecución del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del Pacto Funcional Cesar–Guajira”, ejecutado por el Consorcio Infraestructura Vial en Aguachica, Cesar, con el propósito de generar un diseño técnicamente caracterizado y evaluado que pueda ser considerado como una alternativa de producto para futuros procesos de contratación y licitación, una vez finalizadas las obligaciones contractuales del proyecto. De esta manera, la investigación permite generar conocimiento técnico aplicable a nuevas obras viales, especialmente aquellas localizadas en condiciones climáticas cálidas y que requieran mezclas con adecuados niveles de desempeño, durabilidad y sostenibilidad.

Para realizar el diseño de una mezcla asfáltica es necesario realizar la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales constitutivos, esto es fundamental para garantizar que las soluciones propuestas cumplan con las exigencias normativas y las condiciones específicas para el clima cálido de Aguachica. En estudios previos ha destacado la importancia de ajustar las formulaciones de las mezclas asfálticas para los diseños teniendo en cuenta las características de los materiales locales, asegurando un desempeño óptimo bajo cargas y temperaturas elevadas (Bohórquez Soler & Quintero Serrato, 2020). En este sentido, el diseño

y la evaluación de la mezcla MSC-19 permitirá explorar alternativas que, además de cumplir con la norma INV-450, puedan adaptarse mejor a las condiciones de la región, proporcionando una opción que costos y rendimientos más eficientes en comparación con la mezcla MDC-19 que es la que se está produciendo actualmente para la pavimentación del proyecto.

Por otro lado, el valorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla MSC-19 en comparación con la MDC-19 mediante pruebas de laboratorio permitirá obtener datos críticos sobre la resistencia al desgaste y la estabilidad estructural de ambas mezclas asfálticas. Este análisis técnico contribuirá a la toma de decisiones sobre la mejor opción para el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, priorizando aquellas mezclas que demuestren mejores resultados, tales como mayor durabilidad y menor necesidad de mantenimiento (Guerra Vargas & Peña Ibáñez, 2021). De esta forma, se busca no solo reducir costos de mantenimiento a largo plazo, sino también mejorar la calidad de las infraestructuras viales, enfrentando los desafíos que las altas temperaturas y el tráfico intenso imponen sobre las vías en climas cálidos.

Al comparar el desempeño, los costos y la adaptabilidad de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19, servirá para proponer recomendaciones para ser implementadas en el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”. La realización de pruebas de desempeño y estudios de costos para seleccionar los materiales, con el fin no solo de que se optimicen el uso de recursos, sino que también permita encontrar de una opción más sostenible y resistente a las condiciones locales (Amaya Sandoval, 2022). Así, la adopción de una mezcla más favorable para climas cálidos no solo fortalecerá la infraestructura vial de Aguachica, además establecerá un precedente para futuras intervenciones en la región, presentando soluciones innovadoras y sustentables que

respondan a las necesidades específicas de los proyectos de infraestructura en zonas de climas cálidos.

Con base en lo anterior, se busca mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la durabilidad de las vías mediante la evaluación y posible adopción de una mezcla asfáltica más adecuada para climas cálidos. Esta investigación no solo será de gran relevancia para el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, sino que también tendrá impacto significativo en futuros proyectos de infraestructura vial en condiciones climáticas similares, aportando al crecimiento de la ingeniería vial en la región (Yela Jaramillo, 2022).

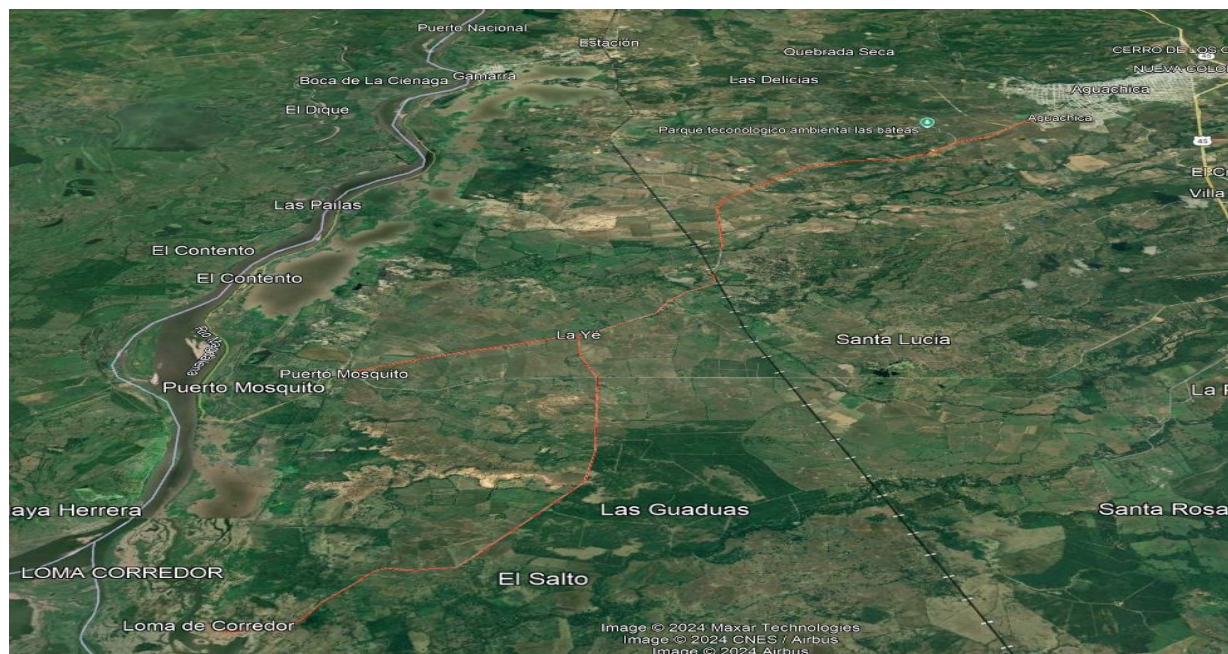
1.5. Delimitaciones

1.5.1. Delimitación Geográfica

Este proyecto se sitúa en el departamento del Cesar, concretamente en las vías terciarias, los tramos que comprende el proyecto son los tramos de Aguachica - Buturama con una longitud de 32,260 km (Figura 1), tramo Morrison- Pita Limón con 23,030 km (Figura 2) y el tramo La Ye Barranca de Lebrija (Figura 3) con 19,330 km. La planta de asfalto se encuentra en la Planta de Producción de Aguas Claras (Figura 4) que está ubicada en el Km 61 Ruta 45 45-14 de la vía Bucaramanga- Aguachica.

Figura 1

Tramo Aguachica- Buturama del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”

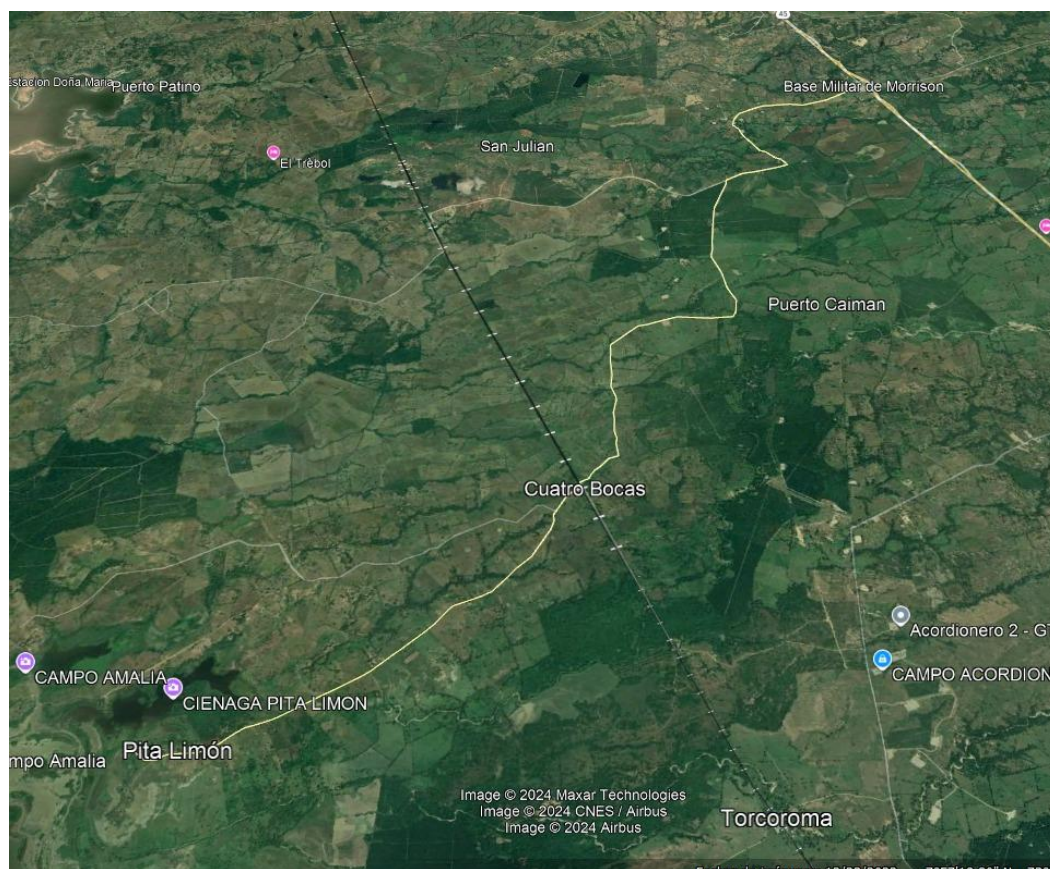


Nota. La línea roja corresponde al tramo de vía del proyecto.

Fuente: Google Earth 2024.

Figura 2

Tramo Morrison- Pita Limón del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”

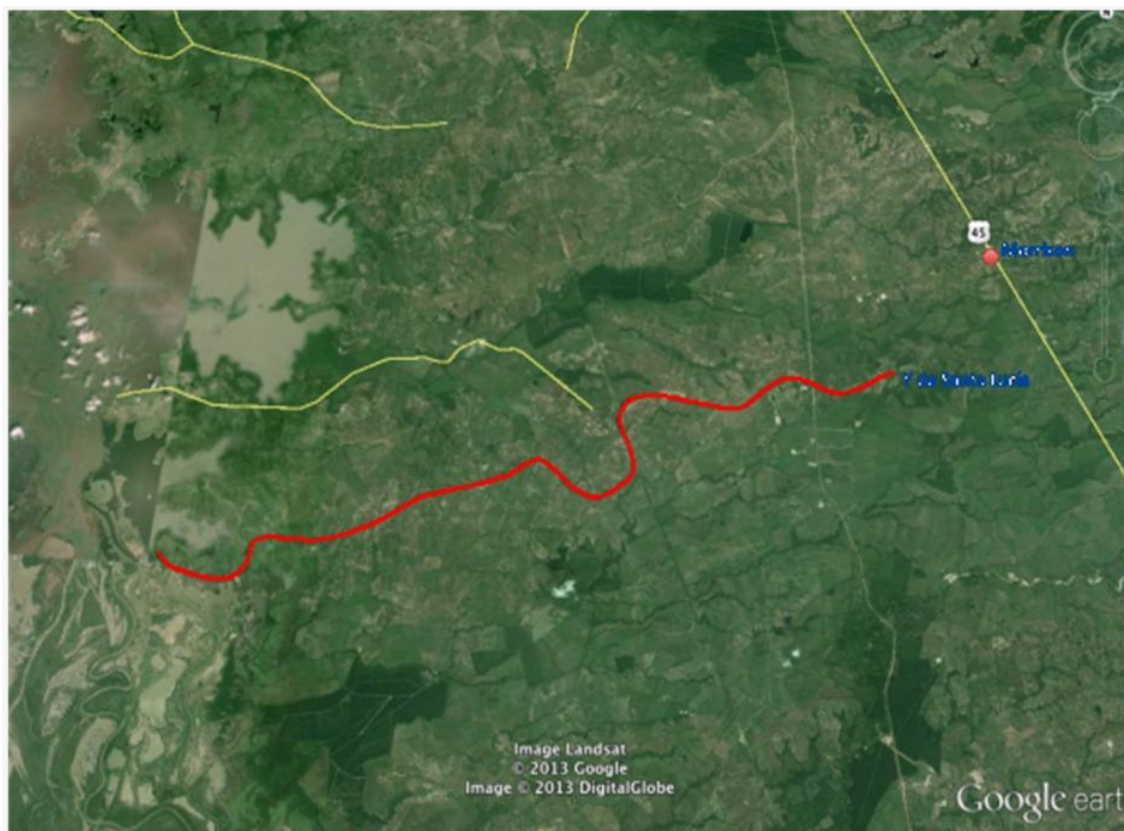


Nota. La línea amarilla corresponde al tramo de vía del proyecto.

Fuente: Google Earth 2024.

Figura 3

Tramo La Ye Barranca de Lebrija del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”



Nota. La línea roja corresponde al tramo de vía del proyecto.

Fuente: Google Earth 2013.

Figura 4

Planta de Producción de Aguas Claras del proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”



Nota. El polígono azul claro corresponde al área de la Planta de producción del proyecto.

Fuente: Google Earth 2024.

1.5.2. Delimitación Temporal

El proyecto plantea ejecutarse en un periodo de 4 meses a partir de la aprobación de la propuesta.

1.5.3. Delimitación Conceptual

El enfoque principal de este proyecto se basa en la diversificación del catálogo de materiales para pavimentación ofrecidos por el Consorcio Infraestructura Vial a sus clientes. El enfoque del proyecto será el diseño de la mezcla asfáltica semidensa MSC-19, la cual será

comparada con la mezcla asfáltica MCD-19, que es la única mezcla asfáltica que la empresa ofrece actualmente a sus clientes. Estas acciones permitirán al cliente disponer de múltiples opciones que se adapten a las necesidades específicas de cada proyecto.

1.5.4. Delimitación Operativa

Caracterización de materiales: Consiste en la identificación y clasificación de los agregados existentes en la zona de influencia, cumpliendo los procedimientos dados en la norma INVIAS 2022. Estos materiales a caracterizar serán los necesarios para diseñar una mezcla asfáltica para nivel de tránsito NT3 que es el que se presenta en el proyecto, esta etapa incluirá el muestreo y realización de pruebas físicas y mecánicas en laboratorio para asegurar que los agregados cumplan con los requisitos técnicos. A continuación, en la Tabla 1 se muestran los ensayos a realizarse en los materiales que componen la mezcla asfáltica.

Tabla 1

Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua para NT3

Características	Norma de ensayo	Nivel de tránsito
Dureza. Agregado grueso (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	E-218	25/35/5/7/7
- Capa de rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones		
-Capa de rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones		
Degradación por abrasión en el equipo Micro- Deval, máximo (%)	E-238	20/25/25
-Capa de: rodadura / intermedia / base		
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	45
Durabilidad (O)		

Características	Norma de ensayo	Nivel de tránsito
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18
Limpieza, agregado grueso (F)		
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)		
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50
Valor de azul de metileno, máximo (%)	E-235	10
Geometría de partículas, agregado grueso (F)		
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10
Caras fracturadas, mínimo (%)		
-Una cara: rodadura / intermedia / base	E-227	85/75/60/70/-
-Dos caras: rodadura / intermedia / base		/-
Geometría de partículas, agregado fino (F)		
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239	45/40/35
-Capa de: rodadura / intermedia / base		
Adhesividad (O)		
-Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757	
-Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel- Weber), índice mínimo	E-774	

Nota. Tomado de Tabla 450-2 Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (INVIA, 2022).

Diseño de la mezcla MSC-19: Utilizando los resultados de la caracterización, se procederá al diseño de la mezcla asfáltica semidensa tipo MSC-19. Se empleará el método estandarizado de diseño de mezclas asfálticas Método Marshall, así mismo el material bituminoso empleado será el cemento asfáltico modificado tipo III, realizando los ajustes necesarios en la dosificación para

lograr la mezcla óptima para la temperatura de la zona y el nivel de tránsito NT del proyecto, bajo los lineamientos de la norma INV-450.

Evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad: Se llevará a cabo un conjunto de pruebas de laboratorio para poder evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla MSC-19, siguiendo el protocolo establecido por la norma INV-450. Las pruebas incluirán:

- Resistencia a la deformación plástica: Ensayo de compresión diametral para determinar la resistencia a la deformación permanente.
- Resistencia a la fatiga: Se realizan ensayos en los que la mezcla se somete a ciclos de carga repetida, controlando tanto la temperatura como la humedad, para así evaluar su capacidad para resistir la formación de fisuras.

Comparación con la mezcla MDC-19: Se llevará a cabo un análisis comparativo entre las dos mezclas asfálticas la MSC-19 y la MDC-19, mediante los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y un análisis de costos, lo que permitirá identificar las ventajas y desventajas de cada mezcla en cuanto a funcionalidad, costos y durabilidad para su uso en zonas de climas cálidos.

2. Marco referencial

2.1. Marco Histórico

La historia de las mezclas asfálticas se remonta al auge de las carreteras modernas durante el siglo XX, cuando el crecimiento de las redes de transporte impulsó la necesidad de materiales más especializados. En sus inicios, los diseños se centraban en soluciones básicas para pavimentos que pudieran soportar tráfico ligero, puesto que para ese tiempo era lo que funcionaba, pero con el paso del tiempo y el aumento de la demanda vehicular, surgió la necesidad de optimizar las mezclas para mejorar su resistencia y adaptabilidad a diferentes

climas y condiciones geográficas y flujo vehicular teniendo en cuenta el tamaño y peso del mismo (Guerra Vargas & Peña Ibáñez, 2021).

Por esta razón, el desarrollo de las mezclas asfálticas como tecnología constructiva surgió como una respuesta a la creciente necesidad de infraestructura vial robusta y duradera. Estudios pioneros en Estados Unidos y Europa permitieron establecer las bases de diseño que más tarde influirían en Latinoamérica, especialmente en Colombia (Moreno Chaparro & Rubio Tafur, 2018). Además de esto el diseño Marshall se convirtió en el estándar, gracias a su balance entre estabilidad, flujo y resistencia, consolidándose como la metodología predominante hasta mediados del siglo (Muñoz Méndez, 2017).

Por otro lado, otra etapa importante de resaltar en el análisis histórico es la incorporación de métodos avanzados en el diseño de mezclas (1950-1980). Durante las décadas de 1950 y 1960, se adoptaron procedimientos innovadores como el diseño Superpave, que optimizó el desempeño de las mezclas en condiciones climáticas extremas. Este avance marcó un hito al integrar características como la resistencia al ahuellamiento y la fatiga, características especialmente relevantes en vías de alto tráfico (Muñoz Méndez, 2017). En Colombia, estudios como el realizado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en la década de 1980 establecieron lineamientos para la implementación de mezclas MDC-19 y MSC-19 en vías secundarias y terciarias (Rodríguez Medina & González Santander, 2018).

Por otro lado, hay autores que resaltan factores ambientales, el cambio climático trajo consigo nuevos retos para la infraestructura vial, entre ellos, la necesidad de mejorar la adaptabilidad de las mezclas a variaciones extremas de temperatura y precipitaciones. Investigaciones recientes han explorado la adición de materiales reciclados y fibras para aumentar la resistencia mecánica y dinámica de las mezclas. Por ejemplo, la Universidad

Pontificia Bolivariana evaluó mezclas MDC-19 modificadas con cemento Portland, logrando mejoras en estabilidad y densidad a diferentes temperaturas. (Rodríguez Medina & González Santander, 2018).

En regiones como Santander y Boyacá, la implementación de mezclas asfálticas MDC-19 ha demostrado ser una solución eficaz para la rehabilitación de vías rurales. La adición de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción ha sido objeto de múltiples investigaciones, como las realizadas por la Universidad Nacional y la Universidad del Cauca, que han demostrado su viabilidad técnica y ambiental. Además, los avances en compactación y diseño estructural han permitido que estas vías soporten mayores cargas vehiculares sin comprometer su funcionalidad.

En la actualidad, las mezclas asfálticas no solo se evalúan por su desempeño mecánico, sino también por su contribución a la sostenibilidad. Las investigaciones apuntan a una integración más profunda de materiales reciclados y el uso de tecnologías como compactación giratoria para optimizar sus propiedades. Esto no solo reduce el impacto ambiental, sino que también disminuye costos, haciendo más accesible su implementación en regiones con limitaciones presupuestarias. El desarrollo continuo de estas tecnologías es crucial para abordar los desafíos que plantean las condiciones climáticas y la creciente demanda de transporte.

2.2. Marco Contextual

Desde un enfoque social, en los últimos años, el incremento de la población en zonas urbanas y rurales de Colombia ha generado una mayor presión sobre la infraestructura vial existente, especialmente en los municipios intermedios y en las zonas rurales. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), cerca del 45% de las vías secundarias y terciarias

en el país están en estado crítico, lo cual impacta directamente la calidad de vida de las comunidades rurales, limitando su acceso a servicios básicos y oportunidades económicas, a esto debe sumarse el hecho de que las zonas mencionadas son las principales productoras de insumos y alimentos de la canasta básica familiar y teniendo en cuenta la relación que existe entre los costos de los alimentos y los costos de transporte, el deterioro de las vías determina un problema social directo. (Rodríguez Medina & González Santander, 2018).

Adicionalmente, el contexto social está marcado por las desigualdades en el acceso a infraestructura moderna. Esto se observa particularmente en regiones como el Caribe colombiano, donde la falta de conectividad ha perpetuado ciclos de pobreza. La Federación Colombiana de Municipios ha resaltado que los esfuerzos en infraestructura vial en estas regiones son fundamentales para cerrar las brechas sociales y mejorar las condiciones de vida de la población marginada, teniendo en cuenta que de alguna manera esto impide el desarrollo en muchos territorios o simplemente la conexión directa el con el crecimiento (Federación Colombiana de Municipios, 2021).

Por otro lado, desde un enfoque cultural, el mejoramiento de vías secundarias y terciarias tiene implicaciones culturales importantes, especialmente en comunidades rurales, destaca que estas vías no solo son infraestructuras funcionales, sino también rutas que conectan comunidades con su historia, tradiciones y valores. Por ejemplo, los caminos rurales suelen ser escenarios de festividades locales y redes culturales, como mercados y eventos tradicionales, los cuales refuerzan la identidad comunitaria. Su mejora no solo facilita la movilidad, sino que también fortalece la cohesión social y cultural de estas regiones (Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe [CAF], 2023).

Además, según (Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe [CAF], 2023) la red de caminos en América Latina es un eje clave para conservar recursos culturales y naturales. Estas rutas contribuyen a preservar elementos culturales al permitir el acceso a áreas rurales donde se desarrollan prácticas culturales únicas. El contexto rural está profundamente vinculado a la herencia cultural y, al mismo tiempo, enfrenta desafíos derivados del cambio climático y la globalización, lo que convierte a las vías rurales en elementos estratégicos para el desarrollo sostenible.

Desde el punto de vista institucional, las vías secundarias y terciarias son un componente esencial de las políticas públicas de desarrollo territorial. La CAF (Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe [CAF], 2023) resalta que estas infraestructuras son fundamentales para la conectividad y la cohesión territorial, al facilitar el acceso a servicios esenciales como educación y salud. El fortalecimiento de estas rutas es prioritario para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, ya que promueven la inclusión social y la equidad territorial, especialmente en zonas con alto índice de pobreza.

Además, la creciente interacción entre lo rural y lo urbano, como señala (Cerón Aparicio, 2016), está transformando las dinámicas institucionales. Las entidades gubernamentales y privadas han comenzado a adoptar el concepto de "nueva ruralidad", que redefine las relaciones campo-ciudad en términos de modernización y sostenibilidad. Este enfoque busca garantizar que las inversiones en infraestructura vial no solo respondan a necesidades económicas, sino también a demandas sociales y culturales más amplias.

2.3. Marco Conceptual

El marco conceptual proporciona una base clara y comprensible de los conceptos clave relacionados con este proyecto de investigación. En primer lugar, se define Infraestructura vial como el conjunto de carreteras, puentes, túneles y demás estructuras que permiten el tránsito seguro y eficiente. Este término es fundamental para comprender el impacto de los proyectos de mejora en las vías rurales (Ministerio de Transporte, 2020).

Por otro lado, el concepto de Mantenimiento vial hace referencia a las actividades preventivas y correctivas destinadas a garantizar la funcionalidad de las carreteras. Según (La Asociación Mundial de la Carretera [PIARC], 2021), estas labores incluyen pavimentación, limpieza de cunetas y reparación de baches, siendo esenciales para evitar el deterioro prematuro de las vías.

Otro término clave es Sostenibilidad ambiental, que según, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2019)) es un elemento clave para el desarrollo sostenible, considerando la necesidad de armonizar el crecimiento económico con la protección del medio ambiente. Este enfoque se centra en gestionar de manera responsable los recursos naturales, fomentar prácticas de producción y consumo sostenibles, y mitigar los efectos del cambio climático. América Latina enfrenta desafíos significativos debido a patrones de desarrollo insostenibles que afectan la biodiversidad y la calidad de vida. La CEPAL enfatiza la importancia de políticas públicas que promuevan transiciones hacia modelos económicos más sostenibles y justos en la región.

Asimismo, se introduce el concepto de Movilidad rural, el cual describe la capacidad de los habitantes de zonas alejadas para acceder a servicios básicos mediante una red vial adecuada. Según un estudio de la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), mejorar la movilidad rural impulsa el desarrollo económico y social de estas regiones.

Dentro del contexto técnico, Geotecnia se define como la rama de la ingeniería civil que estudia las propiedades mecánicas y físicas de los suelos y su interacción con las estructuras. La (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles [ASCE], 2019) enfatiza que la geotecnia es clave para el diseño seguro y eficiente de carreteras en terrenos complejos.

Además, el término Capacidad portante se refiere al máximo peso que un suelo puede soportar sin fallar, un concepto crítico en la construcción de carreteras (Ministerio de Transporte, 2020), su evaluación es esencial para determinar la estabilidad y durabilidad de las estructuras viales.

El Drenaje vial es otro componente esencial, descrito como los sistemas diseñados para manejar el agua de lluvia y evitar inundaciones o erosiones. Según el Manual de Carreteras del (INVIAS, 2023), un drenaje adecuado prolonga la vida útil de las vías y reduce los costos de mantenimiento.

En el ámbito de materiales, se aborda el término Estabilización de suelos, que implica el uso de aditivos como cal o cemento para mejorar las propiedades del terreno. Estudios recientes de la Universidad Nacional de Colombia demuestran que esta técnica es eficaz para aumentar la resistencia y reducir la deformación en suelos arcillosos (INVIAS, 2022).

Uno de los conceptos que se evidenciara a través del siguiente proyecto es la gravedad específica Bulk la cual está definida como la relación entre la masa de un volumen dado de material y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura (INVIAS, 2013).

Dentro de los conceptos encontradas se puede identificar la gravedad específica máxima (Gmm) la cual es la relación entre la masa de la mezcla asfáltica suelta sin aire y un volumen igual de agua a una temperatura de 25°C según la norma INV E-735 (INVIAS, 2013).

Dentro de la elaboración de la mezcla es necesario implementar el método Bailey o empaquetamiento, el cual se remite en un sistema volumétrico para diseñar y analizar mezclas de agregados en pavimentos asfálticos. Básicamente se enfoca en el principio de que las partículas más grandes crean vacíos que son llenados por partículas más pequeñas, consiguiendo así una estructura estable y resistente (INVIAS, 2013).

En los parámetros necesarios para la implementación del estudio de la mezcla MSC-19 es meritorio tomar como dato primordial la Susceptibilidad al agua (Tracción indirecta, INV E-725-13), este ensayo establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta. El método es aplicable a las mezclas densas y permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos mejoradores de adherencia, sean líquidos o sólidos pulverulentos, como la cal hidratada y el cemento portland (INVIAS, 2013).

De igual manera dentro los parámetros a tener en cuenta se encuentra la Resistencia a la deformación plástica realizada con Rueda de Hamburgo y avalada por la Norma AASHTO T 32

y a su vez se alinea con la norma INV E-756-13, donde se relaciona la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas, la cual define que este método de ensayo describe un procedimiento para evaluar la susceptibilidad al ahuellamiento y a la humedad de muestras de pavimento de mezcla asfáltica utilizando el dispositivo de seguimiento de rueda de Hamburgo.

También es importante Modulo Dinámico amparado bajo la AASHTO T342, la cual mide la rigidez y el comportamiento viscoelástico lineal de los materiales asfálticos mediante la aplicación de cargas de tipo axial en sentido cíclico a unas temperaturas y frecuencias diferentes.

Según las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 las Leyes de fatiga amparadas por los ensayos INV E-748-13 e INV E 808-13, los cuales definen el método de ensayo para medir la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente mediante una prueba de flexión en dos puntos sobre muestras con forma trapezoidal.

Capa de rodadura hace referencia a la capa superior de la carretera, diseñada para resistir el desgaste causado por el tráfico (INVIAS, 2022), el diseño y mantenimiento adecuado de esta capa son esenciales para garantizar la seguridad vial.

El término Topografía se refiere al estudio y representación de la superficie terrestre para diseñar proyectos de infraestructura (Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2021), además, destaca la importancia de esta disciplina para garantizar la precisión en la construcción de vías.

El término Eficiencia energética se aplica al uso racional de energía durante la construcción y operación de proyectos de infraestructura (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2019). Implementar tecnologías eficientes reduce el consumo y la huella de carbono.

Otro termino importante es la Mezcla asfáltica que se refiere al material compuesto por agregados pétreos (grava, arena y polvo mineral) y un ligante asfáltico que sirve como aglutinante. Este tipo de mezcla es utilizado en la construcción y mantenimiento de pavimentos flexibles, debido a su capacidad para soportar cargas de tráfico y adaptarse a variaciones climáticas. Según (Asphalt Institute, s.f.), las propiedades de la mezcla dependen de la calidad de los agregados y el tipo de asfalto utilizado, lo que la convierte en un elemento clave para garantizar la durabilidad de las carreteras.

Para la elaboración de este proyecto, se proyectó una mezcla con cemento asfáltico modificado tipo III, el cual corresponde a un ligante obtenido mediante la modificación del cemento asfáltico convencional con polímeros, con el propósito de mejorar sus propiedades reológicas y su comportamiento frente a las condiciones de servicio. Se caracteriza por presentar una mayor elasticidad, cohesión y resistencia a la deformación permanente en comparación con los ligantes asfálticos convencionales. Estas propiedades permiten reducir la aparición de fenómenos como el ahuellamiento, las fisuras por fatiga y otras fallas asociadas a la acción repetitiva de las cargas vehiculares. Asimismo, su comportamiento resulta favorable en pavimentos sometidos a tránsito pesado y a condiciones ambientales exigentes, donde se requiere un ligante con mayor estabilidad y capacidad de recuperación frente a las deformaciones.

Debido a las mejoras obtenidas mediante la modificación con polímeros, este ligante es especialmente adecuado para estructuras de pavimento que requieren un alto desempeño y una mayor durabilidad. Su utilización permite mejorar la resistencia de la mezcla asfáltica frente a las cargas repetitivas del tránsito, contribuyendo a conservar las condiciones de servicio y a prolongar la vida útil del pavimento. De igual manera es importante definir que para efectos del

proyecto de la mezcla MSC-19 y para los ensayos se realizaron los estudios correspondientes con cemento asfáltico modificado con polímeros tipo III.

Por otro lado, mezcla asfáltica densa tipo MDC-19 es un tipo específico de mezcla asfáltica diseñada para capas de rodadura en pavimentos de alto tráfico. La denominación MDC-19 hace referencia al tamaño máximo de los agregados, que no supera los 19 mm, y a su composición densa, que minimiza la presencia de vacíos en la mezcla. Según las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIA, 2022), este tipo de mezcla proporciona una mayor resistencia a las deformaciones y al desgaste, siendo ideal para carreteras principales y autopistas.

Finalmente, la Mezcla Asfáltica Semidensa tipo MSC-19 según (INVIA, 2022), es un tipo de mezcla en caliente que se caracteriza por su granulometría intermedia, adecuada para climas cálidos debido a su capacidad para resistir deformaciones plásticas y ofrecer durabilidad en condiciones de altas temperaturas. Esta mezcla combina partículas de agregado grueso, fino y un contenido adecuado de ligante asfáltico, lo que proporciona una estructura densa, con huecos de aire controlados que contribuyen a su desempeño mecánico y a su resistencia frente al tráfico pesado. Se utiliza principalmente en capas de rodadura de pavimentos donde se requieren propiedades específicas de estabilidad y resistencia al deslizamiento. Su diseño está regulado bajo las especificaciones técnicas de la norma INV E-450, que establece los parámetros de fabricación, compactación y ensayos para garantizar su desempeño óptimo en vías sometidas a condiciones climáticas extremas.

Para efectos del proyecto y del manejo de respuesta a los objetivos específicos es necesario entender las diferencias básicas de cada una de las mezclas enmarcadas en dichos

objetivos para ello es necesario comprender que la Mezcla Densa en Caliente (MDC-19) y la Mezcla Semidensa en Caliente (MSC-19) son mezclas asfálticas de gradación continúa contempladas en las especificaciones del INVÍAS, cuyo tamaño máximo nominal de agregado es de 19 mm. Aunque ambas cumplen la misma función estructural dentro del pavimento flexible, presentan diferencias importantes en su composición granulométrica y en su comportamiento mecánico, lo que determina su campo de aplicación y desempeño en servicio.

La mezcla asfáltica MDC-19 se caracteriza por presentar una gradación más cerrada o densa, con un mayor contenido de agregados finos y llenante mineral, lo que permite obtener una estructura con menor porcentaje de vacíos y una mayor cohesión entre las partículas. Esta configuración favorece una elevada impermeabilidad, reduce la infiltración de agua hacia las capas inferiores del pavimento y proporciona una mayor rigidez estructural. Como consecuencia, la mezcla ofrece una excelente capacidad para distribuir las cargas del tránsito, alta resistencia al ahuellamiento, menor susceptibilidad a la deformación permanente y un mejor comportamiento frente a los procesos de fatiga y envejecimiento del ligante asfáltico. No obstante, debido a su mayor superficie específica, generalmente requiere un contenido ligeramente superior de cemento asfáltico y un control más riguroso durante la producción y la compactación en obra para alcanzar la densidad especificada en el diseño.

Por su parte, la MSC-19 posee una gradación semidensa, con un menor contenido de material fino y un porcentaje de vacíos superior al de la MDC-19. Esta característica proporciona una mezcla con mayor facilidad de compactación y una mejor trabajabilidad durante el proceso constructivo. Sin embargo, al presentar una estructura menos cerrada, su impermeabilidad es inferior y su rigidez estructural es ligeramente menor, por lo que su resistencia al ahuellamiento

y a las cargas repetidas resulta menor en comparación con la MDC-19. A pesar de ello, la MSC-19 mantiene un comportamiento mecánico adecuado para vías con niveles de tránsito medio y constituye una alternativa eficiente cuando se busca optimizar los costos de producción sin comprometer significativamente el desempeño del pavimento.

Desde el punto de vista granulométrico, la principal diferencia entre ambas mezclas radica en la distribución de los agregados. Mientras la MDC-19 desarrolla un esqueleto mineral más compacto que mejora la interconexión entre partículas y disminuye la permeabilidad, la MSC-19 presenta una curva granulométrica más abierta, generando una estructura con mayor contenido de vacíos y una menor densidad relativa. Estas diferencias repercuten directamente en sus propiedades mecánicas, ya que la MDC-19 exhibe un mayor módulo de rigidez, mejor capacidad para distribuir esfuerzos y una vida útil superior bajo condiciones de tránsito pesado, mientras que la MSC-19 ofrece una mayor facilidad constructiva y una respuesta satisfactoria en pavimentos sometidos a exigencias estructurales moderadas.

En términos de aplicación, la MDC-19 es la mezcla recomendada para capas de rodadura en autopistas, carreteras nacionales, intersecciones, glorietas, aeropuertos y demás vías con elevados volúmenes de tránsito y cargas pesadas, donde se requiere una alta resistencia a la deformación permanente y una mayor durabilidad. En contraste, la MSC-19 es utilizada principalmente en vías urbanas y secundarias, así como en capas intermedias o estructurales de pavimentos flexibles, cuando las condiciones de tránsito permiten aprovechar su adecuada relación entre desempeño técnico y costo.

2.4. Marco Teórico.

El desarrollo territorial está profundamente ligado a las conexiones físicas que permiten la integración de comunidades con los centros económicos y sociales. En este contexto, las vías de comunicación, especialmente las secundarias y terciarias, juegan un papel crucial en la dinamización de las economías locales y la reducción de las brechas sociales. La teoría de la Conexión y Desarrollo Territorial sostiene que una infraestructura de transporte bien desarrollada no solo facilita el intercambio de bienes y servicios, sino que también actúa como un catalizador para el desarrollo integral de las regiones (Banco Mundial, 2020), las inversiones en infraestructura vial tienen un efecto multiplicador en el desarrollo rural, al incrementar la productividad agrícola, mejorar el acceso a mercados y garantizar la provisión de servicios esenciales, como salud y educación.

En el marco del pacto funcional Cesar-Guajira, la mejora de las vías secundarias y terciarias en el departamento del Cesar representa una oportunidad estratégica para impulsar el desarrollo sostenible en la región. Estas vías no solo conectan las áreas rurales con las cabeceras municipales, sino que también integran las comunidades más aisladas al mercado regional, permitiéndoles participar de manera activa en la economía. El deterioro de estas infraestructuras, sin embargo, ha perpetuado un ciclo de pobreza y abandono en muchos pueblos, como explica el enfoque de Centros y Periferias de Friedmann (1966). Esta teoría señala que la desconexión física entre las regiones periféricas y los centros urbanos resulta en una exclusión socioeconómica que frena el desarrollo local. Así, invertir en la mejora de estas vías no es solo una cuestión de transporte, sino de equidad y cohesión territorial (Cajamarca Azuero, 2018).

La sostenibilidad de estas intervenciones es otro aspecto crítico. En este sentido, la teoría de la Resiliencia Ambiental de Holling (1973) subraya la necesidad de integrar prácticas

sostenibles en el diseño y construcción de vías. En regiones vulnerables al cambio climático, como el Cesar, el uso de materiales reciclados y técnicas de construcción innovadoras puede no solo prolongar la vida útil de las carreteras, sino también minimizar su impacto ecológico. Esto se complementa con un enfoque logístico eficiente, la cual señala que la planificación adecuada de las rutas puede reducir significativamente los costos operativos y mejorar la conectividad general (FAO, 2020).

Por último, el fortalecimiento de la infraestructura vial en zonas rurales también contribuye al desarrollo social y la inclusión. Mejorar las carreteras facilita el acceso a mercados, fomenta la creación de empleo y, en muchos casos, impulsa la reactivación cultural y social de los pueblos que han sufrido años de aislamiento. Según un informe de la CEPAL (2019), las inversiones en infraestructura no solo deben enfocarse en la conectividad física, sino también en promover el desarrollo humano, asegurando que las comunidades participen activamente en los procesos de planificación y ejecución de estos proyectos.

2.5. Marco Legal

A continuación, se relacionan en la Tabla 2 las leyes, normas y decretos aplicables para la elaboración del presente proyecto.

Tabla 2

Marco conceptual Colombia

Ley/ decreto o normatividad	Descripción	Cita
Ley 105 de 1993	Establece los principios básicos del transporte público en Colombia, definiendo las competencias y	(Ministerio de Transporte, 1993)

Ley/ decreto o normatividad	Descripción	Cita
Ley 1228 de 2008	responsabilidades para la infraestructura vial. Promueve la infraestructura de transporte en áreas rurales, incluyendo el mantenimiento y construcción de vías secundarias y terciarias	(Congreso de Colombia, 2008)
Decreto 1056 de 1953 (Código de Petróleos)	Regula el uso de materiales como el asfalto para la construcción de vías, estableciendo requisitos técnicos y de sostenibilidad ambiental.	(Ministerio de Minas y Energía, 1953)
Decreto 1914 de 2017	Reglamenta el uso de sistemas de información para la planificación y seguimiento de proyectos de infraestructura vial.	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)
Ley 715 de 2001	Define la distribución de competencias entre el gobierno nacional y las entidades territoriales para la construcción y mantenimiento de infraestructura vial.	(Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2001)
Ley 388 de 1997	Define lineamientos para el ordenamiento territorial, enfaticando la conectividad y el desarrollo rural mediante infraestructura vial adecuada.	(Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 1997)
Ley 1508 de 2012	Reglamenta las asociaciones público-privadas (APP) para la financiación y desarrollo de proyectos de infraestructura vial en el país.	(Ministerio de Transporte, 2012)

Ley/ decreto o normatividad	Descripción	Cita
E-218	Dureza. Agregado grueso (O)	(INVIAS, 2012)
E-238	Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones -Capa de rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones	
E-232	Degradación por abrasión en el equipo Micro- Deval, máximo (%) -Capa de: rodadura / intermedia / base Coeficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	
E-220	Durabilidad (O)	
E-237	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%) Limpieza, agregado grueso (F)	
E-133	Impurezas en agregado grueso, máximo (%) Limpieza, gradación combinada (F)	
E-235	Equivalente de arena, mínimo (%) Valor de azul de metileno, máximo (%)	

Ley/ decreto o normatividad	Descripción	Cita
E-240	Geometría de partículas, agregado grueso (F)	
E-227	Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%) Caras fracturadas, mínimo (%) -Una cara: rodadura / intermedia / base -Dos caras: rodadura / intermedia / base	
E-239	Geometría de partículas, agregado fino (F) Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) -Capa de: rodadura / intermedia / base	
E-757	Adhesividad (O)	
E-774	-Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%) -Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel- Weber), índice mínimo	
Norma INV E-2013	Esta norma técnica del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) regula los procedimientos para la fabricación, diseño y control de calidad de las	(INVIAS, 2012)

Ley/ decreto o normatividad	Descripción	Cita
	mezclas asfálticas en caliente. Establece lineamientos para asegurar que las mezclas cumplan con los estándares de durabilidad, estabilidad, resistencia y adaptabilidad a las condiciones climáticas y de tráfico. Se aplica en la ejecución de proyectos viales en Colombia, asegurando el cumplimiento de especificaciones como la granulometría, densidad y contenido de ligante asfáltico	

Nota. La tabla es por elaboración propia, sin embargo, como se muestra en la última columna, se basa de diferentes fuentes y organismos de control vigentes en Colombia que regulan esta actividad. .

3. Diseño metodológico

3.1. Tipo de investigación

De acuerdo con (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014), el diseño metodológico es una estrategia general que guía el proceso de investigación. Este diseño incluye la descripción del tipo de estudio, el método empleado y los procedimientos a seguir, alineados con los objetivos planteados. Cada clasificación responde a la profundidad y naturaleza del conocimiento que se busca generar. En este caso, el estudio se clasifica como:

Investigación descriptiva

Se enfoca en detallar y especificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales constitutivos (agregados pétreos y asfaltos) mediante pruebas de laboratorio. Según Sampieri,

este tipo de investigación "describe fenómenos, contextos y situaciones, estableciendo características específicas del objeto de estudio" (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014). En este contexto, la investigación permite identificar las propiedades necesarias para cumplir con los estándares normativos como la norma INV-450.

Investigación experimental

Este enfoque implica la manipulación de variables bajo condiciones controladas para determinar su efecto en el desempeño de las mezclas asfálticas. La investigación experimental es adecuada cuando se buscan establecer relaciones de causa-efecto, ya que las pruebas de laboratorio permiten analizar cómo los cambios en los materiales afectan el comportamiento de las mezclas MSC-19 y MDC-19.

Investigación cuantitativa

La naturaleza cuantitativa del estudio radica en la recolección y análisis de datos numéricos provenientes de pruebas como la estabilidad, el flujo y la durabilidad. Este enfoque permite la sistematización de la información y el desarrollo de comparaciones objetivas entre las mezclas asfálticas evaluadas.

En síntesis, este estudio adopta un diseño descriptivo, experimental y cuantitativo, pues busca caracterizar materiales, evaluar mezclas mediante experimentación controlada y analizar datos para generar conclusiones basadas en evidencia. El método seleccionado es el cuantitativo, definido como el enfoque que utiliza datos medibles y técnicas estadísticas para obtener resultados objetivos (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014). Este enfoque se complementa con métodos específicos:

- Teóricos:
 - Análisis y síntesis: Permite descomponer las propiedades individuales de los materiales y sintetizar sus características para un uso óptimo.
 - Inducción y deducción: Utilizados para generar generalizaciones a partir de datos específicos y deducir recomendaciones prácticas.
- Prácticos:
 - Experimentación: La manipulación controlada de mezclas asfálticas bajo condiciones normativas es clave para evaluar su desempeño.
 - Observación: Se registra el comportamiento de los materiales durante las pruebas para identificar tendencias y anomalías.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

La población del estudio está compuesta por los materiales constitutivos disponibles en el departamento del Cesar, que incluyen agregados pétreos (grava y arena), asfaltos convencionales y modificados, y aditivos que cumplen con las especificaciones técnicas para la elaboración de mezclas asfálticas según los estándares establecidos por INVÍAS. Asimismo, se consideran los parámetros normativos y las condiciones climáticas locales que afectan el diseño y desempeño de las mezclas.

3.2.2. Muestra

La muestra seleccionada está conformada por los materiales recolectados en las principales canteras y fuentes de suministro del Cesar, incluyendo los tipos de cemento asfáltico modificado tipo III disponibles en la región. Estos materiales serán seleccionados con base en su

representatividad y su cumplimiento de los estándares requeridos por la normativa INV-E-213 e INV-450.

4. Resultados: Diseño de mezcla asfáltica MSC-19

4.1. Materiales

Los agregados pétreos combinados fueron suministrados por la empresa Multinsa S.A.S. desde su planta ubicada en Barrancabermeja, y corresponden a una mezcla ya combinada (no se dispuso de los porcentajes individuales de agregado grueso y fino aportados por el proveedor). El ligante empleado fue cemento asfáltico modificado tipo III, cuyas propiedades reológicas (temperaturas de mezclado y compactación) fueron suministradas por la compañía contratante. La utilización del cemento asfáltico modificado tipo III se tomó como opción debido a que las propiedades mejoradas del ligante permiten incrementar significativamente el comportamiento mecánico y la durabilidad de la mezcla asfáltica frente a las solicitaciones de tránsito y condiciones climáticas.

La granulometría de la MSC-19, al presentar un mayor contenido de vacíos que una mezcla densa convencional, puede ser más susceptible a procesos de deformación permanente, fatiga y daño inducido por humedad cuando se emplean cementos asfálticos convencionales. En este contexto, la incorporación de un cemento asfáltico modificado Tipo III mejora las propiedades reológicas del ligante, incrementando su elasticidad, cohesión y capacidad de recuperación después de la aplicación de cargas repetidas. Estas características permiten que la mezcla resista de manera más eficiente los esfuerzos de compresión, tracción y corte generados por el tránsito vehicular, reduciendo la aparición de ahuellamientos, fisuración por fatiga y desprendimiento de agregados.

Desde el punto de vista del diseño de mezclas, la evaluación de una MSC-19 con cemento asfáltico modificado Tipo III mediante ensayos de laboratorio permite determinar con mayor precisión el efecto del ligante sobre parámetros fundamentales como la estabilidad Marshall, el flujo, la relación estabilidad/flujo, el porcentaje de vacíos de aire, los vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos con asfalto (VFA), la densidad de la mezcla y la susceptibilidad a la humedad. Asimismo, la caracterización del material facilita verificar si la incorporación del polímero mejora el desempeño mecánico sin afectar los criterios de diseño establecidos por las especificaciones del INVÍAS.

Adicionalmente, el empleo de un ligante modificado Tipo III incrementa la resistencia al envejecimiento oxidativo, mejora la adhesión entre el asfalto y los agregados pétreos y disminuye la susceptibilidad térmica del ligante, permitiendo que la mezcla conserve sus propiedades mecánicas durante un mayor periodo de servicio. Esto se traduce en una mayor vida útil del pavimento, menores intervenciones de mantenimiento y una reducción de los costos asociados al ciclo de vida de la infraestructura vial.

4.2. Caracterización de los agregados combinados

Sobre la muestra de agregados combinados se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio, conforme a las normas INV vigentes, en la Figura 5 se evidencia la elaboración de la granulometría.

- Granulometría por tamizado (INV E-213), para verificar el cumplimiento de la franja MSC-19 (Tabla 450-6).
- Desgaste en la máquina de Los Ángeles (INV E-218), como indicador de dureza.

- Índice de plasticidad (INV E-126) y equivalente de arena (INV E-133), como indicadores de limpieza del material.
- Partículas planas y alargadas (INV E-240) y porcentaje de caras fracturadas (INV E-227), como indicadores de geometría de partículas.
- Gravedad específica y absorción de agregados finos y gruesos (INV E-222, E-223, E-217), y gravedad específica del llenante mineral (INV E-128).

Figura 5

Caracterización de materiales mediante ensayo de granulometría



4.3. Elaboración de briquetas y ensayo Marshall

Se fabricaron series de 20 briquetas (Figura 6) para cada uno de cinco contenidos de asfalto (4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, en incrementos de 0.5%), compactadas con 75 golpes por cara, de acuerdo con el nivel de tránsito NT3. Las temperaturas de trabajo, obtenidas de la curva reológica del ligante, fueron:

- Temperatura de mezclado: 157°C a 162°C.

- Temperatura de compactación: 146°C a 151°C.

Cada briqueta fue sometida al ensayo de estabilidad y flujo Marshall (INV E-748) a 60°C, y a la determinación de su gravedad específica bulk (INV E-733). Adicionalmente, se determinó la gravedad específica máxima teórica (Gmm) de la mezcla suelta para cada contenido de asfalto mediante el método Rice (INV E-735).

Figura 6

Elaboración de Briquetas y ensayo Marshall



4.4. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Con los valores promedio de gravedad específica bulk, Gmm, estabilidad y flujo obtenidos para cada uno de los cinco contenidos de asfalto, se construyeron las curvas de diseño Marshall tal como se evidencia en la Figura 7 y Figura 8 y la Figura 9. El contenido óptimo se seleccionó como el promedio de los porcentajes de asfalto correspondientes a: (a) el punto de máxima gravedad específica bulk, (b) el punto de máxima estabilidad y (c) el porcentaje que produce el vacío con aire de diseño (usualmente 4.0% para NT3), verificando adicionalmente

que los demás parámetros (VAM, VFA, relación estabilidad/flujo, relación llenante/ligante, espesor de película) cumplieran los rangos de la Tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall (INVIAS, 2022).

4.5. Resultados de la caracterización de los agregados combinados

Los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados combinados se presentan en la Tabla 3 que se encuentra a continuación.

Tabla 3

Caracterización de los agregados combinados

Ensayo	Norma	Requisito NT3	Resultado	Cumple
Desgaste Máquina de Los Ángeles, % máx.	INV E-218-13	25	24	Sí
Índice de Plasticidad, % máx.	INV E-126-13	NP	NP	Sí
Equivalente de Arena, % mín.	INV E-133-13	50	51	Sí
Partículas planas y alargadas (5:1), % máx.	INV E-240-13	10	1.2	Sí
Caras fracturadas — una cara, % mín.	INV E-227-13	85	99.3	Sí
Caras fracturadas — dos caras, % mín.	INV E-227-13	70	99.2	Sí

Los seis ensayos anteriores demuestran que los agregados combinados cumplen los requisitos del nivel de tránsito NT3, lo cual confirma la aptitud del agregado pétreo suministrado por Multinsa S.A.S. para una mezcla de alto desempeño.

4.6. Gravedades específicas

La Tabla 4 presenta la gravedad específica Bulk del agregado combinado, discriminada por fracción granulométrica, junto con la gravedad específica del cemento asfáltico.

Tabla 4*Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica MSC-19*

Fracción	Gravedad Específica	% en la mezcla
Tamaño máx. – No. 4 (grueso)	2.681	47.14
No. 4 – No. 200 (fino)	2.666	47.9
Pasa No. 200 (llenante mineral)	2.718	4.96
Gsb combinado del agregado	2.676	100

Nota. La columna de gravedad específica, no tiene unidades de medida porque es igual masa/masa.

4.7. Empaquetamiento Bailey

La Tabla 5 mostrada a continuación presenta los parámetros de la fórmula de trabajo bajo el análisis de empaquetamiento Bailey, empleado como verificación complementaria de la granulometría combinada.

Tabla 5*Empaquetamiento Bailey*

Tamaño	Símbolo	Tamiz (mm)	% Pasa
Máximo Nominal	TMN	12.7	87.2
Medio	TM	6.4	60.1
Control Primario	TCP	2.8	39
Control Secundario	TCS	0.6	19.7
Control Terciario	TCT	0.1	7.8

Parámetro Bailey	Símbolo	Valor
Relación agregado grueso	CA	0.53
Relación gruesa del agregado fino	FAC	0.51
Relación fina del agregado fino	FAF	0.4

4.8. Curvas de Diseño Marshall

Las briquetas se fabricaron con cinco contenidos de asfalto entre 4.5% y 6.5%, en incrementos de 0.5%. La Tabla 6 resume los valores promedio de gravedad específica bulk, gravedad específica máxima (Gmm) y los resultados del ensayo Marshall (estabilidad y flujo) obtenidos para cada contenido de asfalto, evidenciados en la Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

Tabla 6

Resultados de Briquetas de acuerdo al porcentaje de asfalto para diseño Marshall

% Asfalto	Gsb Bulk	Gmm (RICE)	Estabilidad (N)	Flujo (mm)
4.5	2.352	2.534	19 900	3.8
5	2.389	2.513	21 400	4
5.5	2.396	2.5	22 500	4.4
6	2.409	2.481	19 800	4.8
6.5	2.389	2.466	16 650	5.9

Figura 7

Curvas Diseño Marshall Contenido de asfalto 5.5%

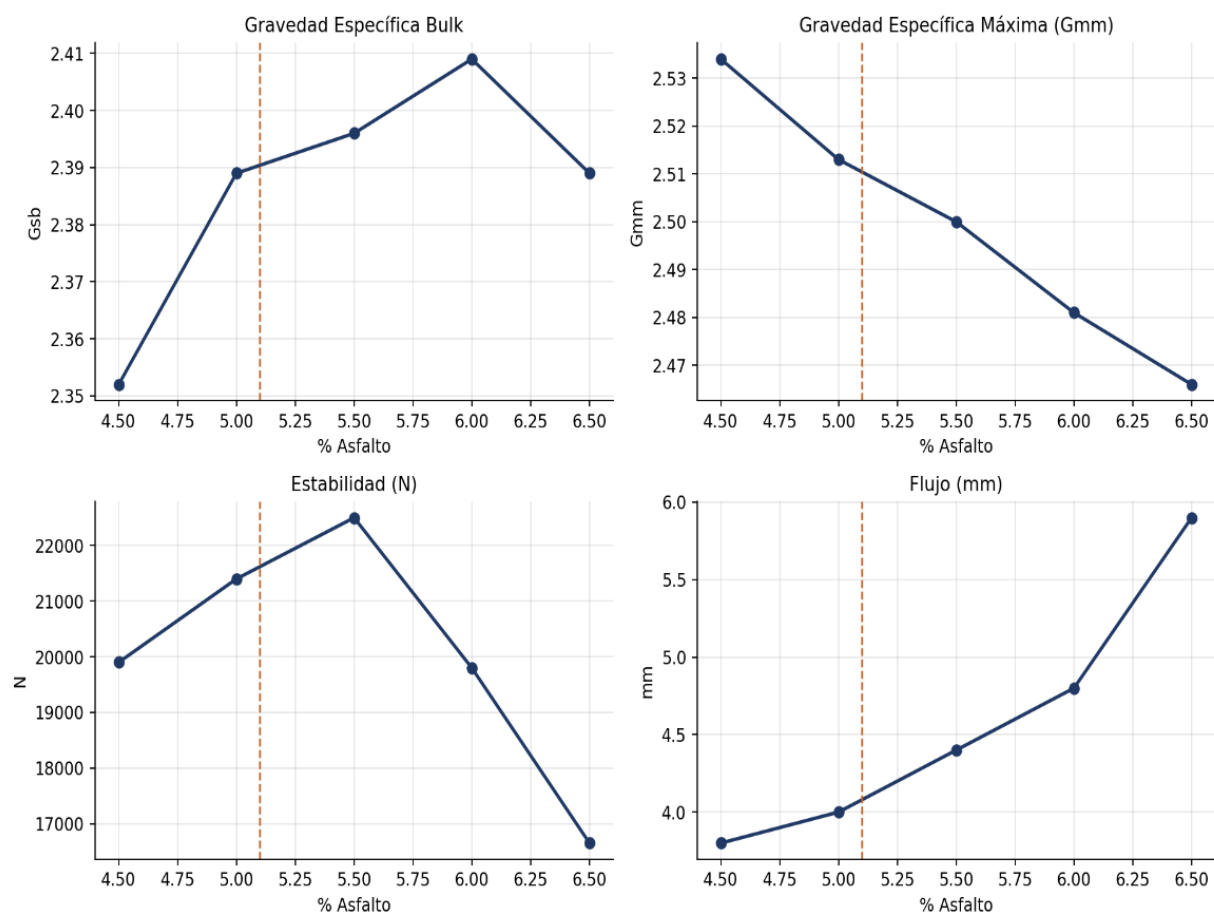


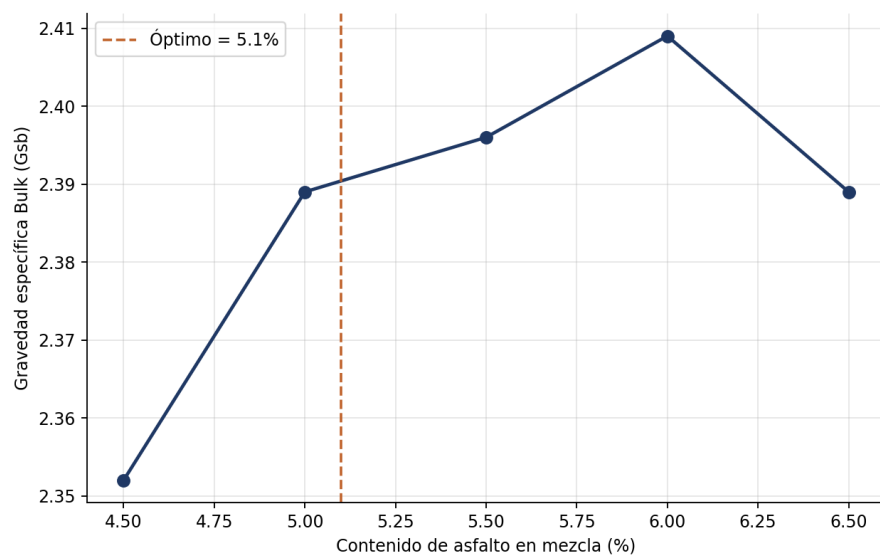
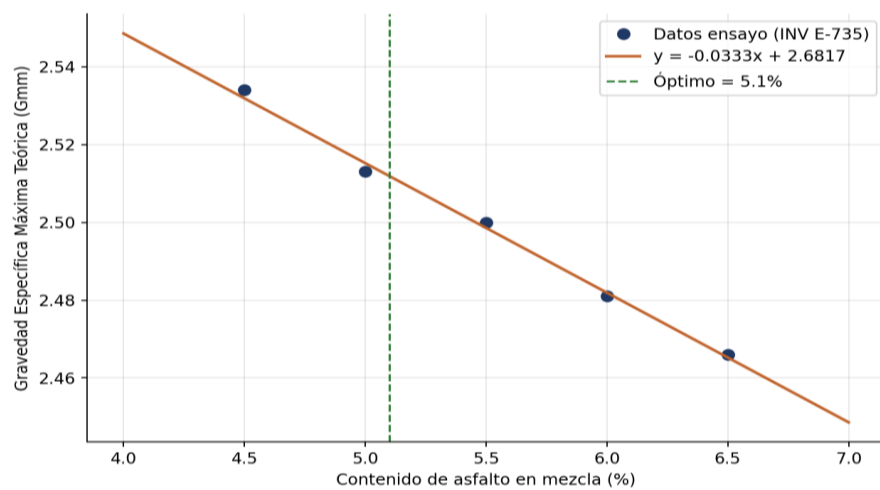
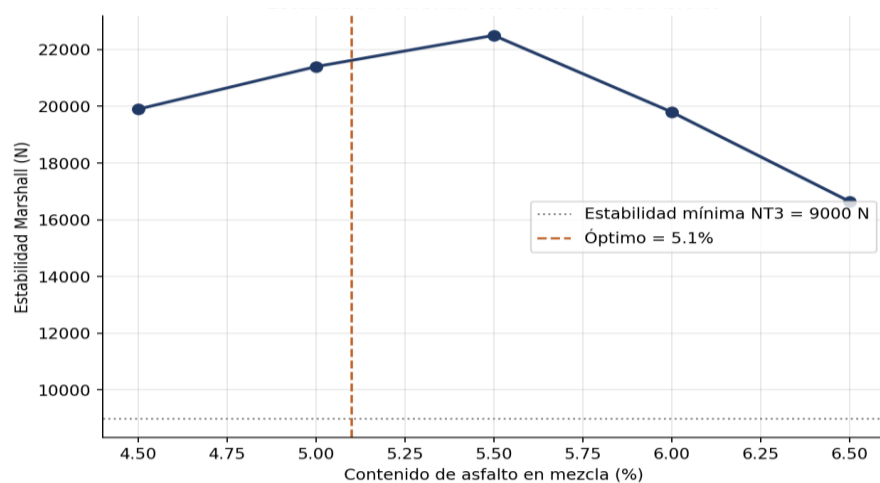
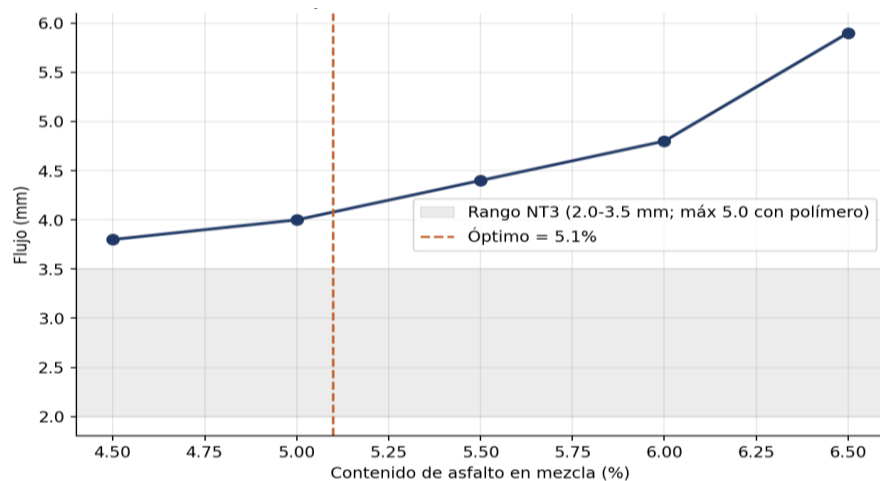
Figura 8*Gravedad específica Bulk de la mezcla vs Contenido de asfalto***Figura 9***Curva de gravedad específica máxima (RICE)*

Figura 10*Estabilidad Marshall vs Contenido de asfalto***Figura 11***Flujo Marshall vs Contenido de asfalto*

4.9. Contenido óptimo de asfalto y parámetros de la fórmula de trabajo

A partir de las curvas anteriores (Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11) se determinó un contenido óptimo de cemento asfáltico modificado tipo III de $5.1\% \pm 0.3\%$. La

Tabla 7 resume los parámetros volumétricos y mecánicos obtenidos en el óptimo, comparados contra los criterios de aceptación de la Tabla 450-10 del INVIAS para nivel de tránsito NT3.

Tabla 7

Contenido óptimo de asfalto y criterios de aceptación

Parámetro	Norma	Criterio NT3	Resultado	Cumple
Contenido de asfalto, %	INV E-732	—	5.1	—
Gravedad Específica Bulk	INV E-733	—	2.391	—
Compactación, golpes/cara	INV E-748	75	75	Sí
Estabilidad mínima, N	INV E-748	9000	21 980	Sí
Flujo, mm	INV E-748	2.0 – 3.5 (máx. 5.0*)	4.1	Sí*
Relación Estabilidad/Flujo, kN/mm	INV E-799	3.0 – 6.0	5.4	Sí
Vacíos con aire (Va), %	INV E-799	4.0 – 6.0	4.8	Sí
Vacíos Agregado Mineral (VAM), % mín.	INV E-799	15	15.2	Sí
Vacíos Llenos de Asfalto (VFA), %	INV E-799	65 – 75	69	Sí
Relación Llenante/Ligante efectivo	INV E-799	0.8 – 1.2	1.08	Sí
Espesor película de asfalto, µm mín.	INV E-741	7.5	9.1	Sí

Como se evidencia en la Tabla 7 todos los parámetros evaluados cumplen los criterios exigidos para el nivel de tránsito NT3, confirmando la validez técnica del diseño Marshall obtenido.

4.10. Ensayos de desempeño de la mezcla óptima

Adicionalmente al diseño volumétrico-mecánico Marshall, se verificó el desempeño de la mezcla en su contenido óptimo de asfalto (5.1%) mediante cuatro ensayos complementarios de caracterización avanzada.

4.10.1. Susceptibilidad al agua (Tracción indirecta, INV E-725)

Se evaluó la resistencia retenida a la tracción (RRT) comparando la resistencia de briquetas acondicionadas en húmedo (saturación por vacío y 24 h de inmersión) frente a briquetas en condición seca. Se obtuvo una resistencia seca promedio de 1341.8 kPa y una resistencia húmeda promedio de 1103.9 kPa, para una RRT de 82.3%, que supera el mínimo especificado por el Artículo 450-07 del INVIAS para NT3 ($RRT > 80\%$). Tal como se muestra en la

Tabla 8.

Tabla 8

Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta

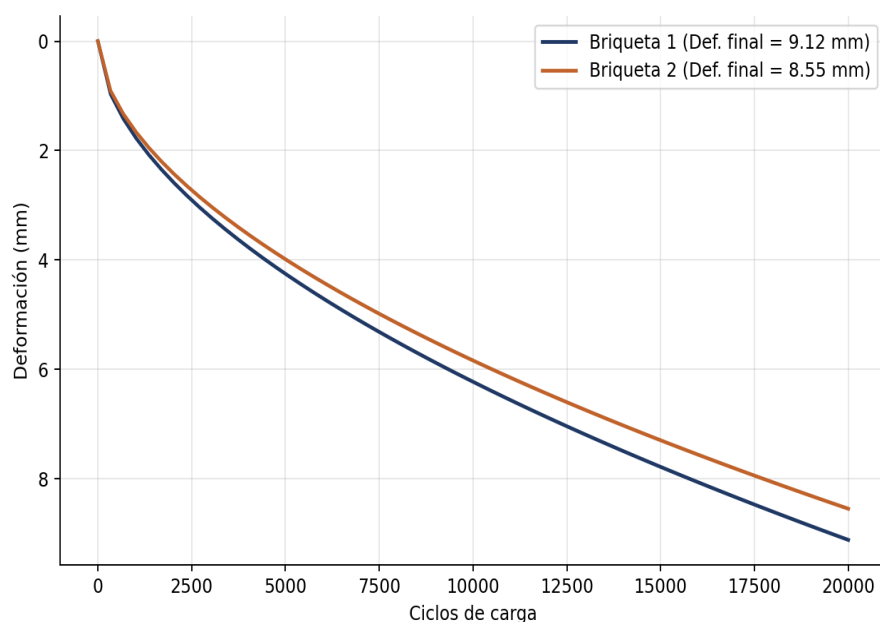
Grupo		Húmedo			Seco		
Propiedad	Símbolo o Fórmula	Briqueta 1	Briqueta 2	Briqueta 3	Briqueta 4	Briqueta 5	Briqueta 6
Diámetro (mm)	D	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6
Espesor (mm)	t	63.9	63.8	63.8	64.1	63.2	63.3
Masa seca al aire (g)	A	1101.07	1103.30	1106.25	1108.19	1102.41	1104.20
Masa SSS (g)	B	1105.33	1109.20	1111.16	1113.41	1108.25	1110.45
Masa en el agua (g)	C	636.78	638.90	639.36	641.47	639.98	641.40
Volumen (cm³)	E = B - C	468.6	470.3	471.8	471.9	468.3	469.1
Gravedad específica Bulk	F = A / E	2.350	2.346	2.345	2.348	2.354	2.354
Gravedad específica máxima	G	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512
Vacios con aire (%)	H = (1-(F/G)) X 100	6.5	6.6	6.7	6.5	6.3	6.3
Volumen de vacíos con aire (cm³)	I = HE / 100	30.2	31.1	31.4	30.8	29.4	29.5
Carga (N)	P				13847	13722	13241
Saturación mediante vacío							
Masa SSS (g)	B'	1118.75	1122.76	1125.57			
Masa en el agua (g)	C'	649.22	650.95	652.26			
Volumen (cm³)	E' = B' - C'	469.5	471.8	473.3			
Volumen absoluto de agua (cm³)	J' = B' - A	17.7	19.5	19.3			
Saturación (%)	100J' / I	58.5	62.6	61.5			
Expansión (%)	100(E'-E) / E	0.2	0.3	0.3			
Acondicionamiento de 24 h en agua							
Espesor (mm)	t''	63.9	63.8	63.8			
Masa SSS (g)	B''	1135.76	1129.64	1132.67			
Masa en el agua (g)	C''	664.24	656.00	657.94			
Volumen (cm³)	E''	471.5	473.6	474.7			
Volumen absoluto de agua (cm³)	J'' = B'' - A	27.6	27.2	28.5			
Saturación (%)	100J'' / I	91.2	87.6	90.6			
Expansión (%)	100(E''-E) / E	0.6	0.7	0.6			
Carga (N)	P''	11292	11120	11335			
Resistencia húmeda (kPa)	R _{th} = 2000P'' / m²D	1106.9	1092.5	1112.5	82.3		
Resistencia seca (kPa)	R _{ts} = 2000P / m²D				1353.6	1361.1	1310.7
RRT (%)	(R _{th} /R _{ts}) x 100						
CONDICIONES AMBIENTALES				23.2°C - 55.0%HR			

4.10.2. Resistencia a la deformación plástica (Rueda de Hamburgo, AASHTO T 324)

Se sometieron dos briquetas a 20 000 ciclos de carga bajo agua a 50°C, registrando deformaciones permanentes finales de 9.12 mm y 8.55 mm, sin presentar desprendimiento (stripping) de la película de asfalto, lo que indica una adecuada adherencia agregado-ligante y resistencia al ahuellamiento. Cabe aclarar que la especificación del INVÍAS no fija un límite máximo para la deformación acumulada (por ejemplo, 3 mm, 5 mm o 10 mm). El criterio de aceptación se basa en la pendiente de la curva de deformación definida en la Figura 12, es decir, en la velocidad con la que continúa deformándose la mezcla durante la fase estable del ensayo. Una mezcla puede presentar una deformación acumulada relativamente alta al inicio, pero si posteriormente su velocidad de deformación es baja y se mantiene por debajo del límite especificado, puede cumplir con el criterio de aceptación,

Figura 12

Resistencia a la deformación plástica-Rueda de Hamburgo (AASHTO T324)

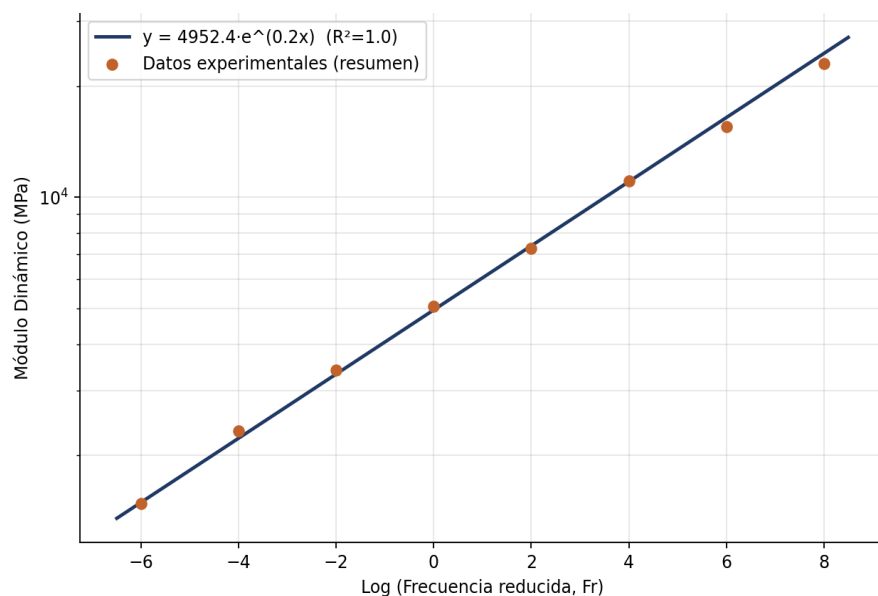


4.10.3. Módulo dinámico (AASHTO T342)

El módulo dinámico se determinó para cinco frecuencias de carga (0.1 a 25 Hz) y cinco temperaturas (-10°C a 54°C), construyendo la curva maestra (Figura 13) a una temperatura de referencia de 21.1°C mediante el principio de superposición tiempo-temperatura. El modelo ajustado fue $\text{Módulo} = 4952,4(e^{0.2 \times \text{Log Fr}})$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 1.0$, lo que evidencia el comportamiento viscoelástico esperado: el módulo aumenta con la frecuencia de carga y disminuye con la temperatura.

Figura 13

Curva maestra de módulo dinámico (AASHTO T342, $T_s=21.1^\circ\text{C}$)



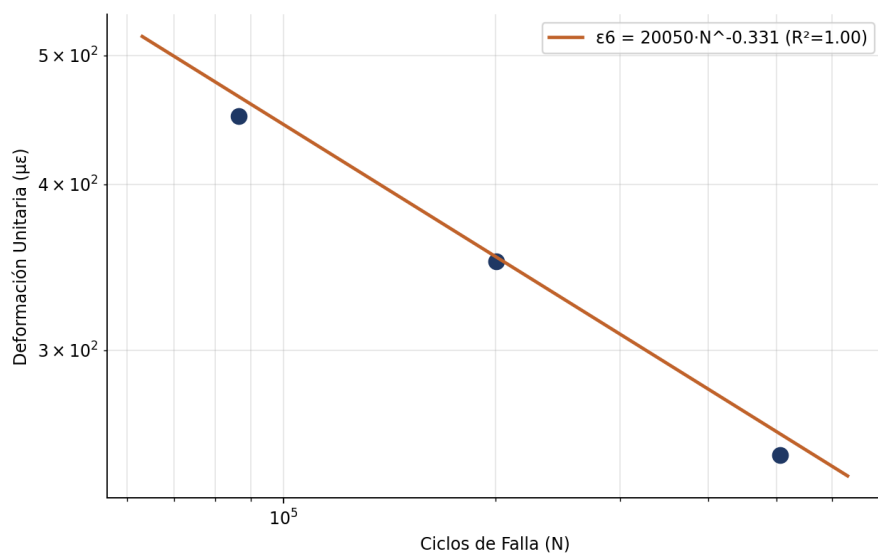
4.10.4. Ley de fatiga (Flexión dinámica en viga INV E-748)

Se ensayaron vigas prismáticas de mezcla compactada a tres niveles de deformación controlada (250, 350 y 450 $\mu\epsilon$), registrando los ciclos de carga hasta la falla (definida como la reducción al 50% de la rigidez inicial): 505 947, 200 332 y 86 427 ciclos, respectivamente. La ley de fatiga resultante fue $\epsilon_6 = 20\,050 \times N^{-0.331}$, lo que permite estimar la vida de fatiga de la

mezcla para cualquier nivel de deformación de servicio esperado en el pavimento, resultados evidenciados en la Figura 14.

Figura 14

Ley de fatiga- Flexión dinámica en viga (INV E-784)



5. Comparación de Resultados de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19

5.1. Caracterización de materiales

Para el análisis del capítulo se tomaron en cuenta los datos recolectados en los ensayos para las muestras, para poder realizar la comparativa de la mezcla objeto de estudio se tomaron datos de una mezcla densa caliente implementada en el plan de mejoramiento de vías terciarias cesar guajira, los datos para su validación se encontrarán en el Apéndice 1

Diseño de mezcla asfáltica MDC-19 (Consortio Infraestructura Vial del Cesar, 2023)

enmarcados en este documento.

Las dosificaciones dadas por los respectivos laboratorios, que enmarcan el diseño de las mezclas con el fin de realizar la respectiva comparación y la cual se verá reflejada en la Tabla 9,

se puede determinar los parámetros con los que se hicieron los correspondientes estudios, los resultados arrojados y si cumplen con lo estipulado en la norma Invias para estos tipos de mezclas.

Tabla 9

Caracterización de materiales

Ensayo	Norma INV	Especificación NT3	MSC-19 (Multinsa)	MDC-19 (Aguas Claras)
Desgaste Máquina de los Ángeles 500 Rev. (%)	INV E-218	≤ 25	24 ✓	18,7 ✓
Índice de Plasticidad	INV E-126	NP	NP ✓	NP ✓
Equivalente de Arena (%)	INV E-133	≥ 50	51 ✓	67 ✓
Partículas planas y alargadas 5:1 (%)	INV E-240	≤ 10	1,2 ✓	8 ✓
Caras fracturadas una cara (%)	INV E-227	≥ 85 (NT3)	99,3 ✓	100 ✓
Caras fracturadas dos caras (%)	INV E-227	≥ 70 (NT3)	99,2 ✓	100 ✓
Gsb agregado grueso	INV E-223	Reportar	2,681	2,633
Gsb agregado fino	INV E-222	Reportar	2,666	2,600
Absorción ag. grueso (%)	INV E-223	Reportar	~1,3	0,94
Absorción ag. fino (%)	INV E-222	Reportar	~1,3	1,25
Gravedad específica llenante mineral	INV E-128	Reportar	2,718	2,701
Solidez en sulfato de Magnesio ag. fino (%)	INV E-220	≤ 18	N/R	9,9 ✓
Angularidad del agregado fino (método A)	INV E-239	≥ 45	N/R	45,2 ✓

Como se evidencia de acuerdo con la Tabla 9, se denota que los agregados estimados para los diseños de las mezclas asfálticas tipo MDC-19 y MSC-19 cumplen con las especificaciones para un nivel de tránsito NT3 correspondiente a la capa de rodadura, cabe resaltar diferencias marcadas en dichos ensayos realizados tal lo es el desgaste en la máquina de

los Ángeles, y que según la norma INV E- 218 evalúa la resistencia de los agregados al desgaste, abrasión e impacto, donde las interpretaciones básicas son que a menor porcentaje de desgaste es igual a un agregado más resistente y duradero, a comparación de que si es se presenta un mayor porcentaje de desgaste es igual a un agregado con menos resistencia y ser más susceptible a fragmentarse durante la correspondiente producción, compactación y puesta en servicio.

Por ello en los resultados comparativos se pueden determinar que:

MSC-19: 24%

- El agregado presenta una buena resistencia mecánica en sus componentes
- Durante el ensayo perdió el 24% de su masa primaria por efectos de la abrasión e impacto.
- El resultado es un valor que se puede considerar adecuado para el diseño de pavimentos asfálticos para niveles de tránsito medios y altos.

MDC-19: 18.7%

- El agregado a comparación del MSC-19 es más resistente
- Indica que los agregados son de mejor calidad frente al desgaste y la fragmentación.

En términos comparativos para este segmento entre ambos agregados de las mezclas, se determina una diferencia porcentual de 5.3%, lo que sugiere que la mezcla MDC-19 contiene un agregado que resiste de mejor manera la abrasión y desgaste que los agregados de la MSC-19, refiere a la vez que el agregado de la MDC-19 muestra una pérdida de 5.3 puntos porcentuales, lo que sugiere una mayor durabilidad potencial del material pétreo.

Cabe aclarar que, a pesar de presentar diferencias, los agregados cumplen con los establecido en la Norma INV E-218, donde indica que los resultados porcentuales de pérdida no deben

diferir el uno del otro más del 5.7% de su promedio, tal como ocurre con las muestras presentadas.

Por otro lado, en los resultados obtenidos en el equivalente de arena donde la MSC-19 obtuvo un valor porcentual del 51% y la MDC-19 obtuvo un equivalente de arena de 67%, donde según la INV E-133, cuando los agregados obtienen valores iguales o por encima del umbral de 50%, los agregados son limpios con menos arcillas, al contrario de cuando están por debajo de dicho valor hay más posibilidades de presencia de materiales finos indeseables.

Cabe resaltar que la diferencia porcentual de 16 puntos entre los agregados y que indicaría que la MDC-19 presenta mejores resultados, debido a que con un valor de 67% se reducen la presencia de arcillas, se mejora la adherencia asfalto-agregado, disminuye la susceptibilidad al daño por humedad, además contribuye a que se genere una mayor durabilidad del pavimento. Sin embargo, los valores del equivalente de arena es solo un indicador de calidad de los finos, así como los demás indicadores mostrados en la Tabla 9, ya que el desempeño real de la mezcla depende a su vez de la granulometría, valores de contenido de asfalto, el ensayo de estabilidad Marshall, entre otros.

5.2. Cemento asfáltico

Las características del cemento asfáltico se encuentran consignadas en la Tabla 10 que se presenta a continuación.

Tabla 10*Características y propiedades físicas de cemento asfáltico*

Ensayo	Norma	MSC-19 (Mod. III)	MDC-19 (40/50) Espec.	MDC-19 (40/50) Resultado
Tipo / Designación	—	Modificado Tipo III	Convencional 40/50	Convencional 40/50
Penetración a 25 °C (1/10 mm)	E-706	—	40 – 50	49
Gravedad específica	Ficha técnica	1,050	—	1,020
Punto de ablandamiento (°C)	E-712	—	52 – 58	54
Viscosidad a 60 °C (Pa·s)	E-717	—	> 200	512
Temp. mezcla (°C)	Reología	157 – 162	154 – 159	154 – 159
Temp. compactación (°C)	Reología	146 – 151	143 – 148	143 – 148
Grado de desempeño PG	INVIAS	PG ≥ 70 (inferido)	PG 70 (diseño)	PG 70

De acuerdo con la Tabla 10, el cemento asfáltico modificado con polímeros tipo III utilizado en la MSC-19, Bajo condiciones de alta radiación solar, un pavimento puede alcanzar temperaturas superficiales entre 55 °C y 70 °C, e incluso superiores en zonas de clima cálido como Aguachica. Estas temperaturas reducen la rigidez del ligante asfáltico convencional, incrementando el riesgo de:

- Deformación permanente (ahuellamiento)
- Desplazamiento lateral de la mezcla
- Pérdida de estabilidad Marshall
- Exudación o sangrado del ligante
- Reducción de la vida útil del pavimento

Por esta razón, las especificaciones del INVÍAS recomiendan el empleo de cementos asfálticos modificados en proyectos sometidos a altas temperaturas y elevados niveles de tránsito, debido a que estos ligantes presentan una mayor resistencia al flujo plástico y conservan una mayor rigidez a temperaturas elevadas.

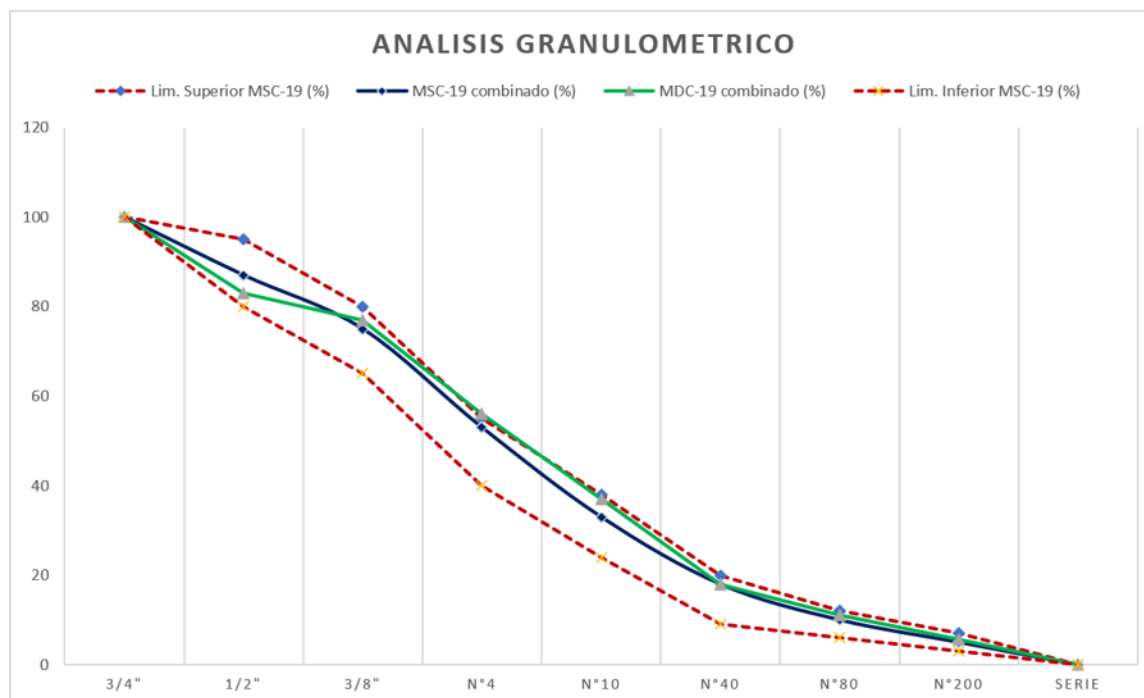
5.3. Análisis Granulométrico

Para la determinación de los requisitos fundamentales para la elaboración se presentan los datos enmarcados en la Tabla 11 y la Figura 15, donde de acuerdo a la tabla 450-5 “Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVÍAS, 2022), para las dos mezclas (MDC-19 y MSC-19), se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11

Análisis granulométrico

Tamiz (mm)	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200	Serie
Lim. Superior MSC-19 (%)	100	95	80	55	38	20	12	7	INVÍAS 450-6
MSC-19 combinado (%)	100	87	75	53	33	18	10	5	Multinsa
MDC-19 combinado (%)	100	83	77	56	37	18	11	5.7	Aguas Claras
Lim. Inferior MSC-19 (%)	100	80	65	40	24	9	6	3	INVÍAS 450-6

Figura 15*Curva de Análisis Granulométrico*

Los resultados muestran que la mezcla MSC-19 Combinado, correspondiente a la planta Multinsa, presenta un porcentaje de material pasante del 100% en el tamiz 3/4" indicando que la totalidad del agregado tiene un tamaño inferior a 19 mm, la cual es condición esencial requerida para este tipo de mezcla, de la misma manera se obtiene un porcentaje del 87% en el tamiz 1/2" encontrándose en el rango establecido entre el 80% y 95% al igual que los tamices 3/8" y N°4 cumpliendo con los rangos especificados por la norma encontrándose en 75% y 53%. En los tamices más finos como lo son el N°10, 40 y 80, la mezcla presenta porcentajes pasantes del 33%, 18% y 10%, respectivamente, manteniendo los intervalos de la norma. Mientras tanto el tamiz N°200 es de 5%, donde los intervalos del límite inferior son de 3% y el superior de 7%, dicho resultado es indicativo que una adecuada proporcionalidad de materiales finos, los cuales contribuyen al equilibrio entre estabilidad, trabajabilidad y durabilidad de la mezcla.

Por otra parte, la mezcla asfáltica MDC-19, proveniente de la fuente Aguas Claras, presenta un valor de 100% de material que pasa por el tamiz 3/4”, el tamiz 1/2” presenta valor de 83% y los tamices 3/8” y N°4 obtuvieron resultados de 77% y 56% respectivamente. Los valores porcentuales de los tamices N°10,40, 80 y 200 los cuales fueron 37%, 18%, 11% y 5.7% respectivamente cumplen con las márgenes establecidas por la tabla 450-5 “Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2022) y se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12

Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

Tipo de mezcla		Tamiz (mm / U.S. Standard)									
		37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,180	0,075
		1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	3/4 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 80	Nro. 200
		Pasa tamiz (%)									
Densa	MDC-25	-	100	80 – 95	67 – 85	60 – 77	43 – 59	29 – 45	14 – 25	8 – 17	4 – 8
	MDC-19	-	-	100	80 – 95	70 – 88	49 – 65	29 – 45	14 – 25	8 – 17	4 – 8
	MDC-10	-	-	-	-	100	65 – 87	43 – 61	16 – 29	9 – 19	5 – 10
Semidensa	MSC-25	-	100	80 – 95	65 – 80	55 – 70	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
	MSC-19	-		100	80 – 95	65 – 80	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
Gruesa	MGC-38	100	75 – 95	65 – 85	47 – 67	40 – 60	28 – 46	17 – 32	7 – 17	4 – 11	2 – 6
	MGC-25	-	100	75 – 95	55 – 75	40 – 60	28 – 46	17 – 32	7 – 17	4 – 11	2 – 6
Alto módulo	MAM-25	-	100	80 – 95	65 – 80	55 – 70	40 – 55	24 – 38	10 – 20	8 – 14	6 – 9
	MAM-19	-	-	100	80 – 95	65 – 80	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		-	4 %					3 %			2 %

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

Por ende, de acuerdo a los resultados porcentuales y comparando los resultados con la tabla 450-5 “Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua” (INVIAS, 2022), las dos mezclas cumplen con los valores granulométricos definidos por la norma.

5.4. Empaquetamiento Bailey

En la Tabla 13 se evidencia el análisis de empaquetamiento Bailey fue realizado para la MSC-19 según los criterios de la Circular EC-404 (Transportation Research Board, 2002). Los parámetros obtenidos indican que la mezcla se comporta predominantemente como una gradación semidensa con tendencia al límite superior de la fracción fina:

Tabla 13

Análisis empaquetamiento Bailey MSC-19

Parámetro Bailey — MSC-19	Valor Obtenido	Rango / Referencia	Interpretación
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	12,7 mm	Tamiz 1/2"	100% pasa
Tamiz medio (HS)	6,4 mm	Tamiz 1/4"	60,1% pasa
Tamiz control primario (TCP)	2,8 mm	Tamiz N°8	39,0% pasa
Tamiz control secundario (TCS)	0,6 mm	Tamiz N°30	19,7% pasa
Tamiz control terciario (TCT)	0,1 mm	Tamiz N°200	7,8% pasa
Relación CA (agregado grueso)	0,53	Rango: 0,60–0,75	Fuera rango grueso
Relación FAc (porción gruesa del fino)	0,51	Rango: 0,35–0,50	Límite superior
Relación FAf (porción fina del fino)	0,40	Rango: 0,35–0,50	Dentro del rango

De acuerdo con la Tabla 13 se puede deducir los siguientes parámetros establecidos en el estudio de la mezcla MDC-19 como lo es el cálculo del Ratio del CA, el cual es hallado mediante la formula

$$CA_{Ratio} = \frac{\%Pasa HS - \%Pasa TCP}{100 - \%Pasa HS} * 100$$

$$CA_{Ratio} = \frac{60.1\% - 39\%}{100 - 60.1\%} * 100$$

$$CA_{Ratio} = 0.91$$

Además de lo anterior también es necesario la identificación de la porción gruesa en los agregados finos que llenan los vacíos dejados por el agregado grueso, este dato se calcula mediante la siguiente formula:

$$FA_c = \frac{\%Pasa\ TCS}{\%Pasa\ TCP}$$

$$FA_c = \frac{19.7\%}{39\%}$$

$$FA_c = 0.50$$

A su vez es necesario conocer además la porción fina en el agregado fino, el cual representa la porción gruesa del agregado fino que es llenada por la fracción fina del mismo, y es calculada mediante la siguiente expresión:

$$FA_c = \frac{\%Pasa\ TCT}{\%Pasa\ TCS}$$

$$FA_c = \frac{7.8\%}{19.7\%}$$

$$FA_c = 0.38$$

Sin embargo, al no cumplir con los rangos de control establecidos, la mezcla se comporta como de gradación fina, por ende, se evalúan las características de empaquetamiento de agregados para mezclas finas de acuerdo con la Tabla 14 para la MDC-19, el CA ratio de 0,91 indica gradación fina (supera el límite superior de mezclas gruesas de 0,75.)

Tabla 14

Tamices de control para mezclas de gradación fina

Tamiz de Control	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.7 mm	9.50 mm	4.75 mm
Original PCS	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18

Tamiz de Control	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.7 mm	9.50 mm	4.75 mm
Nuevo HS	4,75	2,36	2,36	1,18	1,18	0,60
Nuevo PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Nuevo SCS	0,80	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075
Nuevo TCS	0,15	0,075	0,075	—	—	—

Donde:

NMPS: Tamaño Máximo Nominal del Agregado (Nominal Maximum Particle Size).

HS: Half Sieve (Tamiz Medio).

PCS: Primary Control Sieve (Tamiz de Control Primario).

SCS: Secondary Control Sieve (Tamiz de Control Secundario).

TCS: Tertiary Control Sieve (Tamiz de Control Terciario).

De acuerdo con la circular EC-044, los valores de porcentaje de pasa correspondientes a cada tamiz se recalculan haciendo un 100% el porcentaje de pasa del tamiz Original PCS. Para el caso 4,75 mm, y para cada uno de los tamices de control se divide el porcentaje de pasa entre el % de pasa del PCS, de esta manera se tienen nuevos % de pasa que representan como se acomodan los agregados en la fracción predominantemente fina. En la Tabla 15 se presentan los porcentajes de pasa.

Tabla 15

Porcentajes de pasa en nuevos tamices de control para mezclas finas

Abreviatura	Descripción	Tamiz (Abertura)	Abertura (mm)	% Pasa
Original PCS	Tamiz de Control Primario	Nº 4	4,76	100,0

Abreviatura	Descripción	Tamiz (Abertura)	Abertura (mm)	% Pasa
NHS	Nuevo Tamiz Medio (<i>New Half Sieve</i>)	N° 8	2,36	59.5
NPCS	Nuevo Tamiz de Control Primario (<i>New Primary Control Sieve</i>)	N° 16	1,18	48,7
NSCS	Nuevo Tamiz de Control Secundario (<i>New Secondary Control Sieve</i>)	N° 30	0,30	24.5
NTCS	Nuevo Tamiz de Control Terciario (<i>New Tertiary Control Sieve</i>)	N° 200	0,075	10,2

Cálculo de Nuevo CA Ratio

$$CA_{Ratio} = \frac{\%Pasa\ NHS - \%Pasa\ NPCS}{100 - \%Pasa\ NHS} * 100$$

$$CA_{Ratio} = \frac{59.5\% - 48.7\%}{100 - 70.7\%} * 100$$

$$CA_{Ratio} = 0.75$$

Cálculo Relación gruesa del agregado Fino

$$FA_c = \frac{\%Pasa\ NSCS}{\%Pasa\ NPCS}$$

$$FA_c = \frac{24.5\%}{48.7\%}$$

$$FA_c = 0.50$$

Cálculo relación finos del agregado fino

$$FA_f = \frac{\%Pasa\ NTCS}{\%Pasa\ NSCS}$$

$$FA_f = \frac{10.2\%}{24.5\%}$$

$$FA_f = 0.41$$

De acuerdo con los resultados de la Tabla 15 la mezcla cumple con los requerimientos de empaquetamiento de agregados para la fracción fina. A la combinación de agregados se le realizaron los ensayos de caracterización físico-mecánicas de acuerdo con los requerimientos del Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2022 para una capa rodadura

5.5. Diseño Marshall

El ensayo para determinar el diseño Marshall para las dos mezclas MSC-19 y MDC-19, para el ensayo de la MSC-19 se fabricaron 100 briquetas con una temperatura de mezcla entre 157°C a 162 °C y una temperatura de compactación que oscilaba entre 146-151°C, donde se aplicaron 75 golpes por cara, los cuales corresponden al nivel de tránsito NT3, de acuerdo con la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022) consignados en la Tabla 16.

Tabla 16

Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall

Característica		Norma de Ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo
			Categoría de tránsito			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)			5 000	7 500 (16 875)	9 000 (20 250)	15 000
Flujo (mm). (Nota 2)			2,0 — 4,0	2,0 — 4,0 (3,0 — 6,0)	2,0 — 3,5 (3,0 — 5,3)	2,0 — 3,0
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)			2,0 — 4,0	3,0 — 5,0 (4,5 — 7,5)	3,0 — 6,0 (4,5 — 9,0)	-
Vacíos con aire (Va) (%). (Nota 3)	Rodadura	E-736 E-799	3,0 — 5,0	3,0 — 5,0	3,0 — 5,0	4,0 — 6,0
	Intermedia		4,0 — 8,0	4,0 — 7,0	4,0 — 7,0	4,0 — 6,0
	Base		NA	5,0 — 8,0	5,0 — 8,0	4,0 — 6,0

Característica		Norma Ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo
			Categoría de tránsito			
			NT1	NT2	NT3	
Vacíos en los agregados minerales (VAM), mínimo (%)	T. Máx. 38 mm	E-799	13,0			-
	T. Máx. 25 mm		14,0			14,0
	T. Máx. 19 mm		15,0			-
	T. Máx. 10 mm		16,0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)		E-799	65 — 80	65 — 78	65 — 75	63 — 75
Relación Llenante/Ligante efectivo, en peso		E-799	0,8 — 1,2			1,2 — 1,4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor crítico			
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey		-	Reportar			
Espesor promedio de película de asfalto. mínimo (µm)		E-741	7,5			

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

Las briquetas fabricadas se realizaron con porcentajes de contenido de asfalto que van desde 4.5% hasta 6.5%, con incrementos porcentuales de 0.5% con tres briquetas por nivel, donde los resultados consignados en la Tabla 17 determinaron que:

Tabla 17*Cuadro Marshall MSC-19*

% Asfalto	Estab. (N)	Flujo (mm)	Est/Fl (kN/mm)	Va (%)	VAM (%)	VFAM (%)	Llen/Lig.
4,5	19 900	4,0	4,9	7,2	15,2	—	—
5,0	21 400	4,4	4,9	4,9	15,2	—	—
5,1 ★	21 980	4,1	5,4	4,8	15,2	69	1,08
5,5	22 500	4,4	—	4,1	15,4	—	—
6,0	19 800	4,8	—	2,9	15,4	—	—
6,5	16 650	5,9	—	3,2	16,5	—	—

Para efectos se realizó análisis técnico para cada porcentaje de cemento asfáltico evaluado en el diseño Marshall de la mezcla semidensa en caliente MSC-19, considerando el comportamiento conjunto de la estabilidad, el flujo y las propiedades volumétricas de la mezcla.

Contenido de asfalto 4,5 %

La mezcla con 4,5 % de cemento asfáltico presentó una estabilidad Marshall de 19 900 N, valor que evidencia una adecuada capacidad resistente; sin embargo, es el menor de todos los contenidos evaluados. El flujo obtenido fue de 4,0 mm, indicando una mezcla relativamente rígida con limitada capacidad de deformación. El porcentaje de vacíos de aire (7,2 %) es considerablemente alto, lo que refleja una cantidad insuficiente de ligante para llenar adecuadamente los espacios entre los agregados. Esta condición favorece la permeabilidad de la mezcla, incrementa la susceptibilidad al envejecimiento oxidativo del asfalto y aumenta el riesgo de desprendimiento de agregados por acción del agua. Aunque el VAM de 15,2 % es adecuado, el elevado contenido de vacíos descarta este porcentaje como contenido óptimo, ya que compromete la durabilidad del pavimento.

Contenido de asfalto 5,0 %

Con un contenido de 5,0 % de cemento asfáltico, la estabilidad Marshall aumenta hasta 21 400 N, evidenciando una mejora en la cohesión y en la capacidad estructural de la mezcla. El flujo alcanza 4,4 mm, valor que continúa dentro de un comportamiento adecuado para este tipo de mezcla. Los vacíos de aire disminuyen hasta 4,9 %, acercándose al rango objetivo de diseño, mientras que el VAM permanece constante en 15,2 %, indicando que la estructura granulométrica conserva un adecuado empaquetamiento. Aunque este contenido presenta un comportamiento favorable, aún no representa el equilibrio óptimo entre resistencia y propiedades volumétricas, razón por la cual continúa evaluándose un mayor contenido de ligante.

Contenido de asfalto 5,1 %

El contenido de 5,1 % de cemento asfáltico corresponde al contenido óptimo de diseño, ya que reúne el mejor equilibrio entre todas las propiedades evaluadas. La estabilidad Marshall alcanza 21 980 N, valor elevado que garantiza una adecuada resistencia frente a las cargas del tránsito. El flujo de 4,1 mm evidencia una mezcla suficientemente flexible sin presentar deformaciones excesivas. La relación estabilidad/flujo alcanza su máximo valor (5,4 kN/mm), indicando una excelente combinación entre resistencia y rigidez estructural. Adicionalmente, el porcentaje de vacíos de aire (4,8 %) se encuentra dentro del intervalo recomendado para asegurar durabilidad e impermeabilidad, mientras que el VAM (15,2 %), el VFAM (69 %) y la relación llenante/ligante (1,08) muestran un adecuado equilibrio entre la estructura mineral y el contenido de ligante. En conjunto, estos resultados justifican técnicamente la selección del 5,1 % como contenido óptimo para la mezcla MSC-19.

Contenido de asfalto 5,5 %

Con un contenido de 5,5 %, la estabilidad Marshall alcanza el mayor valor del ensayo (22 500 N), lo que indica que la mezcla desarrolla una elevada resistencia a la carga máxima

aplicada. Sin embargo, el flujo aumenta hasta 4,4 mm, evidenciando una mayor deformabilidad. Paralelamente, los vacíos de aire disminuyen hasta 4,1 %, acercándose al límite inferior recomendado, mientras que el VAM aumenta ligeramente hasta 15,4 %. Aunque la elevada estabilidad podría sugerir un mejor comportamiento estructural, este contenido implica una mayor cantidad de ligante que incrementa el riesgo de deformación permanente y ahuellamiento durante el servicio. Por esta razón, el criterio de selección del contenido óptimo no se basa únicamente en la estabilidad máxima, sino en el cumplimiento simultáneo de todos los parámetros de diseño, motivo por el cual este porcentaje no fue seleccionado.

Contenido de asfalto 6,0 %

Con un contenido de 6,0 %, la estabilidad Marshall disminuye hasta 19 800 N, mientras que el flujo aumenta a 4,8 mm, comportamiento que evidencia una reducción de la rigidez de la mezcla debido al exceso de ligante. El porcentaje de vacíos de aire desciende hasta 2,9 %, indicando que gran parte de los espacios internos se encuentran ocupados por cemento asfáltico. Esta condición incrementa considerablemente la susceptibilidad a la deformación permanente y al sangrado del pavimento bajo temperaturas elevadas y tránsito pesado. Aunque el VAM permanece en 15,4 %, la reducción excesiva de vacíos hace que este contenido no sea recomendable para el diseño de la mezcla.

Contenido de asfalto 6,5 %

El contenido de 6,5 % de cemento asfáltico presenta el comportamiento menos favorable del estudio. La estabilidad Marshall disminuye significativamente hasta 16 650 N, mientras que el flujo alcanza el mayor valor registrado (5,9 mm), indicando una mezcla excesivamente plástica y con baja resistencia estructural. El porcentaje de vacíos de aire es de 3,2 %, confirmando la presencia de un exceso de ligante dentro de la estructura granular. Aunque el

VAM aumenta hasta 16,5 %, este incremento no mejora el comportamiento de la mezcla, ya que la elevada cantidad de asfalto reduce la fricción entre los agregados y favorece la deformación permanente bajo carga. En consecuencia, este contenido queda completamente descartado como alternativa de diseño debido a su alta susceptibilidad al ahuellamiento y a la pérdida de estabilidad mecánica.

En el análisis de los resultados comprendidos en la Tabla 17, se determina que con un porcentaje de asfalto del 5.1% se obtuvo, un flujo de 4.1 mm, la cual está amparada en la nota 2 de la tabla 450-9 donde define que “Para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se puede aceptar un valor de flujo hasta de cinco milímetros (5,0 mm). En cualquier caso, se debe cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla para la relación Estabilidad/Flujo” (INVIAS, 2022). De la misma manera la relación estabilidad flujo cumple con los intervalos que oscilan entre 3.0 – 6.0 kN/mm, dando como resultado de 5.4 kN/mm.

El porcentaje de vacíos con aire dio como resultado un valor de 4.8%, dato que cumple con los criterios establecidos en la Tabla 16 y que a su vez puede aplicarse para la aplicación de dos capas tanto intermedia como rodadura según los resultados para un nivel de tránsito NT3.

Del mismo modo el porcentaje de vacíos en los agregados minerales (VAM) para tamaños máximos nominales de 19 mm y un nivel de tránsito NT3, donde el parámetro establecido de acuerdo con la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022), es de 15.0% se obtuvo un resultado de 15.2%. El resultado porcentual de los vacíos llenos de asfaltos, el cual se encuentra en el rango permitido de 65% – 75% donde se obtuvo un valor de 69%. Por

último, la relación llenante Ligante efectivo en peso se obtuvo un valor de 1.08 manteniéndose dentro de los límites establecidos por norma los cuales oscilan entre 0.8 y 1.2 respectivamente.

Por ende, se concluye que para la mezcla MSC-19 un valor de 5.1% de contenido de asfalto modificado con polímeros tipo III Cumple con los criterios establecidos por la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022).

En cuanto a la mezcla MDC-19 se 100 fabricaron briquetas con temperaturas que oscilan de 154-159°C y temperaturas de compactación entre 143 y 148°C, donde se aplicaron 75 golpes por cara para un nivel de tránsito NT3, de los cuales se evidencia que cumple con los parámetros por la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022). Donde, las briquetas fabricadas contemplaron contenidos de asfaltos en porcentaje oscilando entre 4.0% a 6.5%, con incrementos porcentuales de 0.5% con tres briquetas por nivel, donde los resultados consignados en la Tabla 18 determinaron que:

Tabla 18

Cuadro Marshall MDC-19

% Asfalto	Estab. (N)	Flujo (mm)	Est/Fl (kN/mm)	Va (%)	VAM (%)	VFAM (%)	Llen/Lig.
4,0	15 343	3,17	5,0	7,3	14,8	51,2	1,61
4,5	13 500	3,19	4,2	6,4	15,0	57,4	1,42
5,0	13 076	3,23	4,1	5,2	14,8	65,2	1,28
5,5	14 202	3,42	4,2	4,5	15,2	70,2	1,16
5,6 ★	14 100	3,52	4,01	4,1	15,3	73,4	1,15
6,0	13 965	3,76	3,7	3,6	15,4	76,7	1,06
6,5	12 856	3,94	3,3	1,4	14,4	90,1	0,97

Fuente: Apéndice 1 Diseño de mezcla asfáltica MDC-19 (Consorcio Infraestructura Vial del Cesar, 2023).

En el análisis se determinó que para una muestra con contenido de asfalto de 5.6% y de acuerdo con la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022). Los resultados arrojados según la Tabla 18, de acuerdo con los datos se obtuvo un valor de flujo (mm) 3.52 mm, valor el cual está amparado por la nota 2 de la tabla 450-9 donde define que “Para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se puede aceptar un valor de flujo hasta de cinco milímetros (5,0 mm). En cualquier caso, se debe cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla para la relación Estabilidad/Flujo” (INVIAS, 2022).

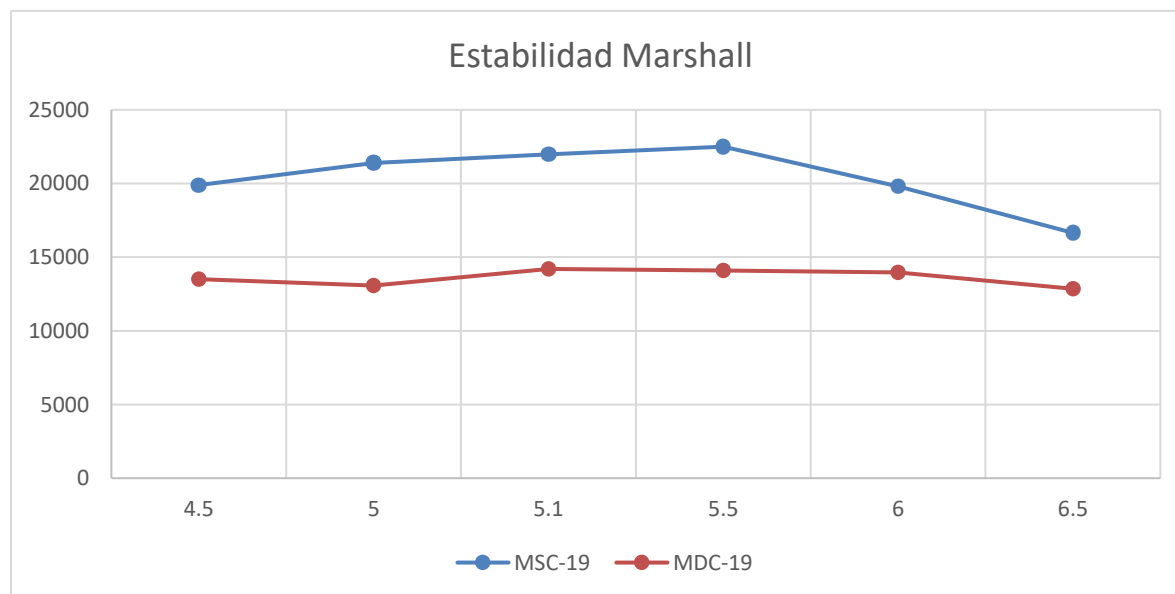
Así mismo, se obtuvo un valor de estabilidad/Flujo de 4.01 kN/mm, el cual cumple con los criterios establecidos por la norma donde se define como variables a considerar valores que van desde 3.0 kN/mm hasta 6.0 kN/mm. En cuanto al resultados de vacíos con aire con una proporción de 5.6%, el cual arrojó un resultado de 4.1% dato que cumple con los criterios establecidos en la Tabla 16 y que a su vez puede aplicarse para la aplicación de dos capas tanto intermedia como rodadura según los resultados para un nivel de tránsito NT3 al igual que la mezcla semidensa caliente (MSC-19). El resultado obtenido para el porcentaje de vacíos en los agregados minerales (VAM) correspondió a su vez con un valor de 15.3%, tomando como valor base lo establecido en la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022). El resultado obtenido más favorable con el porcentaje contenido de asfalto de 5.6% para los vacíos llenos de asfaltos el cual se dio un valor de 73.4%, definiendo así, que dicho resultado puede ser óptimo para los tres tipos de niveles de tránsito definidos en la Tabla 16. Para finalizar se obtuvo un valor en la

relación llenante ligante efectivo de 1.15 en peso, manteniéndose dentro del rango establecido que oscila entre 0.8 y 1.2.

Con base a los resultados obtenidos en la Tabla 17 y Tabla 18, con relación a la estabilidad (N) se puede inferir mediante la Figura 16, donde se identifica en el eje x los porcentajes de contenido de asfalto y en el eje y los resultados en estabilidad (N) para cada uno de ellos. En cuanto a la comparación de cada dato obtenido tomando los parámetros antes mencionados en las descripciones de cada resultado, se enmarcarán en el punto más adelante en el numeral 5.5.1. Análisis comparativo por parámetros de diseño.

Figura 16

Estabilidad Marshall MDC-19 Vs MSC-19



5.5.1. Análisis comparativo por parámetros de diseño

Se realizó el análisis comparativo y los resultados se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19*Análisis Comparativo parámetro de diseño*

Parámetro	Especificación NT3	MSC-19 (resultado)	MDC-19 (resultado)	MSC-19 cumple	MDC-19 cumple
Contenido asfalto (%)	—	5,1	5,6	✓	✓
Compactación (golpes/cara)	75	75	75	✓	✓
Estabilidad mínima (N)	9 000	21 980	14 100	✓	✓
Flujo (mm)	2,0 – 3,5 / Máx 5,0*	4,1	3,52	✓*	✓
Relación Est./Flujo (kN/mm)	3,0 – 6,0	5,4	4,01	✓	✓
Vacíos con aire Va (%)	4,0 – 6,0	4,8	4,1	✓	✓
VAM — vacíos ag. mineral (%)	≥ 15	15,2	15,3	✓	✓
VFAM — vacíos llenos asfalto (%)	65 – 75	69	73,4	✓	✓
Rel.	0,8 – 1,2	1,08	1,15	✓	✓
Llenante/Ligante efectivo					
Película de asfalto (µm)	≥ 7,5	9,1	8,4	✓	✓
Gravedad Esp. Bulk	—	2,391	2,331	✓	✓
RRT susceptib. agua (%)	≥ 80	82,3	81,5	✓	✓

Estabilidad Marshall. Tal como lo muestra en la Figura 16, la mezcla MSC-19 presenta una estabilidad de 21.980N, la cual supera en un 144% el requisito mínimo de 9.000 N para NT3 según la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall”, y en 56% de la estabilidad de MDC-19 (14.100 N). Dicha diferencia se explica por el efecto del refuerzo aplicado en la mezcla modificada con polímeros tipo III, la cual incrementa la resistencia de la película asfáltica frente a las cargas

aplicadas. La MDC-19 también supera ampliamente el requisito mínimo NT3 (9.000 N), evidenciando la alta calidad de los agregados de la fuente Aguas Claras.

Vacíos con Aire (Va) y Vacío en los agregados minerales (VAM). Ambas mezclas se encuentran dentro de los rangos presentados en la tabla 450-9 “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” (INVIAS, 2022), Respecto a los vacíos de aire (Va), la diferencia entre ambas mezclas es de únicamente 0,7 % (4,8 % para la MSC-19 y 4,1 % para la MDC-19). Este comportamiento indica que ambas mezclas poseen una adecuada compactación; sin embargo, el valor ligeramente superior de la MSC-19 proporciona un mayor volumen de vacíos interconectados que permite absorber pequeñas deformaciones ocasionadas por el tránsito y las variaciones térmicas, disminuyendo la probabilidad de exudación o sangrado del ligante durante periodos de altas temperaturas. Por otra parte, la MDC-19, al presentar un contenido de vacíos menor, desarrolla una estructura más impermeable, aunque con un riesgo ligeramente mayor de deformación plástica cuando el contenido de ligante aumenta.

Relación llenante / ligante y película de asfalto. La MSC-19 presentó un valor de 1,08, mientras que la MDC-19 alcanzó 1,15, encontrándose ambas dentro del rango recomendado (0,8–1,2). No obstante, el valor obtenido para la MSC-19 se encuentra más cercano al punto medio del intervalo, indicando un mastico asfáltico mejor balanceado. Este equilibrio favorece una adecuada cohesión entre el ligante y los agregados, mejora la trabajabilidad de la mezcla y reduce la probabilidad de fisuración por exceso de rigidez.

La diferencia más importante se observa en el espesor de la película de asfalto, donde la MSC-19 presenta 9,1 μm , mientras que la MDC-19 registra 8,4 μm . Aunque la diferencia absoluta es de apenas 0,7 μm , desde el punto de vista del comportamiento del ligante representa

aproximadamente un 8 % más de espesor de recubrimiento sobre los agregados. Esta condición proporciona una mayor protección frente a la oxidación del asfalto, mejora la adhesión ligante-agregado y disminuye la susceptibilidad al desprendimiento por acción del agua. En consecuencia, la mezcla MSC-19 podría desarrollar una mayor durabilidad y conservar durante más tiempo sus propiedades mecánicas.

Densidad y gravedad Específica. Dentro de los resultados se evidencio que la densidad Bulk, la MSC-19 alcanzó $2,391 \text{ g/cm}^3$, mientras que la MDC-19 presentó $2,331 \text{ g/cm}^3$, diferencia atribuida principalmente a la mayor gravedad específica combinada de los agregados utilizados en la MSC-19 ($G_{sb} = 2,676$) frente a la MDC-19 ($G_{sb} = 2,606$). Una mayor densidad generalmente está asociada con un mejor empaquetamiento de las partículas minerales y una mayor resistencia estructural. En este caso, la diferencia cercana al 2,6 % puede traducirse en una menor susceptibilidad a la infiltración de agua, una mayor capacidad para soportar cargas repetidas y un mejor comportamiento frente a la acción de agentes ambientales.

Finalmente, cuando estos resultados se analizan de manera conjunta con la utilización de un cemento asfáltico modificado con polímeros Tipo III, las ventajas de la MSC-19 adquieren mayor relevancia. El mayor espesor de película asfáltica, la adecuada relación llenante/ligante y la mayor densidad permiten aprovechar de manera más eficiente las propiedades reológicas del ligante modificado, incrementando la resistencia al ahuellamiento, mejorando la resistencia a la fatiga y reduciendo el envejecimiento prematuro de la mezcla. En consecuencia, aunque las diferencias entre ambas mezclas son numéricamente pequeñas, desde el punto de vista de la ingeniería de pavimentos son estadísticamente y funcionalmente importantes, ya que contribuyen a mejorar la durabilidad, el desempeño mecánico y la vida útil esperada del pavimento.

5.6. Ensayos de desempeño

Los ensayos de desempeño se realizaron en un laboratorio externo y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

Ensayos de desempeño MDC-19 Vs MSC-19

Ensayo de Desempeño	Norma	Especificación	MSC-19 (Modificado)	MDC-19 (Convencional)
TSR —	INV E-725	≥ 80 (NT3)	82,3	81,5
Resistencia conservada (%)				
Resistencia seca (kPa)	INV E-725	—	1 342	1 073
Resistencia húmeda (kPa)	INV E-725	—	1 104	874
Módulo dinámico a -10 °C / 25 Hz (MPa)	AASHTO T342	Reportar	22 039	No realizado
Módulo dinámico a $4,4\text{ °C}$ / 25 Hz (MPa)	AASHTO T342	Reportar	14 037	No realizado
Módulo dinámico a $21,1\text{ °C}$ / 10 Hz (MPa)	AASHTO T342	Reportar	7 131	No realizado
Módulo dinámico a $37,8\text{ °C}$ / 25 Hz (MPa)	AASHTO T342	Reportar	3 935	No realizado
Módulo dinámico a $54,0\text{ °C}$ / 25 Hz (MPa)	AASHTO T342	Reportar	2 752	No realizado
Deformac. permanente Hamburg (20 000 ciclos, mm)	AASHTO T324	Reportar	9,12 (Espec.1)	No realizado
SIP Hamburg — espécimen 2 (ciclos)	AASHTO T324	Reportar	8 241	No realizado
Fatiga: ϵ_6 a 1×10^6 ciclos ($\mu\epsilon$)	INV E-784	Reportar	206,1	No realizado

Ensayo de Desempeño	Norma	Especificación	MSC-19 (Modificado)	MDC-19 (Convencional)
Ciclos falla a 250 $\mu\epsilon$	INV E-784	Reportar	505 947	No realizado
Ciclos falla a 350 $\mu\epsilon$	INV E-784	Reportar	200 332	No realizado
Ciclos falla a 450 $\mu\epsilon$	INV E-784	Reportar	86 427	No realizado

Para los ensayos de desempeño de las mezclas es necesario establecer claridad donde para la mezcla MSC-19 se fue más específico en los resultados a comparación de la MDC-19, tomando como base demostrativo los informes realizados por los laboratorios especificados para cada una de las mezclas. Además, es necesario resaltar que dichos ensayos tienen como objetivo principal evaluar el comportamiento real de la mezcla frente a las condiciones de servicio, verificando que no solo cumpla con los requisitos volumétricos y de estabilidad del método Marshall, sino que también posea la capacidad de resistir los principales mecanismos de deterioro que afectan a los pavimentos durante su vida útil.

En el caso de las mezclas MSC-19 y MDC-19, los ensayos de desempeño permiten determinar la resistencia de la mezcla al ahuellamiento o deformación permanente, a la fatiga, al daño inducido por humedad, a la rigidez y, en algunos casos, a la fisuración térmica. La evaluación de estas propiedades permite estimar el comportamiento esperado del pavimento durante su periodo de servicio y verificar que la combinación de agregados y ligante asfáltico sea capaz de soportar las cargas del tránsito sin presentar fallas prematuras.

5.6.1. TSR-Resistencia conservada (%)

El ensayo de Tracción Indirecta bajo Inmersión arroja un RRT (Relación de Resistencia a la Tracción) de 82,3% para la MSC-19, superando el mínimo requerido de 80% para NT3. La resistencia seca promedio fue de 1 342 kPa y la resistencia húmeda de 1 104 kPa, superando el

umbral de 560 kPa correspondiente al esfuerzo inducido por el eje dual de 80 kN. La MDC-19 también cumple con 81,5% (ambos diseños con promotor de adherencia de Multinsa). Esto confirma la adecuada adhesividad entre el CA y los agregados de la fuente Aguas Claras.

5.6.2. Resistencia a la deformación plástica- Rueda de Hamburgo

El ensayo de Rueda de Hamburgo a 50 °C con 705 N de carga de contacto produjo deformaciones permanentes de 9,12 mm (espécimen 1) y 8,55 mm (espécimen 2) a 20 000 ciclos. El punto de inflexión SIP (Stripping Inflection Point) del espécimen 2 se registró a los 8 241 ciclos con deformación de 5,84 mm, y ninguna muestra presentó desprendimiento. Este resultado confirma la resistencia al ahuellamiento de la mezcla con CA modificado, aspecto crítico dado que las temperaturas altas superficiales del pavimento en Aguachica pueden superar los 65 °C ($T_{\text{alta calculada}} = 65,27\text{ °C}$ según datos IDEAM).

5.6.3. Modulo dinámico

El módulo dinámico fue determinado en tres especímenes cilíndricos (diámetro ~10 cm, altura ~15,9 cm, G_{sb} promedio = 2,392) a cinco temperaturas y seis frecuencias. Los resultados más relevantes se presentan a continuación:

- A -10 °C / 25 Hz (condición fría-alta frecuencia): $E^* = 22\ 039\text{ MPa}$ — alta rigidez para control de fisuración por fatiga a bajas temperaturas.
- A $21,1\text{ °C}$ / 10 Hz (temperatura de referencia): $E^* = 7\ 131\text{ MPa}$ — rigidez de servicio para análisis estructural bajo tráfico normal.
- A $37,8\text{ °C}$ / 25 Hz (condición cálida): $E^* = 3\ 935\text{ MPa}$ — resistencia moderada al ahuellamiento.

- A 54,0 °C / 25 Hz (condición extrema-verano): $E^* = 2\,752\text{ MPa}$ — rigidez

residual aceptable para zonas cálidas.

5.6.4. Leyes de fatiga bajo flexión dinámica

Las pruebas de fatiga se realizaron sobre vigas prismáticas a 20 °C y 10 Hz en deformación controlada a tres niveles de amplitud: 250, 350 y 450 $\mu\epsilon$. Los resultados permiten establecer la ley de fatiga de la mezcla (Tabla 21) para su aplicación en el dimensionamiento estructural del pavimento flexible:

Tabla 21

Pruebas de fatiga

Deformación ($\mu\epsilon$)	Ciclos de falla (N)	Rigidez inicial (Pa)	Constante A	Constante b
250	505 947	$2,90 \times 10^9$	$2,90 \times 10^9$	$-1,37 \times 10^{-6}$
350	200 332	$3,48 \times 10^9$	$3,48 \times 10^9$	$-3,46 \times 10^{-6}$
450	86 427	$3,59 \times 10^9$	$3,59 \times 10^9$	$-8,02 \times 10^{-6}$

La ley de fatiga global de la mezcla MSC-19 es: $\epsilon_6 = 20\,050 \cdot N^{(-0,331)}$, con $R^2 = 1,00$, donde ϵ_6 es la deformación unitaria a 1 000 000 de ciclos = 206,1 $\mu\epsilon$. Esta expresión potencial ajusta perfectamente los tres puntos de ensayo, siendo representativa del comportamiento frente a la fatiga por flexión. El valor $\epsilon_6 = 206,1 \mu\epsilon$ es un parámetro de entrada directo en modelos de diseño mecanístico (M-E PDG), indicando una mezcla con resistencia a la fatiga adecuada para altos niveles de tránsito.

6. Análisis del desempeño, los costos y la adaptabilidad de las mezclas MSC-19 y MDC-19

6.1. Análisis de desempeño de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19

Los resultados obtenidos favorecen a la MSC-19 con cemento asfáltico modificado tipo III: una estabilidad Marshall de 21.980 N frente a 14.100 N, un espesor de película de asfalto de

9,1 μm frente a 8,4 μm (que se traduce en mayor resistencia al envejecimiento oxidativo y al desprendimiento de agregados), una rigidez residual de 2.752 MPa a 54 °C, un comportamiento satisfactorio en rueda de Hamburgo tras 20.000 ciclos bajo agua a 50 °C y una ley de fatiga con $\epsilon_6 = 206,1 \mu\epsilon$. En una zona donde la temperatura alta de pavimento calculada a partir de registros IDEAM alcanza 65,27 °C, estos parámetros anticipan una menor incidencia de ahuellamiento, fisuración por fatiga y pérdida de agregado superficial, y por lo tanto intervalos de mantenimiento más amplios.

El valor de este trabajo no se agota en la decisión puntual sobre cuál mezcla emplear en Aguachica. La caracterización avanzada de la MSC-19 (curva maestra de módulo dinámico, resistencia a la deformación plástica en rueda de Hamburgo y ley de fatiga bajo flexión dinámica) entrega parámetros de entrada directamente utilizables en el diseño mecanicista de pavimentos, un nivel de información que rara vez se encuentra documentado para mezclas destinadas a vías secundarias y terciarias en la región. Esta información es transferible a otros municipios del Cesar y de La Guajira que comparten condiciones climáticas equivalentes (temperatura alta de pavimento del orden de 65 °C) y niveles de tránsito similares, de modo que el aporte trasciende el alcance contractual que le dio origen y queda disponible como referencia técnica regional.

6.2. Análisis comparativo de costos unitarios de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19

Los valores de este capítulo se realizaron tomando los datos especificados en los APUS emitidos por el instituto nacional de vías (INVIAS) del año 2025 para la zona sur del departamento del cesar donde se enmarca el proyecto. Sin embargo, para la interacción de los datos fue necesario realizar ajustes a lo indicado por el INVIAS debido a que, para efectos de validación de los costos directos de cada una de las mezclas, no se estaba contemplando por

ejemplo la emulsión asfáltica de rompimiento rápido, por lo que se añaden a este capítulo y se denotara en los APUS propuestos para efectos de este proyecto en la Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22

Análisis de precios unitarios mezcla asfáltica MDC-19

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
450,2	MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-19 (Aplicado para mezcla MDC-19 fabricada en planta móvil. Incluye suministro de agregados, producción, transporte, extendido y compactación. No incluye llenante mineral)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010140	Cargador: potencia en el volante 125 hp, clasificación de		\$ 179 824.05	0.10000	\$ 17 982.41		
C0010230	Compactador neumático de Potencia 70 HP, peso de 13 ton		\$ 146 739.40	0.10000	\$ 14 673.94		
C0010211	Compactador de rodillo potencia: 99 hp, peso: 8 toneladas		\$ 113 334.49	0.10000	\$ 11 333.45		
C0010660	Planta de asfalto en caliente continua de 120 toneladas de		\$ 711 235.81	0.10000	\$ 71 123.58		
C0010910	Terminadora de asfalto (Finisher), potencia en el volante 174 HP, R=20M3/H, velocidad de desplazamiento 114 m/min		\$ 203 177.63	0.10000	\$ 20 317.76		
C0010958	Volqueta 14 m3		\$ 157 877.21	0.10000	\$ 15 787.72		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 15 971.07	5.00%	\$ 798.55		
				SUBTOTAL \$	\$ 152 017.41		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
	Mezcla asfáltica MDC-19	m3	1.2500	\$ 313 200.00	\$ 391 500.00		
	Emulsión CRR-1	Lts	189.0000	\$ 1 318.33	\$ 249 164.37		
				SUBTOTAL \$	\$ 640 664.37		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0010400	Transporte de agregados	m3- km	1.3000	1.000	1.300		\$ 1 160.53
				SUBTOTAL \$	\$ 1 160.53		
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030080	Obrero (8)	\$ 379 600.00	2.0404	\$ 774 543.74	73.3333	\$ 10 561.96	
A0040010	Oficial	\$ 80 665.00	1.9318	\$ 155 825.89	73.3333	\$ 2 124.90	
A0070020	Rastrillero (2)	\$ 121 472.00	1.9827	\$ 240 842.27	73.3333	\$ 3 284.21	
				SUBTOTAL \$	\$ 15 971.07		
				TOTAL COSTO DIRECTO \$			\$ 809 813.38

Nota. Es un fragmento del APU, este se encuentra detallado en el Apéndice 2 Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MDC-19 (Consortio Infraestructura Vial del Cesar, 2023).

Tabla 23

Análisis de precios unitarios mezcla asfáltica MSC-19

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
450,5	MEZCLA SEMIDENSA EN CALIENTE TIPO MSC-19. (Aplicado para mezcla MSC-19 elaborada en planta móvil. Incluye agregados, producción, transporte, extendido y compactación. No incluye llenante mineral)		m3				
/							
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010140	Cargador: potencia en el volante 125 hp, clasificación de		\$ 179 824.05	0.10000	\$ 17 982.41		
C0010230	Compactador neumático de Potencia 70 HP, peso de 13 ton		\$ 146 739.40	0.10000	\$ 14 673.94		
C0010211	Compactador de rodillo potencia: 99 hp, peso: 8 toneladas		\$ 113 334.49	0.10000	\$ 11 333.45		
C0010660	Planta de asfalto en caliente continua de 120 toneladas de		\$ 711 235.81	0.10000	\$ 71 123.58		
C0010958	Volqueta 14 m3		\$ 157 877.21	0.10000	\$ 15 787.72		
C0010910	Terminadora de asfalto (Finisher), potencia en el volante 174 HP, R=20M3/H, velocidad de desplazamiento 114 m/min		\$ 203 177.63	0.10000	\$ 20 317.76		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 15 971.07	5.00%	\$ 798.55		
SUBTOTAL \$					\$ 152 017.41		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
	Mezcla asfáltica MSC-19	m3	1.2500	\$ 401 000.00	\$ 501 250.00		
	Emulsion	Ltr	189.0000	\$ 1 318.00	\$ 249 102.00		
SUBTOTAL \$					\$ 750 352.00		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0010400	Transporte de agregados	m3-km	1.3000	1.000	1.300	\$ 892.71	\$ 1 160.53
SUBTOTAL \$							\$ 1 160.53
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONE s (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030080	Obrero (8)	\$ 379 600.00	2.0404	\$ 774 543.74	73.3333	\$ 10 561.96	
A0040010	Oficial	\$ 80 665.00	1.9318	\$ 155 825.89	73.3333	\$ 2 124.90	
A0070020	Rastrillero (2)	\$ 121 472.00	1.9827	\$ 240 842.27	73.3333	\$ 3 284.21	
SUBTOTAL \$							\$ 15 971.07
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 919 501.01

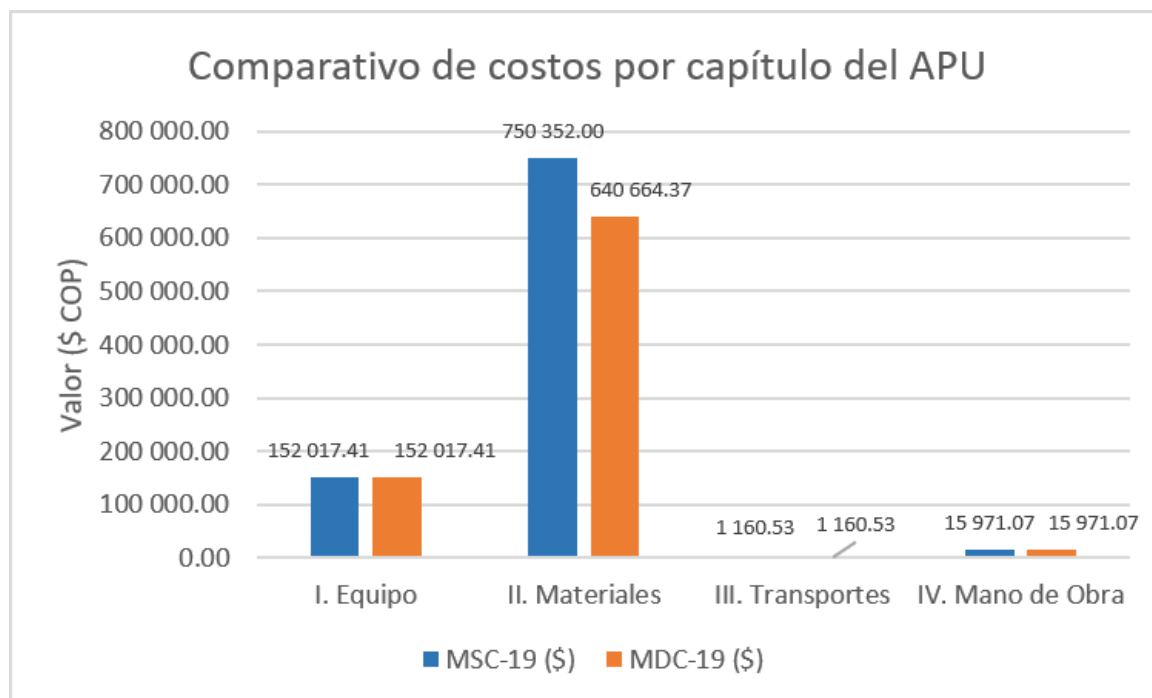
Nota. Es un fragmento del APU, este se encuentra detallado en el Apéndice 3 Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MSC-19 (Consortio Infraestructura Vial del Cesar, 2023).

De acuerdo al análisis de cada uno de los APU's, las variaciones de costos se demostrarán de manera puntual en los siguientes ítems a mostrar, iniciando por la Figura 17 la

Tabla 24.

Figura 17

Comparativo de costos por capítulo por APU

**Tabla 24**

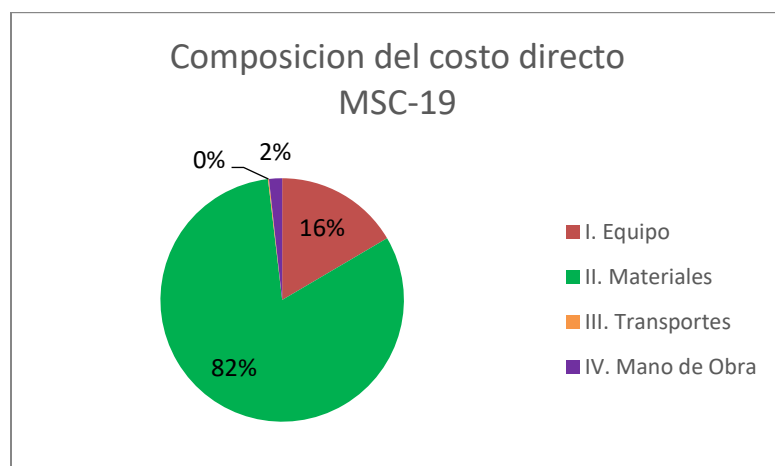
Comparativo de costos y variaciones de costos APU

Capítulo	MSC-19 (\$)	MDC-19 (\$)	Variación (\$)	Variación (%)
Equipo	152.017,41	152.017,41	0,00	0,00%
Materiales	750.352,00	640.664,37	+109.687,63	+17,12%
Transportes	1.160,53	1.160,53	0,00	0,00%
Mano de Obra	15.971,07	15.971,07	0,00	0,00%
TOTAL, COSTO DIRECTO	919.501,01	809.813,38	+109.687,63	+13,54%

De forma porcentual se realizó el desglose de variaciones por ítems de APU (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**), donde el ítem de material como se ha expuesto con antelación se da en los materiales, donde la MSC-19 presenta un 82%, los equipos comprenden un valor de 16%, la mano de obra representa un 2% y el transporte comprenden un 0.17% del total del costo directo por m3 de la mezcla semidensa caliente MSC-19.

Figura 18

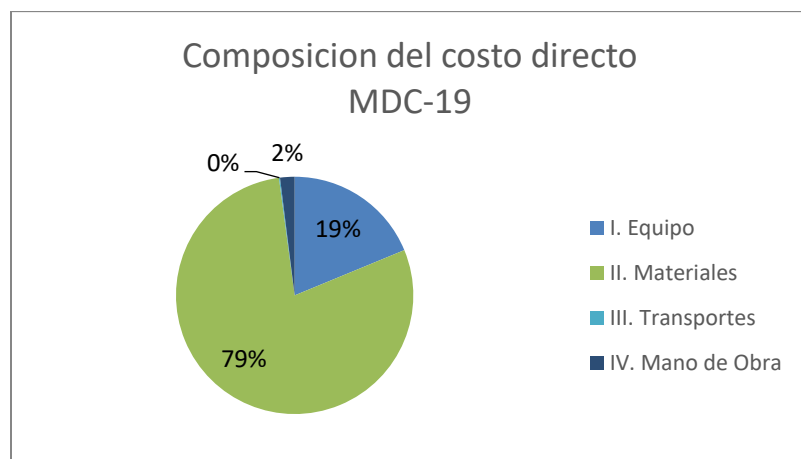
Valor porcentual por Ítems APU MSC-19



De igual manera se realizó el análisis de manera porcentual donde se realizó el desglose de variaciones por ítems de APU (Figura 19), donde el ítem de material al igual que la MSC-19 es de mayor valor con un 79%, los equipos comprenden un valor de 19%, la mano de obra representa un 2% y los transporte comprenden un 0.16% del total del costo directo por m³ de la mezcla densa caliente MDC-19.

Figura 19

Valor porcentual por Ítems APU MDC-19



El análisis de las variaciones de costos unitarios de acuerdo a la Tabla **24**, se determina que la variación se da en los materiales, cabe resaltar que, a comparación de los APU's del INVIAS, los cuales no se enmarcan las mezclas asfálticas MDC-19 y MSC-19 como tal, sino que se detallan solamente los agregados pétreos para la mezcla donde no se incluyen las emulsiones o como tal la mezcla ya ejecutada. Por ello la diferencia de +\$109.687,63 COP (+17.12) en los materiales de la MSC-19, donde se definen dos materiales dentro del costo directo los cuales son la mezcla asfáltica MDC-19 y la emulsión CRR donde de acuerdo a la gráfica se denota la diferencia entre MDC-19 (\$809.813,38 COP) Vs MSC-19 (\$919.501,00 COP). De lo anterior se determina que la variación de costo en general fue de \$109.687,63 COP con un valor porcentual de +13,54% por m³.

Sin embargo, la mezcla asfáltica MSC-19 con cemento asfáltico modificado Tipo III presenta un potencial de reducción de la huella de carbono durante el ciclo de vida, asociado a la posibilidad de incrementar la durabilidad y reducir la frecuencia de las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

A ese mayor costo de origen se suma un factor logístico que el análisis de precios unitarios no alcanza a reflejar. Los agregados de la MSC-19 provienen de la planta de Multinsa S.A.S. en Barrancabermeja, a una distancia aproximada de 150 km de la planta de producción de Aguas Claras, mientras que los de la MDC-19 se explotan de la fuente San Francisco, ubicada prácticamente contigua a la planta. Ambos análisis asumen una distancia de transporte de agregados de 1,000 km, de manera que el costo real de consecución y acarreo del material de la MSC-19 es mucho mayor al registrado. Además, debe tenerse en cuenta que el proveedor entrega el agregado ya combinado, sin discriminar los porcentajes individuales de fracción gruesa y fina, lo que impide ajustar la curva granulométrica en planta y traslada al proyecto un riesgo de

disponibilidad y de consistencia del suministro que debe considerarse en la planeación. En síntesis, la MSC-19 es, de entrada, la alternativa más costosa y logísticamente más exigente.

Evaluar estas dos alternativas de pavimentación únicamente por su precio unitario de puesta en obra conduce a decisiones incompletas. El costo más relevante es el del ciclo de vida, que fue considerado en subtítulo anterior 6.1. Análisis de desempeño de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19.

Esta consideración adquiere mayor peso en vías secundarias y terciarias como las del proyecto. Los tramos Aguachica–Buturama, Morrison–Pita Limón y La Ye–Barranca de Lebrija suman más de 74 km dispersos en el territorio, de modo que cada intervención de mantenimiento implica movilizar equipo y personal a distancias considerables, con costos fijos de traslado que pesan más que el volumen de obra efectivamente ejecutado. En ese contexto, una mezcla que permita espaciar las intervenciones compensa con relativa rapidez un mayor costo inicial, además de reducir los costos indirectos que asumen los usuarios por deterioro del pavimento y por restricciones de tránsito durante los mantenimientos. De manera general, y considerando únicamente el costo directo, la MSC-19 necesitaría prestar un servicio del orden de un 13,5 % más prolongado que la MDC-19 para igualar su costo anual equivalente, sin contabilizar todavía el ahorro asociado a un menor número de intervenciones de mantenimiento. Los resultados de desempeño obtenidos hacen razonable esperar una diferencia de vida útil superior a ese umbral; no obstante, es necesario precisar que este trabajo no la cuantificó, dado que no se ejecutaron sobre la MDC-19 los ensayos de módulo dinámico, rueda de Hamburgo y fatiga que permitirían la comparación directa. Por consiguiente, la conclusión que se sostiene es que la MSC-19 representa una mayor inversión inicial y, previsiblemente, un menor costo en el ciclo de vida; la verificación de esa expectativa exige un análisis formal de costo de ciclo de vida a diez o quince

años (con distancias de transporte reales, AIU y escenarios de mantenimiento) acompañado de un tramo de prueba instrumentado.

6.3. Análisis de la adaptabilidad de las mezclas asfálticas MSC-19 y MDC-19

Al integrar los resultados anteriores, la MSC-19 elaborada con cemento asfáltico modificado tipo III muestra un conjunto de propiedades favorables para climas cálidos: mayor estabilidad Marshall, mayor volumen de vacíos que reduce el riesgo de exudación, mayor espesor de película asfáltica que retarda el envejecimiento del ligante, y un módulo dinámico que conserva rigidez residual aceptable incluso a 54 °C. Estas características, sumadas a una resistencia al ahuellamiento sin desprendimiento en el ensayo de Rueda de Hamburgo, respaldan su idoneidad para zonas donde la temperatura alta calculada del pavimento supera los 65 °C.

La MDC-19, por su parte, ofrece una estructura más densa e impermeable, con menor contenido de vacíos, lo que la hace estructuralmente competitiva para tránsito pesado, aunque con mayor riesgo de deformación plástica si el contenido de ligante se eleva bajo temperaturas extremas. Al no contarse con los ensayos de desempeño avanzado (Hamburgo, módulo dinámico y fatiga) para esta mezcla, su adaptabilidad térmica no puede evaluarse con el mismo nivel de evidencia que la MSC-19, lo que constituye una limitación del análisis comparativo disponible.

En síntesis, con la evidencia disponible, la MSC-19 con cemento asfáltico modificado tipo III presenta una adaptabilidad más robusta y mejor documentada frente a climas cálidos que la MDC-19 convencional, particularmente en los mecanismos de deterioro asociados a temperatura (ahuellamiento, envejecimiento del ligante y pérdida de rigidez a altas temperaturas).

7. Retos presentados durante la ejecución del proyecto

Resulta importante destacar el valor de sostener este tipo de investigación en el nivel de pregrado. En los últimos años, el trabajo de grado por investigación ha venido cediendo terreno frente a modalidades de menor exigencia temporal y económica (pasantía, monografía, diplomado o seminario), en buena medida porque una investigación experimental en el área de pavimentos exige jornadas de laboratorio prolongadas, desplazamientos a planta y el uso de equipos especializados cuyo costo debe asumir directamente el estudiante. Este proyecto se ejecutó bajo esas condiciones: un diseño de mezcla Marshall de cinco contenidos de asfalto con tres briquetas por nivel, la caracterización completa de los agregados y una serie de ensayos de desempeño específicos, con la gestión y financiación directa de los recursos necesarios para realizarlos. Estos costos fueron asumidos por el Consorcio Infraestructura Vial, ya que el diseño de la mezcla MSC-19 era una necesidad real para el consorcio, así que colocaron a mi disposición el personal del laboratorio como el laboratorista y los auxiliares de laboratorio, herramientas y equipos, los materiales para llevar a cabo los ensayos y el recurso económico para la elaboración de los ensayos especializados en un laboratorio externo.

Documentar ese esfuerzo tiene sentido no solo por los resultados obtenidos, sino porque demuestra que una investigación aplicada de este alcance es viable cuando se ancla en un proyecto real en ejecución, y porque constituye un antecedente concreto para que el programa de Ingeniería Civil continúe promoviendo trabajos de grado con componente investigativo y experimental.

8. Conclusiones

- El flujo Marshall de la MSC-19 (4,1 mm) supera el rango ordinario de 2,0–3,5 mm para NT3, pero está explícitamente amparado por la Nota 2 de la Tabla 450-10 de INVIAS 2022, que acepta hasta 5,0 mm para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros.
- El agregado pétreo combinado cumple satisfactoriamente todos los requisitos de dureza, limpieza y geometría de partículas exigidos por el Artículo 450-11 del INVIAS para nivel de tránsito NT3.
- La MSC-19 con CA modificado Tipo III supera a la MDC-19 en estabilidad Marshall (+56%), densidad bulk (+2,6%) y espesor de película de asfalto (+8,3%), indicando mayor capacidad estructural y durabilidad potencial.
- Los ensayos de desempeño avanzados confirman que la MSC-19 posee excelente resistencia al ahuellamiento (Hamburg), adecuada rigidez estructural a temperaturas de servicio (módulo dinámico) y buena resistencia a la fatiga por flexión, siendo apta para las condiciones climáticas extremas de la zona ($T_{\text{alta}} \approx 65\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- La susceptibilidad al agua (RRT) es satisfactoria en ambas mezclas (82,3% MSC-19 y 81,5% MDC-19), ambas superando el umbral del 80% establecido por INVIAS.
- La granulometría de la MDC-19 con proporcionamiento explícito de tres fracciones (25/70/5%) ofrece mayor control y flexibilidad en planta, mientras que la MSC-19 con agregados combinados depende directamente de la consistencia del proveedor.
- Para niveles de tránsito NT3 (≥ 10 millones de ejes equivalentes), especialmente en zonas con tráfico a baja velocidad, intersecciones o condiciones de temperatura elevada (T

alta $> 64^{\circ}\text{C}$), se recomienda la MSC-19 con CA modificado Tipo III por su superior resistencia al ahuellamiento y rigidez estructural demostrada.

- En relación a los costos asociados directos, se denota que la mezcla MSC-19 es en términos generales un 13.54% incrementada en el sentido económico con un valor directo de \$919.501,01 COP con respecto a los \$809.813,38 COP de la MDC-19, sin embargo la MSC-19 con cemento asfáltico modificado Tipo III presenta un potencial de reducción de la huella de carbono durante el ciclo de vida, asociado a la posibilidad de incrementar la durabilidad y reducir la frecuencia de las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

- Aunque ambas mezclas cumplen con los requisitos establecidos por las especificaciones del INVÍAS para mezclas asfálticas en caliente, la MDC-19 ofrece un desempeño estructural superior gracias a su mayor densidad, menor permeabilidad y mayor resistencia al ahuellamiento y la fatiga, lo que la convierte en la opción más adecuada para pavimentos de alto desempeño. Por su parte, la MSC-19 representa una solución técnica eficiente para proyectos con exigencias estructurales moderadas, destacándose por su facilidad de construcción, buena compactibilidad y menor costo de producción, sin dejar de proporcionar un comportamiento satisfactorio cuando se emplea dentro de las condiciones de diseño para las cuales fue concebida.

9. Recomendaciones

De acuerdo con las conclusiones y resultados obtenidos, la recomendación del autor es inclinar la decisión de implementar la MSC-19 para el proyecto “Mejoramiento de vías secundarias y terciarias, en el marco del pacto funcional Cesar - Guajira, en el departamento del Cesar”, debido a con base a las condiciones climáticas y las muestras de ensayos realizadas en

los ítems antes mencionados debido a su alta resistencia a deformaciones del tipo de ahuellamiento y rigideces estructurales.

A su vez es importante recomendar que, para efectos prácticos de análisis comparativo entre cada mezcla, es importante que se realicen de manera igualitaria para ambos casos, así como la calidad y procesos de los materiales empleados para las mezclas a estudiar y en un futuro a implementar.

Se recomienda implementar un control de calidad continuo en planta, verificando diariamente la granulometría de los agregados y el contenido real de asfalto de la mezcla producida, dado que el óptimo de diseño (5.1%) exige una tolerancia estrecha ($\pm 0.3\%$) para mantener el cumplimiento de los parámetros volumétricos.

Para trabajos futuros, se recomienda solicitar al proveedor de agregados los porcentajes individuales de material grueso y fino, de manera que sea posible optimizar de forma independiente la curva granulométrica combinada y evaluar alternativas de dosificación adicionales.

Referencias

- Amaya Sandoval, M. A. (2022). *Efecto de la adición de los residuos de plásticos en el comportamiento mecánico de pavimento flexible, Piura*. Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo. doi:20.500.12692/113302
- Asphalt Institute. (s.f.). Construcción : Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. <https://ceur-rebi.usac.edu.gt/bib/566?>

- Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe [CAF]. (2023). *Caminos rurales, una puerta al desarrollo y la conectividad territorial - América Latina*. Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe [CAF]. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2135>
- Banco Mundial. (2020). ¿Las mejoras en las carreteras de verdad mejoran la calidad de vida? <https://blogs.worldbank.org/es/voices/las-mejoras-en-las-carreteras-de-verdad-mejoran-la-calidad-de-vida>
- Berrío Alzate, A. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/7f0f2504-46ab-4b2c-ad8d-b743af7b2421>
- Bohórquez Soler, E. A., & Quintero Serrato, G. (2020). *Aporte estructural de mezcla asfáltica en caliente con inclusión de plástico PET por vía seca a estructuras de pavimento flexible para vías de bajo tráfico según especificaciones Instituto Nacional de vías*. Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/25824>
- Cajamarca Azuero, C. A. (2018). Las ideas de Friedman sobre la educación y su implementación en Chile. *Fundación Dialnet Universidad de la Rioja*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6628823>
- Cerón Aparicio, E. (2016). Movilidad cotidiana e infraestructura en la configuración del espacio rural no periurbano. *Scielo*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252018000100002

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2019). Medio ambiente y desarrollo sostenible: desafíos contemporáneos para la CEPAL y América Latina y el Caribe. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/69117-medio-ambiente-desarrollo-sostenible-desafios-contemporaneos-la-cepal-america>

Congreso de Colombia. (2008). Ley 1228 de 2008.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=31436>

Consorcio Infraestructura Vial del Cesar. (2023). *Diseño de Mezcla Asfáltica MDC-19*. Colombia.

Fandiño Sánchez, A. P., Ramos Reyes, L. F., & Torres Latorre, C. L. (2014). *Diagnóstico del proceso constructivo de la infraestructura vial en pavimento flexible en algunos sectores especificados en el contrato no. 1018 del 2012, suscritos por la alcaldía municipal a través del modelo de auditoria realizado por la contraloría mun.* Tesis de Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia.
<https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/78ea6abb-99c9-4452-b72a-823ac33554d1>

FAO. (2020). Dimensiones organizativas de la ordenación forestal escentralizada: enseñanzas extraídas de una cooperativa de agricultores en la región central de México.
<https://www.fao.org/4/a0532s/A0532s05.htm>

Federación Colombiana de Municipios. (2021). *Esquemas asociativos territoriales*.
<https://www.fcm.org.co/esquemas-asociativos-territoriales/>

- Galeano Franco, C. C. (2021). *Apoyo técnico en la supervisión, control y seguimiento de proyectos, haciendo énfasis en la optimización de la red vial del municipio, en la Secretaría de Infraestructura de Ibagué*. Tesis de Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Cooperativa de Colombia: <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/6db9f4e2-929b-4a76-b9ed-9b42b2e8a464>
- Guerra Vargas, M. F., & Peña Ibáñez, L. V. (2021). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas tipo MDC-19 modificadas con grano de caucho reciclado y escoria negra de horno de arco eléctrico*. Tesis de Pregrado, Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/items/c061b62d-4f20-43c7-9fbe-76a1210d3925>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición ed.). México: McGraw Hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Hernández Valencia, A. M. (2019). *Diseño de la mezcla asfáltica semi-densa tipo msc-19 con áridos de las fuentes buena fe (1) y piedras blancas (2) más betún de penetración 40/50*. Tesis de Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/3d9f5380-7794-422d-8702-b3ab2d235307>
- Instituto Nacional de vías. (2012). Sección 200 agregados pétreos. https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-002_V1_Normas__Invia_Seccion__200-13.pdf

- Instituto Nacional de vías. (2013). INV E – 733 – 13. En *Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos*. https://caminoscomunitarios.invias.gov.co/docs/caja-herramientas/anexos-modulo-tecnico/normas-ensayo/normas_ensayo_700_800_1.pdf
- Instituto Nacional de vías. (2013). INV E-725-13. En *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta*. https://caminoscomunitarios.invias.gov.co/docs/caja-herramientas/anexos-modulo-tecnico/normas-ensayo/normas_ensayo_700_800_1.pdf
- Instituto Nacional de vías. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/14480-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-2022-1/file>
- Instituto Nacional de vías. (2023). *Cartilla de Obras Menores de Drenaje y Estructuras Viales Pop*. <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/politicas-y-lineamientos/documentos-tecnicos/14788-cartilla-de-obras-menores-de-drenaje-y-estructuras-viales>
- La Asociación Mundial de la Carretera [PIARC]. (2021). Base de Datos de PIARC sobre Carreteras y Transporte por Carretera 2020-2023. <https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/42713-es-Base%20de%20Datos%20dePIARC%20sobre%20Carreteras%20y%20Transporte%20por%20Carretera%202020-2023>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Decreto 1914 de 2017. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1914-de-2017/>

Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (1997). Ley 388 de 1997.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>

Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (2001). Ley 715 de 2001.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4452>

Ministerio de Minas y Energía. (1953). Decreto 1056 de 1953 (Código de Petróleos).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=75114>

Ministerio de Transporte. (1993). Ley 105 de 1993.

<https://mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=16380>

Ministerio de Transporte. (2012). *Ley 1508 de 2012*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=45329>

Ministerio de Transporte. (2020). ABC Anuario estadístico “Transporte en Cifras”. 5.

<https://web.mintransporte.gov.co/jspui/bitstream/001/10563/1/ABC-Anuario-estadistico-transporte-en-cifras.pdf>

Moreno Chaparro, H. C., & Rubio Tafur, J. E. (2018). *Evaluación del módulo resiliente de una mezcla asfáltica (MDC-19) con adición de concreto hidráulico reciclado*. Tesis de Pregrado, Universidad la Gran Colombia, Bogotá.

<https://repository.ugc.edu.co/items/b6f3987a-1b86-40e8-a4cb-41e6b89cc2d9>

Muñoz Méndez, F. A. (2017). *Evaluación del comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica MDC-19 con asfalto 60/70 con adición de fibras Kevlar®*. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. <https://repository.javeriana.edu.co/items/8e3838be-7576-4b47-b52c-afebc84d315e>

- Narváez Veloza, G. L. (2024). *Evaluación de la sostenibilidad en la construcción de infraestructura vial en el municipio de Neiva*. Tesis de Maestría, Universidad de Medellín, Medellín. <http://hdl.handle.net/11407/8292>
- Pérez Otálora, Á. J., & Polanía Andrade, D. M. (2021). *Evaluación de las características mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente compactada a diferentes temperaturas*. Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia. <https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/oai:repository.ucatolica.edu.co:10983-26359/Description>
- Rodríguez Medina, E. L., & González Santander, M. A. (2018). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas mdc - 19 con agregado procedente del río fonce, y su modificación con cemento portland*. Tesis de Especialización, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, Bucaramanga. <https://repository.upb.edu.co/items/04c810b7-9a52-4a9b-899d-5a3288df75f4>
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2021). Conceptos tecnicos . <https://sci.org.co/conceptos-tecnicos/>
- Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles [ASCE]. (2019). Líderes de infraestructura que construyen comunidades. <https://www.asce.org/>
- Transportation Research Board. (2002). *Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, E-C044*. Transportation Research Circular, Transportation Research Board, National Research Council. <https://trid.trb.org/View/733736>

Trujillo Chavarro, M. D. (2022). *Apoyo de gestión de proyectos de obras de infraestructura del departamento*. Tesis de Pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia, Neiva.
doi:20.500.12494/43542

Yela Jaramillo, D. J. (2022). *Desarrollo de una nueva tecnología a partir de un asfalto natural para su aplicación en infraestructura vial*. Tesis de Doctorado, Universidad de Antioquía. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/0ff4c218-a128-439a-a6f4-d050c7ea803c>

Apéndices

Apéndice 1

Diseño de mezcla asfáltica MDC-19

Apéndice 2

Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MDC-19

Apéndice 3

Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MSC-19

Apéndice 1

Diseño de mezcla asfáltica MDC-19

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19

INVIAS 2013

DMP-005-2023-V0-AGUACHICA

CONSORCIO INFRAESTRUCTURA VIAL DEL CESAR

Aguachica, Cesar

Mayo 2023

CONTROL DE CAMBIOS		
VERSIÓN	FECHA	MODIFICACIÓN
0	24 de mayo 2023	Versión inicial – Diseño Volumétrico Marshall y TSR

Tabla de contenido

1	OBJETIVO	4
2	RESUMEN EJECUTIVO	4
3	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	6
3.1	<i>Materiales granulares</i>	6
3.2	<i>Cemento asfáltico</i>	11
3.3	<i>Selección del asfalto por grado de desempeño PG</i>	11
3.4	<i>Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación</i>	12
4	CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	14
4.1	<i>Preparación de muestras y ensayos</i>	14
4.2	<i>Densidad de las briquetas</i>	14
4.3	<i>Ensayo de estabilidad y flujo</i>	14
4.4	<i>Análisis volumétrico de la mezcla asfáltica compactada en caliente</i>	15
4.5	<i>Gravedad específica máxima teórica (GMM) de mezclas asfálticas para pavimentos</i>	15
4.6	<i>Relación llenante ligante efectivo</i>	15
4.7	<i>Espesor de la película de asfalto</i>	16
4.8	<i>Resistencia conservada a la tracción indirecta</i>	16
5	CUADRO MARSHALL Y CURVAS DE DISEÑO	17
6	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	23

1 OBJETIVO

Realizar el diseño, por medio del método Marshall, evaluando la granulometría y el contenido de asfalto óptimo para una mezcla densa en caliente que cumpla los parámetros exigidos de acuerdo con las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determina la **fórmula de trabajo** que se aplicará en la producción de mezcla asfáltica en la planta de mezcla asfáltica de Lorica.

2 RESUMEN EJECUTIVO

Se presenta el informe de diseño de la mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-19 para niveles de tránsito NT2 de acuerdo con los requerimientos del Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013. El diseño de la mezcla MDC-19 se realiza con materiales pétreos de la Fuente Aguachica y asfalto normalizado 40/50 con promotor de adherencia de MULTINSA, conforme a los requerimientos del Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013.

En este diseño se incorporó la siguiente proporción de materiales pétreos:

Grava Triturada de 3/4":	25%
Arena triturada :	70%
Arena fina:	5%

En cuanto al contenido de asfalto de la mezcla, el intervalo en el cual se cumplen los criterios del Numeral 450.4.2.2 el Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013 para nivel de tránsito NT2 se encuentra definido entre el 5,3% y 5,9% de asfalto, y se define un contenido óptimo de asfalto de 5,6%, para el Nivel de Tránsito NT3 el intervalo de asfalto se encuentra comprendido entre 5,3% y 5,6% para un óptimo de diseño de 5,4%

Las características de la mezcla asfáltica diseñada para niveles de tránsito NT2 y NT3 se presentan en la Tabla 1

Tabla 1 Resumen de parámetros de diseño en función del nivel de tránsito

CARACTERISTICA	NORMA INV	NT2	NT3
Contenido óptimo de asfalto	E-748	5.6	5.4
Intervalo de asfalto en la fórmula de trabajo	E-748	5.3 a 5.9	5.3 a 5.6
Contenido de pasa 200	E-782	5.5	5.5
Densidad de la mezcla kg/m ³	E-733	2338	2335
Gravedad específica máxima medida (GMM)	E-735	2.446	2.452
Estabilidad Marshall (N)	E-748	14100	13800
Flujo (mm)	E-748	3.52	3.40
Relación Estabilidad /Flujo (kN/mm)	E-748	4.01	4.06
Vacíos con aire (%)	E-799 y E-748	4,1	4.4
Vacíos en agregado mineral (%)	E-799 y E-748	15.3	15.1

Vacíos llenos con asfalto (%)	E-799 y E-748	73.4	70.6
Porcentaje de asfalto absorbido (%)	E-799 y E-748	0.79	0.71
Volumen de asfalto efectivo (%)	E-799 y E-748	10.22	9.82
Relación llenante / Asfalto efectivo	E-799	1.15	1.20
Espesor de película de asfalto (μm)		8.42	8.09
Velocidad de deformación en el intervalo 105 a 120 min	E-756	Pendiente	
Susceptibilidad a la Humedad TSR	E-725	81,5 %	

3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

3.1 Materiales granulares

Los materiales pétreos para la elaboración de la mezcla asfáltica son explotados de la Fuente San Francisco y procesados en la planta Aguas Claras PR61 ruta 4514, Sentido San Martín - Aguachica a 200 metros de la intersección aguas claras. En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis granulométrico de los agregados componentes de la mezcla asfáltica.

Tabla 2 Gradaciones individuales de los agregados componentes de la mezcla Porcentajes de pasa (%)

MATERIAL:		Triturado ¾"	Arena Triturada	Arena fina	COMBINACION EN LABORATORIO
PROPORCIÓN:		25	71	4	SUMA 100
SERIE DE TAMICES		PORCENTAJES DE PASA			
¾"	19,1	100.0	100.0	100	100
1/2"	12,7	33.0	100.0	100	83
3/8"	9,5	7.7	100.0	99.6	77
Nº4	4,8	1.1	72.7	97.9	56
Nº10	2,0	1.0	46.4	95.8	37
Nº40	0,4	0.9	20.9	77.4	18
Nº80	0,2	0.9	13.7	32	11
Nº200	0,075	0.8	9.7	13.2	5.7

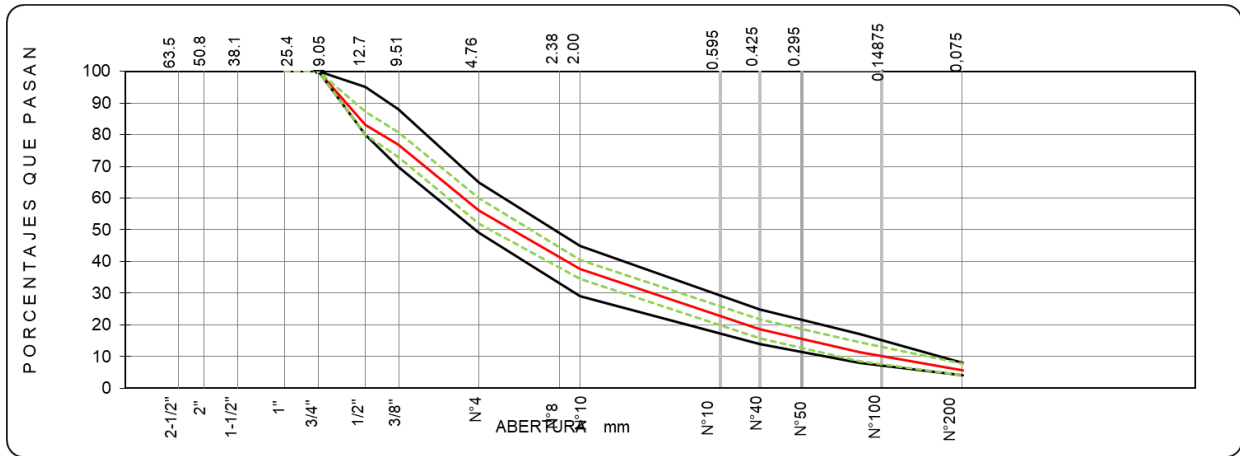
Nota 1: El pasa Nº200 de la combinación es 7.7%, el control de finos en la planta se realizará mediante control de compuerta de los finos recuperados del sistema de filtro de mangas que reingresa a la planta

Los materiales pétreos son combinados con el objetivo de cumplir los requerimientos granulométricos de la mezcla MDC-19 de acuerdo con el Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013, ver la Tabla 3 y el Gráfico 1.

Tabla 3 Franja de diseño MDC-19

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
		19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		¾"	½"	⅜"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº80	Nº200
		Porcentajes de pasa (%)							
DENSA	MDC-19	100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
COMBINACIÓN		100	83	77	56	37	18	11	5.7
FRANJA INTERNA		100	80-87	73-81	52-60	34-40	15-21	8-14	4.7-6.2

Gráfico 1 Curva granulométrica de la MDC-19



El análisis de empaquetamiento de los agregados se realizó de acuerdo con el método Bailey, con base en el documento "Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design – Transportation Research Board- Circular EC-404 de octubre de 2002".

NMPS: Tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla de diseño, corresponde al tamiz superior al tamiz más cercano que retiene el 10% de los agregados, para el caso de la MDC-19 el NMPS corresponde al tamiz de 3/4" de abertura 19 mm.

PCS: Tamiz primario de control, igual a NMPS x K, el valor de K tiene un valor promedio de 0.22, pero puede variar entre 0.18 para partículas redondeadas a 0.28 de partículas fracturadas, para el caso el PCS corresponde al tamiz de Numero 4 de abertura 4.76 mm.

HS: Tamiz medio, igual a NMPS x 0.50, para el NMPS de 19 mm el tamiz HS es el 3/8" con un tamaño de abertura de 9,5 mm.

SCS: Tamiz secundario de control, SCS es el tamiz N°16 de abertura 1.18 mm.

TCS: Tamiz terciario de control el TCS es el tamiz N°50 de abertura 0.3 mm.

CA Ratio: Evalúa el empaquetamiento de los agregados gruesos en la mezcla, se calcula mediante la expresión.

$$CA_{Ratio} = \frac{\% \text{ Pasa HS} - \% \text{ Pasa PCS}}{100 - \% \text{ Pasa HS}}$$

FA_c: Porción gruesa en el agregado fino, representa la porción gruesa del agregado fino que llena los vacíos dejados por el agregado grueso, se calcula mediante la siguiente expresión.

$$FA_c = \frac{\% \text{ Pasa SCS}}{\% \text{ Pasa PCS}}$$

FA: Porción fina en el agregado fino, representa la porción gruesa del agregado fino que es llena por la fracción fina del mismo, se calcula mediante la siguiente expresión.

$$FA_c = \frac{\% \text{ Pasa TCS}}{\% \text{ Pasa SCS}}$$

De acuerdo con NMPS se determinan los rangos de aceptación para cada uno de estos parámetros, ver Tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4 Rangos recomendados de relaciones de agregados de acuerdo con el método Bailey

TAMICES DE CONTROL MÉTODO BAILEY						
	NMPS (mm)					
	37.5	25.0	19.0	12.7	9.50	4.75
HS	19.00	12.70	9.50	4.76	4.76	2.36
PCS	9.50	4.76	4.76	2.36	2.36	1.18
SCS	2.36	1.18	1.18	0.60	0.60	0.30
TCS	0.60	0.30	0.30	0.15	0.15	0.08

Tabla 5 Porcentajes de pasa en tamices de control

TAMICES DE CONTROL		TAMIZ		% PASA
		ABERTURA	Mm	
NMPS	Tamaño máximo nominal	3/4"	19	100.0
HS	Tamiz medio	3/8"	9,5	76.9
PCS	Tamiz de control primario	Nº4	4,76	55.8
SCS	Tamiz de control secundario	No. 16	1,18	27.2
TCS	Tamiz de control terciario	No. 50	0,3	14.6

Tabla 6 Cálculo de parámetros Bailey

ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DISEÑO COMO MEZCLA GRUESA				RANGO DE CONTROL		CUMPLE
CA ratio	Relación del Agregado Grueso =	$\frac{\% \text{ Pasa HS} - \% \text{ Pasa PCS}}{100 - \% \text{ Pasa HS}}$	= 0.91	0.60	0.75	No cumple
FAc	Relación Gruesa del Agregado Fino =	$\frac{\% \text{ Pasa SCS}}{\% \text{ Pasa PCS}}$	= 0.49	0.35	0.50	Cumple
FAf	Relación Gruesa del Agregado Fino =	$\frac{\% \text{ Pasa TCS}}{\% \text{ Pasa SCS}}$	= 0.54	0.35	0.50	No cumple

De acuerdo con las características de la Tabla 6, la mezcla se comporta como de gradación fina por tanto se evalúan las características de empaquetamiento de agregados para mezclas finas de acuerdo con la Tabla 7.

Tabla 7 Tamices de control para mezclas de gradación fina

TAMICES DE CONTROL MÉTODO BAILEY						
	NMPS (mm)					
	37.5	25.0	19.0	12.7	9.50	4.75
Original PCS	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Nuevo HS	4,75	2,36	2,36	1,18	1,18	0,60
Nuevo PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Nuevo SCS	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075
Nuevo TCS	0,15	0,075	0,075	-	-	-

De acuerdo con la circular EC-044, los valores de porcentaje de pasa correspondientes a cada tamiz se recalculan haciendo un 100% el porcentaje de pasa del tamiz Original PCS. Para el caso 4,75 mm, y para cada uno de los tamices de control se divide el porcentaje de pasa entre el % de pasa del PCS, de esta manera se tienen nuevos % de pasa que representan como se acomodan los agregados en la fracción predominantemente fina. En la Tabla 8 se presentan los porcentajes de pasa.

Tabla 8 Porcentajes de pasa en nuevos tamices de control para mezclas finas

TAMICES DE CONTROL		TAMIZ		% PASA
		ABERTURA	Mm	
Original PCS	Tamiz de control primario	Nº4	4,76	100.0
NHS	Nuevo Tamaño Medio	Nº8	2,36	70.7
NPCS	Nuevo Tamiz de Control Primario	Nº16	1,18	48.7
NSCS	Nuevo tamiz de Control Secundario	Nº30	0,3	26.2
NTCS	Nuevo Tamiz de Control Terciario	Nº200	0,075	10.2

En la Tabla 9 se presenta el análisis de empaquetamiento de agregados como mezcla fina.

Tabla 9 Cálculo de parámetros Bailey como mezcla de gradación fina

ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE DISEÑO COMO MEZCLA FINA				RANGO DE CONTROL		CUMPLE
Nuevo CA ratio	Relación del Agregado Grueso =	$\frac{\% \text{ Pasa NHS} - \% \text{ Pasa NPCS}}{100 - \% \text{ Pasa NHS}}$	= 0.75	0.60	0.75	Cumple
Nuevo FAc	Relación Gruesa del Agregado Fino =	$\frac{\% \text{ Pasa NSCS}}{\% \text{ Pasa NPCS}}$	= 0.50	0.35	0.50	Cumple
Nuevo FAf	Relación Gruesa del Agregado Fino =	$\frac{\% \text{ Pasa NTCS}}{\% \text{ Pasa NSCS}}$	= 0.38	0.35	0.50	Cumple

De acuerdo con los resultados de la Tabla 9 la mezcla cumple con los requerimientos de empaquetamiento de agregados para la fracción fina.

A la combinación de agregados se le realizaron los ensayos de caracterización fisicomecánicas de acuerdo con los requerimientos del Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013 para una capa rodadura, ver la Tabla 10 y el Anexo 1 Agregados.

Tabla 10 Propiedades fisicomecánicas de los agregados

ENSAYO	NORMA INV	RESULTADO	VALOR ESPECIFICADO
Gravedades específicas			
Agregados gruesos – Retenido en tamiz N°4			
Gravedad específica bulk Gsb	E-223	2.633	Reportar
Gravedad específica saturada Gss		2.658	
Gravedad específica aparente Gsa		2.700	
Absorción (%)		0.94	
Agregados finos – Pasa N°4 – Retenido N°200			
Gravedad específica bulk Gsb	E-223	2.600	Reportar
Gravedad específica saturada Gss		2.632	
Gravedad específica aparente Gsa		2.687	
Absorción (%)		1.25	
Llenante mineral			
Gravedad específica	E-222	2.701	Reportar
Ensayos a la fracción gruesa			
Caras Fracturadas	E 227	100% 100%	Una cara: 85% Dos caras: 70%.
Desgaste en máquina de los ángeles, 500 Rev.	E 218	18.7	≤ 25 %
Desgaste en máquina de los ángeles, 100 Rev.	E-218	3.5	≤ 5 %
Desgaste Microdeval	E 238	9.1	≤ 20 %
10% de finos	E 224	288.4 82	En seco ≥ 110 kN Húmedo/Seco ≥ 75 %
Solidez en sulfato de Magnesio	E 220	3.2	≤ 18 %
Partículas planas y alargadas (relación 5:1)	E-240	8	≤ 10 %
Limpieza superficial del agregado grueso	E-237	0,33	≤ 0,5 %
Coefficiente de Pulimento acelerado	E-232	Pendiente	≥ 0,45
Ensayos a la fracción fina			
Solidez en sulfato de Magnesio	E 220	9.9	≤ 18%
Equivalente de arena	E-133	67	≥ 50 %
Valor de azul de metileno	E-238	N.A.	N.A.
Límite líquido e Índice de Plasticidad	E-126	N.P	N.P
Angularidad del agregado fino (método A)	E-239	45.2	≥ 45 % para rodadura
Proporción de arena natural en % en peso total de los agregados	N.A.	15	≤ 15%
Ensayos al llenante mineral			
Gravedad específica de sólidos	E-128	2.701	Reportar
Peso unitario en Tolueno, g/cm³	E-225	Pendiente	0.5 a 0.8
Vacíos del llenante compactado en seco, %	E-229	Pendiente	≥ 38
Concentración crítica del llenante mineral	E-745	0,35	Reportar
Adhesividad			
Agregado grueso – Cubrimiento de los agregados gruesos con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757	>95	Reportar
Agregado fino – Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel Weber)	E-774	7	Mayor de 4

3.2 Cemento asfáltico

En la Tabla 11 y el Anexo 2 *Asfalto* se presentan los resultados de la caracterización del asfalto 40/50 usado en el diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 11 Características fisicomecánicas del asfalto 40/50

ENSAYO	NORMA INV	RESULTADO	VALOR ESPECIFICADO
Penetración a 25°C (1/10 mm)	E-706	49	40 – 50
Índice de penetración	E-724	-0,3	-1,2 - +0,6
Viscosidad a 60°C (Pa – s)	E-717	512	> 200
Punto de ablandamiento (°C)	E-712	54	52 – 58
Ductilidad a 25°C y 5cm/min (cm)	E-702	100	> 80
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99,98	> 99
Contenido de agua, %	E-704	0,0	< 0,2
Punto de ignición, °C	E-709	286	> 240
Contenido de parafinas, %	E-718	0,9	< 3
Densidad a 15°C Kg/m ³	E-707	1020	Reportar
Ensayos sobre el residuo luego del envejecimiento RTFO. INV E-720			
Pérdida por calentamiento (%)	E 720	-0.36	< 0,8
Penetración al residuo, porcentaje de la penetración original (%)	E-706	65	< 55
Incremento del punto de ablandamiento (°C)	E-712	8	< 8
Índice de envejecimiento	E-717	4	< 4

3.3 Selección del asfalto por grado de desempeño PG

De acuerdo con la metodología de grado de desempeño el tipo de asfalto se selecciona de para la temperatura alta del proyecto según la siguiente expresión:

$$T_{alta} = 54,32 + 0,78 T_{aire} - 0,0025 L^2 - 15,14 \log(H + 25) + z(9 + 0,16 \sigma_{aire}^2)^{1/2}$$

En donde:

T_{alta} : Temperatura del pavimento para selección del tipo de asfalto

T_{aire} : Temperatura máxima del aire en la superficie del pavimento de acuerdo con una serie histórica de al menos 10 años. Para el análisis se recurrió a la información de estaciones IDEAM en las estaciones Valledupar y Chiriguana con registros desde 2002 a 2022 (Ver Tabla 12 y Anexo 2)

H: Profundidad en mm desde la superficie a la que se quiere conocer la temperatura de pavimento, usualmente 20 mm

z: Coeficiente estadístico cuyo valor es 2,055 para un 98% de confiabilidad

σ_{aire} : Desviación estándar de temperatura máxima

Tabla 12 Calculo de la temperatura alta de pavimento para área de influencia de la Planta El Banco – Fuente IDEAM

Código	Nombre	Municipio	Departamento	Latitud	Fecha desde	Fecha hasta	T _{aire} 7d [°C]	S _{aire} [°C]	T _{alta} [°C]
23215030	Aguas Claras	Aguachica	Cesar	8.228889	04/03/2003	10/03/2013	38.37	1.00	65.27
23215050	La Mata	La Gloria	Cesar	8.614444	11/03/2015	17/03/2015	36.80	0.63	64.00

Para seleccionar el asfalto por grado de desempeño PG de la zona se acude a la Tabla 13.

Tabla 13 Ajustes al Grado PG de acuerdo con la Intensidad del tránsito esperada y la velocidad de operación

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) [1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceiros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

De acuerdo con lo anterior el grado PG recomendado para el proyecto de acuerdo con el clima e intensidad del tránsito es PG 70. El grado de desempeño PG del asfalto se presenta en el Anexo 2 Asfalto

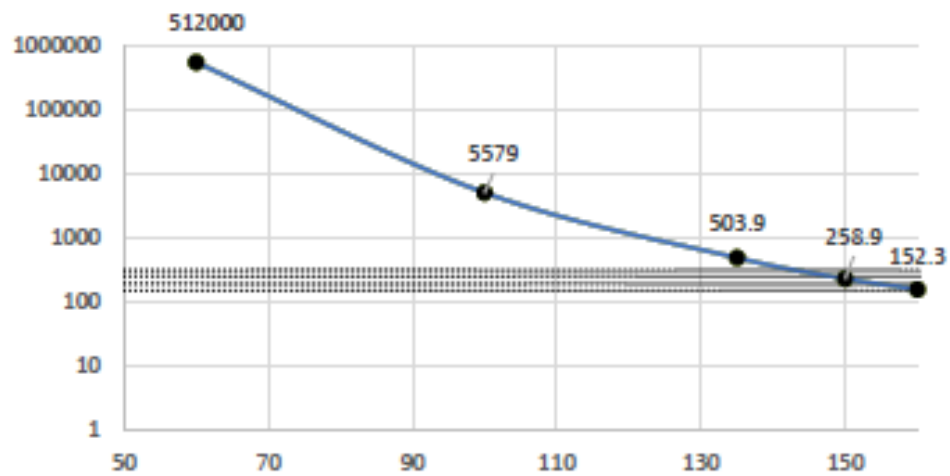
3.4 Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación

De acuerdo con las viscosidades y propiedades del asfalto 40/50 se establecen las siguientes temperaturas de mezcla y compactación en el laboratorio. Ver Gráfico 2.

Temperatura de mezcla: 154 – 159°C

Temperatura de compactación: 143 – 148°C

Curva Reológica - Asfalto Normalizado 40-50



4 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

4.1 Preparación de muestras y ensayos

De acuerdo con el diseño Marshall se prepararon briquetas, reproduciendo la granulometría de diseño y adicionando porcentualmente asfalto en peso a la mezcla total (agregados y asfalto).

Los contenidos de asfalto se incrementaron en 0.5% para cada juego de briquetas (3 por cada contenido de asfalto) dentro de un intervalo entre 4.5% y 6.5%. Las briquetas fueron elaboradas de acuerdo con lo establecido en la norma de ensayo INV-E-748 (Marshall) y las temperaturas de mezcla y compactación corresponden a las establecidas en el Numeral 3.3 del presente informe. La fórmula de trabajo deberá ajustarse para dar cumplimiento a los parámetros de diseño indicados en la Tabla 14.

Tabla 14 Requisitos de diseño de la mezcla MDC -19

CARACTERISTICA	NORMA INV	NT2	NT3
Compactación (golpes por cara)	E-748	75	75
Estabilidad mínima (N)	E-748	7500	9000
Flujo (mm)	E-748	2.0 a 4.0	2.0 a 3.5
Relación Estabilidad /Flujo (kN/mm)	E-748	3 a 6	3 a 6
Vacíos con aire (%)	E-799 y E-748	3 a 5 (Rodadura)	4 a 6 (Rodadura)
Vacíos en agregado mineral (%)	E-799 y E-748	Min 15	Min 15
Vacíos llenos con asfalto (%)	E-799 y E-748	65 a 78	65 a 75
Relación llenante / Asfalto efectivo	E-799	0.8 a 1,2	0.8 a 1,2
Espesor de película de asfalto (µm)		Min 7,5	Min 7,5
Velocidad de deformación en el intervalo 105 a 120 min	E-756	Máx. 15 µm/min	Máx. 15 µm/min
Susceptibilidad a la Humedad TSR	E-725	80 % min	80 % min

4.2 Densidad de las briquetas

Las muestras se ensayaron de acuerdo con la norma INV-E 733-13 y los resultados se presentan en el Anexo 3 Mezcla Asfáltica.

4.3 Ensayo de estabilidad y flujo

Después de determinada la densidad de las muestras se llevan las probetas al baño de agua a 60 °C durante un tiempo entre 30 y 40 minutos para luego realizar pruebas de estabilidad y fluencia de cada una de las muestras en la prensa Marshall, de acuerdo con la norma de ensayo INV E-748-13.

Los resultados de los ensayos de densidad, estabilidad y fluencia para cada porcentaje de asfalto determinados sobre estas briquetas se presentan en el Anexo 3 Mezcla Asfáltica. Los resultados de las briquetas cumplen con la dispersión requerida en las normas.

4.4 Análisis volumétrico de la mezcla asfáltica compactada en caliente

De acuerdo con la norma INV E-799-13 se calcula la gravedad específica bulk (Gsb) de los agregados combinados, la gravedad específica bulk (Gmb) (INV E-733-13) de las briquetas, la gravedad específica efectiva del agregado (Gse), el asfalto absorbido (Pba), el contenido de asfalto efectivo (Pbe), los vacíos en los agregados minerales (VAM), el porcentaje de vacíos con aire (Va), los vacíos llenos con ligante asfáltico (VFA) y la relación llenante / ligante efectivo. Ver resultados en el Anexo 3 Mezcla Asfáltica.

4.5 Gravedad específica máxima teórica (GMM) de mezclas asfálticas para pavimentos

Para cada porcentaje de asfalto y agregados se determinó la gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica de acuerdo con la norma INV-E-735-13. Los resultados se presentan en la Tabla 15 y en el Anexo 3 Mezcla asfáltica.

Tabla 15 Resultados del ensayo Rice

Muestra N°	% de asfalto	Peso muestra en el aire (A)	Peso recipiente lleno con agua (D)	Peso recipiente lleno con agua y muestra (E)	T° Agua	Máx. medido a 25°C A/(A+D-E)
1	4.0	2501.2	7,351.0	8848.2	25.1	2.491
2	4.5	2502.9	7,351.0	8839.6	24.9	2.468
3	5.0	2498.7	7,351.0	8830.1	24.6	2.451
4	5.5	2500.1	7,351.0	8826.5	24.8	2.440
5	6.0	2501.3	7,351.0	8822.1	24.9	2.428
6	6.5	2502.1	7,351.0	8817.0	25.0	2.415

La ecuación que relaciona el peso específico teórico máximo de la mezcla asfáltica con el porcentaje de asfalto es:

$$GMM = -0,029 * \% \text{ Asfalto} + 2,609$$

4.6 Relación llenante ligante efectivo

De acuerdo con la normativa INV E-799-13 se determinan el peso específico efectivo del agregado pétreo.

$$Gse = \frac{100 - \%Asf}{\frac{100}{Gmm} - \frac{\%Asf}{Gb}}$$

Para un óptimo de asfalto de 5,6%, un GMM de 2,446 y un Gb de 1,030 tenemos:

$$Gse = 2,663$$

Con este valor se calcula el porcentaje de asfalto absorbido Pba para Gsb de 2,606

$$P_{ba} = \frac{G_b(G_{se} - G_{sb})}{G_{se} * G_{sb}} \times 100\%$$

$$P_{ba} = 0,85\%$$

Con este valor se calcula el porcentaje efectivo de asfalto:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} \times P_s}{100}$$

Para el contenido óptimo de asfalto de 5,6 % se tiene un porcentaje de asfalto efectivo de 4.8%, y una relación llenante/ligante efectivo para un 5.5% de pasa N°200 de 1,15.

4.7 Espesor de la película de asfalto

Se presenta el cálculo del espesor de la película de asfalto para la mezcla diseñada.

Cálculo del espesor medio de la película de asfalto

Porcentaje pasa No.4	a	55.8
Porcentaje pasa No.8	b	39.5
Porcentaje pasa No.16	c	27.2
Porcentaje pasa No.30	d	20.3
Porcentaje pasa No.50	e	14.6
Porcentaje pasa No.100	f	9.6
Porcentaje pasa No.200	g	5.5
Superficie específica del agregado combinado	(SE) :	5.9

Contenido de asfalto	Pb:	5.6
Densidad del ligante	Db:	1.040
Volumen de Ligante	Pb volumen:	5.38
Asfalto absorbido	Pba:	0.80
Proporción de agregado en la mezcla	Pg:	0.94
Masa de asfalto absorbido	Pba masa:	0.75
Volumen de asfalto absorbido	Pba volumen:	0.72
Volumen de asfalto efectivo	Pbe volumen:	4.66
Espesor medio de la película de asfalto, 	Ha:	8.4

4.8 Resistencia conservada a la tracción indirecta

Se trabajo asfalto 40/50 con aditivo promotor de adherencia de Multinsa. El resultado obtenido de resistencia conservada es de 81,5% el cual se presenta en el Anexo 3 – Mezcla.

Los valores promedio de la resistencia de los especímenes de los subgrupos secos y húmedos son los siguientes.

Esfuerzo de tracción Subgrupo seco: 1073 kPa

Esfuerzo de tracción Subgrupo húmedo: 874 kPa

El valor de tracción del subgrupo húmedo es superior de 560 kPa, que es el esfuerzo inducido por el eje dual de 80 kN, por lo que se considera satisfactorio el nivel de resistencia en húmedo.

5 CUADRO MARSHALL Y CURVAS DE DISEÑO

Obra: PLAN VIAL DEL CESAR
Fuente: SAN FRANCISCO
Localización: PLANTA AGUAS CLARAS - AGUACHICA
Temperatura de compactación: 140 - 150°C (Compactado a 142 Grados)
Tipo de Mezcla: MDC-19 NT2
Tipo de Asfalto: CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL 40/50

Fecha: 5/05/2023

Fracción

%	Gsb	Gsss	Gsa	% abs	Gb
					1.040
Gruesos (Retenido en N°4)	2.7	2.633	2.658	2.700	0.94
Finos (Pasa N°4 y Retenido N°200)	91.8	2.600	2.632	2.687	1.25
Pasa 200	5.5	2.701		Pasa N° 200	5.5
Combinación de agregados	2.606			Gs Llenante Pasa N°200	2.701

% Asfalto	Espesor (mm)	Peso en el aire (g)	Peso S.S.S. (g)	Peso sumergido (g)	Volumen (cm³)	Estabilidad KN.	Fc	Estabilidad Corregida (N)	Flujo (mm)	Gmb	Gmm	Gse	Pba (asf.Abs.)	Pbe (asf.Efec.)	Vol. Agregado s	Vol. Asf.Efect.	Va	V.A.M.	VFA	P _{0.075}	R.P. P _{0.075} /Pbe	F	A	Cv	Estab./Flujo	
4.0	64.50	1122.3	1127.6	640.7	486.9	15.77	0.98	15428	2.48	2.305	2.493	2.647	0.61	3.42	85.41	7.1	7.5	15.1	50.1	5.50	1.61	1.95	3.29	0.372	6.2	
4.0	64.70	1149.8	1152.6	655.8	496.8	16.93	0.97	16492	3.49	2.314	2.493	2.647	0.61	3.42	85.74	7.1	7.2	14.8	51.5	5.50	1.61	1.95	3.29	0.372	4.7	
4.0	65.30	1149.1	1149.1	653.1	496	14.67	0.96	14108	3.54	2.317	2.493	2.647	0.61	3.42	85.86	7.1	7.1	14.7	51.9	5.50	1.61	1.95	3.29	0.372	4.0	
Promedio									15343	3.17	2.312	2.493	2.647	0.61	3.42	85.67	7.1	7.3	14.8	51.2	5.50	1.61	1.95	3.29	0.37	5.0
4.5	65.20	1147.8	1150.4	655.6	494.8	14.12	0.96	13608	3.02	2.320	2.478	2.651	0.67	3.86	85.57	8.0	6.4	15.0	57.4	5.50	1.42	1.94	3.71	0.343	4.5	
4.5	64.90	1149.2	1153.6	658.7	494.9	13.98	0.97	13560	3.25	2.322	2.478	2.651	0.67	3.86	85.65	8.1	6.3	14.9	57.8	5.50	1.42	1.94	3.71	0.343	4.2	
4.5	63.80	1145.3	1148.9	654.9	494	13.42	0.99	13331	3.30	2.318	2.478	2.651	0.67	3.86	85.50	8.0	6.5	15.1	57.1	5.50	1.42	1.94	3.71	0.343	4.0	
Promedio									13500	3.19	2.320	2.478	2.651	0.67	3.86	85.57	8.0	6.4	15.0	57.4	5.50	1.42	1.94	3.71	0.34	4.2
5.0	65.20	1157.6	1162.0	665.6	496.4	13.74	0.96	13242	2.85	2.332	2.464	2.655	0.73	4.31	85.61	9.0	5.3	15.0	64.4	5.50	1.28	1.93	4.14	0.318	4.6	
5.0	63.90	1130.4	1137.6	654.3	483.3	14.10	0.99	13976	3.47	2.339	2.464	2.655	0.73	4.31	85.87	9.1	5.1	14.8	65.7	5.50	1.28	1.93	4.14	0.318	4.0	
5.0	66.40	1148.9	1157.7	666.3	491.4	12.78	0.94	12011	3.36	2.338	2.464	2.655	0.73	4.31	85.84	9.1	5.1	14.8	65.5	5.50	1.28	1.93	4.14	0.318	3.6	
Promedio									13076	3.23	2.336	2.464	2.655	0.73	4.31	85.77	9.1	5.2	14.8	65.2	5.50	1.28	1.93	4.14	0.32	4.1
5.5	64.70	1149.8	1149.0	658.7	490.3	14.58	0.97	14202	3.54	2.345	2.449	2.659	0.78	4.76	85.69	10.1	4.3	15.0	71.6	5.50	1.16	1.92	4.58	0.295	4.0	
5.5	63.90	1142.3	1144.8	654.9	489.9	13.29	0.99	13173	3.41	2.332	2.449	2.659	0.78	4.76	85.21	10.0	4.8	15.5	69.1	5.50	1.16	1.92	4.58	0.295	3.9	
5.5	62.50	1139.5	1142.8	655.1	487.7	14.89	1.02	15232	3.30	2.336	2.449	2.659	0.78	4.76	85.36	10.0	4.6	15.3	69.9	5.50	1.16	1.92	4.58	0.295	4.6	
Promedio									14202	3.42	2.338	2.449	2.659	0.78	4.76	85.42	10.0	4.5	15.2	70.2	5.50	1.16	1.92	4.58	0.30	4.2
6.0	63.80	1149.5	1153.2	665.0	488.2	13.92	0.99	13828	3.65	2.355	2.434	2.662	0.84	5.21	85.65	11.1	3.3	15.1	78.4	5.50	1.06	1.91	5.01	0.276	3.8	
6.0	63.40	1143.7	1150.3	664.9	485.4	13.33	1.00	13360	3.89	2.356	2.434	2.662	0.84	5.21	85.68	11.1	3.2	15.0	78.6	5.50	1.06	1.91	5.01	0.276	3.4	
6.0	64.00	1140.0	1150.3	661.0	489.3	14.87	0.99	14707	3.74	2.330	2.434	2.662	0.84	5.21	84.74	11.0	4.3	16.0	73.1	5.50	1.06	1.91	5.01	0.276	3.9	
Promedio									13965	3.76	2.347	2.434	2.662	0.84	5.21	85.36	11.1	3.6	15.4	76.7	5.50	1.06	1.91	5.01	0.28	3.7
6.5	63.80	1148.7	1150.2	667.2	483.0	13.21	0.99	13123	4.02	2.378	2.420	2.666	0.89	5.67	86.06	12.2	1.7	14.7	88.2	5.50	0.97	1.90	5.45	0.259	3.3	
6.5	63.40	1147.2	1149.8	668.6	481.2	12.57	1.00	12598	3.96	2.384	2.420	2.666	0.89	5.67	86.28	12.2	1.5	14.5	89.8	5.50	0.97	1.90	5.45	0.259	3.2	
6.5	64.00	1145.9	1145.9	667.1	478.8	12.99	0.99	12847	3.84	2.393	2.420	2.666	0.89	5.67	86.61	12.3	1.1	14.2	92.2	5.50	0.97	1.90	5.45	0.259	3.3	
Promedio									12856	3.94	2.385	2.420	2.666	0.89	5.67	86.32	12.2	1.4	14.4	90.1	5.50	0.97	1.90	5.45	0.26	3.3

Con los resultados obtenidos en el ensayo Marshall, se grafican las curvas de diseño, ver Gráficos 3 a 13 y la Tabla 13, y se definen el contenido “**óptimo de asfalto**” y la “**fórmula de trabajo**” de la mezcla asfáltica en cumplimiento de todos los requisitos especificados para una mezcla tipo MDC-19 para capa de rodadura y una categoría de tránsito NT2 según el Artículo 450 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2013.

Gráfico 3 Estabilidad Marshall Vs % de Asfalto

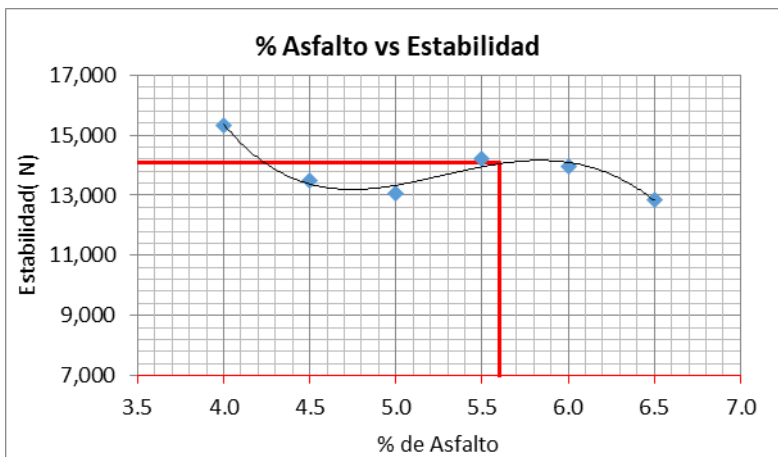


Gráfico 4 Flujo Marshall Vs % de Asfalto

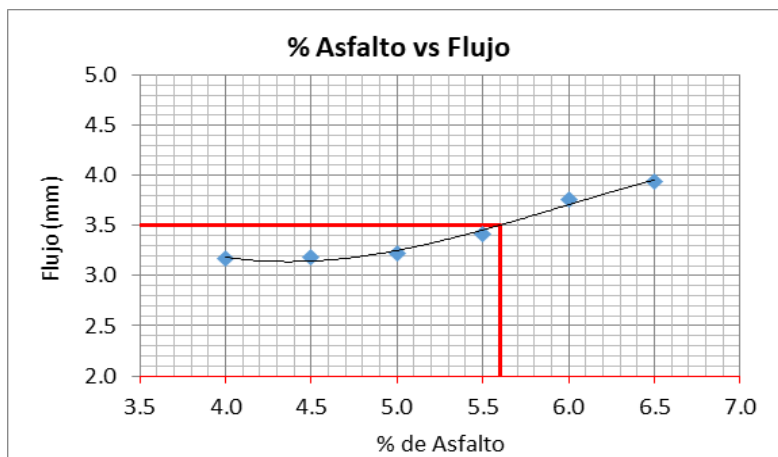


Gráfico 5 Relación Estabilidad/Flujo Vs % de Asfalto

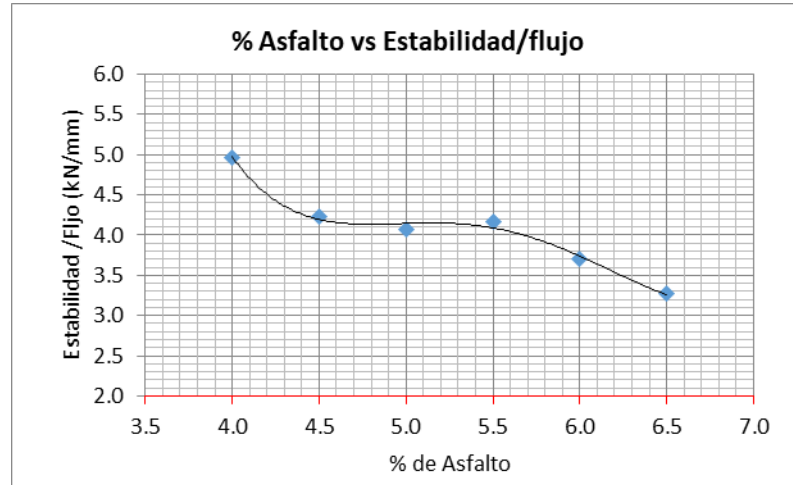


Gráfico 6 Gravedad específica bulk Vs % de Asfalto

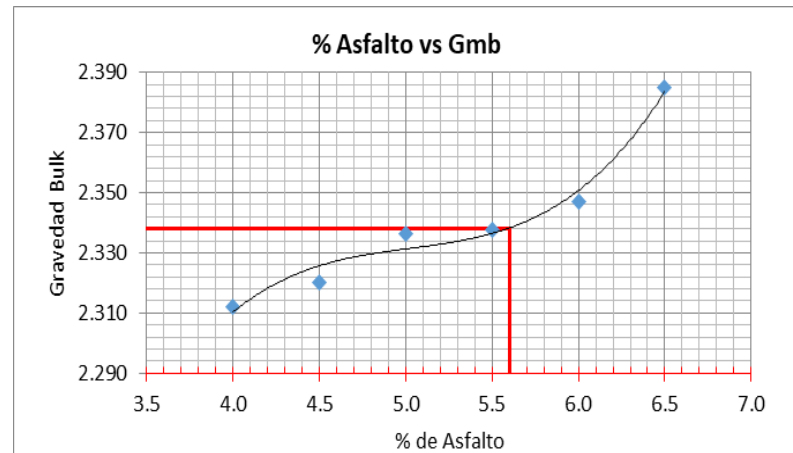


Gráfico 7 Gravedad específica máxima medida Vs % de Asfalto

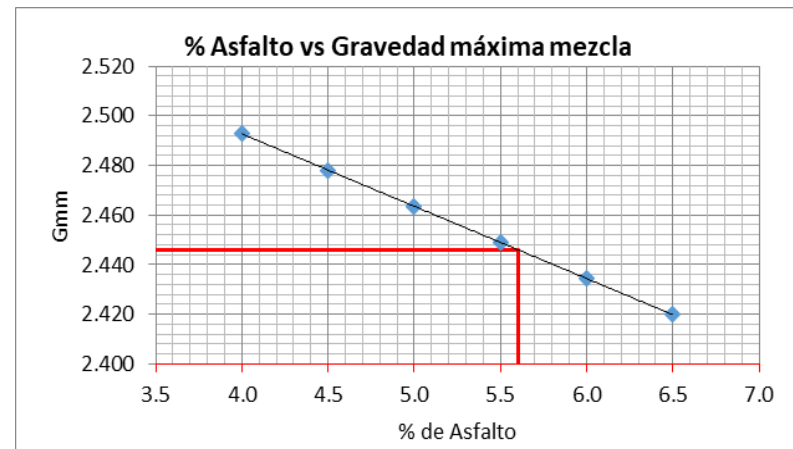


Gráfico 8 Vacíos con aire (Va) Vs % de Asfalto

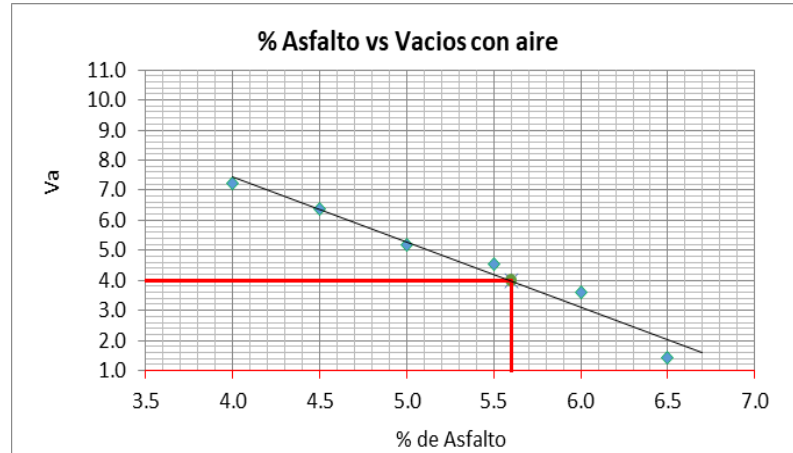


Gráfico 9 Vacíos en agregado mineral Vs % de Asfalto

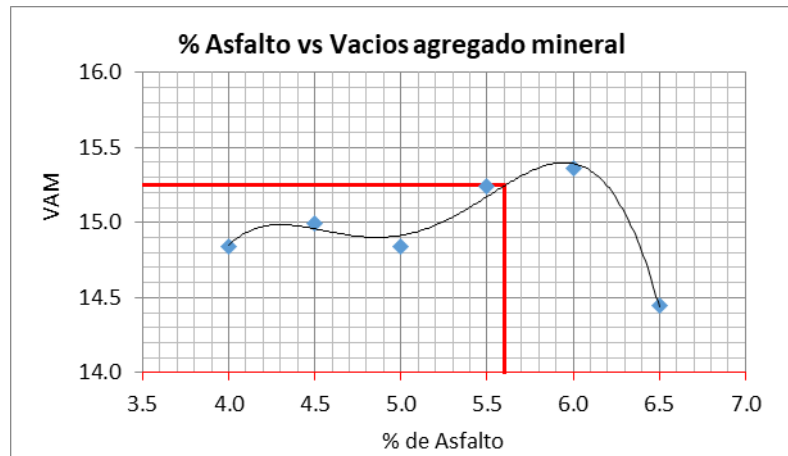


Gráfico 10 Vacíos llenos con asfalto Vs. % de Asfalto

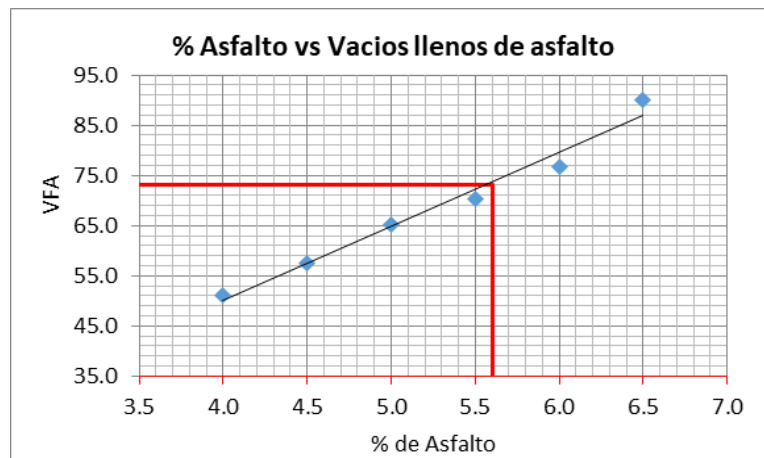


Gráfico 11 Concentración real del llenante en volumen Vs % de Asfalto

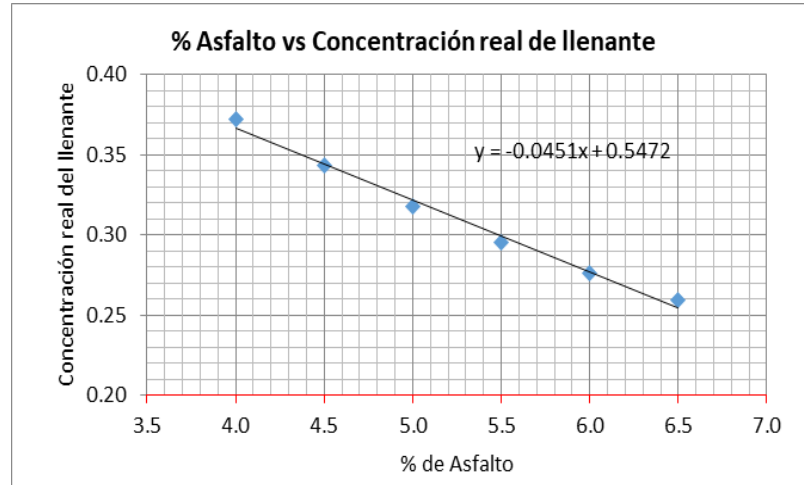


Gráfico 12 Relación Filler/Ligante efectivo Vs % de Asfalto

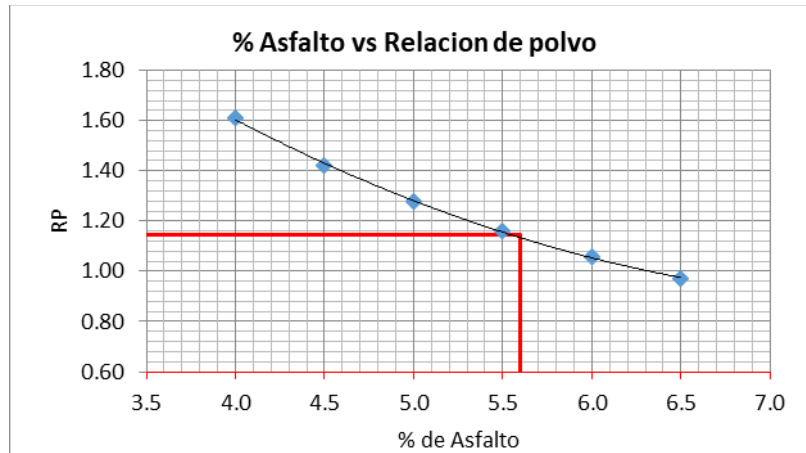


Gráfico 13 Espesor de película de asfalto Vs % de Asfalto

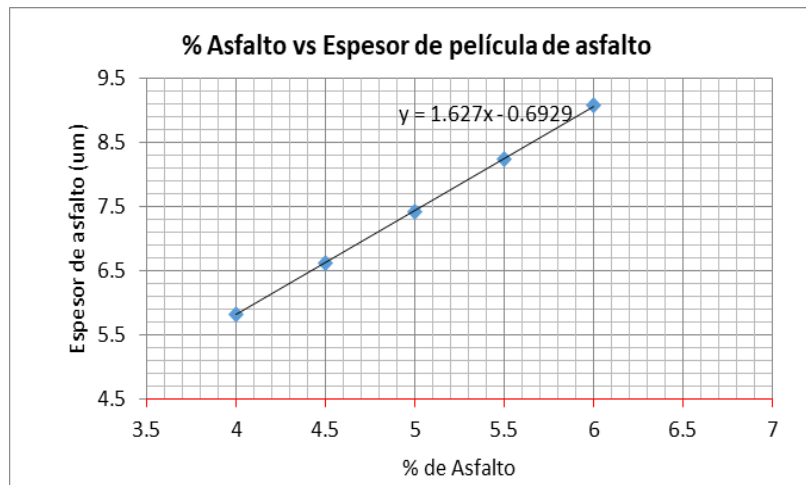


Tabla 16 Fórmula de Trabajo del diseño Marshall evaluados en el óptimo de asfalto para la MDC-19 n12

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	INTERVALO CUMPLE	RESULTADOS
% ÓPTIMO DE ASFALTO	-	5,3 a 5,9	5.6
DENSIDAD BULK, g/cm ³	-	-	2.331
ESTABILIDAD	> 7500 N	4,0 a 6,5	14100
FLUJO	2 a 3,5	4,0 a 6,0	3.52
VACIOS CON AIRE	3 a 5	5,1 a 6,0	4.0
VACIOS EN LOS AG. MINERALES	≥ 15 %	5,2 a 6,3	15.25
VACÍOS LLENOS CON ASFALTO	65 - 78 %	5,0 a 5,9	73.0
CONCENTRACIÓN VOLUMEN	CS > CV	4,5 a 6,5	0.35
ESPESOR DE PELICULA DE ASFALTO	≥ 8 um	5,3 a 6,5	8.6
RELACIÓN LLENANTE / LIGANTE	0,8 - 1,2	5,4 a 6,5	1.15
RELACIÓN ESTABILIDAD / FLUJO	3,0 a 6,0	4,0 a 6,2	4.01

6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Es importante mantener homogeneidad en los acopios de materiales para la producción de mezcla. Los acopios se deben homogenizar antes de la producción para evitar la segregación de los materiales y garantizar una granulometría que cumpla los rangos de la fórmula de trabajo en la producción en planta.
- Se debe chequear antes de cada producción las granulometrías y verificar que la combinación de agregados se encuentre dentro de la franja interna de la fórmula de trabajo. Si es necesario se debe ajustar la proporción de agregados para cumplir la franja interna.
- Teniendo en cuenta las temperaturas altas de la zona y la susceptibilidad al ahuellamiento que esto genera, se recomienda para mezclas NT3 de mas de 10 millones de ejes equivalentes, así como en zonas de más de 3 millones de ejes equivalentes, pero de tránsito a velocidad baja (<20 km/h) como cruces poblados, trabajar con asfalto modificados con polímero tipo II, Tipo III, asfaltos modificados con caucho Tipo I o mezclas adicionadas con fibras de refuerzo de poliamida y poliolefina
- Los agregados de la mezcla se deben proteger de la intemperie, cubrir con plástico triturados y arenas o preferiblemente bajo ramada o invernadero, para mantener humedades bajas de los mismos.
- La presente fórmula de trabajo puede estar sujeta a ajuste durante el primer mes de producción con el fin de validar la franja interna de los agregados y los valores de resistencia y diseño volumétrico Marshall, pasado este mes se presentará a cliente la información de ajuste de acuerdo con el análisis estadístico de los datos reportados.
- Es de gran importancia mantener las temperaturas de mezcla y compactación en laboratorio entre los rangos de acuerdo con la curva reológica del asfalto. En ningún caso se debe permitir el calentamiento del asfalto y la producción de mezclas a una temperatura superior a la recomendada en la curva reológica.

Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
		
Ing. Sergio Alfredo Cifuentes Mosquera	Ing. John Jairo Calderón Ocampo	Ing. Antonio Pacheco
Especialista en Pavimentos	Dirección Técnica Coniteg	Director de Planta

Apéndice 2

Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MDC-19

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE REFERENCIA REGIONALIZADOS ACTUALIZACIÓN PERIÓDICA		CÓDIGO	FR-APU-I		
		VERSIÓN	2021		
		PÁGINA			

FECHA				
		(Día)	Mes	(Año)

ITEM BASE DE APU DE REFERENCIA ☒ PUBLICACIÓN: 2025 - 1. junio de 2025

ITEM DE PROYECTO PARTICULAR:
ITEM DE LA PROPUESTA ECONOMICA ☐
UNIDAD EJECUTORA _____ ITEM NO PREVISTO: ☐ DIRECCION TERRITORIAL: _____ CESAR _____ ITEM APU PARTICULAR: ☐ PROVINCIA: _____ SUR _____

CONTRATO No. _____ FECHA: _____
OBJETO DEL CONTRATO: _____

CARRETERA: _____ SECTOR: _____

CONTRATISTA: _____

INTERVENTOR: _____ CONTRATO No. _____ FECHA: _____

FECHA DE CIERRE DEL PROCESO DE SELECCIÓN DEL CONTRATO: _____ / _____ / _____
(Día) (Día) (Mes) (Año)

DATOS ESPECÍFICOS				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD
450,2	MEZCLA Densa EN CALIENTE TIPO MDC-19 (Aplicado para mezcla MDC-19 fabricada en planta móvil. Incluye suministro de agregados, producción, transporte, extendido y compactación. No incluye llenante mineral)		m3	

I. EQUIPO

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
C0010140	Cargador: potencia en el volante 125 hp, clasificación de rpm		\$ 179 824.05	0.10000	\$ 17 982.41
C0010230	Compactador neumático de Potencia 70 HP, peso de 13 ton		\$ 146 739.40	0.10000	\$ 14 673.94
C0010211	Compactador de rodillo potencia: 99 hp, peso: 8 toneladas		\$ 113 334.49	0.10000	\$ 11 333.45
C0010660	Planta de asfalto en caliente continua de 120 toneladas de		\$ 711 235.81	0.10000	\$ 71 123.58
C0010910	Terminadora de asfalto (Finisher), potencia en el volante 174 HP, R=20M3/H, velocidad de desplazamiento 114 m/min		\$ 203 177.63	0.10000	\$ 20 317.76
C0010958	Volqueta 14 m3		\$ 157 877.21	0.10000	\$ 15 787.72
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 15 971.07	5.00%	\$ 798.55
SUBTOTAL \$					\$ 152 017.41

II. MATERIALES

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO
	Mezcla asfáltica MDC-19	m3	12500	\$ 313 200.00	\$ 391 500.00
	Emulsión CRR-1	lts	189.0000	\$ 1 318.33	\$ 249 164.37
SUBTOTAL \$					\$ 640 664.37

III. TRANSPORTES

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0010400	Transporte de agregados	m3-km	1.3000	1.000	1.300		\$ 1 160.53
SUBTOTAL \$							\$ 1 160.53

IV. MANO DE OBRA

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO
A0030080	Obrero (8)	\$ 379 600.00	2.0404	\$ 774 543.74	73.3333	\$ 10 561.96
A0040010	Oficial	\$ 80 665.00	1.9318	\$ 155 825.89	73.3333	\$ 2 124.90
A0070020	Rastrillero (2)	\$ 121 472.00	1.9827	\$ 240 842.27	73.3333	\$ 3 284.21
SUBTOTAL \$						\$ 15 971.07

TOTAL COSTO DIRECTO \$ 809 813.38

V. COSTOS INDIRECTOS

DESCRIPCIÓN	Porcentaje	Valor Total
ADMINISTRACION		
IMPREVISTOS		
UTILIDAD		
SUBTOTAL \$		

Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$

Firma _____
Nombre: _____
Representante Legal del Contratista o su Apoderado
Matricula No. :

OBSERVACIONES INTERVENTORIA:

APROBACIÓN POR INTERVENTORIA

Nota 1: Este solo es un Análisis de Precios Unitario de referencia. De ser necesario, se debe ajustar a las particularidades de cada proyecto.
Nota 2: Cuando se trate de Análisis de precios unitarios correspondientes a ítems de la propuesta económica aprobada, el Interventor aprueba el desglose de los componentes manteniendo el mismo precio unitario de cada ítem, cumpliendo con las especificaciones de construcción vigentes para el proyecto.

Firma _____
Nombre: _____
Representante Legal del Interventor o su Apoderado
Matricula No. :

Apéndice 3

Análisis de precios unitarios APU mezcla asfáltica MSC-19

