

**Zonificación y recomendaciones de intervención a tramo vial deteriorado aplicando
herramientas SIG**

Alison Geraldine Cogollos Franco

Marlly Lizeth Martínez Rodríguez

**Trabajo de grado
para optar por el título de Ingeniero Civil**

Dirigido por:

Lizeth Abril Cabrera

Ingeniera Civil – Magister en Ingeniería Geotécnica (C)

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá

2020

Resumen

El mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos se orienta a actividades de constancia obligatoria para preservar la estructura de las vías. La conservación de pavimentos se define como una serie de intervenciones destinadas a proteger la estructura de agentes externos, por medio de tratamientos económicos que permitan retardar el deterioro, alargando la vida útil de la vía y mejorando su desempeño sin presentar afectaciones en el nivel de servicio.

El presente documento tiene como propósito obtener una recopilación teórica del asfalto y las patologías de un pavimento flexible para la categorización de daños según los manuales aplicados en Bogotá, evaluando de esta manera, el comportamiento bajo un análisis hipotético-deductivo de la incorporación, modificación o repavimentación de la mezcla asfáltica con aditivos en un tramo vial estudiado, con el fin de determinar el aditivo de mayor viabilidad de acuerdo con el tipo de daño y el método de intervención requerido. El objetivo final de este proyecto consistió en construir una base de datos espaciales (SIG) en la que se logró sistematizar y esquematizar la información recolectada de una manera clara y concisa.

Palabras claves: Pavimento flexible, mantenimiento, rehabilitación, aditivos, ArcMap.

Abstract

The maintenance and rehabilitation of the pavements is oriented to activities of obligatory constancy to preserve the structure of the roads. The preservation of pavements is defined as a series of interventions aimed at protecting the structure from external agents, by means of economic treatments that allow the deterioration to be delayed, lengthening the useful life of the road and improving its performance without affecting the level of service.

The purpose of this document is to obtain a theoretical compilation of the asphalt and the pathologies of a flexible pavement for the categorization of damages according to the manuals applied in Bogotá, thus evaluating the behavior under a hypothetical-deductive analysis of the incorporation, modification or resurfacing of the asphalt mixture with additives in a studied road section, in order to determine the additive with the highest viability according to the type of damage and the required intervention method. The final objective of this project was to build a spatial database (GIS) in which the information collected was systematized and schematized in a clear and concise manner.

Keywords: Flexible pavement, maintenance, rehabilitation, additives, ArcMap.

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

	4
Tabla de Contenido	
Resumen	2
Abstract	3
Tabla de Contenido	4
Lista de Tablas	7
Lista de Figuras	8
Glosario	10
Abreviaturas	13
Introducción	14
Planteamiento del Problema	16
Objetivos	18
General	18
Específicos	18
Justificación	19
Antecedentes	21
Metodología	23
Marco Conceptual	27
Pavimento	27
Clasificación de los Pavimentos.	28
Pavimento Rígido	28
Pavimento Articulado	28
Pavimento Semi-rígido	29
Pavimento Semi-flexible	29
Pavimento Flexible	29
Materiales Bituminosos	31
Asfalto	31
Definición	31
Propiedades Físicas	32
Propiedades Químicas	33
Origen e Historia del Asfalto	36
Clasificación de un Asfalto	38
Comportamiento de un Asfalto	41

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

	5
Alquitrán o brea	41
Asfaltos Modificados	42
Mezcla Asfáltica	42
Clasificación de las Mezclas Asfálticas	43
Tipo INVIAS	45
Tipo IDU	45
Especiales	46
Marco Teórico	47
Patologías del Pavimento Flexible	47
Clasificación y Categorización del Tipo de Daño	48
Factores Causantes de la Reducción de Resistencia y Desgaste del Pavimento.	48
Formato de inspección según el <i>Instituto Nacional de Vías</i>	50
Registro de daños en informe, según el <i>Instituto Nacional de Vías</i>	53
Tipo de Intervenciones Realizados en las Vías	54
Mantenimiento Vial	54
Mantenimiento Rutinario	54
Tratamientos del Mantenimiento Rutinario Realizados en el Pavimento, según el <i>Instituto Nacional de vías</i>	55
Mantenimiento Periódico	57
Rehabilitación de una Vía	61
Alternativas de rehabilitación según <i>el Instituto Nacional de Vías y el Instituto de Desarrollo urbano</i>	61
Aditivos	75
Cal Hidratada	75
Ceniza Volante	79
Geotextil – Geosintéticos	90
Polímeros.	94
Zona de estudio	113
Síntesis Histórica	113
Geología	114
Tránsito	116
Descripción de los tramos viales	119

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

	6
Base de Datos	126
Sistemas de Información Geográfica (SIG)	126
Desarrollo de la base de datos	128
Desarrollo y Resultados	135
Conclusiones	159
Recomendaciones	161
Discusión	162
Nanotecnología en el asfalto	162
Asfaltos Autorreparables	163
Referencias Bibliográficas	166
Anexos	178

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Desarrollo metodológico</i>	25
Tabla 2. <i>Técnicas de tratamientos de preparación en pavimentos asfálticos</i>	63
Tabla 3. <i>Técnicas de restauración en pavimento asfáltico</i>	64
Tabla 4. <i>Selección del método de reciclado en el pavimento asfáltico</i>	68
Tabla 5. <i>Características del reciclado en frío</i>	72
Tabla 6. <i>Condiciones de mezcla con cal para determinar la proporción aproximada de la misma</i>	78
Tabla 7. <i>Condiciones de las capas estabilizadas con cal</i>	79
Tabla 8. <i>Características del carbón colombiano por zonas</i>	88
Tabla 9. <i>Tipo de combustible producido por Centrales Termoeléctricas</i>	89
Tabla 10. <i>Panorama general de las mejoras obtenidas al modificar asfaltos con las diferentes clases de polímeros compatibles</i>	110
Tabla 11. <i>Descripción general del estado superficial del pavimento en el tramo vial A</i>	124
Tabla 12. <i>Desarrollo metodológico de la estructuración de la base de datos</i>	129
Tabla 13. <i>Seguimiento y control de deterioros</i>	136
Tabla 14. <i>Seguimiento de reparaciones</i>	142
Tabla 15. <i>Frecuencia de daños</i>	144
Tabla 16. <i>Porcentaje de afectación de cada tramo</i>	146
Tabla 17. <i>Aditivos aplicados según el tipo de daño</i>	150
Tabla 18. <i>Aditivos recomendados según el tipo de daño</i>	154
Tabla 19. <i>Frecuencia de aditivos usados por tramos en porcentaje</i>	155
Tabla 20. <i>Sección de resultados</i>	157
Tabla 21. <i>Impactos del proyecto</i>	158

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Sección típica de un pavimento</i>	27
Figura 2. <i>Diagrama de la composición química del asfalto</i>	34
Figura 3. <i>Asociación molecular entre resinas y asfaltenos</i>	36
Figura 4. <i>Nomenclatura de carriles y calzadas</i>	51
Figura 5. <i>Nomenclatura de carriles con varias calzadas</i>	52
Figura 6. <i>Sellado de grietas en calzada</i>	56
Figura 7. <i>Cal hidratada</i>	75
Figura 8. <i>Ceniza volante</i>	81
Figura 9. <i>Diagrama del procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica</i>	86
Figura 10. <i>Aplicación de geotextiles</i>	93
Figura 11. <i>Clasificación de los polímeros</i>	100
Figura 12. <i>Tipos de palomeros tipo elastómeros</i>	105
Figura 13. <i>Tipos de palomeros tipo elastómeros</i>	105
Figura 14. <i>Porcentajes encuestas habitantes de la zona</i>	117
Figura 15. <i>Gráficos encuestas habitantes de la zona</i>	117
Figura 16. <i>Vista aérea de los tramos de estudio</i>	119
Figura 17. <i>Vista aérea del Tramo A</i>	120
Figura 18. <i>Vista aérea del Tramo B</i>	121
Figura 19. <i>Vista aérea del Tramo C</i>	122
Figura 20. <i>Vista aérea del Tramo D</i>	123
Figura 21. <i>Ubicación de daños en el tramo A con sus respectivas descripciones</i>	130
Figura 22. <i>Zonificación de los tipos de daños ubicados en el Tramo A</i>	131
Figura 23. <i>Zonificación de daños con su respectiva evolución probable</i>	132
Figura 24. <i>Zonificación de daños con respecto a la categoría y severidad</i>	133
Figura 25. <i>Zonificación de daños según el tipo de intervención requerida y recomendación de aditivos</i>	133
Figura 26. <i>Daños presentados en el tramo vial A</i>	145
Figura 27. <i>Porcentaje de afectación</i>	147

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

	9
Figura 28. <i>Actividad de intervención efectuada según el área de afectación</i>	148
Figura 29. <i>Uso de aditivos según los daños registrados</i>	155

Glosario

Agregados reciclados “Son agregados de material proveniente del fresado o trituración de capas asfálticas elaboradas en caliente” (IDU, 2011b, p. 09)

Agentes rejuvenecedores: Son agentes encargados de restaurar las características del asfalto original en la estructura coloidal intrínseca.

Carbón de Antracita: Mineral metamórfico de características rígidas obtenido de extracción de minas. Es utilizado para la producción de energía y fundición de materiales. Presenta hasta un 95% de contenido de carbón.

Carbón Bituminoso: Carbón denso que puede convertirse en coque, un combustible elaborado mediante la destilación de carbones más blandos; se usa para calentar los altos hornos de las centrales metalúrgicas. Posee alta densidad y alto contenido de volátiles al 70% de carbono fijo.

Carbón Lignito: Estructura orgánica utilizada como combustible, cuya procedencia se origina por medio de la transformación de orgánicos vegetales y fósiles.

Carbón Sub bituminoso lignito: Carbón blando de baja categoría con alto contenido de humedad y similitud a las propiedades del carbón bituminoso y el lignito, es decir, una transición entre los dos tipos de carbón.

Hidroplaneo: Formación de una capa de agua sobre el pavimento que provoca la pérdida de tracción del vehículo al tener contacto con la superficie.

Ligante: Los ligantes son aquellos productos bituminosos de alta viscosidad los cuales proporcionan elasticidad al pavimento debido a que poseen propiedades aglomerantes.

Llenante mineral: “Partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75 μm , cuya dimensión mayor no supera el doble de la menor en la incorporación de la mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento” (Zuloaga, 2020, p. 01)

Fillers: Son sustancias de alta insolubilidad divididas en el material asfáltico, las cuales se pueden dispersar en él, como una forma de modificación de la consistencia del asfalto y sus propiedades mecánicas.

Malla vial arterial principal: De acuerdo con IDU (2020), este tipo de malla es la red de vías de mayor jerarquía, que actúa como soporte de la movilidad y la accesibilidad urbana y regional y de conexión con el resto del país.

Malla arterial complementaria: Según IDU (2020), es la red de vías que articula operacionalmente los subsistemas de la malla arterial principal, facilita la movilidad de mediana y larga distancia como elemento articulador a escala urbana.

Malla Vial Intermedia: : Según IDU (2020), este tipo de malla está constituida por una serie de tramos viales que permean la retícula que conforma la malla arterial principal, sirviendo como alternativa de circulación. Está conformada por vías que enmarcan sectores de 25 hectáreas aproximadamente.

Masillas bituminosas: Es una mezcla de asfalto y material mineral fino en proporciones para verse caliente en su lugar y luego, ser compactado a mano sobre una superficie lisa para pisos, techos y pavimentos.

Perfilado fino: Es la remoción controlada de asfalto o pavimento de concreto a una profundidad utilizando equipo especialmente diseñado para restablecer una superficie a un grado o curva predicha.

Poder Calorífico (PC): Es aquel que representa la energía generada por la reacción de combustión del carbono, hidrógeno y azufre.

Puzolanas: “Materiales silíceos o silíceos y aluminosos que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que en forma de partículas finas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos con propiedades cementantes.” (Canul et al., 2016, p. 02)

Riego: Es la utilización uniforme y fina de un tipo de ligante asfáltico en condición líquida sobre una superficie. Dicha aplicación del ligante se puede realizar sobre un pavimento existente, una base estabilizada o en suelos.

Riego de vigorización: Es la aplicación preventiva de un riego de asfalto cuyo objetivo es fortalecer, vigorizar y revivir aquellas zonas aisladas del pavimento, en donde, se observan señales de deterioro, fisuramientos o desprendimientos leves de la superficie asfáltica.

Temperatura de transición vítrea: Intervalo de temperaturas en las cuales se obtienen cambios radicales en las propiedades del polímero, generando así movimientos de las cadenas poliméricas hasta conseguir un estado vítreo, frágil y rígido del material.

Vulcanización: Proceso de mejoramiento de las propiedades del caucho por medio del incremento de temperatura del material en presencia del azufre con el fin de obtener mayor resistencia a esfuerzos y a temperaturas inferiores.

Abreviaturas

AASHTO: Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y transporte

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas de Material

BCH: Bache

DC: Descascaramiento

DSU: Desgaste superficial

FB: Fisuras en bloque

FBD: Fisuras de borde

FCL, FCT: Fisuras en junta de construcción

FJL o FJT: Fisura por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto

FML: Fisuras en medialuna

GDB: Geodatabase

H/C: Relación Hidrógeno - Carbono

HUM: Hundimiento

kPa: Unidad de presión definida como kilo Pascal

µm: Micrómetro

MPa: Unidad de presión definida como mega Pascal

NTC: Norma Técnica Colombiana

PA: Pérdida de agregado

PC: Fisura de piel de cocodrilo

PSI: Unidad de presión definida como libra sobre pulgada cuadrada

SIG: Sistemas de Información Geográfica

Tg: Temperatura de transición vítrea

Introducción

El proyecto se lleva a cabo con el fin de realizar una zonificación por medio de los sistemas de información geográfica SIG, representando la construcción de una base de datos para recomendación de actividades de mantenimiento o rehabilitación de asfaltos, desde un análisis hipotético-deductivo del nivel de durabilidad al momento de la implementación de aditivos, buscando así, obtener alternativas para el mejoramiento de la resistencia de la carpeta asfáltica ante las elevadas cargas dinámicas producidas por el tráfico, las cuales son evidenciadas diariamente en las vías principales de Bogotá.

A través de la implementación del método observacional, se busca realizar un análisis del estado superficial de un tramo vial de alto volumen de tráfico en la ciudad de Bogotá, en donde, se logre identificar el daño a través de una evaluación de la condición superficial en el pavimento flexible, optando como referencia principal el *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006), y base secundaria el Manual PCI INGEPAV (2002); de esta manera, combinar antecedentes e información obtenida de los trabajos de campo realizados por medio del manejo de datos espaciales en la plataforma ArcMap.

La inspección visual del pavimento permite evaluar los daños de tipo funcional identificados en la estructura. Como objeto de los procesos de caracterización del daño, se plantea una recomendación del tipo de intervención requerida según el deterioro, la cual es obtenida mediante el análisis de la información recopilada con los respectivos aditivos, utilizados para el mejoramiento de las propiedades reológicas del asfalto, tales como la ceniza volante, la cal hidratada, los geotextiles y los polímeros; aditivos utilizados como objeto de investigación de este proyecto para la recolección de información.

Con lo mencionado anteriormente, el informe se encuentra dividido en quince capítulos fundamentales para su continuo desarrollo. En el primer, segundo y tercer capítulo del informe, se plantean los objetivos con una breve introducción de los problemas generados por el deterioro en los pavimentos de las ciudades con su respectiva justificación, dando lugar al cuarto y quinto capítulo con la descripción de los antecedentes y la metodología de desarrollo del proyecto. En el sexto y séptimo capítulo se abarca todo el contexto teórico correspondiente a la recopilación de información obtenida, haciendo referencia a un estado del arte sobre el pavimento, el asfalto, patología de daños, aditivos, actividades de mantenimiento y rehabilitación requeridas según los deterioros presentados en la superficie asfáltica. El octavo y noveno capítulo dan paso a una descripción minuciosa de la zona de estudio y el tramo vial seleccionado. El décimo capítulo explica el software implementado para la realización del proyecto y el desarrollo del mismo, exponiendo el proceso de creación de la base de datos en la plataforma ArcMap. En el undécimo y duodécimo capítulo, se evidencia el desarrollo del informe, al igual que el análisis y la conclusión de los resultados obtenidos en la inspección. El décimo tercer capítulo da apertura a una investigación de nuevas tecnologías a implementar mediante la discusión.

Finalmente, el décimo cuarto capítulo evidencia las referencias bibliográficas por medio del gestor de citas y bibliografías Zotero, y el décimo quinto adjunta los anexos conformados por tablas de Excel, archivos gdb, kmz y pdf, en donde, se evidencia la descripción realizada por INVIAS (2006) de los tipos de daños en pavimentos flexibles, las comparaciones de actividades de intervención de mantenimiento y rehabilitación, la unión de los datos recopilados junto con la inspección visual de pavimentos y, la demostración de la base de datos SIG en ArcMap con sus respectivos mapas.

Planteamiento del Problema

El sistema de movilidad de Bogotá genera una deficiencia por la acumulación de cargas de tránsito, dando lugar a la evolución de diversas patologías del pavimento a tal punto de causar fatiga o ahuellamiento, provocando de esta manera, la pérdida y/o falla de las capas de la estructura. La gestión de mantenimiento y rehabilitación de un pavimento existente, se plantea por medio de la ubicación e importancia de los tramos viales de la ciudad; vías con alto volumen de tráfico generan un impacto significativo sobre la estructura, ocasionando el aumento de la congestión vehicular y a su vez, daños en el sistema de transporte público o privado circulante en las mallas viales de Bogotá. Por tal causa, el objetivo principal del proyecto es indicar mediante la construcción de la base de datos SIG, los daños presentados constantemente en la superficie asfáltica del pavimento, junto con la recomendación de actividades de intervención, dependientes del estado funcional de la zona; estas son realizadas por medio de un mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico o en caso de deterioro evolucionado, rehabilitación.

Reiterando lo mencionado anteriormente, la variabilidad de los tipos de daños presentados en los pavimentos flexibles de Bogotá generan una pérdida de nivel de servicio por el desgaste ocasionado por el impacto del alto tráfico y agentes erosivos, los cuales regularmente son reparados con actividades de baja durabilidad, ya sea por cuenta propia del distrito o por acato a las solicitudes de las comunidades hacia los entes encargados. Con este proyecto se propone una alternativa, en donde, se facilite la interpretación de la frecuencia del daño para recomendar por medio de una zonificación, las diferentes actividades de mantenimiento o rehabilitación en el tramo vial estudiado; considerando el análisis teórico de

aditivos para implementación en la carpeta asfáltica según las propiedades requeridas en la zona.

La importancia de la implementación SIG en una zonificación puede ser utilizada como progreso en los niveles de servicio proyectados en el trayecto vehicular de los ciudadanos, dando lugar al reconocimiento de la localización de deterioros presentados en la vía. De igual modo, la alimentación y depuración de datos espaciales en la plataforma, facilitará y simplificará la información de los daños georreferenciados con su respectiva severidad y área ocupada en el tramo vial.

Objetivos

General

- Construir una base de datos de consulta utilizando Sistemas de Información Geográfica SIG para evidenciar una zonificación de antecedentes, identificación de daños, frecuencia de daños e información recopilada y depurada de alternativas de aditivos para posibles recomendaciones en el mantenimiento o rehabilitación de pavimentos flexibles.

Específicos

- Realizar una evaluación superficial por medio de una inspección visual de pavimentos flexibles en el tramo vial seleccionado según el *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006).
- Construir un estado del arte para comprender el comportamiento del asfalto y los métodos de mantenimiento o rehabilitación aplicados en el análisis y procesamiento de los datos obtenidos.
- Programar una base de datos por medio de los Sistemas de Información Geográfica para zonificar adecuadamente el tramo vial con su respectiva información de daños categorizados y aditivos recomendados.
- Analizar la información recopilada para procesar y categorizar teóricamente el aditivo de mayor viabilidad en la carpeta asfáltica de la zona seleccionada.

Justificación

El estado actual de diversas mallas arteriales de Bogotá requiere de medidas correctivas apropiadas para la preservación y conservación de las estructuras viales. En consecuencia, los factores externos como las solicitaciones de tránsito y clima, afectan directamente la durabilidad del pavimento manifestándose en diferentes tipos de deterioros con evolución gradual; lo que genera fallas estructurales de compleja intervención produciendo descensos considerables en el nivel de servicio de la vía. Basándose en lo mencionado anteriormente, se deriva la ideología de este proyecto con un enfoque hacia el mejoramiento vial por medio de la metodología de inspección visual de un pavimento flexible, con el fin de estudiar variables y construir hipótesis para establecer recomendaciones óptimas en la carpeta asfáltica de un tramo vial seleccionado.

La Avenida Ciudad de Villavicencio como principal conexión directa entre la Avenida Caracas y la Autopista Sur se toma como objeto principal de estudio de este proyecto, debido a las constantes afectaciones previstas por el alto volumen de tráfico. En esta vía es necesario el continuo seguimiento y control de evolución de daños para aplicar los principios de mantenimiento y rehabilitación, por esta razón, se escoge un tramo vial de la misma y uno alterno de la Avenida Jorge Gaitán Cortés para evaluarlos superficialmente por medio del método observacional, de esta manera se realiza un análisis de los mecanismos o causas probables de la manifestación de los daños en el tramo, para aplicar una solución con fundamentos hipotético-deductivos mediante la recomendación de aditivos a la mezcla asfáltica.

La recomendación de aditivos como técnica de incorporación, modificación o repavimentación de la carpeta asfáltica, tiene como objetivo el mejoramiento de las condiciones

de durabilidad evitando el desgaste total del pavimento al prolongar el tiempo de intervención efectuado. Esto a su vez, disminuye los ciclos de reparación y mejora en la vía el nivel de servicio proporcionado al usuario. De este modo, el ciudadano se beneficia evitando daños vehiculares y aumentando el rendimiento del tiempo en el trayecto vial, es decir, mediante la disminución de deterioros existe la probabilidad de incrementar con precaución la velocidad del vehículo sin elevar el índice de accidentalidad.

El presente informe, de igual forma simplifica los datos recolectados por medio del desarrollo de una zonificación de los tramos viales estudiados con su respectiva categorización y caracterización de los daños como recurso de reconocimiento del estado actual de la vía, tipo de intervención y recomendación de los aditivos requeridos para mejorar las condiciones mínimas del nivel de servicio. Dicha zonificación, se efectúa por medio del manejo de los sistemas de información geográfica (SIG) en la plataforma ArcMap, relacionando los daños, las actividades de reparación, aditivos a implementar con los temas recopilados principalmente del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Para finalizar, con los resultados obtenidos se da una apertura futura a la investigación teórico-práctica como método de implementación directa de aditivos a vías de alto tráfico en Colombia, con el desarrollo de modelos empíricos según la frecuencia de daños y condiciones del pavimento. Además, se realiza una discusión como objeto de alternativas para el análisis posterior de la aplicación de nuevas tecnologías en la mezcla asfáltica. Por otra parte, el manejo y la reorganización de información en una base de datos SIG refleja simplificaciones de alto entendimiento para determinar las condiciones de una vía con la caracterización de los procesos del daño.

Antecedentes

El diseño estructural de las mallas arteriales complementarias en las diferentes zonas de Bogotá, tales como la Avenida Ciudad de Villavicencio y la Avenida Jorge Gaitán Cortés, se realizó con una proyección de crecimiento vehicular medio; de acuerdo a los métodos establecidos por INVIAS o IDU, el periodo de diseño se consideraba hasta de 20 años para el pavimento flexible. El mantenimiento vial de las zonas de consideración para la inspección era deficiente hasta el año 2018, ya que carecía de intervenciones periódicas o rutinarias como se establece en la normativa determinada por el Instituto Nacional de Vías. No obstante, la implementación de buses biarticulados de Transmilenio en el sector, dio apertura al mejoramiento vial e inicio de intervenciones para recuperación de la estructura. (IDU, 2020)

Por medio de la visualización de vías de Bogotá con altos volúmenes de tránsito, como las mencionadas anteriormente, se enfatiza la problemática por el crecimiento exponencial de pavimentos cuya condición actual requiere de rehabilitación o reconstrucción total debido a la evolución progresiva de la zona de afectación.

Actualmente, el mantenimiento o rehabilitación en la capa de rodadura y algunas capas subyacentes del pavimento flexible, se efectúa por medio de actividades de intervención nocturna en la ciudad; se realiza mediante el parcheo temporal de calzada con el fin de evitar alteraciones en el tráfico. No obstante, la durabilidad de la reparación se calcula a corto plazo, debido a la deficiente compactación y dificultad presentada en la resistencia y adherencia de los materiales integrados en la mezcla asfáltica.

Para el diseño y rehabilitación del pavimento de una vía en Bogotá, es de primera necesidad tener en cuenta los criterios y especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la normativa del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) para la construcción de la

misma, en donde se determinan los parámetros de estabilidad y flujo para la obtención de la rigidez óptima de la mezcla asfáltica.

En países latinoamericanos como El Salvador, Guatemala y Panamá, se ha optado por la implementación de diferentes aditivos en la mezcla asfáltica para la rehabilitación, con el fin de garantizar el nivel de servicio vial y modificar óptimamente las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto, teniendo en cuenta la reducción de resistencia del material por las constantes cargas y los agentes erosivos presentados en las vías. A diferencia de Colombia, en donde, la incorporación de este tipo de tecnologías en la actualidad es insuficiente, por esta razón, al realizar una comparación hipotético-deductiva se obtendrá la viabilidad del aditivo con la posibilidad de realizar una profundización futura de la demostración práctica de la adición y modificación de asfaltos con diversos materiales. (Arango, 2019)

Metodología

El fundamento de la investigación del proyecto se desarrolla mediante una metodología mixta, a través del procesamiento sistemático y crítico de los datos obtenidos de una recolección con análisis cualitativos y cuantitativos. Los métodos realizados se efectuaron mediante fases integrativas correspondientes a los objetivos específicos del informe, y son evidenciadas de la siguiente manera:

Fase I, como parte preliminar de la planificación del proyecto, se lleva a cabo la ubicación del tramo vial con el fin de obtener un diagnóstico de las condiciones superficiales de la vía, dicho tramo se localiza en el Sur de Bogotá en las avenidas Ciudad de Villavicencio y Jorge Gaitán Cortés. La inspección visual del pavimento se determina por medio de una medición con respecto a un eje establecido que indica el sentido de la vía. La evaluación superficial contempla actividades propias del método observacional no experimental, en donde, a través de un registro fotográfico y reporte de los daños en calzada de acuerdo con el formato propuesto por el *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006), se obtiene la determinación de variables cualitativas de localización, tipo, severidad, causa del daño y descripción.

Fase II, la recopilación teórica se concreta mediante una compilación de información de patologías del pavimento y principios de mantenimiento y rehabilitación (también llamados tipos de intervención). Dicha recolección informativa abarca la explicación teórica de los cuatro aditivos mencionados como técnica de incorporación, modificación y repavimentación actual de la carpeta asfáltica. Esta fase se realiza con el fin de obtener hipótesis explicativas y deductivas a partir de variables cuantitativas o cualitativas para el análisis de datos recolectados y procesados.

Fase III, culminado el análisis de datos se almacena la información en el software ArcMap con la categorización de datos presentados en la reorganización del tramo vial. El almacenamiento en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se efectúa mediante la depuración de datos de tipo raster con relación a la geolocalización de la fotografía correspondiente al deterioro. Del mismo modo, se concreta el geoprocesamiento de los datos tipo vector con sus respectivos atributos.

Fase IV, con la investigación integrativa de las fases anteriores, se formuló una hipótesis cualitativa con dos variables dependientes (tipo y mecanismo de deterioro) y una variable independiente (aditivos) para la recomendación del aditivo de mayor viabilidad a la mezcla asfáltica según la intervención requerida en el área afectada. Una vez obtenidos los resultados se procede con el análisis de los mismos con sus respectivas conclusiones y recomendaciones. Además, se da apertura a la investigación empírica de nuevas tecnologías por medio de la discusión establecida.

Tabla 1.

Desarrollo metodológico

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
1. Realizar una evaluación superficial según la guía del Manual INVIAS	Recolección de datos	Se realizó un proceso de recolección de datos acompañado de la medición y registro fotográfico de daños en la Avenida Villavicencio y Avenida Jorge Gaitán Cortés.	Manual INVIAS (2006); Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
1. Realizar una evaluación superficial según la guía del Manual INVIAS	Análisis de datos recolectados	Se lleva a cabo el análisis correspondiente a cada dato recolectado por medio de la determinación de variables cualitativas de tipo, categoría, descripción y posibles causas.	Manual INVIAS (2006); Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
2. Construcción del estado del arte para analizar el comportamiento del asfalto y los métodos de mantenimiento o rehabilitación aplicados	Recopilación de información teórica	Compilación teórica del pavimento, el asfalto, la mezcla asfáltica, los tipos de intervención aplicados en la actualidad e información de los aditivos implementados en el tiempo actual.	Recopilación realizada por Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L. con soporte de la bibliografía del proyecto.
2. Construcción del estado del arte para el análisis de los datos recolectados	Análisis de datos recolectados	De acuerdo al estado del arte elaborado se obtiene una hipótesis teórica y explicativa del tipo de intervención requerido para el tramo vial analizado.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
2. Construcción del estado del arte para el análisis de los datos recolectados	Análisis de datos procesados	Análisis de los datos obtenidos de las actividades anteriores para determinación de variables cuantitativas continuas del área de afectación del daño y total del tramo vial estudiado con respecto al tipo de intervención. Además, se indica el daño con mayor frecuencia según el año y el tramo.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
3. Programación de base de datos	Base de datos	Manejo de información depurada en el software ArcMap para realizar la zonificación de daños categorizados.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
4. Análisis de la información recopilada para determinación del aditivo	Formulación de hipótesis deductiva	Análisis de variables cualitativas para la obtención de hipótesis deductivas del aditivo más viable en la carpeta asfáltica del tramo vial designado.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.

Nota: Guía metodológica de las actividades correspondientes a los objetivos específicos del proyecto, previstos en la página 15. Cabe aclarar que la enumeración se realiza con respecto a la ubicación de los objetivos del 1 al 4. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L., (2020).

Marco Conceptual

Pavimento

Un pavimento es una estructura compuesta por una secuencia de capas superpuestas y afirmadas a la rasante, cuyos materiales seleccionados en el diseño son compactados de manera apropiada a fin de obtener la resistencia necesaria para soportar, resistir y distribuir los esfuerzos obtenidos por las cargas dinámicas generadas por el tránsito vehicular en un periodo determinado. (Montejo, 1998)

Figura 1.

Sección típica de un pavimento

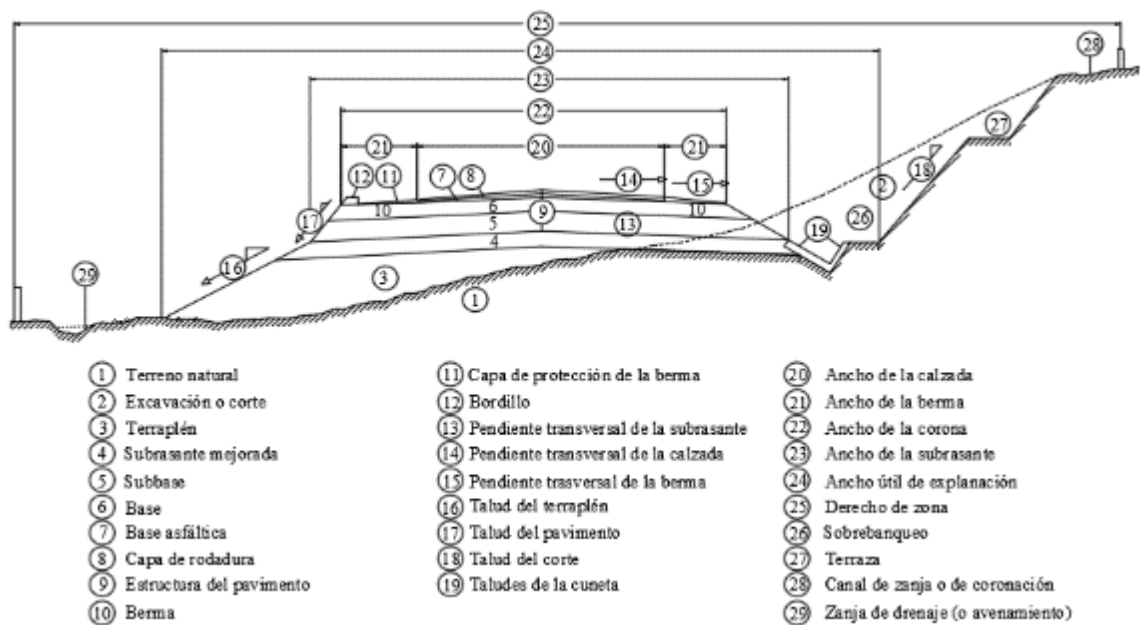


Figura 1. Representación de la sección típica de la estructura de un pavimento, enumerada con la posición de cada elemento que la conforma. Montejo Fonseca. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia. 3p.

La vía conforme a su diseño deberá presentar principalmente funcionalidad, comodidad y servicio al usuario, por medio del cumplimiento de parámetros de durabilidad, resistencia, regularidad, obras de drenaje, economía y ajuste del color, en donde, se evidencie una estructura adecuada.

Clasificación de los Pavimentos.

Motejo (1998), sugiere una clasificación del pavimento de acuerdo a la forma, construcción de las capas y de la superficie de rodadura para la transferencia de cargas, dicha clasificación se realiza de la siguiente manera:

- Pavimento Flexible
- Pavimento Rígido
- Pavimento Semi-rígido
- Pavimento Semi-flexible
- Pavimento Articulado

Debido a la selección y condición de los tramos viales para recomendación de aditivo a la carpeta asfáltica, este documento dará principalmente un enfoque teórico a los pavimentos flexibles. No obstante, para un breve entendimiento se realiza una conceptualización acerca de los pavimentos rígidos, semirrígidos, semi-flexible y articulados.

Pavimento Rígido

Estructura de pavimento de alta rigidez, con distribución de esfuerzos en grandes áreas y capacidad estructural generada por losas de concreto hidráulico superpuestas sobre una o varias capas de material seleccionado (Montejo, 1998).

Pavimento Articulado

Pavimento compuesto por una capa de rodadura diseñada a base de adoquines, bloques de concreto o arcillas prefabricadas, iguales y de espesor uniforme, los cuales se apoyan sobre una capa de arena sostenida por la base granular o rasante (ASOPAC et al, 2004).

Pavimento Semi-rígido

Pavimento de estructura semejante a la de un pavimento flexible, con excepción de que una de sus capas se construye con un aditivo estabilizante, ya sea cal, emulsión, cemento o un producto químico. La estabilización modifica o corrige las propiedades mecánicas del elemento, aumentando los costos de construcción (Montejo, 1998).

Pavimento Semi-flexible

Pavimento de estructura semejante a la de un pavimento rígido, con excepción de que la capa subyacente está construida a base de un material bituminoso de alta porosidad con un mortero especial, para fortaleza de la estructura.

Pavimento Flexible

Es un tipo de pavimento compuesto por una carpeta de material asfáltico la cual se encuentra apoyada sobre una o más capas sin rigidez, utilizadas para soporte de las cargas transferidas por el tránsito rutinariamente (Montejo, 1998).

La estructura de un pavimento flexible además de ser económica permite una superficie de rodadura compatible ambientalmente, cuya función es dar comodidad y seguridad al usuario (Asopao), ya que proporciona resistencia a las altas cargas impuestas por el flujo vehicular.

Más del 65% de las vías en Bogotá son construidas en pavimento asfáltico, por ende, el diseño de las mismas debe ser eficiente, debido a que dichos pavimentos deben ser drenantes, es decir, evacuar rápidamente el agua lluvia. Deben presentar una homogeneidad en la superficie para que el tránsito sea cómodo. La superficie debe ser capaz de absorber el ruido y tener el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos. (ASOPAC et al, 2004, p. 07).

Las capas que constituyen el pavimento flexible según Montejo (1998), Solano (2014) y ASOPAC (2014) son:

Terreno natural o subrasante: Es el componente del pavimento encargado del soporte de todas las capas. El material que la compone define el espesor uniforme de cada capa en el diseño del pavimento, para evitar un deterioro estructural, por esta razón se debe emplear parámetros de homogeneidad y resistencia a la deformación por cortante. Por otra parte, la variación volumétrica del terreno, expansión o retracción, de la subrasante puede generar daños de mayor gravedad, los cuales se verán reflejados en la superficie de rodadura, debido a esto, se utilizan técnicas de estabilización del suelo con cal.

Subbase granular: Es aquella capa de construcción económica constituida por materiales de alta calidad, cuya función es drenar y actuar como filtro del material fino de la subrasante para evitar deformaciones en la base granular. Además, resiste la transferencia de esfuerzos recibidos para transmitirlos debidamente a la subrasante.

Base granular: Es una capa semirrígida y provista de vacíos la cual se construye sobre la subbase con la finalidad económica de reducir el espesor a la carpeta asfáltica (la capa de mayor costo). En cuanto a resistencia, soporta y transmite a la subbase y subrasante los esfuerzos generados por las cargas dinámicas aplicadas constantemente. “En la actualidad existe gran variedad de materiales empleados para la construcción de la base como son los suelos y materiales pétreos, algunos estabilizantes como el cemento, la cal y otros materiales ligantes” (Solano, 2014, p. 10)

Superficie de rodadura o carpeta asfáltica: Es la capa de contacto directo con el tránsito vehicular encargada de proporcionar comodidad, uniformidad y estabilidad al usuario. Se construye a base de material pétreo y producto asfáltico para generar resistencia a la tensión y a

los efectos de abrasión producidos por el tránsito para así transferirlos en menor área a las capas que la soportan. También, se comporta como drenante, antideslizante e impermeabilizante para dar protección conjunta a la estructura de los efectos adversos del agua.

En general, si la estructura tiene solamente una (1) capa asfáltica, ésta será rodadura; si tiene dos (2) capas asfálticas, éstas serán rodadura e intermedia; y si tienen tres (3) o más capas asfálticas, la o las subyacentes a la intermedia recibirán el nombre de base.

La capa de base debe quedar debajo de no menos de 100 mm de las capas asfálticas de rodadura e intermedia. (IDU, 2011b, p. 01).

Materiales Bituminosos

Sustancias de alto porcentaje de viscosidad constituidas por un componente orgánico llamado betún, ya que son originadas por los crudos petrolíferos y de la destilación destructiva de otros elementos procedentes del carbón. Se caracterizan por ser de tonalidades oscuras y dúctiles debido a las propiedades adhesivas y termoplásticas que las componen (Villarino, 2008).

Los materiales bituminosos se dividen en dos grandes grupos:

- Asfalto
- Alquitrán

Asfalto

Definición

Es un material utilizado como agente cementante para la construcción de pavimentos flexibles, revestimientos e impermeabilización de estructuras, debido a que posee propiedades altamente viscosas y de consistencia variable, entre sólido y semisólido, las cuales le aportan

resistencia, adherencia y cohesión. Además, es un componente resistente ante los ácidos, álcalis, y sales. (MAPA, 2014)

Este producto viscoelástico de alta durabilidad y tonalidad oscura está compuesto por hidrocarburos complejos, y generalmente, es obtenido y extraído por destilación del crudo de petróleo a través de procedimientos de refinería. “La refinería es una planta de tratamiento en donde se procesa el crudo de petróleo y se separa en partes según su composición química, mediante distintos procesos, conocidos como derivados del petróleo.” (Alonso, 2017, p. 03)

Propiedades Físicas

El asfalto es un material flexible, el cual puede ser mezclado con grava y arena para proporcionar resistencia a los esfuerzos generados por las cargas dinámicas en una estructura de pavimento. Dicha resistencia es proporcionada por las propiedades físicas del asfalto, que son: (Salamanca, 2007)

Durabilidad: Es la propiedad del asfalto que designa el tiempo en el que mantendrá sus condiciones iniciales sin evidencia de falla en la estructura. No obstante, es un tema de alta complejidad a causa del comportamiento del material frente al envejecimiento (Fuente, 2007).

Adhesión: Unión molecular y física entre el asfalto y el agregado por fuerzas interfaciales, es decir, es la capacidad del asfalto de adherirse al agregado pétreo. En otro orden de ideas, la mayoría de daños en el pavimento son ocasionados por fallas en la adhesión o cohesión del material asfáltico (Salamanca, 2007).

Cohesión: Fuerza de atracción molecular entre el asfalto y el agregado, es decir, la capacidad del asfalto para conservar la firmeza de las partículas del agregado en la superficie (Salamanca, 2007).

Susceptibilidad: Capacidad del asfalto de tener fluidez ante las variaciones de la temperatura y a su vez de viscosidad, por lo consiguiente permite conocer la temperatura necesaria para la mezcla asfáltica. No obstante, si se evidencia deficiencia en el proceso de elaboración, la susceptibilidad térmica del material será baja y producirá deformaciones permanentes en el pavimento (Salamanca, 2007).

Envejecimiento y endurecimiento: Es la alteración de la estructura molecular, cambios físicos, químicos, mecánicos y reológicos, del asfalto generado por un proceso de oxidación y polimerización a causa de las altas temperaturas o películas delgadas de asfalto (Salamanca, 2007).

Propiedades Químicas

El asfalto es una mezcla compleja de estructura molecular orgánica con gran diversidad; está compuesta por hidrocarburos pesados (parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos), en donde se forma una solución coloidal de moléculas envueltas por moléculas de hidrocarburos livianos.

Por otra parte, el asfalto es una sustancia termoplástica constituida por las siguientes propiedades químicas: pureza, a causa de existencia de impurezas inactivas, consistencia, por la capacidad de fluir ante variaciones térmicas, y seguridad, debido a la afinidad ante las cargas eléctricas (Fuente, 2007).

Para la determinación de los componentes principales del asfalto se realiza un procedimiento llamado digestión, el cual tiene como objetivo realizar una dilución del material utilizando n-heptano como solvente. El resultado de este proceso es el fraccionamiento del asfalto en los siguientes componentes (Reyes et al., 2012):

Asfaltenos: Son una fracción soluble de crudo compuesto por moléculas planas aromáticas y nafténicas de alto peso molecular (Alayon, 2004).

Maltenos: “La fracción del crudo insoluble en propano líquido pero soluble en n-heptano a temperatura ambiente” (Barre et al., 1997, p. 03).

Figura 2.

Diagrama de la composición química del asfalto

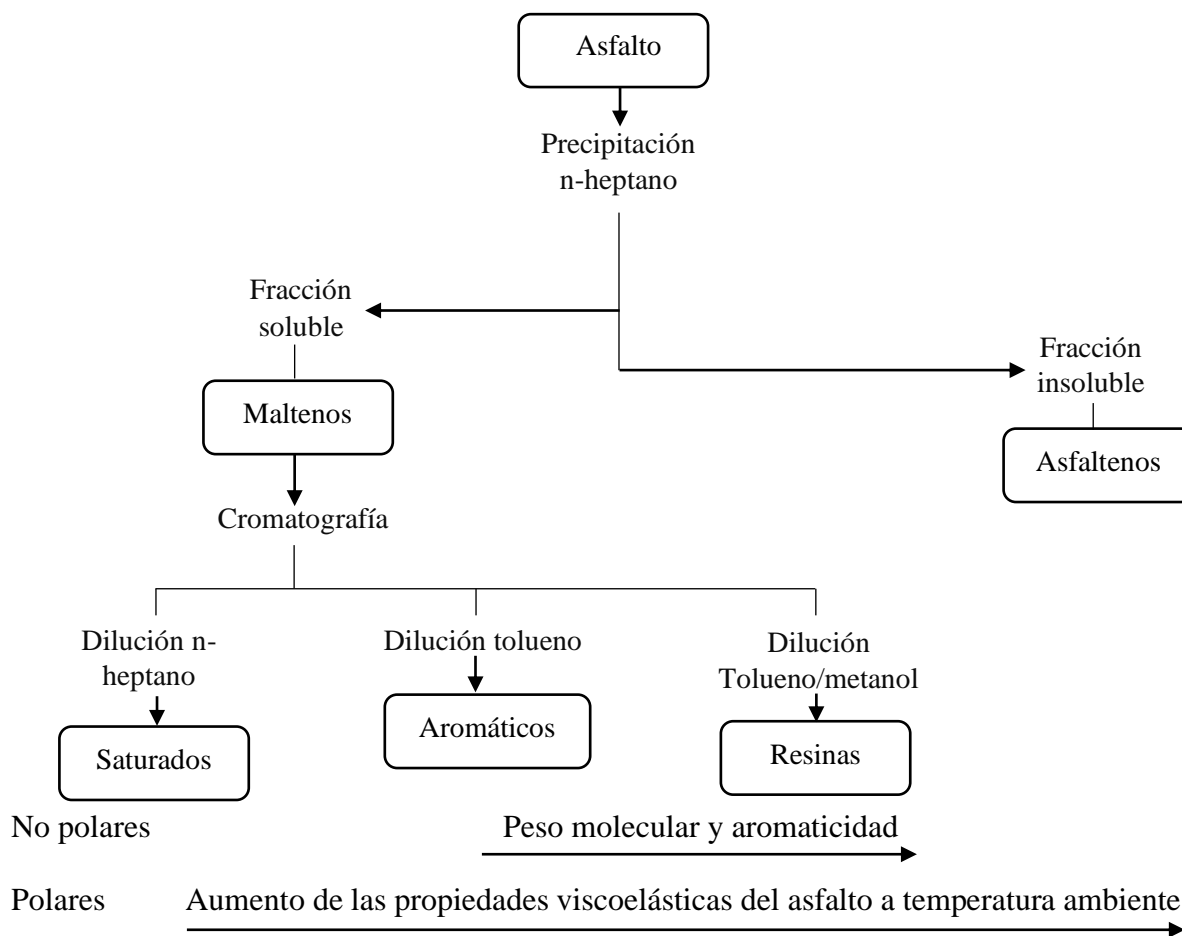


Figura 2. Diagrama de los componentes en los que se divide el asfalto al utilizar el solvente n-heptano. Fuente Ruiz, R. (2013). AC20 EKBE - Introducción al Asfalto [Técnica - Comercial]. Ergon Asfaltos México. <http://www.portal-comercial-smm.com/articulostecnicos-AC20-EKBE-introduccion-al-asfalto.php>.

Como se ha explicado anteriormente, el asfalto es una mezcla compleja de moléculas pertenecientes a un sistema coloidal cuya composición tiene variaciones en la estructura química y peso molecular del material. Montejo (1998), a su vez explica e identifica estas variaciones en la estructura molecular por medio de los siguientes grupos genéricos:

- Aromáticos: Componentes de color oscuro con relación H/C igual a 1.5, cuya estructura molecular contiene anillos del tipo aromático constituidos por ciclos nafténicos conectados a cadenas alifáticas. Generalmente, este tipo de aceites de alta viscosidad conforman entre el 40% y 65% del material asfáltico.
- Saturados: Componentes incoloros de posible cristalización constituidos por anillos nafténicos de cadenas largas y rectas. Dada la composición parafínica de este grupo, la consistencia de este material es grasa y su relación H/C varía entre 1.9 y 2.0.
- Aromáticos Polares: “Estos compuestos agrupan las resinas y los asfaltenos, contienen muchos anillos aromáticos condensados por moléculas. El carbono se encuentra en estructuras nafténicas y parafínicas” (Montejo, 1998, p. 620)
 - Resinas: Componentes sólidos de color negro los cuales pueden ser fundidos con el calor, cuya relación H/C varía entre 1 y 1.2.

Figura 3.

Asociación molecular entre resinas y asfaltenos

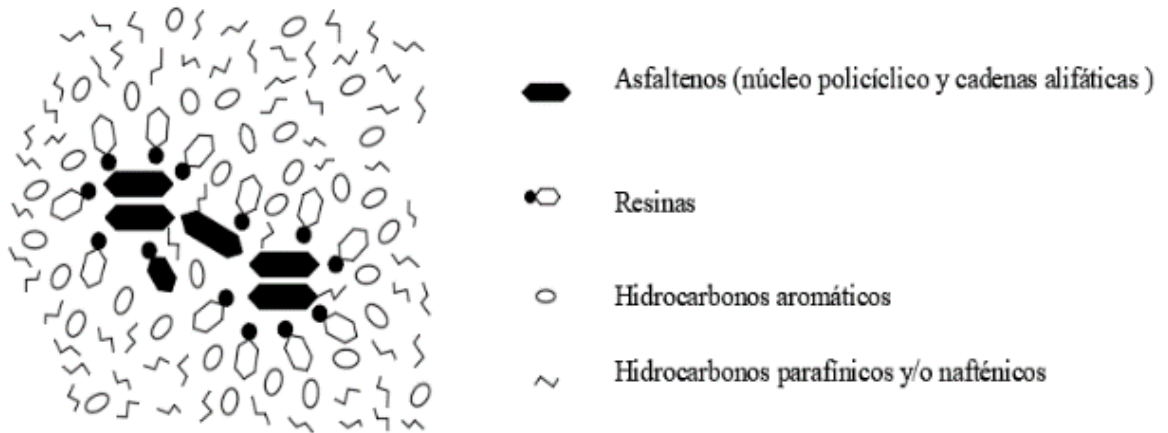


Figura 3. Representación microscópica de la asociación molecular entre resinas y asfaltenos. Márquez, G., Alejandro, F. J., & Bencomo, M. R. (2006). Influencia de asfaltenos y resinas en la viscosidad de petróleos bituminosos utilizables como pinturas asfálticas de imprimación. *Materiales de Construcción*.43p. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.91>.

Origen e Historia del Asfalto

La comunicación terrestre con el paso del tiempo, ha llevado al ser humano a progresar en calidad de desarrollo de la infraestructura vial por medio del manejo de diferentes materiales y tecnologías, que garanticen la resistencia ante los esfuerzos inducidos por las cargas aplicadas. Uno de los materiales con mayor utilización actualmente en la construcción de pavimentos es el asfalto, debido a que es una alternativa económica y segura para la estructura.

El asfalto es un producto utilizado desde hace más de 6000 años para suplir algunas necesidades de los antepasados; solía ser empleado por los egipcios como técnica impermeabilizante para evitar la erosión del suelo. Además, según excavaciones arqueológicas los fenicios construían barcos a base este material y los mesopotámicos sellaban tanques y embalses (BeyondRoads, 2020).

La extracción del asfalto en el pasado se obtenía de diferentes depósitos naturales, ya sea de roca asfáltica o de lagos asfálticos, no obstante, en algunos países todavía emplean el material procedente de dichos depósitos.

“Desde el año 625 d.C en Babilonia y Grecia se inició a hacer uso del material asfáltico como componente para la construcción de carreteras, de hecho, la palabra "asfalto" proviene de la palabra griega "asphaltos" que significa "seguro"” (BeyondRoads, 2020, p. 02). Por otro lado, Roma lo empleó en calidad de sellante de los acueductos de aquel tiempo.

Los europeos en el siglo XVI extraían el asfalto de islas latinoamericanas, en especial de la Isla Trinidad, para utilizarlo como impermeabilizante de los Barcos. Para el siglo XIX la aplicación de asfalto aumentó exponencialmente para las construcciones de vías y es así, cómo se fundó la primera planta para producción del material, The Cummer Company. A finales de siglo, un químico de origen belgíco produjo el primer pavimento asfáltico y se inició el estudio del material asfáltico para construir capas para el pavimento, en donde, se extrajo el material del lago de la Brea, en Trinidad. (BeyondRoads, 2020)

En el siglo XX aumentó totalmente la construcción de carreteras con la invención del automóvil, por esta razón se inició la extracción del asfalto por refinería de petróleo. La ampliación de tecnologías del producto se fueron obteniendo con la llegada de la segunda guerra mundial, además, a mediados del siglo se fundó la empresa The National Bituminous Concrete Association, actualmente the National Asphalt Pavement Association o NAPA, la cual comenzó con experimentación y pruebas del asfalto (BeyondRoads, 2020).

Finalizando el siglo XX, el desarrollo de la tecnología del material asfáltico incrementó el uso de maquinaria y equipo como técnica de innovación en la construcción de la infraestructura

vial. Por otro lado, se incorporó el reciclaje de la mezcla asfáltica para reutilización y cuidado ambiental.

La industria del asfalto no era sustentable para el medio ambiente, sin embargo, la EPA (la Agencia de Protección del Medio Ambiente, USA) en 2002 anunció que la producción del material ya no era la fuente de mayor contaminación para el planeta.

Desde la producción de pavimento de asfalto hasta la colocación en la carretera, hasta la rehabilitación, a través de la reutilización / reciclaje, los pavimentos de asfalto minimizan el impacto en el medio ambiente. Tecnologías como el reciclaje del pavimento de asfalto, el reciclaje de tejas de asfalto, el asfalto de mezcla tibia, el pavimento poroso y otros avances ayudan a reducir los costos del ciclo de vida y los impactos ambientales de las superficies de conducción. (MAPA, 2014, p. 08)

Clasificación de un Asfalto

Técnicamente cuando se habla de asfalto no es posible referirse a él en términos generales, como se mencionaba anteriormente, el producto es obtenido de las refinerías de petróleo, en donde, el origen del crudo, el proceso de producción y los aditivos o modificaciones aplicadas en la sustancia varían significativamente (Speight, 2016). Por esta razón el asfalto se clasifica de la siguiente manera:

Cemento asfáltico: Material bituminoso con alta viscosidad, impermeabilidad y variable consistencia, obtenido mediante procesos de destilación y aplicación de vapor para la separación de volátiles pesados. Es requerido para el uso de pavimentos asfálticos por sus propiedades aglomerantes y solubilidad en tricloroetileno, por otra parte, la calidad del producto varía dependiendo de las propiedades del crudo (IDU, 2011a).

Según Montejo (1998), de acuerdo al grado de penetración se designa el cemento asfáltico en los siguientes rangos:

- 40-50: Cemento asfáltico con penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro.
- 60-70: Cemento asfáltico con penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro.
- 80-100: Cemento asfáltico con penetración entre 80 y 100 décimas de milímetro.
- 120-150: Cemento asfáltico con penetración entre 120 y 150 décimas de milímetro.
- 200-300: Cemento asfáltico con penetración entre 200 y 300 décimas de milímetro.

Según el Instituto de Desarrollo Urbano (2011), en Colombia se utilizan los rangos de cemento asfáltico de 40/50, 60/70 y 80/100, debido a que los grados 120/150 y 200/300 son demasiado blandos.

Asfaltos Líquidos “Cutbacks”: Es un tipo de cemento asfáltico licuado, reducido y de baja viscosidad, cuya obtención es a partir de la mezcla de betunes duros con aceites ligeros volátiles (gasolina, diésel, etc). Dadas las propiedades físico-químicas del producto, se facilita la puesta en obra por la posibilidad de elaborar mezclas sin necesidad de elevar su temperatura, por esta razón, también es utilizado como capa adhesiva cuando la temperatura de la zona es dcx5. Además, genera la evaporación de diluyentes al contacto con la atmósfera y deja un residuo aglutinante de asfalto. En términos económicos y ambientales este producto no es una alternativa eficiente.

De acuerdo a lo mencionado por Montejo (1998), los asfaltos diluidos se clasifican de acuerdo al tiempo de curado de la siguiente manera:

- Asfaltos rebajados de curado rápido (RC): Material compuesto por un solvente líquido volátil, con un nivel de destilación semejante a la nafta o gasolina.

- Asfaltos rebajados de curado medio (MC): Material compuesto por un solvente volatilidad media, con un nivel de destilación semejante al kerosene.
- Asfaltos rebajados de curado lento (SC): Material compuesto por un aceite pesado y un solvente de baja volatilidad, con un nivel de destilación semejante al Fuel-oil.

Emulsiones Asfálticas: Son el resultado de la mezcla entre compuestos no miscibles, el asfalto, el agua y un agente emulsionante como el jabón o la arcilla, por lo que elimina el uso de combustibles y son más o menos volátiles. Para la carpeta asfáltica el contenido de asfalto de emulsiones se encuentra en un rango del 50% al 60% del peso total (Fuente, 2007).

En las emulsiones se produce una dispersión, en donde los glóbulos minúsculos de asfalto se dispersan en un líquido no miscible (agente emulsionante) para obtener una emulsión estable, generar el equilibrio de las partículas en suspensión y adquirir una aglomeración, a fin de provocar el rompimiento de la emulsión. Los glóbulos de asfalto suelen ser positivos o negativos, ya que son electrostáticos (Montejo, 1998).

Según Montejo (1998), las emulsiones se clasifican de acuerdo al tipo de carga de los glóbulos y la velocidad de rompimiento y se realiza de la siguiente manera:

- ARR: Emulsión aniónica de rompimiento rápido.
- ARM: Emulsión aniónica de rompimiento medio.
- ARL: Emulsión aniónica de rompimiento lento.
- CRR: Emulsión catiónica de rompimiento rápido.
- CRM: Emulsión catiónica de rompimiento medio.
- CRL: Emulsión catiónica de rompimiento lento.

Comercialmente se presentan los siguientes grados: ARR-1, ARR-2, CRL-1, CRL-1h.

La letra h indica que el cemento es AC 60-70 y las demás emulsiones son preparadas

con cemento AC 85-100. Los índices 1 y 2 representan viscosidad baja y alta. (Montejo, 1998, p. 425).

Comportamiento de un Asfalto

El comportamiento del asfalto depende de la temperatura y las cargas inducidas en las propiedades visco-elásticas que componen su naturaleza, por esta razón el material tiene una conducta líquida plástica y sólida plástica. Las variaciones de temperatura y el envejecimiento de la mezcla sólida determinan los cambios en las propiedades físico-mecánicas del material.

Cuando el producto asfáltico se somete a altas temperaturas, se produce el fenómeno del endurecimiento, en donde, el asfalto se rigidiza, pierde resistencia y se acelera la deformación a causa de la forma líquido viscosa que adquiere el material por su comportamiento plástico. Debido a la conducta lineal entre la velocidad relativa y la fuerza de resistencia se considera el asfalto como un fluido newtoniano. (Fuente, 2007)

Cuando la zona frecuente bajas temperaturas, el asfalto se comporta de manera sólida plástica, por ende, hay posibilidad de deformación sin pérdida total de la resistencia. No obstante, en el momento en que el asfalto se contrae se acumulan tensiones internas causantes del fisuramiento del material, para esto se recomienda la aplicación de lechadas asfálticas. Por otro lado, la adherencia entre el producto asfáltico y los agregados es más eficiente a temperatura ambiente.

Alquitrán o brea

Es un material de tipo bituminoso con características impermeables, el cual es obtenido de la destilación destructiva del petróleo, carbón o esquisto. Este producto solía utilizarse como ligante para construcción del pavimento tarmacadam en el siglo XIX, no obstante, por incremento de costos en la actualidad, se emplea como combustible de avión y en ocasiones

como aglutinante en la mezcla para sellos de lechada. (The Federal Highway Administration, 2018)

Asfaltos Modificados

El incremento vehicular en una ciudad genera alteraciones en las propiedades físico-mecánicas de una mezcla de pavimento asfáltico convencional, es por esta razón que las instituciones encargadas de la construcción y mantenimiento vial utilizan modificaciones en el asfalto con el fin de mejorar y aumentar vida útil de la infraestructura vial.

Actualmente, en vías de medio y alto tráfico se ha optado por aumentar el nivel de desarrollo por medio de aditivos como los polímeros y otros materiales sintéticos y termoplásticos para la composición de la mezcla asfáltica. Esto a fin de mejorar características reológicas del asfalto disminuyendo la susceptibilidad térmica, el envejecimiento y, además, aumentando la durabilidad y resistencia ante las cargas aplicadas constantemente en el pavimento.

Mezcla Asfáltica

La mezcla asfáltica es una combinación uniforme compuesta por arenas finas y conglomerados impregnados en el asfalto, se utiliza en la construcción de superficies de rodadura o capas inferiores con la finalidad de proporcionar resistencia al pavimento y confortabilidad al usuario. Las proporciones de dosificación son relativas, pero usualmente, el 95% del peso total de la mezcla está conformado por los agregados pétreos y el otro 5% por el aglutinante. Por otra parte, el comportamiento de la mezcla asfáltica varía por la densidad de la mezcla, los vacíos y el contenido de asfalto (MAPA, 2014).

Según ASOPAC (2004) la mezcla asfáltica posee características que inducen en la vida útil del pavimento, las cuales son:

- Estabilidad: Resistencia a la deformación.
- Durabilidad: Resistencia al clima y al tránsito.
- Impermeabilidad: Evita la infiltración del agua.
- Flexibilidad: Deformación sin perder resistencia.
- Resistencia a la fatiga: Resistencia a flexión por repetición de cargas.
- Resistencia al deslizamiento: Minimización del deslizamiento por aumento de fricción en la superficie, especialmente cuando está húmeda.

Clasificación de las Mezclas Asfálticas

Las mezclas se pueden clasificar según los diferentes parámetros dependiendo del uso para el que sea elaborada, en Colombia se categorizan de acuerdo a:

Temperatura de la mezcla: Dadas las propiedades de los componentes de la mezcla asfáltica, la susceptibilidad térmica ocasiona cambios significativos en el comportamiento del material según la temperatura utilizada en obra.

Mezclas asfálticas en caliente: Compactación en temperaturas mayores a 150 °C del ligante hidrocarbonado y los agregados para formar una película uniforme en obra. Este tipo de mezcla es utilizada tanto para la superficie de rodadura como para las capas inferiores (Yarango, 2014).

Mezclas asfálticas en frío: Compactación en bajas temperaturas de la mezcla la cual es fabricada con emulsiones asfálticas y agregado pétreo.

Proporción de vacíos en la mezcla: La clasificación de la mezcla según la proporción de vacíos es fundamental para mantener el control de vacíos y deformaciones plásticas. Se realiza de la siguiente manera (Padilla, 2004):

- Mezclas Densas MDC: Proporción de vacíos menor o igual al 6%.

- Mezclas Semidensas MSC: Textura rugosa en la superficie por una proporción de vacíos en un rango entre el 6% y 10%.
- Mezclas Gruesas MGC: Proporción de vacíos en un rango entre el 12% y 20%
- Mezclas Alto Módulo MAM: Proporción de vacíos mayor o igual al 20%. Este tipo de mezcla permite la infiltración del agua para evacuarla por medio de las bermas.

Tamaño del agregado Pétreo: Esta clasificación corresponde al tamaño del agregado pétreo retenido en un tamiz específico para la mezcla asfáltica, y está subdividida en (Padilla, 2004):

- Mezclas Gruesas: Fracción de agregado retenido en el tamiz No.4 cuyo tamaño nominal es mayor a 10 mm.
- Mezclas Finas (microaglomerados): Es la combinación entre un árido, un llenante mineral y un ligante asfáltico, cuya fracción de agregado retenido se encuentra entre el tamiz No.4 y el tamiz No.200, es decir, el tamaño nominal es menor a 10 mm y mayor a 75 μm .

Granulometría: La clasificación de la mezcla asfáltica bajo el parámetro de granulometría corresponde a la distribución de las partículas según su tamaño. Se clasifica de la siguiente manera (Padilla, 2004):

- Mezclas Continuas: Gradación del agregado en todos los tamaños.
- Mezclas Discontinuas: Inexistencia de tamaños intermedios en el agregado pétreo.

En Colombia, las diferentes instituciones presentan las mezclas asfálticas especificadas de acuerdo a la clasificación y tipo de mezcla. CTU (2020) realiza la apropiada explicación de cada una de ellas, por lo que se transcribe en el documento de la siguiente manera:

Tipo INVIAS

MDC-10: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 10 mm, utilizada generalmente en la construcción de capas de rodadura para vías de bajos volúmenes de tránsito.

MDC-19: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm utilizada en la construcción de capas de rodadura para vías con tráfico medio y alto.

MDC-25: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 25 mm, se utiliza para la construcción de capas intermedias y capas de base en vías con tráfico medio y alto.

MSC-19: Mezcla asfáltica semidensa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm, utilizada para la construcción de capas de rodadura en vías con tráfico medio y alto.

MSC-25: Mezcla asfáltica semidensa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 25 mm, utilizada para la construcción de capas intermedias y capas de base en vías con tráfico medio y alto. La MSC-25 se usa siempre debajo de una mezcla MSC-19 por compatibilidad de módulos estructurales.

Tipo IDU

MD-10: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 9.5 mm, utilizada para la construcción de capas de rodadura en vías con tráfico bajo.

MD-12: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 12.5 mm, utilizada para la construcción de capas de rodadura en vías con tráfico medio y alto.

MD-20: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm, utilizada para la construcción de capas intermedias y capas de base en vías con tráfico medio y alto.

GCR Tipo1: Mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado por vía húmeda. El asfalto incorpora el grano de caucho homogeneizado antes de ser mezclado con los agregados. El objetivo de este tipo de mezclas es el de reutilizar los neumáticos usados de los vehículos, sin afectar las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales, para evitar la contaminación de los mismos.

Base estabilizada por asfalto (BTA): Material granular estabilizado con cemento asfáltico, de especificación IDU. Se usa para construir capas de base, en vías de tráfico alto, cuando los suelos y materiales granulares disponibles no tienen la capacidad portante requerida. Muy utilizado sobre los suelos de Bogotá y sus alrededores.

Especiales

Rodadura Tipo B-1150: Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua y de textura cerrada, con más contenido de arena, y especificada por el antiguo Ministerio de Obras Públicas. Se usa generalmente para construir capas de rodadura en vías de tráfico medio que no están reguladas por la normativa nacional vigente, como vías de conjuntos cerrados, parqueaderos de centros comerciales, etc.

Rodadura T.M. 19 (Fusca): Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua sin especificación de norma, con agregado de tamaño máximo 19 mm. Se usa

generalmente para construir capas de rodadura en vías de tráfico medio que no están reguladas por la normativa nacional. Es una mezcla económica.

Arena Asfalto T.M.5: Mezcla asfáltica en caliente de arena y asfalto, de textura cerrada, sin especificación de normativa. Se usa generalmente para construir rodaduras de ciclo-rutas o capas de pavimento flexible en canchas deportivas y parqueaderos.

Marco Teórico

Patologías del Pavimento Flexible

Una estructura vial se ve afectada debido a factores externos de alta influencia y baja compatibilidad con la misma. Por lo tanto, es necesario realizar una evaluación visual para establecer la condición del pavimento, a fin de prevenir y evitar el aumento de costos por rehabilitación o reconstrucción de la vía.

Para la inspección inicial del estado del pavimento, se debe tener en cuenta, el tipo de deficiencia que genera una reducción de resistencia ante los esfuerzos producidos por las cargas dinámicas aplicadas constantemente sobre la estructura; las deficiencias mencionadas anteriormente pueden ser llamadas como fallas, daños o deterioros.

Con la finalidad de realizar la auscultación del pavimento se opta como guía los manuales PCI INGEPAV 2002 e INVIAS 2006, encargados de categorizar el daño en la ciudad de Bogotá según la UMV (Unidad de Mantenimiento Vial). Por otra parte, para obtener mayor información acerca de las patologías del pavimento, se utiliza el catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de Chile y la guía para categorización de fallas de República Dominicana.

Como fundamento para la inspección visual del pavimento es necesario tener en cuenta la clasificación del daño, la cual se divide en cinco categorías según el INVIAS (2006):

- Fisuras
- Deformación
- Pérdida de las capas de la estructura
- Daños superficiales
- Otros daños

Clasificación y Categorización del Tipo de Daño

El Anexo A enseña el cuadro teórico mediante el cual se realiza la clasificación y categorización del tipo de daño que se implementa en la inspección visual del pavimento de acuerdo a INVIAS (2006), en donde, se describe de manera concisa, comprensible y ordenada cada una de las variables a tener en cuenta. El manual mencionado anteriormente, generaliza los daños en pavimentos flexibles dando lugar a la unión de la subcategoría de los pavimentos semi-rígidos con los flexibles por similitud de estructura y superficie de rodadura.

Factores Causantes de la Reducción de Resistencia y Desgaste del Pavimento.

La vida útil de una estructura vial es predefinida en el diseño y construcción, sin embargo, existen factores que intervienen las condiciones iniciales y afectan la funcionalidad del pavimento con respecto al tiempo. Los factores a tener en cuenta son:

Tránsito.

Las deformaciones más relevantes en la estructura del pavimento son causadas por la constante reincidencia de cargas acumuladas provocadas por el flujo vehicular. En otro orden de ideas, el aumento de la magnitud de carga y número de vehículos, exceden el máximo de esfuerzos permisibles y aceleran el proceso de deterioro de la vía por medio de fallas en la estructura (Adlinge & Gupta, 2015).

Humedad.

El asfalto es un elemento de tipo impermeable, no obstante, la pérdida de resistencia y el debilitamiento del pavimento también son atribuidos a la influencia del agua. La infiltración del fluido en un daño superficial genera cambios físicos y químicos en las propiedades del asfalto, además de segregación entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, en donde, la separación de estos dos componentes conlleva a la desintegración y pérdida de uniformidad de la capa de rodadura hasta llegar a deteriorar las capas inferiores (Rondón Quintana et al., 2016).

Por otra parte, como es conocido, la subrasante es sensible a la humedad y tiene un alto índice de permeabilidad, por esta razón, la acción del agua ocasiona el fenómeno de la capilaridad en las capas subyacentes, causando la pérdida de resistencia del pavimento y produciendo deformaciones permanentes en la superficie y estructura (Adlinge & Gupta, 2015).

Subrasante.

El terreno de fundación también conocido como subrasante aporta la estabilidad o capacidad de soporte ante las cargas aplicadas, por ende, si los materiales que la componen son altamente orgánicos, la estructura del pavimento obtendrá bajos porcentajes de resistencia a las cargas impuestas por los vehículos. De igual forma, las variaciones de volumen del suelo cuando hay presencia de arcillas expansivas pueden causar mayor susceptibilidad a fallas o deformaciones estructurales y superficiales. (Montejo, 1998)

Oxidación de la Capa Asfáltica.

El envejecimiento del asfalto produce un cambio en las propiedades fisicoquímicas del material debido a la acción abrasiva de agentes ambientales, (fenómenos climáticos como rayos ultravioletas del sol, la temperatura, precipitación, o simplemente el material entra en contacto con el oxígeno por algún factor externo) que consecuentemente generan el endurecimiento del

asfalto, es decir, la pérdida de flexibilidad de la carpeta asfáltica y el incremento significativo de susceptibilidad de la superficie al agrietamiento. (Villegas et al., 2015)

Calidad de Construcción.

La calidad de los procesos constructivos influye en el rendimiento de una estructura vial, dado que los materiales deficientes, mala ejecución de las juntas de construcción o compactación defectuosa, afectan directamente la funcionalidad del pavimento y por consiguiente ocasionan daños graves. (Adlinge & Gupta, 2015)

Mantenimiento.

Preservar la estructura de un pavimento es una actividad de obligatoria constancia realizada a través del mantenimiento, en donde, se efectúan intervenciones con el fin de cumplir el periodo de diseño establecido inicialmente y proteger la estructura continuamente a los agentes externos. Sin embargo, el no frecuentar este tipo de actividades conlleva a un sobre costo por un posible deterioro de la vía. (Adlinge & Gupta, 2015)

Otros.

Otros tipos de daño en el asfalto son la contaminación y la acumulación de combustibles y aceites provenientes de los vehículos.

Formato de inspección según el Instituto Nacional de Vías

Es un documento cuya función es “capturar la información de campo de una forma sistemática y detallada” (INVIAS, 2006, p. 32), y está descrito por las siguientes partes:

Información general: Descripción de la vía la cual especifica la información inicial del levantamiento.

Deterioros: Información para registro del daño con sus respectivas patologías (tipo, dimensiones, severidad, registro fotográfico, reparación) según su posición en la calzada y carril.

Para ello, INVIAS (2006) propone una nomenclatura de carriles y calzadas de la siguiente manera:

- I: Carril izquierdo
- D: Carril derecho
- C: Toda la calzada
- E: Eje

Figura 4.

Nomenclatura de carriles y calzadas

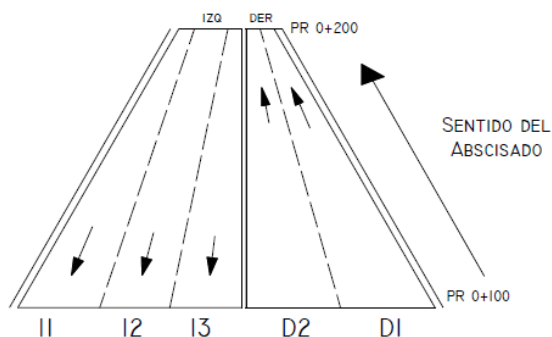


Figura 4. Esquema de la nomenclatura de carriles y calzadas propuesta por el Manual Invias. Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2006). Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. Instituto Nacional de Vías INVIAS.30p. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>

- D1: Derecho externo
- D2: Derecho interno
- I1: Izquierdo externo
- I2: Izquierdo central
- I3: Izquierdo interno

Figura 5.

Nomenclatura de carriles con varias calzadas

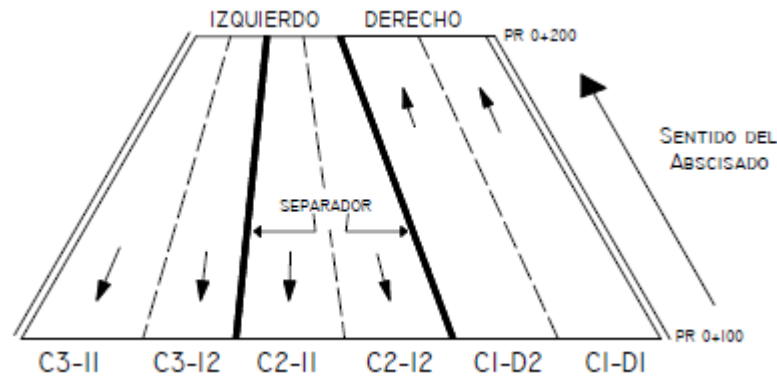


Figura 5. Numeración de carriles para vía con varias calzadas, Invias. Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Instituto Nacional de Vías INVIAS. 29p. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>

- C1-D1: Calzada 1- derecho externo
- C1-D2: Calzada 1- derecho interno
- C2-I2: Calzada 2- izquierdo interno
- C2-I1: Calzada 2- izquierdo externo
- C3-I2: Calzada 3- izquierdo interno
- C3-I1: Calzada 3- izquierdo externo

Aclaraciones: Reporte adicional del daño especificado.

Geometría de la vía: Detalle descriptivo de la vía de acuerdo al número de calzadas, carriles por calzada, ancho de carril y ancho de berma, si la tiene.

Comentarios: Registro de la información adicional e importante.

Los diferentes daños pertenecientes a las categorías de clasificación se presentan con distintas descripciones, las cuales precisan la identificación del deterioro según la evaluación visual y su respectiva medición. A continuación, se dará una explicación corta y concisa de cada una de ellas:

- **Descripción general de daño:** Información general del daño que aporta una descripción de las formas de presentación, condiciones y ubicaciones frecuentes del deterioro en el pavimento. (Miranda, 2010)
- **Posibles causas:** Análisis probable del origen del daño cuyo mecanismo conduce a la interpretación del deterioro estudiado para su respectivo reporte y reparación
- **Niveles de severidad:** Indicativo del estado del deterioro según su grado de avance por medio de tres niveles de severidad: 1. Bajo, 2. Medio, 3. Alto. Conforme al grado indicado es posible realizar un diagnóstico para establecer la reparación requerida para el daño. (Miranda, 2010)
- **Medición:** Criterio establecido para determinar la unidad de medida del daño según el área de afectación. (INVIAS, 2006)
- **Posible evolución:** Pronóstico de la transformación gradual del daño expuesto a diferentes factores externos para determinar la prioridad de reparación.

Registro de daños en informe, según el Instituto Nacional de Vías

El análisis y procesamiento de la información se basa en la identificación del deterioro visualizado y medido para determinar el nivel de severidad y a su vez calcular los porcentajes de afectación para establecer las áreas totales y frecuencia de daños en un tramo. El tratamiento de datos se registra en un documento constituido con la siguiente información:

- Tramo.
- Abscisa inicial y final de cada tramo.
- Área total de cada tramo.

- Daños encontrados por severidad en cada tramo.
- Áreas totales de daños para cada tramo.
- Porcentajes de afectación de cada tramo.
- Área total de cada daño y por severidad.
- Peso de cada tipo de daño y severidad dentro del área total afectada.
- Área total afectada en la vía.
- Porcentaje de afectación de la vía.

Tipo de Intervenciones Realizados en las Vías

Mantenimiento Vial

Intervenciones ejecutadas en un periodo determinado de tiempo para aplicar correctivas y mejoras a la estructura existente por medio del cumplimiento de requisitos de calidad. Tiene como finalidad conservar y preservar la comodidad y servicio al usuario, asegurando la vida útil del pavimento para evitar la desintegración completa de las capas estructurales y a su vez el incremento del presupuesto establecido (IDU, 2014). La práctica de mantenimiento vial se subdivide según el tiempo de ejecución y, se realiza de la siguiente manera: Mantenimiento rutinario y Mantenimiento periódico.

Mantenimiento Rutinario

Práctica de tipo preventiva efectuada en intervalos menores a un año, en la cual se establece un tratamiento correctivo para algunas irregularidades o fallas leves que involucran en especial la carpeta asfáltica. En ocasiones, esta actividad de conservación permanente se anticipa al deterioro para obtener condiciones óptimas. En este tipo de práctica normalmente se realizan las siguientes actividades generales:(Instituto Nacional de Vías & Ministerio de Transporte, 2019)

- Remoción de derrumbes.
- Rocería.
- Limpieza de obras de drenaje.
- Reconstrucción de cunetas.
- Reconstrucción de zanjas de coronación.
- Reparación de baches en afirmado.
- Perfilado y compactación de la superficie.
- Riegos de vigorización de la capa de rodadura.
- Limpieza y reparación de señales.

Tratamientos del Mantenimiento Rutinario Realizados en el Pavimento, Según el Instituto Nacional de vías

Sellado de grietas en calzada: Técnica cuyo objetivo principal es prevenir la evolución del deterioro por medio de la limpieza, secado y relleno de la abertura. Para este procedimiento se emplea un producto bituminosos sellante en caliente (asfaltos rebajados aplicados a altas temperaturas) o en frío (emulsiones asfálticas de rotura lenta), los cuales funcionan como impermeabilizantes para evitar la infiltración del agua (Instituto Nacional de Vías, 2016).

Este tipo de trabajo es aplicado especialmente en fisuras longitudinales, transversales y en ocasiones de bloque (siempre y cuando exista baja flexibilidad en la carpeta asfáltica y diferenciales térmicos), sin embargo, no es utilizado en fisuramientos interconectados.

Figura 6.

Sellado de grietas en calzada



Figura 6. Demostración gráfica del sellado de grietas en calzada aplicado correctamente. Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2006). Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. Instituto Nacional de Vías INVIAS.40p. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>

Parqueo en calzada o bacheo superficial: Retiro y sustitución del material existente de la zona localizada para realizar un procedimiento de tipo correctivo. El parqueo se emplea con mezcla asfáltica en caliente y “cuando se deba apoyar sobre una base granular, se emplea como imprimante una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta de los tipos CRL-0 o CRL1, o un asfalto líquido MC-30” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 173).

Generalmente se realiza fisuras, depresiones, ahuellamientos o parqueos provisionales.

Parqueo temporal en calzada: Parqueo realizado en desintegraciones por medio de la utilización de mezclas asfálticas. “El ligante para el riego de liga será una emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida de los tipos CRR-1, CRR-2, CRR-1m o CRR-2m y mezclas asfálticas en caliente de gradación continua o mezclas abiertas con emulsión asfáltica de rotura media” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 179)

Para el procedimiento del parqueo existen dos métodos:

- Throw and roll: Técnica económica de baja limpieza y compactación realizada con las llantas de un camión.
- Spray-injection patching: Tratamiento de limpieza con aire comprimido realizado por medio de una máquina de parqueo (tapa huecos).

Bacheo de Pavimentos Asfálticos: Operación realizada cuando el deterioro ha afectado estructuralmente al pavimento. Se reemplazan las bases y subbases por materiales granulares. “Como imprimante de la base granular de reemplazo se empleará una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta de los tipos CRL-0 o CRL-1, o un asfalto líquido MC-30 y se emplearán mezclas asfálticas en caliente de gradación continua”. (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 183).

Mantenimiento Periódico

Reparación del daño producido en un periodo de tiempo mayor a un año, en el cual se recuperan propiedades superficiales del pavimento de zonas localizadas por medio del retiro de la carpeta asfáltica, en caso de que sea necesario; esto con la finalidad de evitar evoluciones considerables en los deterioros generados por el tráfico u otros factores. En este tipo de práctica normalmente se realizan las siguientes actividades generales (Instituto Nacional de Vías & Ministerio de Transporte, 2019):

- Reconfiguración y recuperación de la banca.
- Limpieza mecánica y reconstrucción de cunetas.
- Escarificación del material de afirmado existente.
- Extensión y compactación de material.
- Reposición del pavimento en algunos sectores.
- Reconstrucción de obras de drenaje.
- Construcción de obras de protección y drenaje menores.
- Demarcación lineal.
- Señalización vertical.

Riegos sin gravilla: Tratamientos auxiliares de espesores pequeños utilizados en ocasiones como constituyentes de la capa de rodadura. Los tipos de riego son los siguientes (Instituto Nacional de Vías, 2016):

- Riego de imprimación: Este tipo de riego es efectuado sobre una base o capa granular antes de emplear el material bituminoso. (Fernández, 1983) “En este riego se aplica una emulsión catiónica de rotura lenta de los tipos CRL-0 o CRL-1, o con un asfalto líquido MC-30” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 193)
- Riego de liga: Es aplicado uniformemente sobre una de las capas bituminosas antes de aplicar la siguiente capa, es decir, es utilizado como adherencia de la carpeta asfáltica al pavimento asfáltico o a la capa inferior. “El riego de liga se aplicará con una emulsión catiónica de rotura rápida, que podrá ser convencional de los tipos CRR-1 o CRR-2” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 193)
- Riego tipo niebla: Aplicado sobre la superficie de un pavimento en servicio para mejorar la impermeabilidad si es riego negro o rejuvenecer la capa de rodadura cuando hay existencia de oxidación. (Instituto Nacional de Vías, 2016) “El riego en negro se efectuará con una emulsión asfáltica de rotura lenta de alguno de los tipos CRL-1 o CRL-1h” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 194)

Para preservar los riegos y evitar accidentes a los vehículos (por resistencia al deslizamiento) es necesario aplicar arena sobre la capa tratada.

Sello de arena-asfalto: Recubrimiento de un pavimento existente con un material bituminoso, “seguido por la extensión y la compactación de una delgada capa de arena, con el fin de sellar de la superficie y mejorar temporalmente la fricción superficial” (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 199)

Tratamiento superficial: Colocación y compactación del agregado pétreo sobre un ligante bituminoso, emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido. Esta práctica se subdivide en:

- Tratamiento superficial simple: Aplicación del agregado sobre una capa uniforme de riego para impermeabilizar y disminuir las partículas de polvo. (Programa de Infraestructura de Transporte, 2017)
- Tratamiento superficial doble: Compactación y recubrimiento de agregado pétreo (el tamaño debe ser menor al tratamiento anterior) sobre una aplicación doble de material bituminoso en una superficie preparada para obtener mayor uniformidad, se puede aplicar en la superficie asfáltica o en la base granular (Programa de Infraestructura de Transporte, 2017).

Lechada asfáltica y microaglomerado en frío: Tratamiento de conservación aplicado por medio de una mezcla con emulsión bituminosa de rompimiento lento, “llenante mineral y, eventualmente, aditivos, que se coloca a manera de sello de la superficie, cuando se tiene una gran densidad y extensión de fisuras de poca profundidad” (IDU, 2014, p. 02). Este tipo de técnica evita el desgaste ya que crea una capa protectora e impermeabilizante.

Si la emulsión asfáltica catiónica empleada es convencional, la mezcla recibe el nombre de lechada asfáltica (rotura lenta y super estable del tipo CRL1-h), y si es modificada con polímeros (catiónica de rotura lenta y super estable del tipo CRL1-hm) recibe el nombre de microaglomerado en frío. (Instituto Nacional de Vías, 2016, p. 203)

Para controlar el agrietamiento es conveniente la utilización de aditivos para modificar la reología del lechado o el microaglomerado.

Sello del Cabo: Capa de lechada asfáltica aplicada sobre una capa de tratamiento superficial simple, es utilizada como protección y prevención para evitar la infiltración del agua y dar resistencia al deslizamiento. La lechada asfáltica tendrá las mismas especificaciones mencionadas en el numeral anterior (Instituto Nacional de Vías, 2016).

Microaglomerado en caliente: Emulsión asfáltica (modificada con polímeros del tipo CRR-2m) con granulometría discontinua y mejoras en las propiedades mecánicas (comportamiento favorable ante la fatiga y alto nivel de flexibilidad) del material en el pavimento existente, la cual tiene como objetivo proporcionar una capa de rodadura rejuvenecida con mejores condiciones de drenaje y fricción superficial. No obstante, requiere de aditivos mejoradores de adherencia (Muñoz, 2013).

Sobrecapa delgada: Recubrimiento de la superficie de rodadura con una capa delgada (máximo 40 mm de espesor) de mezcla asfáltica (tipo denso en caliente), cuyo objetivo es aumentar la resistencia al deslizamiento y a su vez, evitar la desintegración de la carpeta asfáltica, además de dar una apariencia rejuvenecida. Este procedimiento se realiza en un pavimento estructuralmente sano (Instituto Nacional de Vías, 2016).

Mezcla drenante: Mezcla asfáltica de agregado pétreo con alto porcentaje de volumen de vacíos, cuya elaboración se realiza en planta y en caliente con cemento asfáltico (tipo I o II elaborado con polímeros) para obtener un comportamiento de tipo drenante y antideslizante. Tiene como desventaja el incremento de costos para su realización. (Instituto Nacional de Vías, 2016)

Fresado de pavimento asfáltico: Remoción de daños funcionales de poca profundidad por medio del levantamiento y trituración (con ayuda de la máquina fresadora) de la carpeta asfáltica, para corregir el perfil longitudinal y transversal. Tiene como finalidad compensar la

pérdida de espesor con la construcción de una capa nueva de superficie macrotextura rugosa y nivelada. (Instituto Nacional de Vías, 2016)

Rehabilitación de una Vía

Los cambios de las propiedades reológicas del asfalto generan la pérdida de capacidad estructural de un pavimento con respecto a un periodo de tiempo. Las deficiencias en el mantenimiento vial y la evolución del deterioro conllevan a realizar una serie de intervenciones que implican el retiro de las capas afectadas para restaurar las condiciones iniciales del pavimento en cuanto a resistencia, funcionalidad y servicio.

Según la localización de la falla un pavimento puede tener dos tipos de rehabilitación:

Rehabilitación Superficial: Es el mejoramiento de las condiciones superficiales del pavimento a través de la restauración de las capas superiores cuando el desgaste es menor a 100 mm. Se aplica a daños de tipo funcional relacionados con la oxidación del asfalto, fisuramientos y descascaramientos generados usualmente por factores térmicos. (Rondón, 2012)

Rehabilitación Estructural: Es la solución de problemas estructurales a largo plazo por medio de la máxima recuperación del pavimento existente. (Rondón, 2012)

Alternativas de rehabilitación según el Instituto Nacional de Vías y el Instituto de Desarrollo urbano

Las intervenciones realizadas en una rehabilitación de pavimentos se componen de diferentes técnicas de reparación conformadas por el grupo de las 4R: restauración, refuerzo, reciclado y reconstrucción. Generalmente, para obtener un comportamiento adecuado de la estructura, se suele realizar un tratamiento de preparación como etapa preliminar de cada alternativa de rehabilitación.

Tratamiento de Preparación.

Para la ejecución adecuada de las técnicas de reparación se requiere inicialmente un tratamiento de preparación con el fin de aumentar el tiempo de rehabilitación y evitar el agrietamiento de la estructura.

En los tratamientos de reparación se efectúan las siguientes actividades:

Sello de fisuras: Este tratamiento es utilizado usualmente para fisuras de tipo longitudinal y transversal mediante un procedimiento de sellado de fisuras cuyo objetivo es impedir el paso del agua a las capas inferiores del pavimento. Se realiza a través de la aplicación líquida en caliente o en frío de un material bituminoso (emulsiones, asfaltos modificados o riego asfáltico) sobre la fisura; su cantidad o características varían de acuerdo a la abertura (para intervenir deberán ser mayor a 6mm).

“El sello puede resultar técnica y económicamente aceptable si la longitud de grietas por sellar no excede de 300 metros por hectómetro de calzada” (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 284). De lo contrario, es conveniente usar otros métodos de rehabilitación.

Parcheo y bacheo: Reparación de las áreas localizadas en carpeta asfáltica (parcheo) o capas subyacentes (bacheo) cuya finalidad es corregir defectos estructurales generados por los deterioros. Este tratamiento se efectúa por medio de la aplicación de mezcla asfáltica en frío o en caliente.

Capa de nivelación: Tratamiento realizado para dar uniformidad a la vía mediante el relleno de deformaciones y eliminación de algunos deterioros superficiales. Se construye con cemento asfáltico para proporcionar soporte a la capa de rodadura, ya sea como tratamiento de restauración o alternativa de refuerzo.

Fresado: Operación efectuada a temperatura ambiente como método de remoción de imperfecciones superficiales con el objetivo de mejorar el perfil longitudinal y transversal del pavimento. Generalmente, se suele poner una nueva capa asfáltica para compensar la pérdida de espesor de la capa existente y aumentar la capacidad estructural.

Una alternativa para corregir la irregularidad superficial es el microfresado, encargado de eliminar puntos altos de la superficie.

Tabla 2.

Técnicas de tratamientos de preparación en pavimentos asfálticos

Técnicas	Propósitos
Sello de Fisuras	Sellado de la superficie Impermeabilización
Parcheo y Bacheo	Corrección estructural Corrección de problemas de humedad, materiales o construcción
Capa de nivelación	Relleno de deformaciones Eliminación de diferencias de nivel
Fresado	Remoción de imperfecciones Mejoramiento de perfil longitudinal y transversal

Nota: Corregir la irregularidad superficial es el microfresado, encargado de eliminar puntos altos de la superficie. Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 262p.

Restauración.

Es una alternativa de reparación de las condiciones funcionales del pavimento existente para mejorar la superficie. Las principales funciones de la restauración son: impermeabilización, reducción de la tasa de desgaste, suministro de una nueva capa de rodadura, reducción del ruido, mejoramiento del drenaje superficial y de la ficción superficial.

No obstante, este mecanismo de rehabilitación no proporciona ningún aporte estructural al pavimento.

Tabla 3.

Técnicas de restauración en pavimento asfáltico

Técnicas	Propósitos	Limitaciones
Riego en negro	Sellado de la superficie Rejuvenecimiento del asfalto oxidado	Puede generar superficies deslizantes
Sello de arena – asfalto	Sellado de la superficie Mejora temporal de la fricción superficial	No es 100% efectivo
Tratamiento superficial	Suministra una superficie de rodamiento rejuvenecida Mejora el drenaje superficial de la calzada Mejora las características de fricción superficial	No es 100% efectivo
Lechada asfáltica	Sellado de la superficie Retarda la desintegración superficial del pavimento Mejora la resistencia al deslizamiento	Baja durabilidad de rehabilitación, cuando el pavimento tiene deflexiones o fisuras considerables
Microaglomerado en frío	Sellado de la superficie Retarda la desintegración superficial del pavimento Mejora la resistencia al deslizamiento Nivela áreas ahuelladas de poca profundidad	No es 100% efectivo

Técnicas	Propósitos	Limitaciones
Sello del Cabo (Cape seal)	Suministra una superficie rodamiento rejuvenecida Mejora el drenaje superficial de la calzada Mejora las características de fricción superficial Retarda la desintegración superficial del pavimento	No es 100% efectivo
Microaglomerado en caliente	Brinda una nueva superficie de rodamiento Mejora el drenaje y la fricción superficial	Genera buen comportamiento cuando hay deformaciones considerables en la superficie La capa subyacente debe ser impermeable, resistente al
Mezcla drenante	Suministra un adecuado drenaje superficial Reduce el hidroplaneo limita la proyección de agua lluvia Mejora la visibilidad en condiciones de lluvia Incrementa la fricción superficial Reduce el ruido de rodadura	desprendimiento del asfalto y tener una adecuada pendiente para obtener viabilidad en este método. Además, cuando sufren deterioros localizados suelen ser sometidas a sellado de fisuras u operaciones de parcheo que afectan el flujo libre de agua a través de la capa
Sobrecapa delgada	Brinda una nueva superficie de rodamiento Retarda la desintegración superficial del pavimento	No es 100% efectivo

Nota: Técnicas de restauración en pavimento asfáltico de acuerdo al tipo de rehabilitación. Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 270p.

Refuerzo.

Es la técnica de rehabilitación para corregir los daños de tipo funcional y aumentar la capacidad estructural, mediante la aplicación de un refuerzo que modifique las propiedades físicas del pavimento. El método de refuerzo se realiza generalmente en operaciones de bacheos o capas de nivelación. No obstante, este procedimiento conlleva al ahuellamiento del refuerzo o a la reflexión de fisuras cuando hay existencia de una capa subyacente de mayor rigidez la cual refleja el desarrollo del agrietamiento.

Existe la probabilidad de deficiencias en el comportamiento de la estructura por la ejecución defectuosa de la aplicación de las sobrecarpetas asfálticas, cuando el espesor es insuficiente, la elaboración de la mezcla es deficiente, la capa asfáltica no es adecuada en el método de rehabilitación o hay fallas en el diseño por la incorrecta reparación de las zonas deterioradas.

“El tipo más común de sobrecapa se construye con mezclas densas en caliente del tipo concreto asfáltico, elaboradas con cementos asfálticos convencionales o modificados con polímeros” (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 297).

Tratamiento previo al refuerzo: Para asegurar un comportamiento eficiente del refuerzo, el pavimento existente deberá presentar condiciones óptimas en la estructura mediante un tratamiento preliminar; esto con el fin de obtener capacidad de adherencia al momento de colocar la capa de refuerzo.

Los trabajos de preparación en el tratamiento son:

- Materiales utilizados en el refuerzo.
- Capacidad estructural del pavimento.
- Tipos de deterioros.

- Estudio de tránsito.
- Control de tránsito.
- Costos.

Durante el tratamiento se realiza un control de zonas deterioradas por bacheo o, la colocación de una sobrecapa para protección de áreas débiles de la estructura. Por otro lado, el incremento de espesor en el refuerzo sin remover la capa afectada, protege de deformaciones las capas subyacentes que se encuentran deterioradas.

De ser lineal la fisuración el tratamiento previo a realizar será un sellado de fisuras o fresado.

Ahuellamiento del refuerzo: El nivel de servicio del usuario decrece a medida que se generan ahuellamientos en la superficie de la estructura a causa del tránsito, en donde, se genera una acumulación del agua cuando hay excesivas precipitaciones. Dado el incremento de cargas en una estructura de pavimento, se busca una alternativa de mejora a este tipo de daño por medio del diseño de mezclas de alta exigencia (utilización de asfaltos modificados de alto módulo y agregados pétreos triturados con elevada resistencia).

Oportunidad para el refuerzo: Según las condiciones del pavimento se determinará el índice de servicio de la vía con respecto a los costos generados en el proceso de rehabilitación, con el fin de decidir qué porcentaje de requerimiento de reparación demanda la vía.

El aumento del presupuesto de la obra de rehabilitación dependerá de la eficiencia del estudio realizado a los requerimientos de la vía según sus condiciones, ya que si existe un retraso de construcción del refuerzo es posible observar los siguientes incrementos:

- Aumento de costos en el tratamiento previo.
- Incremento del costo de refuerzo por aumento del espesor.

- Disminución de durabilidad del pavimento.
- Conservación costosa de la estructura.
- Reclamos de la comunidad.

Reciclado.

Es la reutilización del material del pavimento existente para racionalizar recursos por medio de la reconstrucción de una nueva capa en el mismo tramo vial o en otra vía semejante, a fin de rejuvenecer el ligante asfáltico con una adición de nuevos materiales pétreos, agua, mejoradores de adherencia, etc. “Se debe tener en cuenta que las mezclas asfálticas sufren una expansión volumétrica de más o menos 10%, cuando se convierten en material reciclado” (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 321).

Tabla 4.

Selección del método de reciclado en el pavimento asfáltico

Tipo de deterioro del pavimento	Reciclado en planta en caliente	Reciclado en el sitio	
		Reciclado superficial en caliente	Reciclado en frío en el sitio
Defectos superficiales			
Desprendimientos	x	x	
Exudación	x	x	
Superficie resbaladiza	x	x	
Deformaciones			
Abultamientos	x	x	
Ahuellamiento poco profundo	x	x	
Ahuellamiento profundo			x

Tipo de deterioro del pavimento	Reciclado en planta en caliente	Reciclado en el sitio	
		Reciclado superficial en caliente	Reciclado en frío en el sitio
Agrietamiento asociado a las cargas del Tránsito			
Piel de cocodrilo	X		X
Longitudinal en la banda de rodamiento	X	X	X
Parabólicas		X	
Agrietamiento no asociado a las cargas del tránsito			
Grietas en bloque	X		X
Grietas longitudinales de junta	X	X	
Grietas transversales de contracción	X		X
Agrietamiento por reflexión	X		X
Rugosidad			
Falta general de regularidad superficial	X	X	
Depresiones	X	X	

Nota: Selección del método de reciclado en el pavimento asfáltico según el deterioro presentado. Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 292p.

Según Montejo (1998), la aplicación del reciclado se efectúa cuando las fallas son ocasionadas por comportamientos desfavorables del asfalto, ya sea por deficiencia o desgaste.

Las variables definidas en la utilización del reciclado son dependientes de:

- Envejecimiento del asfalto.

- Desprendimiento de agregados por fallas en la adherencia.
- Deformaciones plásticas.
- Pulimiento de agregados superficiales.
- Afloramiento del asfalto.
- Fatiga.

Con respecto a la temperatura en la que el reciclado de asfalto es elaborado, se obtiene la clasificación del método de reparación de la siguiente manera:

Reciclado en planta en caliente: Consiste en la remoción de la carpeta asfáltica y, con ello a la trituración del material obtenido para ser transportado hacia la planta, en donde, se reconstruye una mezcla asfáltica en caliente con materiales nuevos (agregados pétreos vírgenes, cemento asfáltico y un agente rejuvenecedor), encargada de cumplir requisitos de calidad y responder al diseño existente. Una vez realizada la nueva mezcla se distribuye y compacta en el lugar de origen.

Esta técnica es una de las más económicas para corregir deficiencias y aumentar capacidad estructural, ya que permite mejor confección y control de la mezcla. No obstante, este método carece de flexibilidad y su comportamiento es definido por la calidad de los materiales, por ende, no se realiza en agrietamientos excesivos.

Reciclado en el sitio: Es un proceso de reutilización de la mezcla se realiza en el sitio de origen, utilizado como método de mejoramiento de la resistencia al deslizamiento, eliminación de fisuras reflejadas y corrección de deficiencias.

Este procedimiento se clasifica en dos técnicas:

Reciclado superficial en caliente: Es el método más económico, el cual consiste en el retratamiento de la capa de rodadura en espesores bajos, se emplea para eliminar deterioros

superficiales (ahuellamientos, abultamientos y fisuramientos superficiales, excesos de asfalto y desprendimientos), restablecer propiedades antideslizantes y rejuvenecer la superficie del pavimento. Sin embargo, este tipo de proceso no aporta refuerzo estructural y la profundidad de intervención es mínima (menor a 2,5 cm).

Las operaciones realizadas en el reciclado superficial son:

- El termo-perfilado: Proceso realizado por una sola máquina, el cual mejora las características de la mezcla, simplemente con una adición de rejuvenecedor de asfalto para corregir pequeñas deficiencias de la superficie.
- El termo-regeneración: Procedimiento el cual aporta una mezcla nueva con adiciones de agregados, asfaltos nuevos y agentes rejuvenecedores.
- Fresado en frío: Resalta las rasantes especificadas y elimina ondulaciones, ruido de la carpeta y otras imperfecciones. Además, aumenta la resistencia al deslizamiento y deja superficies texturizadas. (Montejo, 1998)
- Cepillado: Se realiza por medio de máquinas cepilladoras para levantamientos de muy poco espesor. (Montejo, 1998)

Reciclado en frío en el sitio: Rehabilitación del pavimento a una profundidad mayor de 2.5 cm utilizada como corrección de deficiencias estructurales. El material obtenido de la trituración de la carpeta es mezclado con un agente de reciclaje y un porcentaje de agregado (dependiendo de las propiedades del material a reciclar) nuevo para el cumplimiento de requisitos de la mezcla nueva, dicho proceso es realizado en frío. “Las estructuras recicladas en frío en el sitio presentan propiedades similares a las de las bases estabilizadas, razón por la cual deben ser cubiertas con una capa de desgaste” (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 315).

Este procedimiento se realiza con los siguientes aditivos: Emulsiones asfálticas, cementos Portland, cal y cenizas volantes.

Tabla 5.

Características del reciclado en frío

Razones para utilización del reciclado en frío	Limitaciones
Mejoramiento de la capacidad estructural del pavimento	Operaciones y procesos son bastante demorados
Mejoramiento de las propiedades de la mezcla	El comportamiento adecuado de la nueva carpeta dependerá de factores climáticos
Aumento de impermeabilidad y reducción de susceptibilidad ante la acción del agua.	El producto es inferior a las mezclas realizadas en planta

Nota: Características del reciclado en frío. Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. 295p.

El reciclado en frío en el sitio, se puede dividir en tres tipos:

Reciclado en frío en sitio con ligantes hidrocarbonados: Se realiza a partir de la utilización de emulsiones asfálticas fabricadas con agentes regenerantes, espuma de asfalto “obtenida por inyección de agua a un cemento asfáltico caliente en el momento del reciclado” (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 317). El comportamiento de esta técnica en el pavimento depende del diseño estructural, calidad de materiales y proceso constructivo.

Esta operación se efectúa con el fin de obtener beneficios (ambientales, energéticos y económicos), mejorar irregularidades y perfiles del pavimento. Sin embargo, no es del 100% efectivo, no es la mejor técnica para deformaciones permanentes, requiere un periodo de maduración y no soluciona problemas en las capas inferiores del pavimento.

Reciclado en frío con conglomerantes hidráulicos: Es un proceso factible por la alta utilización de conglomerante hidráulico, no obstante, es un material limitado en el país. Este tipo de reciclaje para tratar homogeneidad de la superficie.

La aplicación del conglomerante para el reciclado se puede realizar de tres maneras: (i) esparciéndose sobre la superficie del pavimento previamente al paso de la máquina recicladora (ii) mezclado con agua en forma de lechada, la cual es incorporada directamente en la cámara de mezclado y (iii) mediante un distribuidor de cemento a granel, acoplado a la máquina recicladora. (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 320)

Reciclado mixto en frío en el sitio: En esta técnica se utiliza la mezcla de materiales bituminosos con conglomerantes hidráulicos para conservar la impermeabilidad y disminuir los periodos de maduración cuando se emplea una emulsión asfáltica.

Reconstrucción.

Es el reemplazo parcial o total de la estructura existente, el cual conserva la explanación y el alineamiento de la vía. Se realiza cuando no hay posibilidad de reciclado y el pavimento exige un cambio significativo a causa de los deterioros evolucionados tanto funcional como estructuralmente. En el diseño es importante definir las capas de remoción para evaluar la capacidad portante de la estructura remanente.

En la reconstrucción de un pavimento los costos se incrementan de manera significativa debido a que nuevamente es necesario realizar los diseños estructurales con los materiales especificados.

Reconstrucción de tipo flexible.

Consiste en reemplazar las capas removidas con materiales granulares no tratados, ajustados a las especificaciones de construcción de carreteras, los cuales se cubren con una o más capas de concreto asfáltico convencional o modificado con polímeros, en espesores obtenidos según un diseño estructural, acordes con la capacidad de las capas remanentes y las expectativas del tránsito para la siguiente etapa de vida del pavimento.

(Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2008, p. 322)

Recubrimiento blanco, whitetopping: Es la construcción de una capa de concreto hidráulico sobre el pavimento asfáltico, utilizada como medida para la corrección de irregularidades y deformaciones en la vía. Esta técnica es viable porque la estructura existente actúa como subrasante y el concreto proporciona mayor resistencia, rigidez y durabilidad al disipar los esfuerzos aplicados, además, genera costos bajos de mantenimiento.

En este procedimiento es necesario realizar un tratamiento previo de fresado o capa de nivelación para eliminar el ahuellamiento.

Corrección de Fallas Localizadas.

Aunque las condiciones de un pavimento sean adecuadas, frecuentemente se suelen encontrar daños de tipo funcional generados por motivos diferentes a la fatiga, tales como: ojos de pescado localizados, las depresiones, las segregaciones, los desprendimientos y los afloramientos. Para este tipo de daños manifestados continuamente se utilizan técnicas de reparación no ligadas a la capacidad estructural como bacheos, tratamientos con propiedades antideslizantes, sellado de fisuras, etc.

Aditivos

Los aditivos son modificaciones a la estructura convencional del asfalto mediante la incorporación de materiales compatibles química y físicamente. Tienen como objetivo mejorar las propiedades mecánicas y reológicas del material asfáltico.

Cal Hidratada

Cal hidratada (Hidróxido de Calcio - $\text{Ca} [\text{OH}]_2$) se da a partir de la evolución química del carbonato de calcio, es un polvo seco y esta es obtenida en el instante en que la cal viva reacciona con el agua transformándose en una matriz cementante (National Lime Association, 2004)

Los mecanismos de este aditivo producen estabilización y resistencia en el suelo a largo plazo, por lo que este es utilizado en las mezclas asfálticas debido a que contrarresta los daños producidos en el pavimento haciéndolo más duradero.

Figura 7.

Cal hidratada



Figura 7. Cal hidratada con pureza mínima del 92%. Natsteel Ltd. (2020). *Cal Hidratada* [Comercial]. Alibaba. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/hydrated-lime-104707592.html>

Cal Hidratada en Mezclas Asfálticas.

Ante la presencia de humedad en la mezcla asfáltica esta puede presentar una pérdida de adhesión entre los aglomerantes y los agregados, disminuyendo su resistencia. La cal actúa como un agente modificador, al implementarse en la mezcla asfáltica sus mecanismos aumentando la adherencia, por su naturaleza químicamente activa se excluyen componentes haciendo la mezcla mucho más resistente a las altas temperaturas que es expuesta implicando una mejora a la resistencia al ahuellamiento. Por otro lado, se evidencia una reducción al envejecimiento aplazando la oxidación del ligante al momento en el que la Cal reacciona con las moléculas altamente polares consolidado el enlace entre el betún y la roca, moléculas polares se refiere a moléculas con un extremo de carga positiva y el otro de carga negativa bloqueando la formación de jabones solubles en el agua (National Lime Association, 2004).

Según National Lime Association (2004), En Estados Unidos y en Europa tras varios experimentos e investigaciones se logró identificar que al aplicar la cal en modo de efecto de relleno en el asfalto, este aumenta de manera significativa la rigidez en el asfalto, la resistencia rutinaria a la que es sometido el pavimento y mejoramiento a la susceptibilidad al agua, debido a que la mezcla con la cal implementada demuestra mantenerse en excelentes condiciones con comportamientos estables a plazos largos a comparación de la mezcla que no posee el aditivo . Ante el las mejoras presentadas en estudios se obtienen los siguientes argumentos:

1. La cal hidratada no es simplemente un relleno inerte, sino que reacciona con el betún. Las partículas de cal en realidad absorben componentes polares del betún. Este adsorbido entre capas hace cal hidratada un aditivo muy efectivo. Se encontró el nivel de la reacción betún-cal ser bituminoso dependiente. (Zamora & Mora, 2019, p. 12)

2. El efecto de relleno "activo" tiene una sensibilidad a la temperatura graduada. A altas temperaturas, el efecto de relleno es más pronunciado; es considerablemente menor a temperaturas cercanas al vidrio transición del betún. Esta característica muy positiva permite que el betún resista daño por flujo a altas temperaturas y aun así relajarse a bajas temperaturas, disipándose energía por flujo en lugar de fractura. (Zamora & Mora, 2019, p. 12)

A modo de conclusión del aditivo, los beneficios de la cal en mezclas asfálticas son reflejadas en la disminución del envejecimiento, resistencia a la fatiga, aumento en la resistencia de la humedad, potenciador en sus propiedades mecánicas y métodos experimentales para el incremento del 38% de la vida útil de los pavimentos.

Métodos de Aplicación en Mezcla Asfáltica.

Existen 3 métodos básicos para adicionar Cal hidratada a la mezcla asfáltica caliente, los más utilizados son:

- **Adición al tambor:** En este método se adiciona la cal hidratada al tambor de mezcla para que este se adhiera a los agregados. En ocasiones se agrega la cal con llenantes o con caliza fina creando un activo, “filler” mezclado (EULA, 2011).
- **Árido Húmedo:** En este método se adiciona la cal sobre una cinta de alimentación fría de manera uniforme de tal manera que se adhiera a los agregados húmedos superficiales (EULA, 2011).
- **Lechada de cal:** Se aplica una lechada de mezcla de cal y agua aplicándola a los agregados en un porcentaje adecuado donde se cerciora que la cal tenga una mayor

cobertura, luego se descarga sobre la banda transportadora para que siga con el proceso de mezclado dejando que esta reaccione a las impurezas presentadas (EULA, 2011).

Especificaciones Para la Adición de Cal.

Se debe determinar materiales, equipo de transporte del aditivo, ejecución de trabajo y depósitos de almacenamiento, donde se deberá comprobar el cumplimiento de adhesividad exigido por las normativas de acuerdo a la cantidad de aditivo que se implemente en la mezcla, la cantidad debe ir regida por una proporcionalidad de ensayos que se tiene que realizar previamente determinando las propiedades mecánicas y demás de la mezcla modificada.

Tabla 6.

Condiciones de mezcla con cal para determinar la proporción aproximada de la misma

Capa	Ensayo	Valor recomendado	Norma
Subrasante Fina	IP de la mezcla material/suelo-cal (mezcla previa)	≤3%	INV E-125-07 INV E-126-07
	CBR de la mezcla material/suelo – cal (mezcla previa)	≤3%	INV E-148-07
Materiales Granulares	IP de la mezcla material granular cal (mezcla previa)	≤3%	INV E-125-07 INV E-126-07
	CBR de la mezcla material granular–cal (mezcla previa).	Según especificación de Subbase o Base de diseño, Norma IDU.	INV E-148-07

Nota: Condiciones recomendados en la preparación previa de mezcla con cal para determinar la proporción aproximada de la misma. IDU, I. de D. U. (2011). Estabilización con Cal (Manual Sección 230-11; Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C., 05p. Instituto de Desarrollo Urbano. <https://www.idu.gov.co/web/content/7601/230-11.pdf>

“La elaboración de la mezcla, el curado y la evaluación de la resistencia se realizará de acuerdo con la norma de ensayo INV E-801-07” (IDU, 2011, p. 05)

Tabla 7.

Condiciones de las capas estabilizadas con cal

Capa	Ensayo	Valor recomendado	Norma
Bases y Subbases granulares	Resistencia a la Compresión inconfiada	≥ 690 kPa (0.69 MPa) (100 PSI)	
Suelos Subrasantes	Resistencia a la Compresión inconfiada	≥ 345 kPa (0.345 MPa) (50 PSI)	INVE-801-07
Curado de mezcla con cal para granulares y suelos de subrasante		Por 7 días	

Nota: Condiciones de calidad de las capas estabilizadas con cal. IDU, I. de D. U. (2011). Estabilización con Cal (Manual Sección 230-11; Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C., p. 5). Instituto de Desarrollo Urbano. <https://www.idu.gov.co/web/content/7601/230-11.pdf>

Según National Lime Association, Using new Pavement design procedures for hot Asphalt Mixes modified with Hydrated Lime (2005)] los valores deben estar establecidos entre 1% y 1,5% de Cal, esto en función del peso total de los agregados áridos. Para el caso de otros países como Los Estados Unidos de América, la adición de Cal a las mezclas asfálticas esta puntualmente estipulada en la norma AASHTO M303 “Standard Specification for Lime for Asphalt Mixtures” (Especificación estándar de Cal para mezclas Asfálticas).

Ceniza Volante

Reiterando lo mencionado anteriormente en aditivos, el objetivo de este tipo de adición es la implementación de un material compatible tanto en la mezcla como con el medio ambiente para aumentar la efectividad y durabilidad actual del pavimento.

Las cenizas volantes son un subproducto o residuo recolectado por medio de la precipitación electrostática ocasionada por el transporte de gases de combustión del carbón en las centrales termoeléctricas, es decir, un producto de calcinación generado por la quema de carbón pulverizado; formado por una microestructura de partículas de naturaleza sílicea, fina, esférica y vitrificada. Según Veropalumbo et al. (2019) el material tiene las propiedades de la piedra caliza al ser un compuesto químico constituido principalmente por tres elementos influyentes, el sílice (18,59%), el aluminio (18.38%) y el carbono (34.02%). Por otra parte, Velásquez & Maestre (2015) indican la formación de las cenizas volantes por la composición predominante de silicio, hierro y aluminio, presentados en forma de óxidos representantes de una cantidad significativa del material, 75% y 95%. Además, por medio de un análisis mineralógico se determina que entre el 65% y 90 % el estado de la ceniza es de tipo vítreo.

La investigación de este residuo se ha llevado a cabo desde el siglo anterior debido al descubrimiento de las propiedades cementantes derivadas del contenido de óxido del compuesto. Actualmente, este compuesto es una innovación en el mercado ya que es un producto industrial de tipo reciclable el cual genera la reducción del impacto ambiental y aporta favorabilidad económica al presupuesto.

Propiedades físicas.

Este residuo está compuesto por partículas finas de naturaleza sílicea (contiene cristales de sílice), inorgánica y vítrea de color crema a gris oscuro, cuyo tamaño varía entre 0,5 mm y 0,001mm, la humedad está entre 30% y 70% y, además, el peso específico de este material se encuentra en el rango entre 2,2 y 2,8 gr/cm³. (Velásquez & Maestre, 2015)

Las cenizas volantes encontradas en Termozipa, Colombia, son clasificadas como materiales no plásticos de gradación delgada y baja cohesión de partículas.

Figura 8.

Ceniza volante



Figura 8. Ceniza volante obtenida de los residuos de carbón. Asocem. (2018, junio 27). *Investigación: Elevar el uso de las cenizas volantes en el cemento* [Comercial]. Asocem. <http://www.asocem.org.pe/noticias-internacionales/investigacion-realizada-para-aumentar-las-cenizas-volantes-en-el-cemento>

Normativa aplicada a la utilización de ceniza volante.

La producción de ceniza volante se ha desarrollado en la industria europea durante algún tiempo, por ende, los materiales de combustión están sometidos a investigación rutinaria por medio del seguimiento de normativas y especificaciones, en donde, se suprime el criterio del dióxido de silicio reactivo. Actualmente la normativa aplicada, teniendo en cuenta las especificaciones de ASTM, para el desarrollo de productos de cenizas volantes en Europa es:

- UNE-EN 13043: Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas, Asociación Española de Normalización y Certificación
- UNE-EN 13108: Agregado de la mezcla asfáltica
- UNE-EN 933-10: Granulometría

La especificación técnica para cenizas volantes de carbón y puzolanas es desarrollada, de acuerdo a principios de estandarización, por la normativa ASTM a nivel internacional:

- ASTM C618-19: Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón.
- ASTM C311: Métodos de prueba estándar para tomar muestras y analizar cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto de cemento Portland.

En 1993, la Norma Técnica Colombiana establece la utilización de cenizas volantes en el país por medio de la transcripción traducida de la norma ASTM C618-91 y lo realiza a través de la siguiente normativa:

- NTC 3493: Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland.

“La composición química de la ceniza volante según la norma NTC 3493 (ASTM C618), exige primordialmente un mínimo de 70 % de óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) y un máximo de 5% de sulfato” (Velásquez & Maestre, 2015, p. 22)

Clasificación universal de la ceniza volante.

Según, la Norma Técnica Colombiana (1993), las cenizas volcánicas se clasifican conforme al origen del carbón y los requerimientos físicos y químicos, establecidos en la normativa de la siguiente manera:

- Clase N: Puzolanas naturales calcinadas o crudas. Son productos naturales de origen térmico e hidrotérmico procedentes de la descomposición de plantas, árboles y animales. (Muñoz & Chacón, 2011)
- Clase F: Cenizas volantes provenientes de la quema de carbón antracítico o bituminoso. Son de tipo artificial obtenidos de tratamientos térmicos de activación. (Muñoz & Chacón, 2011)

- Clase C: Cenizas volantes provenientes de carbón lignítico o sub bituminoso, cuya diferencia comparativa de las otras clases se basa en el contenido de sílice, aluminio y óxido de hierro. Además, la clase C se caracteriza por tener propiedades cementantes y puzolánicas, con alta posibilidad de alcanzar más de 10% de cal en algunas cenizas volantes de esta clase. En otro orden de ideas, este tipo de compuestos se utiliza en la aplicación de la mezcla asfáltica y dependen del relleno y abertura.

En las centrales termoeléctricas principalmente se producen tres tipos de carbón, carbón bituminoso, carbón de antracita y carbón sub bituminoso lignito.

Usos de la ceniza volante.

En el sector de la construcción las cenizas volantes tienen una extensa aplicación en diferentes campos de la ingeniería tales como, producción de cementos y concreto, estabilización del suelo, rellenos estructurales y no estructurales, construcción de terraplenes, bases y subbases de pavimentos, muros de contención, capas base, aditivos asfálticos y rellenos minerales. (Ortiz et al., 2006)

Ceniza volante en la mezcla asfáltica.

La ceniza volante generalmente es utilizada en la mezcla asfáltica en caliente como agente modificador para mejorar las propiedades de resistencia a la deformación permanente, rigidez, viscosidad a altas temperaturas y susceptibilidad térmica, además se emplea como sustituto de ciertas cantidades de bitumen para el rendimiento reológico. “Cenizas volantes tienen una resistencia favorable al enrutamiento en comparación con la mezcla con relleno de piedra” (Mirković et al., 2019, p. 02)

Una investigación microestructural del bitumen con cenizas volantes utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) demostró un efecto de detección de grietas

inducido por partículas de cenizas volantes a bajas temperaturas. La investigación del rendimiento reológico de las masillas con DSR confirmó que las cenizas volantes se pueden usar como un extensor de bitumen, reemplazando hasta el 15% del bitumen para mejorar su resistencia a la deformación permanente a altas temperaturas. La mejor mejora se logró al agregar 15% de cenizas volantes de Clase F o 30% de cenizas volantes de Clase C. (Mirković et al., 2019, p. 02)

Por otra parte, la ceniza volante se emplea principalmente como material llenante o filler en mezclas asfálticas por sus características rígidas y resistentes, ya que soporta fuerzas compresivas de hasta 15 MPa (Velásquez & Maestre, 2015). Este sustituto parcial o completo del relleno natural o relleno común establece una relación sólida de cohesión entre el asfalto y el agregado. Cabe aclarar, que la ceniza volante no es un ingrediente activo de la mezcla y por esta razón, se utiliza en especial como llenante; al ser más gruesa en comparación al relleno mineral estándar y aportar mayor sustitución de cargas minerales.

Entre los resultados obtenidos se determinó un incremento de la resistencia del 19% para un reemplazo del 20%. La deformación permanente disminuyó 10% y 38% para el reemplazo de 20% y 45%, respectivamente. Adicionalmente, se evaluó la rigidez Marshall y la velocidad de deformación y se obtuvo un porcentaje de adición favorable de ceniza volante de 25% con respecto al peso del llenante mineral. (Ortiz et al., 2006, p. 01)

Según Mirković et al. (2019), se analiza el estudio de nuevos porcentajes de compuestos químicos en algunas cenizas volantes llamadas G, K y P. La ceniza volante tipo G, es alcalina con alto contenido de óxido de calcio y satisface los tamaños de partícula, la ceniza volante tipo K, es altamente alcalina sin propiedades puzolánicas de gradación gruesa con alto contenido de

sulfato y, por último, la ceniza alcalina tipo P, no causa aumento en la rigidez del bitumen y es de gradación gruesa. Finalmente, los autores concluyen la posibilidad de utilización de las tres cenizas volantes para obtener resultados satisfactorios en la mezcla.

El aumento de la implementación de este tipo de residuos en la mezcla asfáltica para construcción o rehabilitación de pavimentos, se ha efectuado para incrementar la resistencia a la deformación permanente debido a las condiciones óptimas de estabilidad del asfalto, resistencia a la humedad y composición volumétrica satisfactoria, al dar favorabilidad a la estabilidad y flujo en el mezclado que garantiza la adición de residuos de cenizas volantes.

El comportamiento de las propiedades de la ceniza volante es dependiente del tipo de carbón procesado, el tipo de caldera y, además, del método de captación mecánica de la pulverización realizada en la combustión. Por lo consiguiente, las propiedades de este compuesto determinan la densidad y los vacíos en la mezcla asfáltica. (Mirković et al., 2019) En otro orden de ideas, cuando el porcentaje de utilización de ceniza volante es alto, el aumento del contenido de vacíos en la mezcla puede generar limitaciones.

Pruebas de laboratorio más comunes para la utilización de ceniza volante en la mezcla asfáltica a la ceniza volante.

- Granulometría de los agregados gruesos y finos: Caracterización del material granular fino
- Peso específico y absorción de los agregados finos: Determinación de la absorción y el peso específico aparente y real
- Contenido de materia orgánica: Evaluación de impurezas presentes en el material
- Ensayo Marshall: Determina la proporción óptima del asfalto, además, evalúa fluencia y estabilidad del material

- Resistencia a la tracción indirecta ITS: Caracterización de la mezcla asfáltica para evaluar ITS
- Prueba directa uniaxial: Evalúa rigidez de la mezcla asfáltica
- Prueba axial de carga repetida: Determina resistencia a la deformación permanente

Figura 9.

Diagrama del procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica

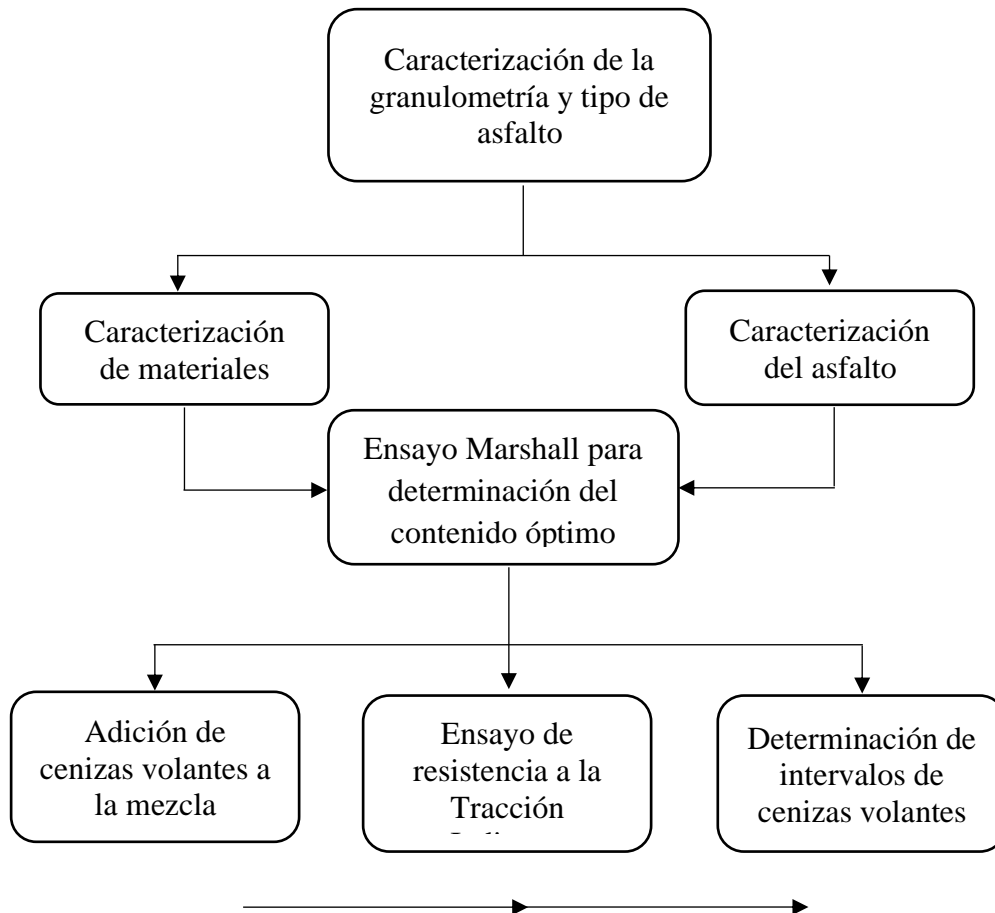


Figura 9. Diagrama del procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica. Fuente 1. Ortiz, O. J. R., Rivera, J. R. T., & Tauta, J. F. C. (2006). *Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes*. 12p. Fuente 2. Reyes, Ó. J., & Rincón, J. F. (2009). Influence of characteristics of mineral filler in the resistance of asphalt mixture. *Revista EIA*, 11p, 93-103.

Países de mayor producción de ceniza volante.

En Europa, anualmente se emplean miles de kilotoneladas de cenizas volantes para diferentes usos, ya sea, en relleno de asfalto, cemento o estabilización de suelos. Los países con mayores producciones de cenizas son Francia, España, Alemania y Dinamarca. Actualmente, en Finlandia se utilizan este tipo de residuos para llenante de asfalto. (Bech, 2020)

La producción internacional de cenizas volantes ha profundizado en el estudio del material en cemento o concreto y estabilización de bases y subbases, no obstante, aún no se desarrolla una investigación enfocada en especial a utilización de estos residuos en la mezcla asfáltica para la obtención de mayor capacidad estructural. (Velásquez & Maestre, 2015)

Sitios de extracción de ceniza volante en Colombia.

El 68,33% de producción de energía en Colombia es atribuido a las hidroeléctricas, un proceso de obtención más transparente y limpio. Por otra parte, la energía térmica abarca aproximadamente el 30,7% de producción de gas, carbón y diésel a nivel nacional, el porcentaje restante se atribuye a producción de energía no convencional. (Caballero Badillo, 1997)

Tabla 8.

Características del carbón colombiano por zonas

Zona	% de Cenizas
Boyacá	
Sogamoso	11,60
Samacá	10,40
Paipa	11,00
Cesar	
El descanso	10,60
La Jagua	5,30
La Loma	5,60
Córdoba	
San Jorge 1/ 1	9,24
Cundinamarca	
Checua - Lenguazaque	10,20
La Guajira	
Cerrejón Norte	7,00
Cerrejón Central	8,30
Norte de Santander	
Tasajero	7,70
Zulia Sur	11,90
Zulia Norte	9,20
Santander	
San Luis	25,90
Valle del Cauca	
Valle del Cauca	22,40

Nota: Principales zonas de producción de ceniza volante con su respectivo porcentaje de producción. Velásquez, C. A. C., & Maestre, Y. L. G. (2015). Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero. (p. 50-60).

Tabla 9.

Tipo de combustible producido por Centrales Termoeléctricas

Central termoeléctrica	Ubicación	Tipo de combustible producido
Merieléctrica	Barrancabermeja, Santander	Carbón
Proeléctrica	Cartagena, Bolívar	Gas
Termobarranquilla	Barranquilla, Atlántico	Gas
Termocandelaria	Cartagena, Bolívar	Gas
Termocartagena	Cartagena, Bolívar	Gas y oil como alternativa
Termocentro	Puerto Olaya, Santander	Gas
Termodorada	La Dorada, Caldas	Gas
Termoemcali	Cali, Valle del Cauca	Gas
Termoflores	Barranquilla, Atlántico	Gas
Termoguajira ¹	Dibulla, La Guajira	Carbón
Termonorte	Troncal del Caribe, Central Magdalena	Gas
Termopaipa ²	Paipa, Boyacá	Carbón
Termosierra	Puerto Nare, Antioquia	Gas
Termosochagota	Paipa, Boyacá	Carbón
Termotasajero ⁴	San Cayetano, Norte de Santander	Carbón
Termozipa ³	Tocancipá, Cundinamarca	Carbón

Nota: 1. La Central Termoguajira se caracteriza por la producción de cenizas volantes de clase F con un porcentaje de los óxidos predominantes mayor a 70%. Estos residuos se utilizan como llenante de mezclas asfálticas. 2. La Central Termopaipa se caracteriza por generar cenizas volantes de clase F con un porcentaje de los óxidos predominantes igual a 93%. Estos residuos se utilizan como reemplazo del material llenante de mezclas asfálticas. 3. La Central Termozipa se caracteriza por generar cenizas volantes de clase C y clase F con un porcentaje de los óxidos predominantes igual a 96%. 4. La Central Termotasajero se caracteriza por generar cenizas volantes de clase F con un porcentaje de los óxidos predominantes igual a 89,1%. Velásquez, C. A. C., & Maestre, Y. L. G. (2015). Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero. (p. 50-60).

Para finalizar, los principales proveedores de ceniza volante en el país son:

- AHINCO S.A
- OVNICON S.A.S
- ECLUID GROUP TOXEMENT
- ENEL S.A

La recolección de las cenizas volantes se realiza de forma sólida, por otro lado, este producto de calcinación se efectúa por medio de la combustión a temperaturas entre 1500 a 1700 °C para activar los componentes químicos del carbón mineral. (Velásquez & Maestre, 2015)

Actualmente, la producción de carbón ha aumentado considerablemente desde el siglo anterior, no obstante, las plantas generadoras de energía térmica están iniciando un programa estratégico para obtener un porcentaje mayor de energía a base de gas y así, reducir la producción de carbón, a fin de contribuir al desarrollo sostenible del país.

Geotextil – Geosintéticos

Son telas permeables que se utilizan como filtros sustituyendo agregados implementados como aditivos estabilizadores de suelos blandos. Estos elementos son empleados para la distribución de cargas en los pavimentos y taludes ayudando a proteger de la erosión.

En la ingeniería civil los geosintéticos de mayor implementación son los de tipo geotextil o, los conocidos comúnmente como las geomallas debido a la gran eficiencia que tienen en las obras viales o sus aplicaciones medioambientales, por su forma de filtro o lamina que permite su uso en contacto con el suelo o en su caso tiene una variada aplicabilidad en el campo de la geotecnia

Clasificación de los Geotextiles.

Los geotextiles debido a su método y proceso de fabricación son clasificados en dos tipos, los geotextiles tejidos y los geotextiles no tejidos.

Geotextiles tejidos: Los geotextiles tejidos son aquellos formados por cintas entrecruzadas tejidas en una máquina, estos son implementados para la separación y estabilización de subrasante en vías y cimentaciones (Amanco, 2011). Estos geotextiles tienen un sistema de resistencia de tipo biaxial o multiaxial lo que permite que sean usados por sus altas resistencias a la estabilidad de taludes o principalmente para evitar deformaciones.

Geotextiles no tejidos: Es un tipo de material formado a partir de fibras entrelazadas o filamentos de polipropileno mezclados aleatoriamente; generalmente se utilizan como un sistema de drenaje y filtración, no obstante, su utilización también es requerida para la repavimentación (Amanco, 2011). Sus características hidráulicas permiten una exitosa adaptabilidad a cualquier tipo de terreno proporcionando protección también conocido como “efectos de colchón”.

Geosintéticos en Mezclas Asfálticas.

Comúnmente los geotextiles tejidos y no tejidos están compuestos por nylon, fibras de vidrio, polipropileno o en algunos casos por la una unión de estos; son implementados para la disminución de fisuras longitudinales o transversales y de tipo piel de cocodrilo con baja o mediana severidad. Existen evidencias donde se ha aplicado este tipo de geosintéticos directamente sobre el pavimento entre la capa asfáltica y la capa estructural, con una previa aplicación de riego, demostrando con éxito una clara mejora en la propagación de fisuras a lo largo de la vía. (Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías, 2002)

Cuando se hace uso de este material se tienen como función el refuerzo en la redistribución de cargas, debido a que este es un material rígido ayuda que sea mayor se módulo elástico que el del material que se está reforzando, en ocasiones este tipo de refuerzo es conocido como las intercapas en las que se reduce la aparición de grietas o los ahuellamientos y corrugamientos (Pavco, 2012).

Las intercapas que reducen la aparición de fisuras has sido muy eficientes para el control de movimientos verticales y horizontales, estas son construidas mediante una mezcla en caliente, a la cual se le adicionan agregados con baja a nula proporción de finos y ligantes, permitiendo así una compactación con alto grado de vacíos con el fin de lograr un control en la transmisión de fisuras a las capas de refuerzo construidas. (INVIAS, 2006)

En los procesos de rehabilitación y mantenimientos de las vías, las fisuras y el exceso de humedad afectan la durabilidad del pavimento y baja su resistencia a la aplicación de cargas, debido a esto los geotextiles por su estructura son ideales ya que actúan como barrera entre la capa de rodadura y la estructura del pavimento impermeabilizando y actuando como amortiguador para flexión de este (Amanco, 2011).

Figura 10.

Aplicación de geotextiles



Figura 10. Puesta en obra para aplicación de geotextiles. Geotexan. (2013). El uso de geosintéticos en las vías de acceso a parques eólicos. [Comercial]. *Geotexan*. <https://geotexan.com/el-uso-de-geosinteticos-en-las-vias-de-acceso-a-parques-eolicos/>

La implementación de este tipo de método trae grandes beneficios como la disminución de los costos de mantenimiento debido a que incrementa la vida útil del pavimento. Según el Pavco (2012), las principales ventajas del uso de este mecanismo son:

- (1) Reducir al mínimo el agrietamiento reflexivo por esfuerzos de tensión y cambios de temperatura en las carpetas asfálticas.
- (2) Reducir las deflexiones de los pavimentos sujetos a grandes temperaturas ambiente e intensas repeticiones de carga.
- (3) Aumentar la resistencia a la fatiga de las capas bituminosas.
- (4) Proporciona beneficios de costo aumentando el ciclo de vida del pavimento.
- (5) Debido al recubrimiento bituminoso, su adherencia con las mezclas asfálticas es óptima.
- (6) Su espesor homogéneo permite un apoyo continuo sobre la emulsión y por ende una mayor adherencia entre la nueva capa y el pavimento existente.
- (7) Su gran resistencia a la fatiga permite mantener sus

propiedades mecánicas originales bajo la acción de cargas cíclicas.” (Pavco, 2012, p.p. 177-178)

Proceso de Aplicación para Rehabilitación.

La superficie tiene que estar nivelada y el concreto asfáltico tiene que tener un espesor mínimo de 3cm para ser colocada por encima de la capa de asfalto ya existente teniendo en cuenta que se debe realizar un riego de liga en la capa asfáltica existente. Para pavimentos flexibles en cuanto se instala el geosintético de debe aplicar una capa de 5cm por encima de esta. Se debe tener en cuenta que este proceso no se puede llevar a cabo sin antes ser limpiada la superficie, y se debe realizar un pequeño tratamiento a las fisuras y baches para poder emplear la capa de nivelación (Pavco, 2012).

Polímeros.

Sustancias químicas de peso molecular alto, constituidas por un enlace conformado por cientos de miles de moléculas diminutas llamadas monómeros, es decir, compuestos químicos con moléculas simples las cuales se unen y configuran diferentes estructuras. (Maxil & Salinas, 2006)

Asfaltos modificados con polímeros.

Como es conocido, las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto deben proporcionar a la mezcla asfáltica propiedades viscoelásticas que permitan dar flexibilidad y a su vez, proporcionar adherencia y adhesión de los ligantes en la superficie de rodadura para evitar deformaciones plásticas o agrietamientos térmicos. (Ibáñez, 1999)

La asociación Asfalto-Polímero es otra forma de modificar las propiedades químicas, reológicas y mecánicas del material con el fin de mejorar la calidad del mismo. El aporte viscoelástico sobre la mezcla asfáltica es una de las razones principales por las que se opta

incorporar los polímeros al asfalto, debido a que se evidencia un aumento de la capacidad elástica del material para regresar a su estado inicial, sin embargo, la elasticidad varía conforme a la temperatura de aplicación del agente modificador sobre el asfalto. Por otro lado, se genera una disipación de esfuerzos externos para evitar deformaciones permanentes, fatiga o envejecimiento. Actualmente, los tipos de polímeros más utilizados son los termo-plásticos, siendo los cauchos SBS y SBR de uso frecuente en carreteras. (Elizondo et al., 2011)

Cabe destacar que la adición del polímero a la mezcla generará interacciones entre las estructuras moleculares de los componentes, obteniendo como resultado una alteración en el sistema coloidal del material asfáltico. De esta manera se produce un cambio considerable en las propiedades químicas del asfalto, las cuales son dependientes de los siguientes factores (Montejo, 1998):

- Tipo de polímero, dosificación y procesos de producción.
- Proceso de adición del material polimérico al asfalto.
- Geometría molecular, composición química y concentración del polímero.
- Sistema coloidal y composición química del asfalto, incluyendo proceso de refinación y fuente del crudo.

La asociación asfalto-polímero da lugar a dos tipos de mezclas diferentes, un gel físico compuesto por una red de estructura polimérica formada por uniones físicas, la cual se genera a través de mezclados mecánicos y, un gel químico compuesto por una red de estructura polimérica formada por uniones químicas debido a una reacción química entre los componentes. (Rodríguez et al., 2001)

Para la modificación del asfalto con polímeros del tipo elastómeros con Tg baja, se requiere la adición de los mismos a elevadas temperaturas, en un rango de 180°C a 200°C, en

donde, se evidencie altos esfuerzos de corte con el fin de generar una red o malla polimérica tridimensional en el material asfáltico para proporcionar la resistencia del material sometido a temperaturas de servicio e incrementar el intervalo de esfuerzos. Por lo consiguiente, los asfaltos modificados con polímeros SBS tienen capacidad de utilizarse a mayores temperaturas de servicio y son conocidos como asfaltos suaves. (Rodríguez et al., 2001)

Inicialmente, otra forma de modificación de asfaltos se efectuaba por medio de las emulsiones utilizadas como método de impermeabilización. Sin embargo, en la actualidad se han utilizado para aumentar la resistencia a la fatiga y al envejecimiento en mantenimientos o rehabilitaciones por medio de riegos en tratamientos superficiales en frío (Maxil & Salinas, 2006).

Según Ibáñez (1999), en las emulsiones es indispensable el manejo de la temperatura para darle la viscosidad requerida y así, producir la emulsión. Los métodos más acertados para fabricar la emulsión son:

- Emulsificación de una solución de polímero y después mezclarla con una emulsión convencional.
- La adición del látex natural o sintético en la fase acuosa en el momento de producir la emulsión.
- La emulsificación directa de un asfalto modificado.

Aplicaciones de un asfalto modificado.

Según Maxil & Salinas (2006), las aplicaciones de un asfalto modificado se realizan de la siguiente manera:

- **Concreto asfáltico:** El asfalto modificado se aplica principalmente en vías de altos niveles de tránsito para reducir considerablemente las deformaciones plásticas y los agrietamientos térmicos.
- **Mezclas abiertas:** La aplicación del asfalto modificado confiere al pavimento de drenaje el aumento de impermeabilidad y adhesividad del agregado, en donde, las cargas generadas por el tráfico se encuentran en niveles NT1.
- **Tratamientos superficiales:** Generalmente, se utiliza en riegos de liga debido a la retención del agregado, mejor resistencia a la tracción, y por su formulación de asfaltos diluidos y emulsiones.

Ventajas.

En la industria del producto asfáltico se ha optado la incorporación de polímeros a la mezcla desde hace ya algún tiempo, debido a que poseen las siguientes ventajas (Maxil & Salinas, 2006):

- Modifica la reología de la mezcla.
- Confiere a la mezcla un comportamiento óptimo ante los esfuerzos externos.
- Aporta mayores porcentajes de viscosidad que de plasticidad.
- Aumenta viscosidad a bajas temperaturas.
- Aumento de rigidez a altas temperaturas.
- Aumento de resistencia al envejecimiento al conservar las propiedades del ligante.
- Mayor durabilidad.
- Reducción de rigidez a bajas temperaturas.
- Aumento de resistencia a la deformación plástica.
- Aumento de resistencia a la fatiga.

- Disminuye la susceptibilidad térmica.
- Aporta propiedades de adhesión y cohesión a la mezcla.
- Se obtienen mezclas con mayor flexibilidad para reducción del fisuramiento.
- Disminución de exudación del asfalto.
- Confiere propiedades impermeables a la mezcla debido a la absorción de esfuerzos tangenciales por medio de sellos bituminosos.
- Aumento de resistencia al derrame de hidrocarburos sobre la superficie.
- Reducción en costos de mantenimiento.
- Disminución del nivel de ruidos.
- Óptimas condiciones de trabajabilidad y compactación.
- Recubrimientos para vías de alto tráfico.
- Aumento del módulo de la mezcla.
- Variación de costes de acuerdo al tipo de polímero a implementar.
- Los asfaltos modificados con polímeros elastoméricos presentan mayor módulo de resiliencia.
- Los asfaltos modificados con polímeros SBS presentan mayor elasticidad a esfuerzos de tensión.
- Los asfaltos modificados con polímeros lineales tienen mayor elasticidad.

Desventajas.

A pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente, la modificación de asfalto con polímeros tiene un nivel de complejidad debido a las siguientes desventajas según Maxil & Salinas (2006):

- Algunos polímeros como los termo-endurecibles tienen costes elevados.
- Complejo análisis del nivel de compatibilidad entre el polímero y el material asfáltico.
- Dificultades del mezclado.
- Requiere de cuidados en el momento de aplicación de la mezcla.
- Manejo de temperaturas, especialmente en polímeros termo-endurecibles.
- Se requiere de áridos limpios de baja humedad.
- La temperatura de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

Como se mencionó anteriormente, la mayor desventaja de la incorporación de polímeros al asfalto es el aumento del presupuesto inicial, no obstante, es imprescindible realizar un análisis de la relación costo- durabilidad del material para determinar si con el costo.

Clasificación de los polímeros.

Los polímeros debido a su composición por diferentes agrupaciones moleculares en cadenas largas se clasifican en polímeros termo-endurecibles y termo-plásticos, como se observa en el siguiente cuadro:

Figura 11.

Clasificación de los polímeros

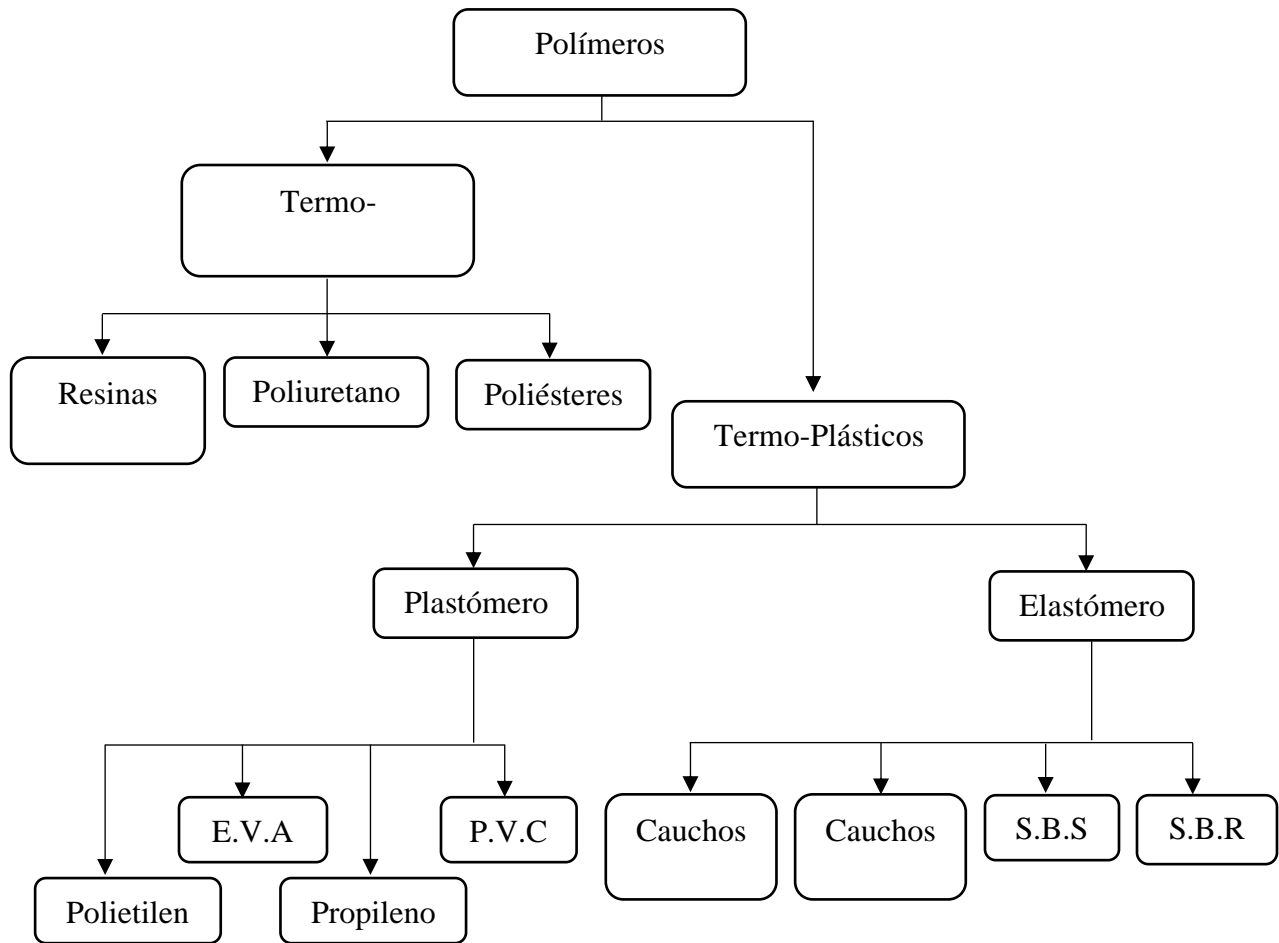


Figura 11. Clasificación de los polímeros por Termo-Endurecibles y Termo-Plásticos, sistematizada a partir de lo investigado. Montejo Fonseca. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia. (p. 621-623)

Polímeros termo-endurecibles: Son estructuras entrecruzadas formadas por una relación estequiométrica entre una base y un endurecedor, por lo tanto, debido a las propiedades de estos polímeros, las deformaciones generadas en el material por esfuerzos externos tienden a ser irreversibles. Por otra parte, estos polímeros proporcionan adhesión, resistencia a la tracción e impermeabilización a la mezcla asfáltica, sin embargo, no son muy utilizados a causa del manejo de temperaturas y los costos elevados, por esta razón, se usan en zonas de frenado intenso. (Ibáñez, 1999)

- **Resinas epoxi:** Son polímeros de alta reactividad cuya estructura molecular está conformada por grupos químicos del tipo epoxi. Este material polimérico tiene la capacidad de generar una transición de la fase líquida a sólida por la aplicación de un agente endurecedor o catalizador de enlaces transversales. En cuanto a la incorporación de las resinas a la mezcla asfáltica, se utilizan como aglutinante o en algunos casos para revestimientos, sin embargo, la aplicación in situ es compleja al realizarse en temperaturas bajas menores a 10° C y utilizando porcentajes mayores al 20%, por lo que resultan ser muy costosas y empleadas para zonas especiales. (Montejo, 1998)
- **Poliuretanos:** Son polímeros de adaptación rígida o flexible por su composición de enlaces del tipo uretano. Tienen similitud de costos a las resinas epoxi. Se aplican a temperaturas menores a 0°C y en capas delgadas para nivelante e impermeabilizante de la carpeta asfáltica. (Montejo, 1998)
- **Poliésteres:** Son materiales compuestos por enlaces del tipo éster. Son los menos utilizados como modificadores en el asfalto. (Montejo, 1998)

Polímeros termo-plásticos: Son sustancias de largas cadenas rectas o ramificadas las cuales tienen la capacidad de adquirir deformabilidad o flexibilidad al ser sometidas a elevadas temperaturas. Para la modificación del asfalto se requiere la solubilización del material polimérico. Actualmente, algunos mecanismos de incorporación aún se basan en hipótesis. (Ibáñez, 1999)

1. Plastómeros: Son materiales poliméricos de baja elasticidad los cuales tienen deformaciones pseudoplásticas, es decir, al aplicar un esfuerzo sobre material no se evidencia recuperación de la forma o longitud inicial al retirar la carga aplicada. Por otra parte, aumenta la

viscosidad y propende a rigidizar el material asfáltico con bajas posibilidades de flexibilidad, por lo que, puede causar ruptura o fatiga. (Montejo, 1998)

- Polietileno: Es un material de bajo costo, ecológico y de compatibilidad media con el asfalto, el cual proporciona resistencia a la tracción, resistencia térmica, un óptimo comportamiento a bajas temperaturas y aumenta la resistencia Marshall de 2 a 2.5 veces. (Ibáñez, 1999)
- E.V.A (Etileno Acetato de Vinilo): Son polímeros de alta compatibilidad con el asfalto cuya dosificación oscila entre el 3% y 10%. Se han implementado debido a que confiere al asfalto propiedades de resistencia y disminución a la susceptibilidad térmica, por lo que, normalmente se emplea en climas cálidos con índices de alto tráfico vehicular. Están compuestos por copolímeros de etileno los cuales componen una cadena macromolecular con otros monómeros, acetato de vinilo, con el fin de disminuir el grado de cristalinidad.

Los mecanismos de incorporación son nuevos en la modificación de asfaltos ya que sus propiedades son dependientes del peso molecular, debido a que si éste aumenta se produce menor flexibilidad y mayor dificultad para mezclarlo. Otra propiedad, es el porcentaje de acetato de vinilo, con aplicación del 33% al 40%, el cual funciona como adherente y es directamente proporcional con la flexibilidad del polímero y si el contenido es bajo no se evidencian cambios en las propiedades del asfalto, además, “es necesario recircular el acetato en almacenamiento para evitar la separación y el mezclado deberá ser a 160°C sin aditivos” (Montejo, 1998, p. 622). El proceso de producción requiere un procedimiento de agitación y temperatura para obtener la fundición del polímero para ser incorporado.

- Propileno atáctico (EPDM): Es un polímero de baja densidad y cristalinidad el cual es mezclado con elastómeros para aumentar la flexibilidad, resistencia al calor y a los agentes químicos. Tiene buena compatibilidad con el asfalto. (Montejo, 1998)
- P.V.C: Es un polímero de baja actividad química y poca compatibilidad con el asfalto. Generalmente, este material económico se mezcla (con un porcentaje entre 2% a 6%) con el asfalto a 130°C para obtener un ligante con mayor viscosidad e impermeabilidad, sin embargo, no resiste a altas temperatura y es utilizado principalmente en alquitranes y algunas veces en estaciones de servicio y aeropuertos. (Montejo, 1998)

2. *Elastómeros*: Son polímeros lineales de estructura amorfa y comportamiento elástico los cuales aportan resiliencia y alta viscosidad a la mezcla cuando se someten a altas temperaturas. Obtienen una estructura final reticulada debido a un proceso de vulcanización que le aporta sus propiedades elásticas. (Montejo, 1998)

- Cauchos naturales: Se obtienen del látex natural extraído del árbol del Hule. Proporciona propiedades semejantes a las del SBS y SBR y mejora el asfalto a temperaturas bajas. El más utilizado es el isopreno. (Ibáñez, 1999)
- Cauchos sintéticos: Algunos cauchos sintéticos utilizados en el asfalto son el neopreno, un caucho industrial que aumenta la resistencia de la mezcla a los agentes climáticos y es empleado como apoyo de vigas y estructuras en carreteras (Montejo, 1998). Por otra parte, el hule de llanta, se utiliza desde hace 70 años como método ecológico de reutilización de materiales de degradación tardía, el cual tiene similitud con los polímeros SBS y SBR en sus propiedades químicas, aporta un alto porcentaje de viscosidad, mejora la flexibilidad y la resistencia a la tensión. El proceso industrial de implementación del hule llanta comprende procedimientos complejos por la

administración de dosificaciones altas en el material asfáltico y aplicación a temperaturas entre 200°C y 230°C, además, es necesario determinar las propiedades definidas por el origen de la llanta analizada y el contenido de hule con el fin de precisar el nivel de compatibilidad del polímero con el asfalto. Según Ibáñez (1999), lo ideal para incorporar este material polimérico es aplicar un proceso de desvulcanización para adquirir las propiedades iniciales del hule y, además, aplicar las siguientes técnicas para utilizarlo como agente modificador:

- Se realiza a temperatura ambiente y produce granos de estructura esponjosa y alta superficie específica.
- Se realiza a baja temperatura y genera granos de paredes lisas de poca superficie específica.
- El polímero hule de llanta se utiliza generalmente como riego de sello para mitigar los fisuramientos y para tratamientos superficiales.
- S.B.S (estireno-butadieno-estireno): “Caucho termoplástico desarrollado en la década de los 60s en EEUU para adhesivos y suelos, llega luego al asfalto, los dos homopolímeros que lo forman son compatibles entre sí.” (Montejo, 1998, p. 622). Sus propiedades le confieren mejoras en el comportamiento del asfalto con respecto a variaciones de temperatura, por ende, son utilizados en carpetas asfálticas delgadas de pavimentos con un índice de alto tráfico vehicular. De igual modo, se emplean para la elaboración de emulsiones en tratamientos superficiales. Para el proceso de elaboración se realizan etapas de molienda, control de calidad y pruebas físicas en la reacción final (Maxil & Salinas, 2006)

- S.B.R (estireno-butadieno): Polímeros elastoméricos los cuales mejoran la adhesividad del material asfáltico al incorporar ácido acrílico. Su composición se basa en 25% estireno y 75% butadieno. (Montejo, 1998) “En este hule el 30 % es fase estirénica y el resto es la parte butadiénica. La proporción de tetra-acoplado es mayor del 80%, siendo el resto tri-acoplado y cadena lineal” (Rodríguez et al., 2001, p. 21)

Figura 12.

Tipos de palomeros tipo elastómeros

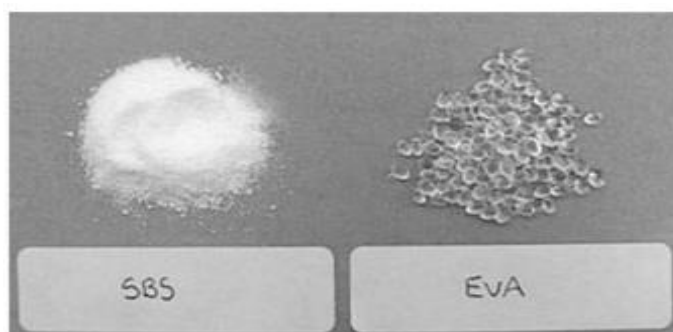


Figura 12. Comparación microscópica de los polímeros tipo elastómeros (S.B.S (estireno-butadieno-estireno) y EVA). Robinson, H. L. (2004). Chapter 5: Polymers Used in Asphalt [Académica]. Engineering 360. <https://www.globalspec.com/reference/50496/203279/chapter-5-polymers-used-in-asphalt>

Figura 13.

Tipos de palomeros tipo elastómeros



Figura 13. Comparación microscópica de los polímeros tipo elastómeros (Látex y Waxes). Robinson, H. L. (2004). Chapter 5: Polymers Used in Asphalt [Académica]. Engineering 360. <https://www.globalspec.com/reference/50496/203279/chapter-5-polymers-used-in-asphalt>

Los polímeros del tipo SBS y SBR se implementaron desde hace más de 25 años en la industria del material asfáltico y son utilizados para aumentar la flexibilidad y disminuir la

susceptibilidad térmica dependiendo de la relación estireno-butadieno, para incrementar el nivel de elasticidad se manejan temperaturas entre -10°C y 10°C . (Ibáñez, 1999)

Según, Montejo (1998), el estireno es el compuesto de mayor incompatibilidad con el asfalto, a causa de ser la fase dura del polímero, con temperatura de cristalización de 100°C . Por lo contrario, el butadieno al ser la fase elástica es de mayor compatibilidad.

Por otra parte, Rodríguez et al. (2001), reafirma la conveniencia de modificar el asfalto con polímeros SBS o SBR cuando el tiempo de recuperación de la inversión es importante, se requieren carreteras de altas especificaciones, se requieren carreteras de alto desempeño, se requiere reducir el gasto de mantenimiento, si existen temperaturas extremas y, por último, cuando existen condiciones de tráfico intenso.

Principales modificadores utilizados en el asfalto.

La incorporación directa de los polímeros como modificadores al material asfáltico ha incrementado la adherencia debido a la producción de tensoactivos iónicos, por lo que se aumenta la resistencia al agua, a la deformación y a los esfuerzos de tensión. A continuación, se explican las clases de modificadores en el asfalto (Instituto Mexicano del Transporte, 2006):

- Polímero tipo I: Es un agente modificador empleado en la construcción y mantenimiento de superficies asfálticas de altos volúmenes de tráfico, en donde, confiere al material el mejoramiento de las propiedades reológicas, la adherencia y la disminución de la susceptibilidad térmica. De igual forma, se puede utilizar en la elaboración de emulsiones. (Instituto Mexicano del Transporte, 2006)
- Polímero tipo IIa: Es un agente modificador efectuado principalmente en climas cálidos para ser utilizado en mezclas drenantes, discontinuas, densas, semidensas y gruesas en caliente para altos niveles de tránsito, por otra parte, suele ser implementado en la

elaboración de emulsiones para tratamientos superficiales. (Multinsa, 2020) Se elabora con polímeros elastoméricos lineales mediante una configuración de caucho de SBS, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. (Instituto Mexicano del Transporte, 2006)

- Polímero tipo IIb: Este agente modificador es recomendado para climas templados y contiene propiedades semejantes a las del polímero tipo IIa.
- Polímero tipo III: Es un agente modificador incorporado a mezclas asfálticas en zonas de altas exigencias cuyo objetivo es mejorar el comportamiento del asfalto a elevadas temperaturas y, a su vez, la resistencia al ahuellamiento. Es utilizado en climas cálidos para mezclas drenantes, discontinuas, densas, semidensas y gruesas en calientes. Se elabora a partir de polímeros plastómeros por medio de configuraciones SBS y SB cuya interacción fisicoquímica genera polímeros radiales del grupo bibloque o tribloque, EVA o polietilenos de alta o baja densidad. (Instituto Mexicano del Transporte, 2006)
- Polímero tipo IV: Agentes modificadores utilizados en la elaboración de mezclas antirreflectivas o riegos en caliente para membranas de absorción de esfuerzos. Se compone por configuraciones SBS y SB cuya interacción fisicoquímica genera polímeros radiales del grupo bibloque o tribloque (MPI, 2020)
- Polímero tipo V: Agentes modificadores cuyo comportamiento confiere al asfalto alta consistencia y resistencia a la deformación plástica. Se emplea en la producción de mezclas asfálticas de alto módulo para capas base, intermedias o carpetas con niveles de tránsito NT3. (MPI, 2020)

Compatibilidad de los polímeros con el asfalto.

La alteración de la geometría molecular de un material conlleva a modificaciones en la composición química, micromorfología, reología y propiedades físico-mecánicas. Este es el

resultado de la adición de un material polimérico a un material asfáltico, no obstante, es imprescindible tener en cuenta el nivel de compatibilidad de estos dos componentes por causa de la formación de dos fases diferentes en la incorporación microscópica del aditivo. Por esta razón, se recomienda la utilización de asfaltos destilados.

La compatibilidad de los materiales se genera cuando el polímero establece una malla o red de trabajo continua al interior del producto asfáltico, obteniendo de esta manera un material estable. Para conseguir las propiedades deseadas en la mezcla es importante la selección del asfalto base, el tipo de polímero, para determinar la temperatura de mezcla, la dosificación y el almacenamiento.

Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta el polímero actúa como un filler y por debajo pasan los solubilizados y aumentan la viscosidad (sin mejorar la elasticidad y resistencia). Por otra parte, algunos productores de asfalto polimerizado utilizan procesos especiales para lograr la compatibilidad entre el asfalto y el polímero. (Maxil & Salinas, 2006, p. 19)

Los posibles riesgos técnicos se pueden generar por la defectuosa implementación del polímero al no considerar las precauciones de mezclado, dando lugar a las siguientes consecuencias (Montejo, 1998):

- Mezcla heterogénea: Se produce cuando existen altos niveles de incompatibilidad entre el asfalto y el polímero, dado que se genera una separación de los componentes de la mezcla, proporcionándole propiedades similares a las de un asfalto convencional. Dicho resultado se obtiene frecuentemente.

- Mezcla totalmente homogénea: Ocurre con poca frecuencia cuando el polímero y el asfalto tienen niveles extremadamente elevados de compatibilidad, lo que proporciona aumento del porcentaje inicial de viscosidad, extrema estabilidad al ligante e impide el mejoramiento de propiedades, por el contrario, son más débiles que las de un asfalto convencional.

- Mezcla micro heterogénea:

Es el caso de compatibilidad deseada, que permite realmente modificar el ligante. En un sistema de estas características, el polímero compatible “se hincha” absorbiendo una parte de las fracciones aceitosas ligeras del asfalto, para formar una fase polimérica diferente a la fase asfáltica residual constituida por las fracciones pesadas del ligante, aceites restantes, resinas y asfaltenos. (Montejo, 1998, p. 624)

Polímeros compatibles.

Como se menciona anteriormente, los polímeros de mayor uso son los termo-plásticos los cuales cumplen con un nivel de compatibilidad con los ligantes hidrocarbonados. Dichos polímeros poseen bajas polaridades, cadenas largas, altos pesos moleculares y bajas Tg.

Tabla 10.

Panorama general de las mejoras obtenidas al modificar asfaltos con las diferentes clases de polímeros compatibles

Polímero	Resistencia			Adhesión a los agregados	Resistencia al envejecimiento	Incremento de costo
	A la deformación permanente	Al agitación				
Termo endurecibles	+++	++	+	+++	+++	Muy alto
Blastómeros	++	++	+	+	0+	Medio alto
Plastómeros	1	+	0	0	0	Medio medio
Caucho de llanta usada	0/1	+ / 1	1	0	0	Medio

Nota: 1. +++ corresponde a muy efectivo 2. ++ corresponde a mejora sustancial 3. + corresponde a mejora significativa 4. 0 corresponde a poca o ninguna mejora, resultados generales de un asfalto al que se le implementos clases de polímeros compatibles. Montejo Fonseca. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia. 625p.

Por otra parte, los polímeros del tipo termo-endurecibles confieren al ligante propiedad superiores a costos elevados y aplicaciones complejas. Cuando el ligante posee altos porcentajes de elastómeros aumenta la resistencia a la deformación, fatiga y ruptura sin perder la adhesividad y cuando el ligante tiene polímeros del tipo EVA aporta propiedades similares a las de algunos elastómeros. (Montejo, 1998)

Normativa aplicada a la utilización de polímeros en asfalto.

Para la producción e incorporación de polímeros en la mezcla se han desarrollado normativas nacionales e internacionales para la determinación de rangos de dosificación, procedimientos, ensayos, entre otros. Entre ellos se encuentran los más destacados:

- Comité unido AASHTO-AGC-ARTBA: Guía de especificaciones para asfalto modificado con polímeros.
- IDU Sección 560-11: Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda.
- Artículo 400 – 07: Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos.
- Artículo 450 – 07: Mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo).

Pruebas de laboratorio más comunes para la utilización de polímeros en la mezcla asfáltica.

Según Montejo (1998), para la determinación de la eficiencia del agente modificador en el asfalto se realiza por medio de los siguientes ensayos:

- Ensayos de identificación y composición: Se determina el tipo de polímero y las cantidades necesarias para la aplicación en el ligante. Generalmente, los copolímeros SBS son determinados por la extracción selectiva con disolvente o precipitación de los mismos mediante la utilización de técnicas de espectroscopia infrarroja o cromatografía sobre geles porosos.

- Ensayos de compatibilidad: Si el polímero es termo-endurecible se realiza una relación hidrofílica-lipofílica para comparar factores de solubilidad del polímero y el ligante, de lo contrario, si son del tipo termoplásticos se efectúa por medio de estimación. Para el control de dispersiones de las partículas del polímero se realiza una microscopía óptica de fluorescencia por reflexión térmica para la observación de la micromorfología del mismo.
- Ensayos para determinar condiciones de almacenaje: Para evitar fenómenos de sedimentación en el asiento del tanque de almacenamiento se utiliza el ensayo de punto de ablandamiento.
- Ensayos de comportamiento reológico y susceptibilidad a la temperatura: Para evaluar las condiciones y propiedades adquiridas en el ligante se realizan los siguientes ensayos:
 - Penetración
 - Índice de penetración
 - Punto de fragilidad frass
 - Ductilidad
 - Viscosidad a varias temperaturas

Principales proveedores de asfaltos modificados con polímeros

Algunos proveedores de Asfaltos modificados en Colombia son: *Surfax Colombia,*

IncoAsfaltos, EZ Street Cold Asphalt, MPI

Zona de estudio

La selección de los tramos viales estudiados se basó en la determinación del mayor porcentaje de deterioros presentados a lo largo de la red vial. A continuación, se realiza una breve descripción de cada tramo de vía.

El primer segmento del tramo de vía se encuentra en la Avenida ciudad de Villavicencio, en donde, se muestra una malla vial arterial de tipo complementaria con una sección típica de dos calzadas constituidas por tres carriles cada una y, un separador central de aproximadamente 6.40 m. En cada calzada se encuentran tres carriles para vehículos mixtos (3.25m de ancho cada carril) junto con un andén de aproximadamente 5m. (FDN, 2018)

El segundo segmento del tramo de vía se encuentra en la Avenida Jorge Gaitán Cortés, en donde, se muestra una malla vial arterial de tipo complementaria con una sección típica de dos calzadas constituidas por dos carriles cada una y, un separador central de aproximadamente 1.65 m. En cada calzada se encuentran dos carriles para vehículos mixtos (3.25m de ancho cada carril) junto con un andén de aproximadamente 3m. (FDN, 2018)

Síntesis Histórica

La Avenida Villavicencio o Cl 68 Sur se vigorizó hace aproximadamente 30 años debido a la creación de grandes fábricas como Bavaria; fundamentales para la expansión territorial e industrial del sector, para dar paso al progreso de barrios desarrollados permitiendo que la zona obtuviera mejores vías de acceso principal entre la Avenida Caracas con la Autopista Sur y Avenida Ciudad de Cali. Además, esta vía ofrece la comunicación entre las localidades de Rafael Uribe, Tunjuelito, Ciudad Bolívar, Kennedy y Bosa.

En última instancia, con la llegada del transporte público como los alimentadores de Transmilenio y los buses del SITP, se obtuvo un desarrollo óptimo de la economía y la parte

comercial de toda la zona y sus alrededores, puesto que confiere acceso a la Universidad

Francisco José de Caldas, el centro Comercial el Gran Ensueño, Club Recreodeportivo Cafam Madelena, Parque Timiza, Parque del Tunal, entre otros. (Universidad Externado de Colombia & United Nations Population Fund, 2007)

Actualmente, la Avenida Villavicencio comunica el Portal Tunal con el Patio Laguna Bogotá Móvil, ubicado en la Avenida Jorge Gaitán Cortés y, con el Portal del Sur conectado con la Autopista Sur, dando de esta manera, paso al tránsito de buses articulados y biarticulados de Transmilenio, lo que genera un incremento de esfuerzos en el pavimento sobrepasando las cargas establecidas en el diseño y a su vez, ocasionando deformaciones permanentes en la estructura.

Por último, según el Instituto de Desarrollo Urbano (2020), se proyecta una ampliación futura de la Avenida Villavicencio hacia el occidente de la ciudad. Además, en la actualidad se encuentra en estudios y diseños para la adjudicación de Transmilenio a la vía como comunicación directa entre los portales Tunal y Sur.

Por otra parte, la Avenida Jorge Gaitán Cortés o carrera 51 fue construida con el fin de comunicar la Avenida Villavicencio, la Avenida Boyacá y la carrera 30 hace aproximadamente 25 años, dando paso a vehículos mixtos y actualmente a Transmilenio en un segmento de 1 km.

Geología

En términos generales, gran parte de la Formación de Bogotá principalmente son depósitos sedimentados, en los cuales se puede identificar dos conjuntos, uno con alternancia de areniscas cuarzosas feldespató de grano fino junto con arcillolitas blandas y plásticas, y el otro corresponde a afloramientos en los cuales predomina la arcilla.

Estas formaciones se encuentran hoy en día forzosamente plegadas, falladas y diaclasadas, en donde, se identifican valles y montañas, todo esto alterando los ciclos de erosión, los ecosistemas y las cuencas hidrográficas. Las alteraciones antrópicas han venido afectando notablemente los cambios de cobertura vegetal, expansión urbana, cambio climático y sobreexplotación de recursos naturales.

El proceso geológico de la zona sur de Bogotá, en donde se localiza el tramo vial, comprende una acumulación de sedimentos de origen aluvial con afloramiento de rocas procedentes del periodo cretáceo superior al periodo cuaternario, en el pleistoceno y holoceno con edades superiores a 16000 años; “se trata en realidad de varios fragmentos de varios conos que bajaban de los relieves de la vertiente oriental del Valle del Tunjuelo y que se fusionaron en el valle formando un fondo aluvial” (Julivert, 1961, p. 08).

Dicha geología se trata de un depósito llamado Formación Río Tunjuelito, compuesto por sedimentos de grano grueso transportados por los ríos que recorrían la Sabana de Bogotá.

Estos sedimentos están conformados por gravas intercaladas de arenas, arcillas y turbas y que están cubiertas por sedimentos de la Formación Chía, además, se caracterizan por secuencias de gravas con intercalaciones de arenas arcillosas, arcillas, arcillas orgánicas y arcillas turbosas; las gravas pueden mostrar, gradación, los cantos son redondeados, con diámetros hasta de 40 cm y altos volúmenes. En ciertas localidades los sedimentos gravosos pueden tener espesores de hasta 80 m. (Arenas & Torres, 2005, p. 71).

La extensión de abanicos originados por los depósitos fluviales provoca pendientes suaves y diversas terrazas de diferentes altitudes como resultado de la acumulación de sedimentos arenosos en los Valles Marginales de la Sabana, generando elevaciones aproximadas de 2500 m.s.n.m a 2650 m.s.n.m. Por otra parte, en el cuaternario a lo largo de los

ríos se transportaban depósitos de gravas hacia los valles, posteriormente, un periodo de meteorización del material fino depositó turbas y arcillas en esa zona. (Arenas & Torres, 2005).

Por último, sobre la litología de la Formación Marichuela se evidencian sedimentos de la Formación Río Tunjuelito cubiertos por un lecho de material fino de la formación Chía, arcillas, limos y arcillas orgánica diatomíticas. (Arenas & Torres, 2005).

Tránsito

Las vías manejan altos volúmenes de tránsito compuestos mayormente por vehículos livianos, pero cuenta con la presencia del transporte público como lo son los colectivos, buses y alimentadores, también, en cuanto se levanta la restricción de transporte de carga alta se evidencia movilidad en este sector. Los flujos peatonales son de gran tamaño en las horas pico (mañana – tarde) tomando en cuenta la sede de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnología.

Se presenta indicadores de movilidad obtenidos de encuestas realizadas a habitantes del sector, en donde, se puede identificar qué tipo de transporte es más utilizado por los ciudadanos, al igual que se analiza que el 75% de las vías de Ciudad Bolívar presentan deterioros de las cuales un 45% está en mal estado.

Figura 14.

Porcentajes encuestas habitantes de la zona

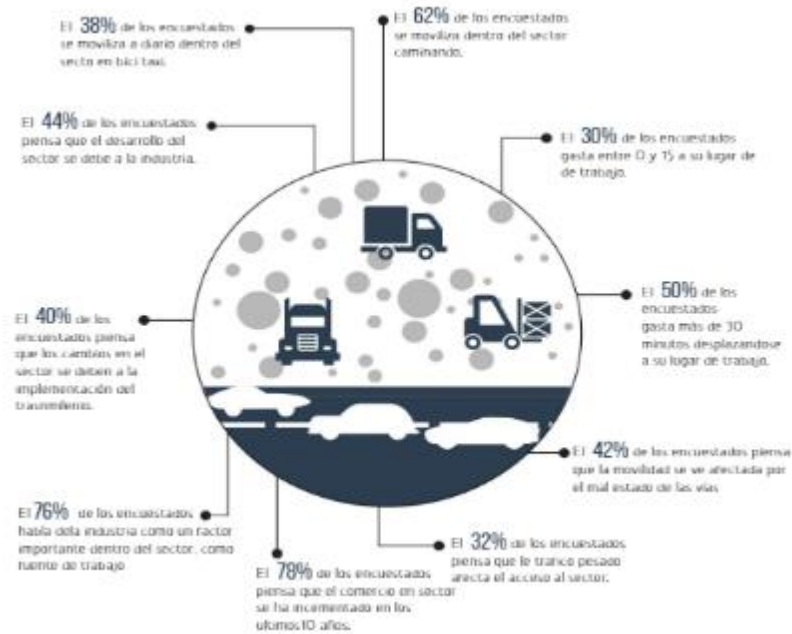


Figura 14. Encuesta habitantes Av. Cdad. De Villavicencio & Av. Gaitán Cortés, Bogotá. 172p. Montes, X., Cipagauta, S., & Oliveros, A. (2017). Avenida Villavicencio [Académica]. Issuu. https://issuu.com/centrosurbanos/docs/atlas_final_av_villavo

Figura 15.

Gráficos encuestas habitantes de la zona



Figura 15. Gráfico de resultados Encuesta del tipo de movilidad que usan los habitantes Av. Cdad. De Villavicencio & Av. Gaitán Cortés, Bogotá. 173p. Montes, X., Cipagauta, S., & Oliveros, A. (2017). Avenida Villavicencio [Académica]. Issuu. https://issuu.com/centrosurbanos/docs/atlas_final_av_villavo

Se logra evidenciar en las estadísticas que aproximadamente un 45% de transeúntes opinan que la movilidad se ve afectada por la baja frecuencia de actividades de mantenimiento en la vía, obteniendo de esta manera un aumento de la zona de afectación en la estructura.

Actualmente el IDU realiza un programa de rehabilitación de la Avenida Ciudad de Villavicencio sur desde el año 2019, dadas las condiciones estructurales del pavimento y el tránsito de la vía, la rehabilitación realizada actualmente, año 2020, presenta daños evolucionados en los parcheos realizados a lo largo del tramo vial.

Descripción de los tramos viales

Para tener una concepción general de los tramos viales en estudio se adjunta una imagen extraída de Google Earth, la cual determina visualmente la ubicación de las vías.

Figura 16.

Vista aérea de los tramos de estudio



Figura 16. Tramo vial de estudio unificado (Av. Cdad. De Villavicencio & Av. Gaitán Cortés, Bogotá), DISTANCIA TOTAL DE TRAMO: 1.164 km, Distancia Av. Villavicencio: 547 m, Distancia Jorge Gaitán Cortés: 617 m. Google Earth. (2020). [Avenida Ciudad de Villavicencio & Avenida Jorge Gaitán Cortés]. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://earth.google.com/web/@4.57872848,-74.15511301,2565.24368682a,897.85375129d,35y,0h,0t,0r>

En las visitas a las vías de inspección se lleva a cabo una reorganización de los datos mediante la división del tramo de estudio en cuatro segmentos según la vía seleccionada, además, se realiza una breve descripción de acuerdo a la longitud, altitud, localización y codificación establecidas por Google Earth y el Instituto de Desarrollo Urbano (2020).

- Tramo A

Este segmento de 262 m se ubica en la calzada sentido oriente-occidente de la Av. Villavicencio, con una elevación promedio de 2566 m.s.n.m, además, está identificado con los códigos 64053 y 68664 del eje vial y, código de calzada 603008. Se le asigna como abscisado inicial la Calle 68 Sur # 48 y abscisado final la Calle 68 Sur # 48c-99. Cabe aclarar, que este tramo es el principal objeto de estudio del proyecto debido al análisis realizado durante los últimos tres años.

Figura 17.

Vista aérea del Tramo A



Figura 17. Tramo A, Av. Villavicencio, sentido oriente occidente. Google Earth. (2020). [Avenida Ciudad de Villavicencio]. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://earth.google.com/web/@4.57706943,-74.15554643,2567.14130786a,446.53211972d,35y,0h,0t,0r>

- Tramo B

Este tramo de 285 m se ubica en la calzada sentido oriente-occidente de la Av. Villavicencio con una elevación promedio de 2565 m.s.n.m. Se le asigna como abscisado inicial la Calle 68 Sur # 49-23 y abscisado final la Calle 68 Sur # 51. Por último, el tramo se identifica con los códigos 48401 y 43011 del eje vial y, código de calzada 91030500.

Figura 18.

Vista aérea del Tramo B



Figura 18. Tramo B, Av. Villavicencio, sentido oriente occidente. Google Earth. (2020). [Avenida Ciudad de Villavicencio]. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://earth.google.com/web/@4.57917748,-74.15650941,2566.43087462a,447.24260585d,35y,0h,0t,0r>

- Tramo C

Este segmento de 218m se ubica en la calzada sentido sur-norte de la Av. Jorge Gaitán Cortés, con una elevación promedio de 2562 m.s.n.m. Se le asigna como abscisado inicial la Calle 68 Sur # 51 y abscisado final la Carrera 51 # 59c Sur. Por último, el tramo se identifica con los códigos 63503 y 60083 del eje vial y, código de calzada 444734.

Figura 19.

Vista aérea del Tramo C



Figura 19. Tramo C, Av. Gaitán Cortés, sentido sur norte. Google Earth. (2020). [Avenida Jorge Gaitán Cortés]. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://earth.google.com/web/@4.58060569,-74.15651433,2564.18589653a,218.26099635d,35y,0h,0t,0r>

- Tramo D

Este segmento de 399 m se ubica en la calzada sentido sur-norte de la Av. Gaitán Cortés, con una elevación promedio de 2563 m.s.n.m. Se le asigna como abscisado inicial la Carrera 51 # 58d Sur y abscisado final la Carrera 51 # 58a Sur. Por último, está identificado con los códigos 57689, 48343 y 49879 del eje vial y, códigos de calzada 444679, 234928, 444694.

Figura 20.

Vista aérea del Tramo D



Figura 20. Tramo D, Av. Gaitán Cortés, sentido sur norte. Google Earth. (2020). [Avenida Jorge Gaitán Cortés]. Recuperado el 03 de junio de 2020 de <https://earth.google.com/web/@4.58096975,-74.15393653,2563.09245202a,308.33851121d,35y,0h,0t,0r>

Seguimiento del tramo A

Ante la extensa área de afectación de la vía en años anteriores, el tramo A fue seleccionado como objeto de estudio. Dadas las condiciones del nivel de servicio del pavimento al usuario, se realiza en cada seguimiento la aplicación del método observacional con el fin de

evaluar el estado superficial del pavimento. Para un mejor entendimiento se explica de la siguiente manera:

Tabla 11.

Descripción general del estado superficial del pavimento en el tramo vial A

Año	Descripción	Registro fotográfico
2018	En ese año, no se realizaban actividades de mantenimiento ni rehabilitación con constancia desde la construcción de la vía, por lo que se observaba una evolución avanzada de los daños, en donde, las zonas de mayor afectación se localizan en los paraderos de buses y zonas de frenado intenso.	
2019	Con la incorporación del tránsito de buses articulados y biarticulados, se dio inicio a un programa de intervención de obras nocturnas por medio de tratamientos de rehabilitación en deterioros con mayor evolución. Sin embargo, aún se observaban daños en por retención de agua y, además, en las zonas de frenado, baches como producto de evolución de piel de cocodrilo.	
2020	Pese a la serie de intervenciones realizadas en el año anterior y su continuación en el actual, aún se registraban algunos daños antiguos y deterioros precedentes de los tratamientos de rehabilitación.	

Nota: Descripción general del tramo A por medio de la evaluación superficial del pavimento durante los años 2018, 2019 y 2020, en donde, se evidencian la evolución de algunos daños y, además, las intervenciones realizadas por parte de la Unidad de Mantenimiento Vial y la alcaldía de Bogotá, D.C, Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020).

Como se mencionó anteriormente, la etapa preliminar se inició con un seguimiento visual en el tramo No. 1 desde el año 2018 hasta el año 2020, en el que se evidencia un registro fotográfico con su respectiva categorización de daños presentados de acuerdo al *Manual para la Inspección de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006). Con todos los datos e información recopilada se crea una tabla en Excel representada en el Anexo C.

Base de Datos

Con la recopilación y depuración de información en un cuadro de Excel explicado en el capítulo anterior y en el Anexo C, con toda la información obtenida a lo largo del proyecto, se realiza una base de datos en ArcGis (ArcMap), en donde, se muestra de manera muy concisa y clara la zonificación de antecedentes, identificación de daños e información recopilada y depurada de alternativas de aditivos para posibles recomendaciones de mantenimiento y rehabilitación en pavimentos flexibles.

Para mayor entendimiento de los procesamientos realizados por medio de los programas de tratamiento de datos, se explican a continuación los fundamentos teóricos:

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Son aquellos sistemas de almacenamiento de datos espaciales para consulta, manipulación y representación.

Por lo consiguiente, *SIG* se puede definir bajo el concepto de un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es tanto un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos georreferenciados, como un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos. En cierto modo, un SIG es un mapa de orden superior. (Star & Estes, 1990, p. 20)

Por otra parte, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitan el manejo y la manipulación de componentes de un mapa, asimismo, permite vincular un elemento con información alfanumérica relacionada. De esta manera, el registro de la base de datos se realiza con respecto a los atributos correspondientes a un objeto del modelo, mejorando la recuperación y mantenimiento de datos con agilidad, precisión y economía. Los modelos obtenidos pueden

ser evaluados y aprovechados en la creación de múltiples escenarios a medida que se alteran las variables.

Para el procesamiento y tratamiento de SIG se emplea la plataforma ArcGis como representación del manejo de datos por medio del componente ArcMap 10.6, en donde, se visualiza y explora los dataset SIG, dando la posibilidad de crearlos y editarlos mediante la asignación de simbologías y diseños aptos para la ilustración, desarrollo y publicación de mapas informativos. En términos generales, ArcMap representa la información georreferenciada como una colección de capas y muchos más elementos en un solo mapa.

La depuración y almacenamiento de datos obtenidos en campo por medio de la medición y determinación del deterioro en el software ArcGis, facilita el manejo de la información recolectada, de tal manera que se evidencie la ubicación del daño con sus respectivas coordenadas a través del tratamiento de datos de variable continua, tipo ráster, obtenidos a partir de las fotografías de cada deterioro presentado en el tramo vial, para así ejecutar la distinción del daño mediante la banda de colores RGB, por esta razón, las imágenes se trabajan en formato JPG (Joint Photographic Experts Group) con datos espaciales asignados a su respectiva coordenada y sistema de referencia.

En cuanto a la representación espacial de los daños en la base de datos, se realiza el procesamiento de datos tipo vector a través de puntos, líneas, polígonos, entre otros, como simbolización real de los baches o hundimientos presentados en el tramo vial analizado. Dicha representación es obtenida por medio de la identificación, ubicación y descripción de cada daño.

Para finalizar, el presente estudio también se basa en la utilización de Google Earth, como una herramienta informática en la que se visualiza el globo terráqueo, en donde, se

permite observar la cartografía diseñada a base de la fotografía satelital. Por medio de este programa se adquiere la ubicación de los daños a través de cada imagen obtenida en el trabajo de campo con sus respectivas coordenadas geográficas WGS 84 (World Geodetic System 1984), las cuales parten de un punto de posición en la cartografía, con el fin de insertar datos georreferenciados en la plataforma ArcGis. Como método de conversión de coordenadas se implementa la utilización de Global Mapper, una herramienta que viabiliza el proyecto con la transformación de coordenadas geográficas WGS 84 (World Geodetic System 1984) a coordenadas planas del sistema de referencia oficial de Colombia, “MAGNA-SIRGAS (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas)” (IGAC, 2018, p. 01), como técnica de posicionamiento compatible a las coordenadas colombianas.

La utilización de MAGNA- SIRGAS se relaciona con el concepto de “una superficie de referencia vertical (geoide) que permite obtener alturas clásicas (referencias al nivel medio del mar) a partir de información GPS” (IGAC, 2018, p. 01), trabajando así con el sistema MAGNA- SIRGAS Colombia Bogotá Zone en la aplicación de los datos a ArcMap 10.6.

Desarrollo de la base de datos

Para el almacenamiento, organización y procesamiento de datos en el software ArcMap 10.6 se da seguimiento a una ruta metodológica expuesta a en la siguiente hoja.

Las categorizaciones procesadas por el software se pueden visualizar en los Anexos E y F, sin embargo, se presentan algunos modelos de categorización del tramo A de 2020 a partir de la página 130.

Tabla 12.

Desarrollo metodológico de la estructuración de la base de datos

Objetivo Específico	Actividad	Descripción	Actores
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Conexión de datos tipo vector	Se realiza la conexión de datos de un archivo de Excel tipo .csv con los daños procesados, designando de esta manera las coordenadas X, Y para su procedente exportación a shapefile.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Creación de Geodatabase	Se crea un una File Geodatabase para la incorporación de archivos correspondientes a cada tramo	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Ajuste de datos	En la tabla de atributos de cada tramo se realiza un ajuste de datos para modificar especificaciones y hallar el área de cada daño directamente en el programa	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Incorporación de archivos tipo ráster	Se adjuntan las imágenes correspondientes a cada daño	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Georreferenciación de daños	Para una mayor visualización del tramo vial se georreferencian imágenes de alta resolución extraídas de Mapas Bogotá.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.
Construcción de base de datos para zonificación del tramo vial	Categorización de daños	Según los elementos establecidos en la tabla de atributos se categorizan mediante la simbología de los daños por tipo, severidad, área de afectación, tipo de intervención y recomendación.	Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M. L.

Nota: Metodología realizada para la construcción de la base de datos. Cogollos Franco A. G., & Martínez Rodríguez M. L., (2020).

Figura 21.

Ubicación de daños en el tramo A con sus respectivas descripciones



Figura 21. Visualización de la ubicación de los daños en el tramo A con su descripción y registro fotográfico. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Figura 22.

Zonificación de los tipos de daños ubicados en el Tramo A

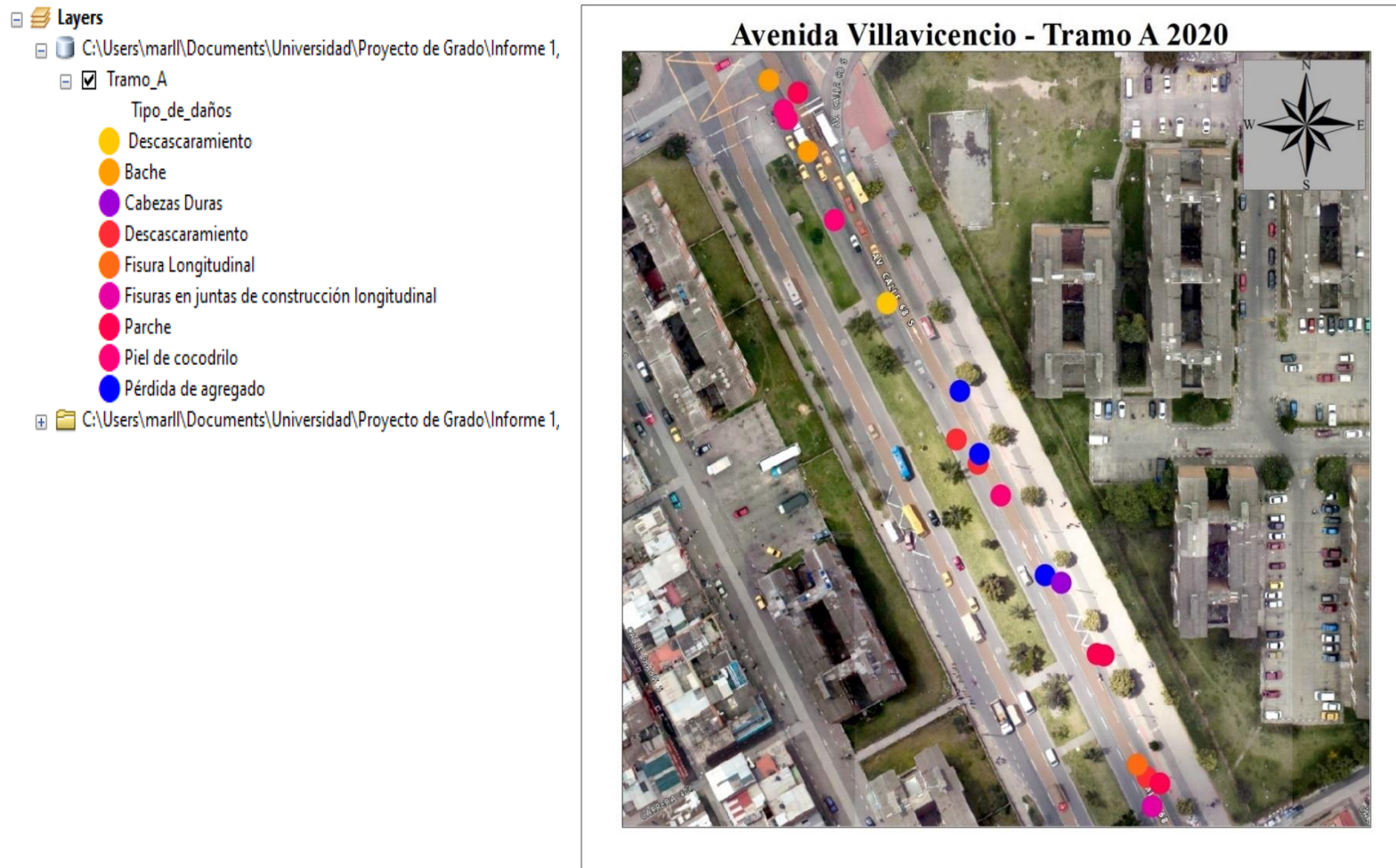


Figura 22. Zonificación realizada con la categorización del tipo de daño mediante una gama de colores en el tramo vial A. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Figura 23.

Zonificación de daños con su respectiva evolución probable



Figura 23. Zonificación realizada con la categorización del tipo de daño presentando una gama de colores de acuerdo a la severidad y evolución probable del mismo. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Figura 24.

Zonificación de daños con respecto a la categoría y severidad

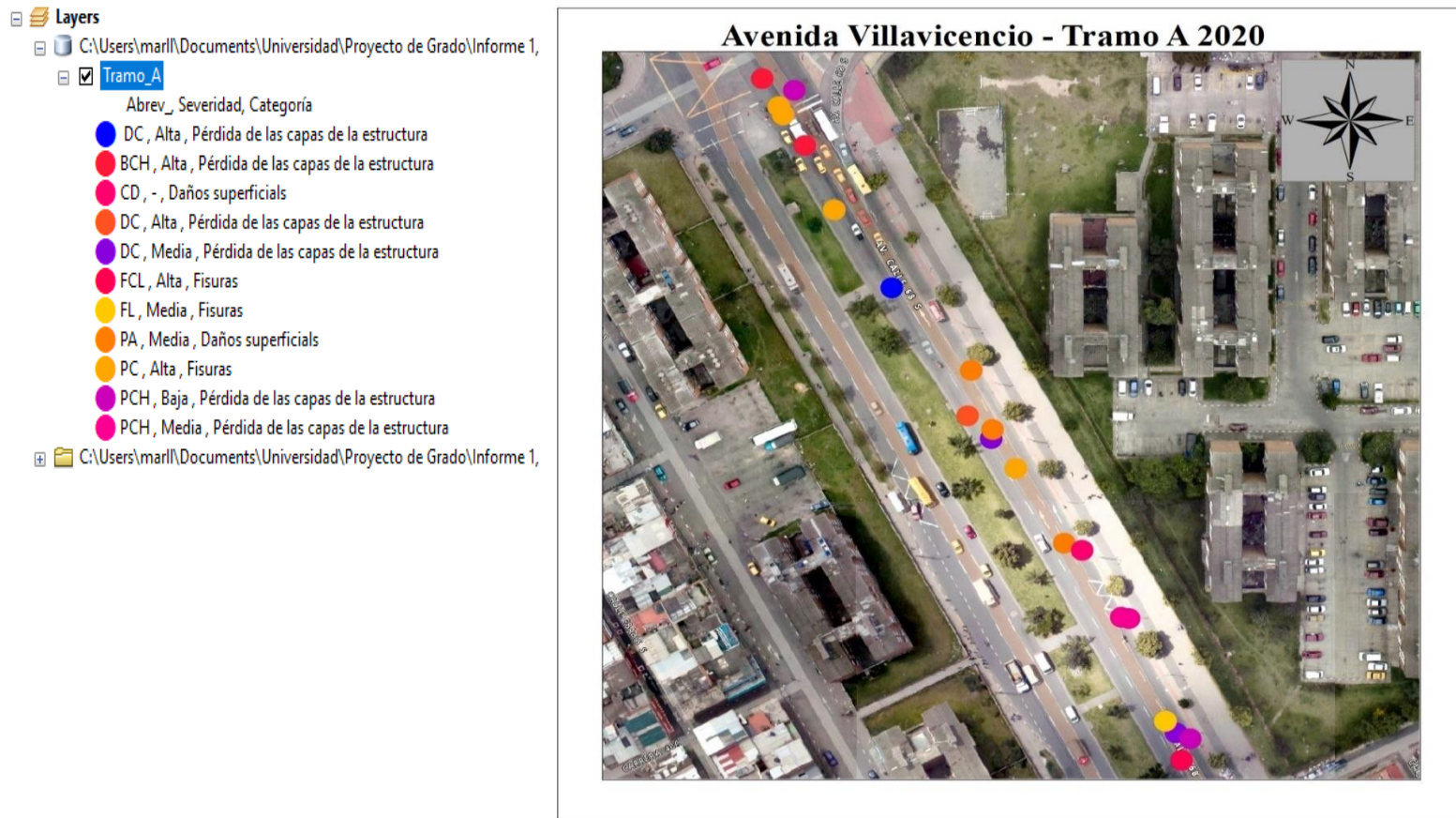


Figura 24. Zonificación de los tipos de daños visualizados en el tramo vial con sus respectivas categorías y severidades representadas en una gama de colores. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Figura 25.

Zonificación de daños según el tipo de intervención requerida y recomendación de aditivos

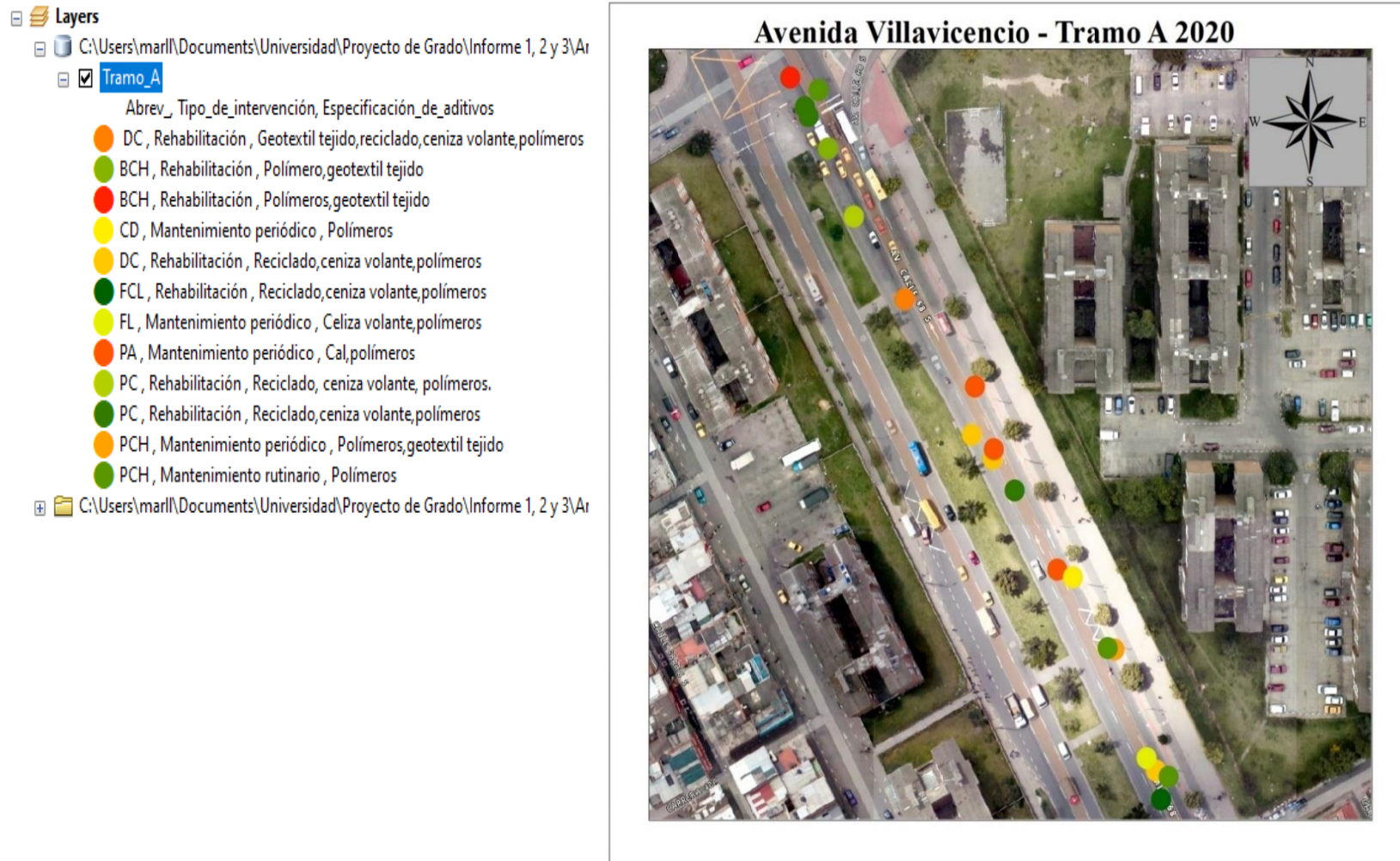


Figura 25. Zonificación de los daños presentados a lo largo del tramo vial con colores indicativos de acuerdo al tipo, intervención y aditivo recomendado. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Desarrollo y Resultados

Con base al *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006), se determinan variables del tipo cualitativo obtenidas del método observacional no experimental. En el Anexo C se especifican dichas variables designadas por tipo de daño, categoría, localización, medición, severidad y descripción.

En primera instancia, con los datos recolectados en las vías se determina la patología del daño y a su vez, abreviatura y categoría conforme a lo estructurado por el Manual INVIAS (2006). Seguido de esto, se geolocaliza el daño con la utilización de un GPS empleado en campo, se manejan los datos de medición y se obtiene el área de cada daño con su respectiva área de reparación, cabe aclarar que el ancho y el largo del daño se miden de acuerdo al eje vial del tramo (el largo se dimensiona según el sentido de la vía y el ancho perpendicular a este).






Con dependencia de la medición del deterioro se determina la severidad junto con una hipótesis explicativa de la descripción del daño observado, dando lugar al análisis de la actividad de intervención requerida en la falla funcional con respecto a la conceptualización fundamentada en el Anexo B.





Finalmente, cada deterioro ubicado en la tabla del Anexo C tiene adjunto el registro fotográfico como toma de evidencia de las visitas a la zona. Además, cada numeración del daño contribuye a la organización de datos procesados en el software ArcMap.







De esta manera, por medio de la comparación de la evolución o intervención generada en el deterioro durante el seguimiento del tramo vial A de la Avenida Villavicencio se realiza la siguiente tabla:






Tabla 13.





Seguimiento y control de deterioros








Evolución de daños durante el seguimiento			
Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020
Registro Fotográfico		-	
Descripción	1 Se evidencia un bache de severidad alta con rellenos leves de escombros y desechos. Este deterioro es generado por el aumento de esfuerzos de tracción provocados por el giro de vehículos	-	Se evidencia la evolución del bache en dos años con presencia de hundimientos leves y aumento de los rellenos de escombros y desechos, como técnica de usuarios para evitar fuertes desniveles de la vía.
Registro Fotográfico			
Descripción	2 Bache de alta severidad con acumulación e infiltración de agua y desechos. Este deterioro es producto de la evolución de una piel de cocodrilo a un descascamiento que afectó las demás capas.	Se observan evidencias de una reparación deficiente que da lugar a una propagación de un patrón de fisuras preexistentes hasta generar una piel de cocodrilo.	Evolución de piel de cocodrilo con aumento de desportillamientos y definición de polígonos. Además, posee indicios de descascamiento.

Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020	
Registro Fotográfico			-	
Descripción	3	<p>Bache de media severidad provocado por la evolución de un descascamiento. Se observa acumulación de escombros, infiltración de agua y contigüidad con una intervención de reparación de daño con excedente de material asfáltico</p>	<p>Se visualiza intervención previa para la señalización de la vía con malas ejecuciones, que provocó un aumento y reflexión del deterioro del año anterior</p>	-
Registro Fotográfico			-	
Descripción	4	<p>Bache de media severidad provocado por la evolución de un descascamiento. Se observa infiltración y empozamiento de agua, relleno de desechos y drenaje inadecuado en el tramo vial</p>	<p>Se visualiza intervención de la vía con defectuosa ejecución que provoca un aumento, reflexión del deterioro del año anterior y fisuramientos contiguos</p>	-

Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020	
Registro Fotográfico				
Descripción	5	Este bache posiblemente es ocasionado por sobreesfuerzos generados en la acumulación de cargas en periodos de tiempo extensos (designados por el control de tráfico). Se evidencia rellenos de desechos y escombros	Este daño es la evolución del bache con descascaramientos en los bordes y excesiva acumulación de escombros, dando lugar al aumento del área del mismo.	Se evidencia una manifestación severa del daño, ampliando el área de deterioro y relleno de escombros. Se observan pérdidas de agregado entorno al bache.
Registro Fotográfico				
Descripción	6	Piel de cocodrilo generada por acumulación de cargas y aumento de tensiones internas en el asfalto. Es el claro resultado de la evolución de ahuellamiento de severidad baja y pérdida de agregado	Se evidencia cambios mínimos por desprendimiento de agregados y aumento de desportillamientos	Se observan fisuras bien definidas con alto grado de desportillamientos y aumento del área de deterioro.

Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020
Registro Fotográfico			
Descripción	<p>7</p> <p>Desintegración avanzada de la carpeta asfáltica; se genera por el frenado abrupto producido constantemente por el estacionamiento de buses de transporte público. Se evidencian múltiples daños internos a lo largo del deterioro total</p>	<p>Se evidencia intervención de rehabilitación en la zona con tratamientos superficiales, bacheos parciales y fresado.</p>	<p>Por deficiencia del ligante se generan pérdidas de agregado en la superficie con posibilidad de evolución en descascaramientos (los más frecuentes en la zona); el desgaste de la superficie se ha producido en un corto periodo de tiempo (aprox. 5 meses)</p>
Registro Fotográfico	-		
Descripción	-	<p>8</p> <p>Descascaramiento producido por la evolución severa de una de fisura piel de cocodrilo a causa de la infiltración de agua por las fisuras anteriores</p>	<p>Descascaramiento avanzado en un periodo de tiempo por la acumulación e infiltración de agua dentro de las fisuras existentes de piel de cocodrilo.</p>

Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020
Registro Fotográfico			-
Descripción	<p>9 Se evidencia un reemplazo en la zona como método de rehabilitación superficial para reparación de daños, el cual se ha visto afectado por la propagación preexistente de fisuras de piel de cocodrilo debido a un deficiente proceso constructivo</p>		-
Registro Fotográfico			-
Descripción	<p>10 Parche con patrones fisuramiento interno de alta severidad y contigüidad de descascaramientos a causa de un deficiente proceso constructivo e insuficiente mantenimiento.</p>		-
	<p>Evolución o propagación preexistente de fisuras de piel de cocodrilo de alta severidad con descascaramientos leves a causa de un deficiente proceso constructivo.</p>		





Daño	Tramo A 2018	Tramo A 2019	Tramo A 2020
Registro Fotográfico			
Descripción	1 Fisura longitudinal de alta severidad con posible presencia de descascaramientos.	Descascaramiento producido por la evolución severa de la fisura longitudinal con pérdida de agregados entorno al daño.	Crecimiento severo del descascaramiento existente durante un corto periodo de tiempo.
Registro Fotográfico			-
Descripción	2 Piel de cocodrilo generada por la evolución severa de una fisura en junta de construcción longitudinal efectuada por la acción del tránsito.	Evolución de piel de cocodrilo con desportillamientos, definición de polígonos angulares e indicios de descascaramiento efectuados por la acción del tránsito.	-
Registro Fotográfico	-		
Descripción	-	3 Se observa el parche en condiciones aceptables. No obstante, se evidencian indicios de fisuramientos perimetrales al parche y pérdida de agregados.	Se evidencia en el parche evolución y propagación preexistente de fisuras y descascaramiento interno de severidad baja.

Nota: Tabla de argumento comparativo de la zona deteriorada durante tres periodos de tiempo (2018,2019,2020). Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020)









Mediante el seguimiento consecutivo de los tramos viales se desarrolla un argumento comparativo a razón de la transición del deterioro durante el estado de reparación por orden del Distrito, el objeto de dicha trazabilidad se basaba en la comparación del daño previo a la actividad de intervención. Se observó en los tramos A y B de la Avenida Ciudad de Villavicencio un método de intervención superficial con una serie de parcheos temporales de calzada; asociados a deficiencias evidentes en la reparación de la mayor parte de estos. Dicho argumento se interpreta a través la siguiente tabla:

Tabla 14.

Seguimiento de reparaciones

Daños intervenidos en el Tramo A 2020		
Daño	01/03/2020	8/03/2020
<p>Registro Fotográfico</p> <p style="text-align: center;">1</p>		
<p>Descripción</p>	<p>Se evidencia parche en estado aceptable como producto de rehabilitación de daños altamente deteriorados</p>	<p>Se evidencia un proceso de parcheo en la calzada como técnica de rehabilitación con una superposición a un parche existente.</p>
<p>Registro Fotográfico</p> <p style="text-align: center;">2</p>		
<p>Descripción</p>	<p>Fisuras perimetrales de severidad alta, como producto de un déficit en proceso constructivo o propagación de fisuras preexistentes</p>	<p>Se visualiza un parcheo temporal como técnica de cobertura al fisuramiento anteriormente visto. Por otro lado, se evidencian residuos asfálticos entorno al parche.</p>

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA
RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

Daño	01/03/2020	8/03/2020
Registro Fotográfico		
Descripción	3 Evolución de pérdida de agregados en la carpeta con evidentes desportillamientos que generaron el descascaramiento de la capa de rodadura.	Se evidencia un proceso de parcheo temporal de la calzada con un porcentaje considerable de residuos de material asfáltico en torno a la reparación.
Registro Fotográfico		
Descripción	4 Piel de cocodrilo de alta severidad con posibles indicios de descascaramiento.	Se evidencia un proceso de parcheo temporal de la calzada con residuos de material asfáltico alrededor del parche.
Registro Fotográfico		
Descripción	5 Se evidencia un deterioro presentado con terminación en descascaramiento a causa de espesor de carpeta insuficiente, infiltración de agua por la fisura y/o ligantes envejecidos.	Relleno superficial del descascaramiento con material residual de la mezcla asfáltica.
Registro Fotográfico		
Descripción	6 Piel de cocodrilo de severidad alta con indicio de descascaramiento y presencia de fisuras perimetrales.	Relleno superficial del descascaramiento con material residual de la mezcla asfáltica.

Nota: Argumento comparativo con respecto a las reparaciones realizadas durante una semana en los tramos A y B de la Avenida Villavicencio. Cogollos Franco A.G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020).

De acuerdo a la inspección visual realizada en el pavimento, se calcula la cantidad de daños de acuerdo a las variables de categoría, tramo vial y número de deterioros registrados en cada vía como objeto de determinación de la frecuencia de los daños presentados en la zona de estudio.

Tabla 15.

Frecuencia de daños

Máximo de daños presentados en cada tramo		
Tramo	Tipo de daño	Número de Daños
A 2018	Descascaramiento	10
A 2019	Parche	20
A 2020	Parche, Descascaramiento, Piel de cocodrilo	4
B 2020	Parche	3
C 2020	Fisura en reflexión de juntas	5
D 2020	Fisura en reflexión de juntas	9

Nota: Daños de mayor frecuencia en la zona según el año de inspección y el tramo vial. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020)

Partiendo del análisis de daños frecuentes, se estudian las patologías presentadas a lo largo del seguimiento y control efectuado durante los años 2018, 2019 y 2020 como forma de interpretación del daño de mayor manifestación en el tramo A de la Avenida Villavicencio.

El tramo A, de igual forma se toma como método de estudio debido a la recolección de datos obtenidos durante el periodo de tiempo mencionado. Por esta razón, se realiza un análisis de variables de tipo cuantitativo a fin de obtener el daño de mayor frecuencia presentado a lo largo del segmento vial; como resultado se obtiene el parcheo. Dicho proceso de reparación es considerado como un deterioro efectuado mediante la recuperación del área afectada, generada por un daño evolucionado. No obstante, el parcheo como se indicó anteriormente, ha sido

objeto de intervención de un deterioro, por ende, el daño causante de dicha actividad se deduce en la manifestación de fisuras longitudinales y en juntas de construcción con patrones de fisuramientos evolucionados en piel de cocodrilo que en consecuencia conllevan a un descascaramiento severo con requerimientos de rehabilitación; estos deterioros son causados principalmente por la acción del tránsito y procesos constructivos o reparaciones deficientes de la vía. Dicho análisis es procedente de la representación gráfica expuesta en la parte posterior.

Figura 26.

Daños presentados en el tramo vial A

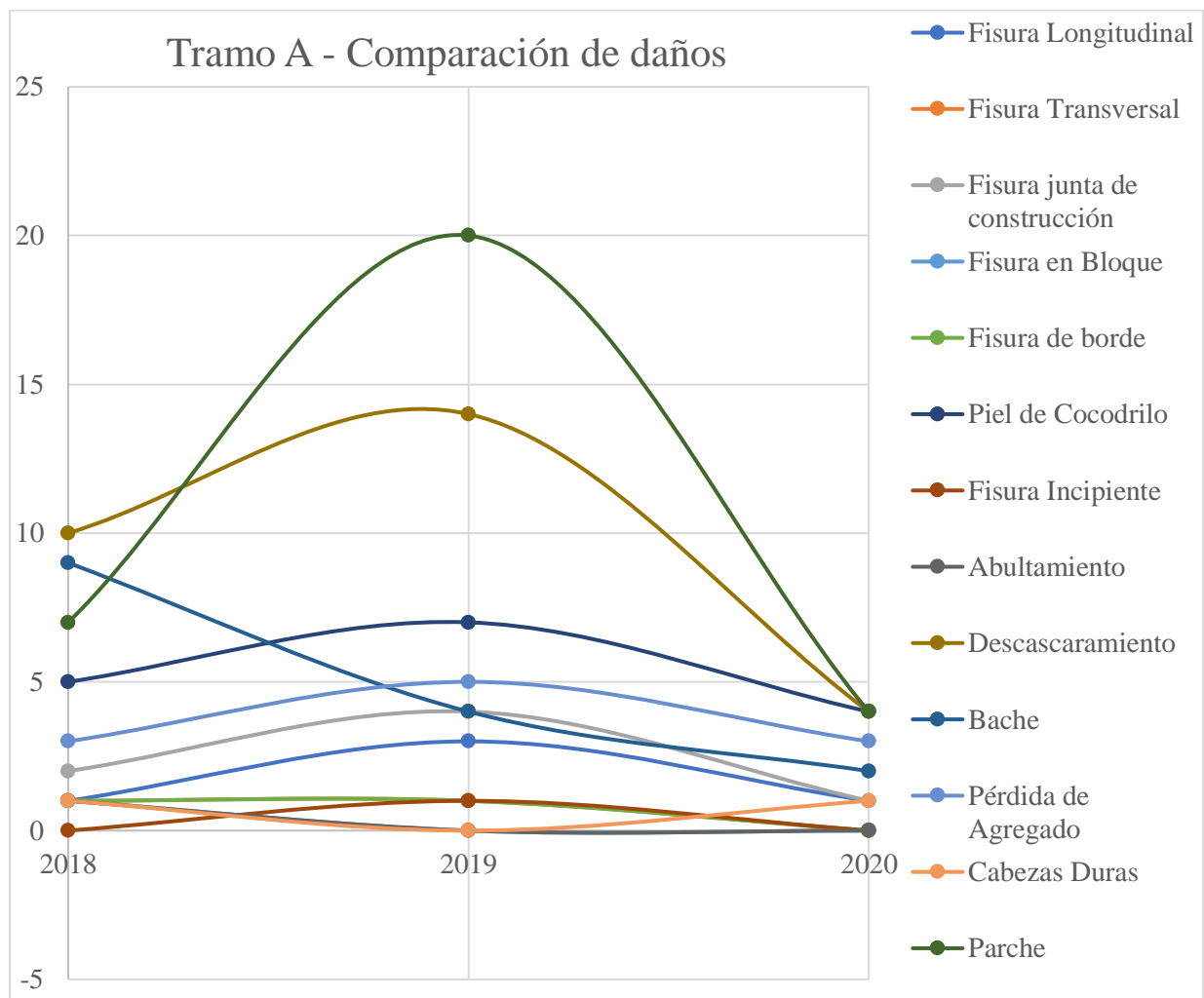


Figura 26. Representación gráfica de la manifestación de daños en el tramo A según el tipo y el año de inspección visual. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020)

El tramo A como objeto principal de estudio, evidenció en el año 2018 un requerimiento de reconstrucción para remoción y reemplazo de las capas, según el análisis hipotético-deductivo realizado a causa de la frecuencia de deterioros de tipo piel de cocodrilo, bache y descascaramiento. Sin embargo, las intervenciones observadas durante el seguimiento, se efectuaron superficialmente por medio de restauraciones y refuerzos, como técnica para evitar problemas de movilidad y a su vez, el aumento del presupuesto que generaba el cierre parcial del tramo vial a razón del alto volumen de tráfico frecuentado en la zona.

El área de afectación de un pavimento es la diferencia del área de cada daño con respecto al área total de deterioros en cada tramo, dicha área indica el porcentaje de la zona total deteriorada con respecto al área total del tramo vial seleccionado. Las tablas que comprenden el análisis mencionado se visualizan en el Anexo D. Sin embargo, por medio de la tabla posterior se obtienen los valores de afectación según el tramo.

Tabla 16.

Porcentaje de afectación de cada tramo

Porcentaje de Áreas con respecto a cada tramo				
	Tramo A	Tramo B	Tramo C	Tramo D
Área total de afectación (m²)	356,32	36,60	91,96	108,87
Área aproximada de cada tramo (m²)	2655,98	2778,75	1417,00	2593,50
Porcentaje con respecto al área total del tramo (%)	13%	1%	6%	4%

Nota: Total de áreas especificadas en cada tramo vial. Anexo D. Cogollos Franco A. G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Dado el porcentaje total de afectación de los deterioros con respecto al área del tramo correspondiente, se descarta la posibilidad del cierre parcial de la vía y se observa la viabilidad de intervención de acuerdo al área de reparación registrada.

Tanto en la Avenida Ciudad de Villavicencio como en la Avenida Jorge Gaitán Cortés, se presentan patologías como producto de la humedad ocasionada por la vegetación contigua y la deficiencia del sistema de drenaje y alcantarillado. Por esta razón, la afectación en algunas zonas es de tipo estructural, sin embargo, para realizar una remoción de capas se requiere del cierre total del tramo lo que afecta la movilidad y economía de la vía.

Al analizar la tabla 16, se establece el tramo A como el segmento de mayor afectación con respecto a los demás tramos, adicionalmente, se determina el área requerida para la actividad de intervención de cada uno, visualizada en el Anexo C.

Figura 27.

Porcentaje de afectación

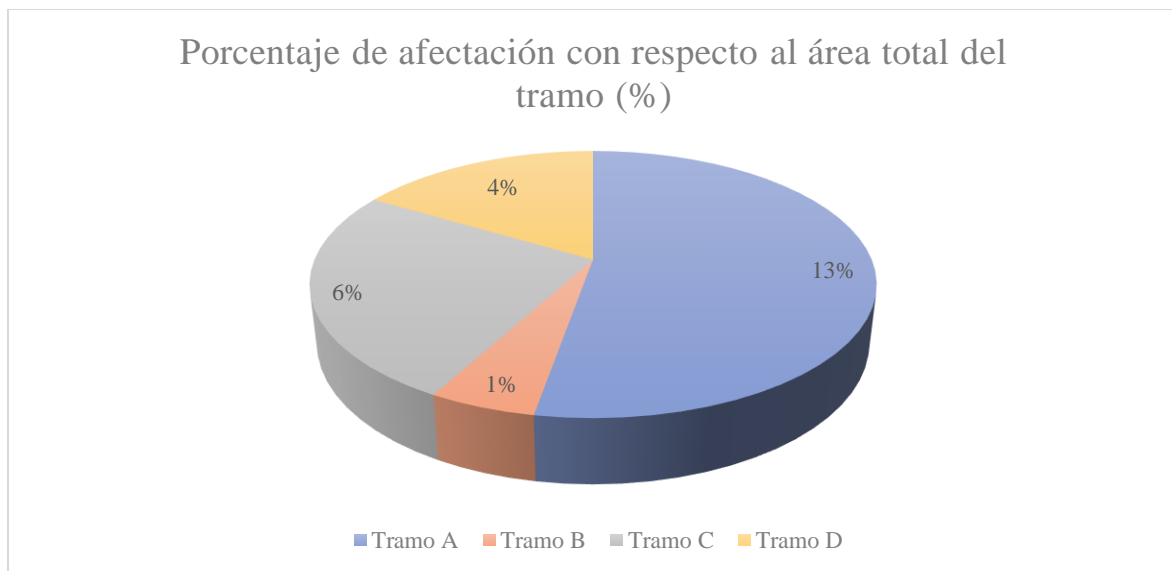


Figura 27. Representación gráfica de los porcentajes de afectación de cada tramo con respecto al área total del segmento vial. Cogollos Franco A. G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020).

Una vez obtenidas las áreas de afectación se determinan las actividades de intervención con respecto a las mismas. Para el análisis se elabora la siguiente gráfica:

Figura 28.

Actividad de intervención efectuada según el área de afectación

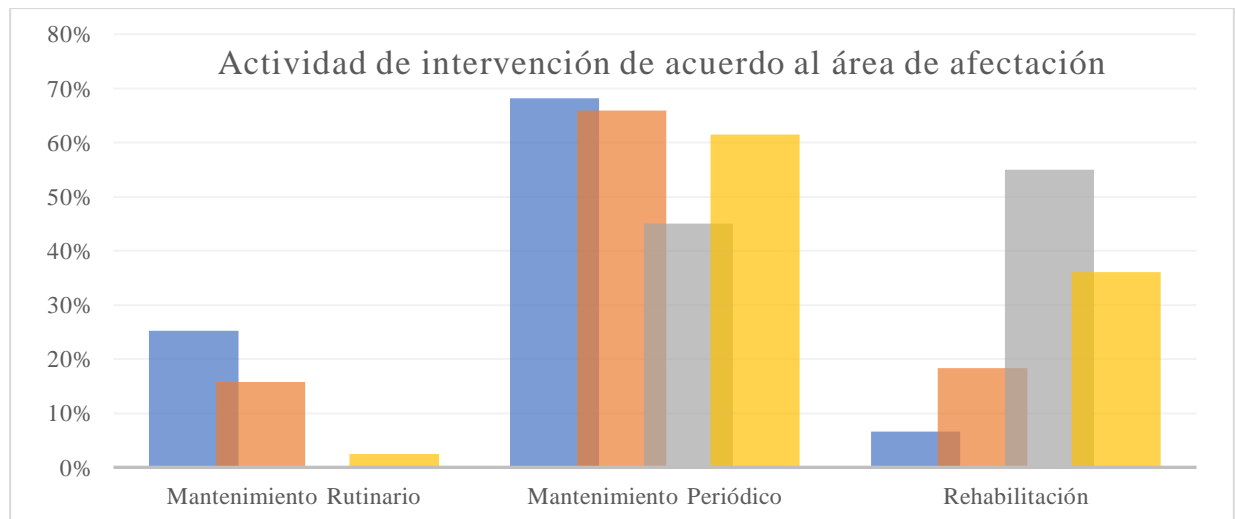


Figura 28. Porcentaje de actividades de intervención con respecto al área afectada. Cogollos Franco A. G., & Martínez Rodríguez M.L., (2020).

Dada la gráfica anterior, se determina el mantenimiento periódico como actividad de mayor frecuencia en los tramos A y B correspondientes a la Avenida Villavicencio, a diferencia de los tramos C y D de la Avenida Jorge Gaitán Cortés cuya intervención necesaria es una rehabilitación y mantenimiento periódico, debido a la baja constancia del mantenimiento efectuado en la zona, por esta razón, en la actualidad diversos usuarios utilizan recursos como cojines o desechos para la amortiguación del impacto generado entre la llanta y el pavimento. Todas las tablas se evidencian en Anexo D.

Con la inspección visual realizada, se observó en la Avenida Ciudad de Villavicencio una estructura de pavimento flexible con bajas condiciones de drenaje pluvial y deterioros considerables, causados por el alto volumen de tráfico y deficiencias constructivas; principalmente en la compactación de parcheos y juntas de construcción. Por otro lado, la

Avenida Jorge Gaitán Cortés se compone por una estructura semi-rígida debido a la optimización realizada en la vía para generar una transición de malla local a malla arterial de tipo complementaria, por esta razón, este pavimento está constituido por una capa de concreto hidráulico subyacente de la carpeta asfáltica. Dicha hipótesis se deduce del análisis de daños registrados en los tramos C y D a causa de una proyección de fisuramientos internos de las placas de concreto reflejados en la superficie asfáltica. (INVIAS, 2006)

Para la selección de aditivos se realizó una tabla descriptiva, la cual se evidencia en la siguiente página.

Tabla 17.

Aditivos aplicados según el tipo de daño

Tipo de daño	Posibles causas	Reciclado			Ceniza Volante	Polímeros		Cal	Geotextiles	
		En planta caliente	Superficial en caliente en el sitio	Reciclado en frío en el sitio		Plastómeros	Elastómeros		Tejidos	No tejidos
Fisura Longitudinal	Fatiga, alta rigidización, ligantes envejecidos, reflexión de grietas				x		x			
Fisura Transversal	Fatiga, alta rigidización, ligantes envejecidos, reflexión de grietas				x		x			
Fisuras en juntas de construcción longitudinal	Mala ejecución de juntas de construcción, deficiencia de ligantes, carencia de compactación, mezcla de materiales de diferente rigidez	x	x		x		x			
Fisuras en juntas de construcción transversal	Mala ejecución de juntas de construcción, deficiencia de ligantes, carencia de compactación, mezcla de diferente material	x		x	x		x			

Tipo de daño	Posibles causas	Reciclado			Ceniza Volante	Polímeros		Cal	Geotextiles	
		En planta caliente	Superficial en caliente en el sitio	Reciclado en frío en el sitio		Plastómeros	Elastómeros		Tejidos	No Tejidos
Fisura en Bloque	Contracción de concreto asfáltico, susceptibilidad térmica, rigidez, endurecimiento	x		x	x		x	x	x	
Fisura de borde	Cargas de tránsito, carencia de bordillos, condiciones climáticas							x	x	
Piel de Cocodrilo	Cargas de tránsito, Espesor deficiente capa asfáltica, envejecimiento, permeable, rigidez frágil, compactación deficiente	x		x	x	x	x		x 1-2	
Fisura Incipiente	Susceptibilidad térmica, deficiencia de puesta en obra				x	x		x		
Abultamiento	Baja resistencia a la tracción	x	x			x			x	
Hundimiento	Tráfico pesado, materiales, permeable	x	x		x					x

Tipo de daño	Posibles causas	Reciclado			Ceniza Volante	Polímeros			Geotextiles	
		En planta caliente	Superficial en caliente en el sitio	Reciclado en frío en el sitio		Plastómeros	Elastómeros	Cal	Tejidos	No tejidos
Descascaramiento	Espesor insuficiente CA, baja adhesividad y adherencia, permeable, riego deficiente		x		x	x				
Bache	Permeable, baja resistencia a esfuerzos externos					x		x		
Parche	Deficiencia de juntas, preexistencia de los daños					x			x	
Desgaste Superficial	Tránsito, adherencia, clima, permeable, deficiencia en dosificación de mezcla asfáltica y agregados	x	x			x	x	x		
Pérdida de Agregado	Envejecimiento, baja adhesión y adherencia, compactación deficiente y oxidación	x	x			x	x	x		

Tipo de daño	Posibles causas	Reciclado			Ceniza Volante	Polímeros		Geotextiles		
		En planta caliente	Superficial en caliente en el sitio	Reciclado en frío en el sitio		Plastómeros	Elastómeros	Cal	Tejidos	No tejidos
Fisura por Reflexión de Juntas	Susceptibilidad térmica, movimiento entre capas	x		x	x	x		x		
Cabezas Duras	Tamaño inapropiado de agregados, granulometría continua						x			
Alcantarillado	Permeable, baja resistencia a esfuerzos de construcción, incompatibilidad de materiales				x		x	x		x

Nota: En la mezcla asfáltica se realiza una incorporación de cal y ceniza volante a la mezcla, modificación de asfalto con polímeros o repavimentación con geotextiles según el aditivo seleccionado. Tabla de clasificación de aditivos de acuerdo al tipo de daño y sus requerimientos. Los geotextiles con asignación x 1-2, determinan su utilización solo en daños de severidad baja y media. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020). Comparación del método de reciclado efectuado según los tipos de daños. Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2002). Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras (Instituto Nacional de Vías, Vol. 1). Instituto Nacional de Vías.

La tabla anterior se realiza con el fin de identificar y recomendar la implementación del aditivo por medio de una metodología hipotético-deductiva generada por el análisis de la formulación de dos variables dependientes y una independiente para determinar el tipo de aditivo (variable independiente) según el tipo de daño y sus posibles causas (variables dependientes)

Con la realización de la metodología anterior se obtiene el procesamiento de los datos para un conteo posterior utilizado como objeto del análisis e interpretación deductiva del aditivo con propiedades de mayor compatibilidad a las condiciones superficiales de la vía y los daños frecuentados en los tramos viales de estudio.

Tabla 18.

Aditivos recomendados según el tipo de daño

Aditivos de mayor uso según los daños registrados				
Aditivo	Tramo A	Tramo B	Tramo C	Tramo D
Polímeros	20	9	10	25
Reciclado	8	3	5	16
Geotextiles	4	2	8	22
Ceniza Volante	10	4	9	34
Cal hidratada	3	2	7	23
Total de daños registrados	20	9	16	40

Nota: Conteo de aditivos presentados con mayor frecuencia en los daños registrados. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020).

Para mayor entendimiento se evidencia el conteo mediante la representación gráfica de la siguiente página.

Figura 29.

Uso de aditivos según los daños registrados

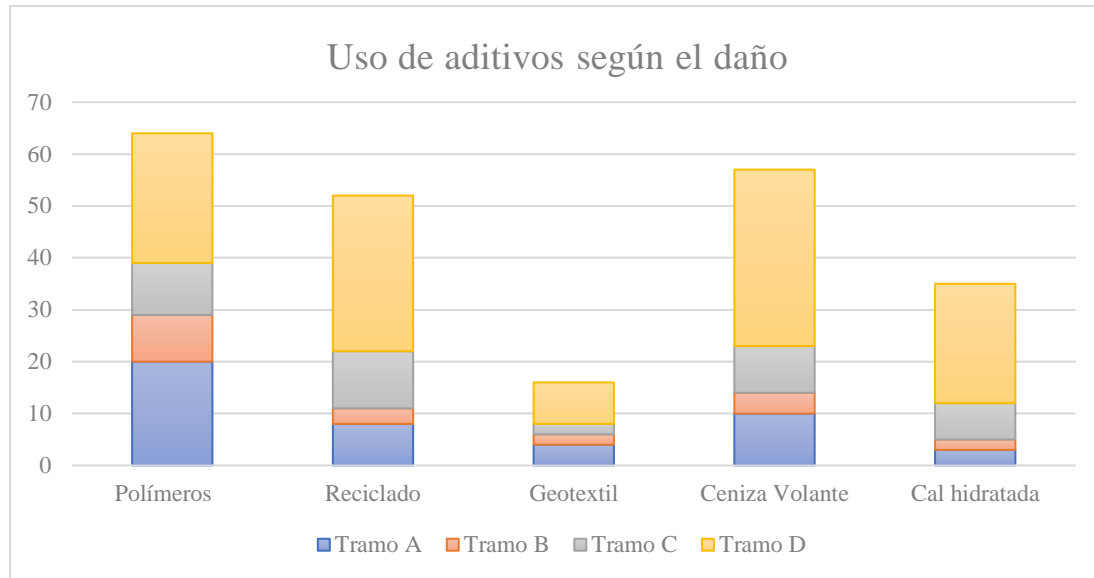


Figura 29. Frecuencia de aditivos recomendados en los tamos viales del año 2020. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020)

La demostración de la hipótesis planteada se representa en valores de porcentaje como técnica de visualización y elección directa de la incorporación de aditivos de mayor viabilidad, obteniendo como resultado los polímeros para los tramos A, B y C y, ceniza volante para el tramo D.

Tabla 19.

Frecuencia de aditivos usados por tramos en porcentaje

Representación de uso de aditivos en porcentaje				
	Tramo A	Tramo B	Tramo C	Tramo D
Polímeros	100%	100%	63%	63%
Reciclado	40%	33%	69%	75%
Geotextil	20%	22%	13%	20%
Ceniza Volante	50%	44%	56%	85%
Cal hidratada	15%	22%	44%	58%

Nota: Representación del porcentaje del aditivo con respecto al total de daños identificados. Cogollos Franco, A. G., & Martínez Rodríguez, M. L. (2020).

Con el resultado obtenido se puede interpretar la viabilidad del polímero en la Avenida Villavicencio, esta vía de alto tráfico vehicular tiene deficiencias en los procesos constructivos y en el sistema de drenaje pluvial, además, pese a las recientes actividades de intervención, la manifestación de patrones de fisuras se expondrá en un corto periodo de tiempo como se observó en el seguimiento realizado. Por ende, al realizar futuros modelos empíricos, probablemente determinarán mediante el análisis de costo-durabilidad la reducción de actividades de intervención y el mejoramiento de la resistencia ante las cargas aplicadas constantemente.

Por otra parte, dadas las condiciones de la Avenida Jorge Gaitán Cortés se estableció la vinculación de la mayoría de daños con la baja resistencia de la mezcla asfáltica a la fatiga, la humedad y, además, la manifestación de daños entorno a elementos de alcantarillado, por lo tanto, la ceniza volante en el tramo proporciona propiedades modificadoras de la reología del asfalto para mejoramiento de las afectaciones presentadas.

Para mayor entendimiento el Anexo D se compone de gráficas demostrativas de los porcentajes de aditivos obtenidos en cada tramo vial.

Para finalizar, se realiza una simplificación de los resultados obtenidos por medio de la siguiente tabla:

Tabla 20.

Sección de resultados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
En los tramos A y B los deterioros predominantes son parches, piel de cocodrilo y descascaramientos, en tanto que en los tramos C y D principalmente se genera un mayor porcentaje de fisuración en bloque.	Se presentan 4 daños de tipo parche, piel de cocodrilo y descascaramiento cada uno, en el Tramo B se encuentran 4 daños de tipo descascaramiento, a diferencia de los Tramos C y D que se identifican 6 y 14 respectivamente de fisuras en bloque.	1. Realizar una evaluación superficial por medio de una inspección visual de pavimentos flexibles en el tramo vial seleccionado según el Manual INVIAS.
En los tramos A y B el mayor porcentaje de afectación corresponde a una actividad de mantenimiento periódico a diferencia de los tramos C y D que carecen de una rehabilitación.	Tramos A y B con 68% y 73% de porcentaje de área para mantenimiento rutinario, a diferencia de los tramos C y D con un 54% y 56% de porcentaje de área para rehabilitación.	2. Construir un estado del arte para comprender el comportamiento del asfalto y los métodos de mantenimiento o rehabilitación aplicados para el análisis y procesamiento de los datos obtenidos.
En los tramos A, B y C predomina la adición de polímeros en contraposición al tramo D, en donde, la ceniza volante tiene mayor ajuste a las propiedades generales de la vía.	Polímeros: entre el 63% y 100% Ceniza Volante: entre 50% y 80%	4. Analizar la información recopilada para procesar y categorizar teóricamente el aditivo de mayor viabilidad para la zona seleccionada.

Nota: Simplificación del análisis de resultados. Cogollos Franco A.L., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Tabla 21.

Impactos del proyecto

Aspecto	Impacto	Plazo
Social	Mejoramiento del nivel de servicio de las mallas arteriales mediante el planteamiento de hipótesis para establecer recomendaciones óptimas en actividades de intervención en un tramo vial seleccionado.	Corto, mediano y largo
Económico	Al realizar futuros modelos empíricos, probablemente se determinará el análisis de costo-durabilidad para la reducción de actividades de intervención y el mejoramiento de la resistencia ante las cargas aplicadas constantemente.	Mediano y largo
Académico	Ampliación de conocimientos en la línea de Pavimentos y Geomática.	Mediano
Técnico o científico	Se da una apertura a la investigación teórico-práctica como método de implementación directa de aditivos a vías de alto tráfico en Colombia, al igual que alternativas para el análisis posterior de la aplicación de nuevas tecnologías en la mezcla asfáltica.	Mediano y largo

Nota: Impactos del proyecto vistos desde diferentes perspectivas. Cogollos Franco A.L., & Martínez Rodríguez M.L., (2020)

Conclusiones

Los tramos viales localizados en la Avenida Ciudad de Villavicencio y Jorge Gaitán Cortés, fueron objeto de la evaluación superficial del estado funcional de la estructura por medio de una categorización de daños, bajo los parámetros establecidos en pavimentos flexibles por el Instituto Nacional de Vías, en donde, se depuró la información obtenida en la base de datos desarrollada en ArcMap, con el fin de demostrar la frecuencia, la localización y el área de afectación del daño según el año y los tramos estudiados. Además, la interpretación de los deterioros permitió identificar la vinculación de estos con el tráfico y la deficiencia del proceso constructivo del pavimento con respecto a procedimientos de compactación en algunas áreas reparadas; por lo que se llevó a cabo una recomendación para implementar diferentes aditivos, cuyas características mejoran las propiedades reológicas de la mezcla asfáltica ante los factores externos, al realizar una actividad de mantenimiento o rehabilitación.

En la Avenida Ciudad de Villavicencio se estableció un tramo con una trazabilidad efectuada durante tres años como método de identificación del estado superficial del pavimento y comparación de patologías, de esta manera, se visualizó el proceso evolutivo de deterioros en el seguimiento del tramo vial A, observando y analizando la manifestación de fisuras en juntas de construcción a pieles de cocodrilo con desportillamientos severos los cuales conllevan a descascamientos considerables y, en última instancia, a baches como resultado de la infiltración de agua, acumulación de escombros y desechos; puestos por usuarios para corregir la nivelación de la superficie como método de amortiguación entre el impacto de la llanta y el pavimento.

A base de las medidas obtenidas mediante la inspección visual de daños se obtiene el área total de afectación de la zona deteriorada a lo largo del tramo vial, por tal motivo, se deduce una

IMPLEMENTACIÓN DE SIG EN TRAMO VIAL DE BOGOTÁ PARA RECOMENDACIÓN DE INTERVENCIÓN

160

relación que determina la actividad de intervención con respecto al porcentaje de afectación previsto en la Figura 28. Analizando el estado del arte se establece la intervención de acuerdo al tipo de daño y, de esta manera se concluye el mayor porcentaje de afectación de los tramos A y B, el cual corresponde a una actividad de mantenimiento periódico con porcentajes de 68% y 66%. Por otro lado, en los tramos C y D varía la intervención por la severidad del daño; el tramo C requiere de una rehabilitación por la evolución evidente de descascaramientos, a diferencia del tramo D cuyo porcentaje de afectación determina la carencia de un mantenimiento periódico en los fisuramientos proyectados por la capa de concreto hidráulico que subyace de la carpeta asfáltica.

La estructuración de la base de datos mediante el componente de procesamientos geoespaciales ArcMap, permitió la identificación, interpretación y visualización de los daños categorizados en la malla vial con su respectiva geolocalización, determinando así, la frecuencia de daños ubicados de acuerdo a la Avenida seleccionada. En los tramos A y B los deterioros predominantes son parches, piel de cocodrilo y descascaramientos, a diferencia de los tramos C y D, en donde, se genera un mayor porcentaje de fisuración por reflexión en juntas con evolución probable de bache.

Partiendo de la información recopilada se realiza un análisis e hipótesis a base de la definición de una metodología para la aplicación de aditivos según el tipo de daño y posibles causas; de esta forma, en la Tabla 19 se establece la correlación para la modificación de la mezcla con polímeros en los tramos A, B y C en contraposición al tramo D, en donde, la incorporación de ceniza volante tiene mayor ajuste a las propiedades generales de la vía. La diferencia de adición

se debe al sistema de drenaje pluvial de las vías, por lo que, en la carpeta asfáltica del tramo D se requiere del aumento de resistencia e impermeabilización por la humedad considerable en la zona.

Recomendaciones

Ante la depuración realizada a la información recolectada, se recomienda la implementación de los aditivos, dependiendo de las propiedades óptimas que confieran al comportamiento del material asfáltico aplicado en la superficie deteriorada, teniendo en cuenta las medidas de mezclado y puesta en obra.

Se recomienda la incorporación de cal o polímeros en la mezcla asfáltica para la intervención de daños procedentes de la pérdida de adherencia, desgastes por tránsito y clima, o en su defecto, por déficits en el proceso constructivo del pavimento.

Para evitar la susceptibilidad térmica de la mezcla se recomienda la incorporación de ceniza volante, cal o geotextil como método de prevención ante una posible presencia de patrones de fisuramientos longitudinales y transversales severos.

Se recomienda realizar una base de datos de consulta utilizando los Sistemas de Información Geográfica para evidenciar zonificaciones de las mallas arteriales de Bogotá, identificando los daños con su respectiva evolución, al igual que la frecuencia de estos; con el fin de alertar e informar la intervención del deterioro por medio de un mantenimiento o rehabilitación, según la severidad del daño y el porcentaje de afectación del tramo.

Discusión

Para la industria de construcción de pavimentos flexibles, el mejoramiento de las propiedades reológicas del asfalto ha sido objeto de estudio durante un largo periodo de tiempo. Por esta razón, se desarrolla la aplicación de nuevas tecnologías en los componentes de una mezcla asfáltica con la finalidad de prolongar la vida útil del pavimento expuesto a la intemperie y a diferentes mecanismos de falla que afectan su durabilidad.

A continuación, se da la apertura de temas cuya incorporación tecnológica son objeto de investigación y debate en la ingeniería.

Nanotecnología en el asfalto

La implementación de nuevas tecnologías conlleva a la modificación de la estructura molecular del asfalto por medio de la adición de nanopartículas de carbono, una forma de incorporación para mejorar el comportamiento del material, teniendo en cuenta la relación de análisis económico y durabilidad del pavimento. (Leiva-Villacorta et al., s. f.)

Para mejor entendimiento, los nanotubos de carbono son una modificación química del carbono por la formación de láminas de grafeno aparentemente cilíndricas a nivel nanoscópico. La transmisión de ondas térmicas y módulos de Young aumentan la resistencia de estos aditivos a un nivel mayor del acero, por lo que resulta viable la incidencia de estas partículas en el asfalto. Con tan solo la aplicación del 2% de nanomateriales, la deformación y susceptibilidad térmica disminuyen considerablemente en el pavimento. (Reyes et al., 2017)

Otro tipo de modificación del ligante se realiza a través del uso de la nanoarcilla, materiales cerámicos de silicatos, cuyo objetivo es mejorar el comportamiento del asfalto frente a la fatiga o deformación mediante la adición del 3% de nanomaterial a la mezcla. (De Luna Gutiérrez, 2017)

La producción de nanomateriales ha desarrollado la investigación prematura de aplicación de dichos objetos a escala nanométrica en un producto asfáltico, con el fin de controlar y manipular microscópicamente las moléculas que conforman la composición química del material para dar una solución de adherencia. Sin embargo, aún no es factible utilizar este aditivo en la mezcla, debido a la variabilidad del comportamiento de cada nanopartícula sobre el asfalto y su compleja distribución del material en obra por las altas propiedades viscoelásticas que genera la aplicación de la nanotecnología.

Asfaltos Autorreparables

Es un método innovador de bajo riesgo incorporado desde el año 2010 en las carreteras de Países Bajos, cuyos resultados favorables han obtenido una reducción en gran porcentaje de la evolución de daños en ubicaciones críticas por la adición de fibras de acero utilizadas como medio de transporte del calor inyectado en la capa de rodadura. Cabe aclarar, que “el Asfalto es un mal conductor de calor por el agregado mineral” (Van Bochove, 2016, p. 02).

El proceso base de estudio según Van Bochove, (2016) inicia con el siguiente análisis:

Fuerzas de corte sobre las piedras - Tensión entre el ligante y los agregados □ Fatiga □ Iniciación de grietas - Rotura del puente adhesivo - Desprendimiento del agregado □ Técnica de curación - Restauración del puente adhesivo - Radiación en superficie asfáltica - Disparo de calor en fibras de acero - Sellado de fisuras

Los asfaltos autorreparables consisten en la aplicación de una tecnología implementada para utilizarse como alternativa de reparación, por medio de un proceso de elevación térmica de moléculas de hierro mediante la inducción realizada por una máquina, en donde, la pérdida de energía es mínima y las fisuras son selladas por el transporte de calor entre las fibras finas de

acero y el mortero. Este procedimiento aumenta la vida útil del pavimento hasta 20 años a causa del restablecimiento de las condiciones de la estructura. (Hook, 2018)

La creciente investigación de mejoramiento del desarrollo de las propiedades físicas del asfalto en cuanto a durabilidad, y reducción del ruido, conllevan a la utilización de otros materiales en la técnica de autocuración para controlar la incidencia de factores externos en el pavimento. Según Hook (2018) y González et al. (2018) los materiales mencionados anteriormente son:

- **Fórmula Capheal:** Tiene como objetivo la reducción de viscosidad aglutinante del asfalto para aumentar el proceso de sanación por medio de la incorporación de microcápsulas de girasol a la mezcla, las cuales se rompen, establecen una unión, suavizan el pavimento y corrigen las fisuras antes de una posible evolución.
- **Nanopartículas de óxido de hierro:** Al exponer el material en un campo magnético las partículas elevan la temperatura sin necesidad de ninguna máquina, simplemente la curación se induce por los vehículos de mantenimiento que transmiten calor al material bituminoso, el cual se ablanda y colmata las fisuras. Esta técnica es más rápida y eficiente que las fibras finas de acero.
- **Bacteria Bacillus Pseudeudofirmus:** Esta técnica se genera en la activación de las bacterias cuando hay presencia de agua para utilizarse como reparación del asfalto. No es viable porque aún se desconoce el comportamiento del material frente a factores externos.
- **Virutas metálicas:** Genera un incremento en la reparación de la mezcla, a pesar de tener un contenido óptimo de solo 1%.

El análisis económico de esta alternativa está basado en una relación de compensación de precios, debido a que esta técnica evita la necesidad constante de mantenimientos de altos costos,

sin embargo, la instalación equivale a un aumento del 25% del valor total, por la costosa adición de fibras, en comparación a un método convencional. Por esta razón, aún se encuentra en estudios de factibilidad para determinar si es justificable pagar dicha instalación. Hook, (2018)

La constitución del asfalto autorreparable por materiales termo-plastos dan posibilidad al reciclaje del material en un nuevo pavimento de autocuración, brindando de igual forma funcionalidad y servicio al usuario. Por otra parte, esta técnica es muy recomendada para vías con altos volúmenes de tráfico. (Van Bochove, 2016)

Referencias Bibliográficas

- Acuña, W. C., & Pinzón, C. M. (2015). *Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito*. 103.
- Adlinge, S. S., & Gupta, A. K. (2015). *Pavement Deterioration and its Causes*. 7.
- Alayon, M. (2004). *Asfaltenos Ocurrencia y floculación*. 17.
- Alonso, J. P. (2017, septiembre 13). Obtención de Asfalto desde Petróleo. *Asfalto Madrid*.
<https://asfaltomadrid.com/asfalto-y-petroleo/>
- Amanco Geosintéticos. (2011). *Geotextiles tejidos y no tejidos*. 12.
- ANI. (2020). *Mantenimiento Rutinario*. Portal ANI.
<https://www.ani.gov.co/glosario/mantenimiento-rutinario>
- Arenas, D. M. M., & Torres, G. A. R. (2005). Geología de la Sabana de Bogotá. *p.104, 28, 104*.
- Arquintex, C. (2016). *Historia del asfalto*. Arquintex. <http://arquintex.com/historia-de-asfalto.html>
- Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia, ASOPAC, Palliere, A. M., Retour, P., & Instituto Colombiano de Productores de Cemento. (2004). *Cartilla del pavimento asfáltico*. ASOPAC.
- Bahgat, A. G., & Zahw, M. A. (1993). Efecto de las propiedades físicas y químicas del asfalto en la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas. *XII Congreso Mundial IRF, Madrid 1993. Tomo 2*. <https://trid.trb.org/view/1004522>
- Barre, L., Espinat, D., Rosenberg, E., & Scarsella, M. (1997). Colloidal Structure of Heavy Crudes and Asphaltene Solutions. *Revue de l'Institut Français Du Pétrole, 2*.
<https://doi.org/10.2516/ogst:1997015>

Barrera, L. A. F. (2016). *Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos*. 319.

Bech, N. (2020). *Use of Fly Ash for Asphalt* [Academic].

<http://ashtrans.eu/onewebmedia/1%20Building%20activity%202008%20-2020.pdf>

BeyondRoads. (2020). *The History of Asphalt*. BeyondRoads.

<http://www.beyondroads.com/index.cfm?fuseaction=page&filename=history.html>

Caballero Badillo, C. (1997). Resurgiendo de las cenizas [Académica]. *Ciencia al Día AUPEC*.

<https://aupec.univalle.edu.co/informes/junio97/boletin40/cenizas.html>

Caldas-Vieira, F., & Feuerborn, H.-J. (2013). *European Product Standards—Update on status and changes with relevance to CCPs*. 15.

Canul, J. A., Moreno, E. I., & Mendoza Rangel, J. M. (2016). Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas de concretos hechos con agregado calizo triturado de alta absorción. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 235-247. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.150>

Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 13.

Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. (2002). *Catálogo de Deterioros Pavimentos Flexibles*.

Corredor, G., & Corros, M. (2010, agosto). *Evaluación de Pavimentos* [Académico].

<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/fallas-en-pavimentos1.pdf>

CTU, C. de T. U. (2020). Mezclas Asfálticas. *CTU*. <http://ctu.com.co/mezclas-asfalticas-bogota/>

Dallas N. Little, & Jon A. Epps. (2006). The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. *Nacional Lime Association: The Versatile Chemical*, 80.

- De Luna Gutiérrez, M. U. (2017). *Asfalto modificado con nanosustancias* [Tesina, Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12693/TESINA%20DE%20LUNA%20GUTIERREZ%20MARTIN%20UBILFREDO.pdf?sequence=1>
- Elizondo Arrieta, F., Salazar Delgado, J., & Villegas Villegas, E. (2011). Caracterización de asfaltos modificados con diferentes aditivos. *Revista Ingeniería*, 20(1-2).
<https://doi.org/10.15517/ring.v20i1-2.7267>
- EULA. (2011, febrero 9). *Cal hidratada: Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos*. 4.
- FDN. (2018). *Estudios de factibilidad de la Primera Línea del Metro de Bogotá* (p. 2). Financiera de Desarrollo Nacional.
<https://www.fdn.com.co/sites/default/files/fdncomunicadosep2018estudiosfactibilidadmetro.pdf>
- Fernández del Campo, J. A. (1983). *Pavimentos bituminosos en frio*. Editores Técnicos Asociados.
- Fuente Utrilla, A. (2007). *Diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento para baches superficiales y profundos: Tramo carretero Villahermosa—Teapa* [Universidad de las Américas Puebla].
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/de_l_a/capitulo1.pdf
- Fundación Descubre. (2012). *Desarrollan nuevos aditivos para retrasar el envejecimiento del asfalto* [Investigación]. Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Desarrollan-nuevos-aditivos-para-retrasar-el-envejecimiento-del-asfalto>

Geosistemas Pavco. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos* (9.^a ed.).

http://www.geosoftpavco.com/manual_geosinteticos_files/OEBPS/ibook_split_000.xhtml

1

González, Á., Palma, L. S., Contreras, J. N., & Schlangen, E. (2018). *Pavimentos asfálticos autorreparables con materiales reciclados mediante calentamiento por microondas*. 11.

González, Á., Parraguez, A., Corvalán, L., Correa, N., Schliebs, E., & Stukrath, C. (2018). *Hormigón autorreparable con bacterias para la infraestructura vial*. 9.

González Morgado, D. E. (2018). *Metodologías de reparación para pavimentos flexibles de mediano y bajo tránsito*. Universidad Andrés Bello.

Higuera Sandoval, C. H. (2007). *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Hook, J. (2018). *Self-Healing Asphalt and the Future of Smart Roadways*. Buildsoft.

<https://www.buildsoft.com.au/blog/self-healing-asphalt-and-the-future-of-smart-roadways>

Ibáñez, I. I. C. (1999). *Asfaltos Modificados*. 15.

IDU. (2020). *Transparencia y acceso a la información pública*. Instituto de Desarrollo Urbano - IDU. <https://www.idu.gov.co/page/ley-1712-de-2014#scrollTop=0>

IDU, I. de D. U. (2006). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C.* Instituto de Desarrollo Urbano - IDU. <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/portafolio-inno>

IDU, I. de D. U. (2011a). *Cemento Asfáltico* (Manual Sección 200-11; Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de

espacio público para Bogotá D.C., p. 5). Instituto de Desarrollo Urbano.

<https://www.idu.gov.co/web/content/7596/200-11.pdf>

IDU, I. de D. U. (2011b). *Estabilización con Cal* (Manual Sección 230-11; Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C., p. 15). Instituto de Desarrollo Urbano.

<https://www.idu.gov.co/web/content/7601/230-11.pdf>

IDU, I. de D. U. (2011c). *Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas, y de alto módulo* (Especificaciones N.º 520-11; Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C., p. 49). <https://www.idu.gov.co/web/content/7623/510-11.pdf>

IDU, I. de D. U. (2014). *Inventario vial de las localidades para evaluar y priorizar estrategias de intervención en la ciudad de Bogotá*. Instituto de Desarrollo Urbano IDU.

<https://www.idu.gov.co/web/content/7450/IDU-617-1999.pdf>

IGAC. (2018, septiembre 24). *Magna-Sirgas*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

<https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/magna-sirgas>

Instituto Mexicano del Transporte. (2006). Normativa N-CMT-4-05-002-06. En *CMT*.

Características de los materiales: Vol. Materiales para pavimentos (Normativa para la Infraestructura del Transporte, p. México). Normativa para la Infraestructura del Transporte. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-002-06.pdf>

Instituto Nacional de Vías. (2012). *Estabilización de Suelos* (Manual INV E-601-13; Sección 600). Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2016). *Manual de Mantenimiento de carreteras* (Vol. 2).

Instituto Nacional de Vías, & Ministerio de Transporte. (2019). *Manual de Gestión para el*

Mantenimiento y Administración Vial Integral (p. 84). manual de gestion para el

mantenimiento y administracion ...community.secop.gov.co › Public › Archive ›

RetrieveFile › Index

INVIAS. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Instituto Nacional de

Vías. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos->

[tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-)

[pavimentos-flexibles/file](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-)

Julivert, M. (1961). Observaciones sobre el cuaternario de la Sabana de Bogotá. *Boletín de*

Geología, 7, 5-36.

Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P., Villegas-Villegas, R. E., Salazar-Delgado, J., & Loría-

Salazar, G. (2014). *Nano-materiales en el desempeño del Asfalto*. 10.

Marchán Moreno, R. (2005). *Métodos de rehabilitación en pavimentos* [Ingeniería]. Instituto

Politécnico Nacional.

María Clara Arango. (2019, marzo 5). *Panorama energético de Colombia* [Comercial]. Grupo

Bancolombia. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital->

[inteligente/actualidad-economica-sectorial/especiales/especial-energia-2019/panomara-](https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-)

[energetico-colombia](https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-)

Márquez, G., Alejandre, F. J., & Bencomo, M. R. (2006). Influencia de asfaltenos y resinas en la viscosidad de petróleos bituminosos utilizables como pinturas asfálticas de imprimación.

Materiales de Construcción, 56(281). <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.91>

Maxil, R., & Salinas, M. (2006). *Ventajas y Desventajas del Uso de Polimeros en el Asfalto* [Académico, Universidad de las Américas Puebla].

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación*. 212.

Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2002). *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras* (Instituto Nacional de Vías, Vol. 1). Instituto Nacional de Vías.

Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. (p. 509).

Minnesota Asphalt Pavement Association, MAPA. (2014). *Asphalt Paving Design Guide* (Consulting Gorup, Inc, Ed.).

<https://cdn.ymaws.com/www.asphaltisbest.com/resource/resmgr/MAPA-Asphalt-Paving-Design-G.pdf>

Miranda, R. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles* [Universidad Austral de Chile].
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcim672d/doc/bmfcim672d.pdf>

Mirković, K., Tošić, N., & Mladenović, G. (2019). Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-11.
<https://doi.org/10.1155/2019/8107264>

Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.

MPI. (2020). *Asfaltos con Polímeros* [Comercial]. Manufactura y procesos industriales.
<http://www.mpi.net.co/ASFALTOS-CON-POLIMEROS>

- Multinsa. (2020). *Asfaltos modificados* [Comercial]. Multinsa- Soluciones industriales sostenibles. <https://www.multinsa.com/productos/asfaltos/?#divtest>
- Muñoz, G. A. L. (2015). *Estudio de las propiedades de calentamiento y auto-reparación de una mezcla asfáltica con fibras*. 29.
- Muñoz, G. A. O., & Chacón, J. P. M. (2011). *Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras*. 118.
- Muñoz, L. A. (2013). *Diseño de Microaglomerado discontinuo en caliente modificado con polímero reciclado* [Universidad del Biobío]. http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2339/1/Munoz_Vasquez_Luis_Alberto.pdf
- National Lime Association. (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. 326, 42.
- Norma Técnica Colombiana. (1993). Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. En *NTC 3493* (pp. 3-5).
- Ortiz, O. J. R., Rivera, J. R. T., & Tauta, J. F. C. (2006). *Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes*. 12.
- Padilla Rodríguez, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista* [Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Pinilla, D. A., Jorge, D., & Reynaldi, L. A. (1969). *Estudio de durabilidad de asfaltos de uso vial por ensayo de envejecimiento acelerado*. 28.
- Poveda, D. H. C., & Camacho, S. A. V. (2017). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas de concreto asfáltico tipo 2 (mdc-19) con adición de polímeros*. 68.

Programa de Infraestructura de Transporte. (2017). *Tratamientos superficiales como alternativa en ruta de Lastre.*

https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/866/public_es_p_tratam_superficiales_ruta_lastre.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rai. (2017, diciembre 21). El pavimento semi flexible, qué es y sus principales usos [Rai

Pintores]. *Rai Pintores*. <https://www.raipintores.com/blog/pavimento-semi-flexible>

Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón, H. A. (2012). *Determinación de las fracciones sara de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna*. 10.

Reyes, F. A., Daza, C., & Pérez, A. (2017, noviembre 22). Nanotubos de carbono para el mejoramiento de la mezcla asfáltica mdc-2 y del asfalto 60/70 [Académica]. *Revista Pesquisa Javeriana*. <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/vias-mas-duraderas-gracias-a-los-nanomateriales/>

Reyes, Ó. J., & Rincón, J. F. (2009). Influence of characteristics of mineral filler in the resistance of asphalt mixture. *Revista EIA*, 11, 93-103.

Rodríguez, R., Castaño, V., Martínez, M., & Hernández, G. (2001). *Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule* (Publicación técnica N.º 160; p. 54). Instituto Mexicano del Transporte.

<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt160.pdf>

Rondón, A. M. F. (2012). *Rehabilitación de pavimentos fisurados por reflexión implementado sistemas de membrana antifisura s.a.m.i.* [Pontificia Universidad Javeriana].

<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11119>

- Rondón Quintana, H. A., Ruge Cárdenas, J. C., & Moreno Anselmi, L. Á. (2016). Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 558-569.
<https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400003>
- Ruiz, R. (2013). *AC20 EKBE - Introducción al Asfalto* [Técnica - Comercial]. Ergon Asfaltos México. <http://www.portal-comercial-smm.com/articulostecnicos-AC20-EKBE-introduccion-al-asfalto.php>
- Salamanca Arce, G. (2007). *Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos*. [Universidad de Chile].
http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/salamanca_ga/sources/salamanca_ga.pdf
- Solano Bonett, G. E. B. (2014). *Guía de procesos constructivos de una vía en pavimento Flexible*. 36.
- Speight, J. G. (2016). *Asphalt materials science and technology*.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1075344>
- Star, J., & Estes, J. E. (1990). *Geographic information systems: An introduction*. Prentice Hall.
- Talavera, R. R., Meneses, V. M. C., & Madrid, M. M. (2001). *Emulsiones asfálticas*. 48.
12/3/2020.
- The Federal Highway Administration, F. (2018). Asphalt Materials and Paving Mixtures. En *Highway Materials Engineering Course (HMEC): Vol. F* (pp. 16-49).
https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_f/participant_workbook.pdf

- Triches, G. (2018). *La nanotecnología puede minimizar las deformaciones asfálticas*. Road Experts. <https://www.roadexpertsla.com/es/noticias/detalhes/la-nanotecnologia-puede-minimizar-las-deformaciones-asfalticas>
- Universidad Externado de Colombia, & United Nations Population Fund (Eds.). (2007). *Ciudad, espacio y población: El proceso de urbanización en Colombia*. Fondo de Población de las Naciones Unidas.
- Van Bochove, G. (2016, junio 30). Self Healing Asphalt—Extending the service life by induction heating of asphalt. *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. <https://doi.org/10.14311/EE.2016.310>
- Vasquez Varela, L. (2002). *Pavement Condition Index (pci) Para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Ingepav.
- Velásquez, C. A. C., & Maestre, Y. L. G. (2015). *Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de termotasajero*. 130.
- Veropalumbo, R., Viscione, N., & Francesca, R. (2019). Rheological and Mechanical Properties of HMA Containing Fly Ashes as Alternative Filler. En *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)*. Springer Nature.
- Villarino Otero, A. (2008). *Ciencia y tecnología de los materiales* (Universidad de Salamanca, Vol. 7). <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%207-%20MATERIALES%20BITUMINOSOS.pdf>
- Villegas, R., Aguiar, J., & Loria, L. (2015). *Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con ftir y su relación con los parámetros reológicos*. 11.

Walker, D. (2020). *Los beneficios de los asfaltos modificados* / *Revista de asfalto* [Académica].

Asphalt The Magazine Of The Asphalt Institute. <http://asphaltmagazine.com/the-benefits-of-modified-asphalts/>

Yarango, E. (2014). *Rehabilitación de la carretera de acceso a la sociedad minera cerro verde (s.m.c.v) desde la prog. Km 0+000 hasta el km 1+900, en el distrito de uchumayo, arequipa, arequipa. Empleando el sistema bitufor para reducir la reflexión de grietas y prolongar la vida útil del pavimento* [Ingeniería, Universidad Ricardo Palma].

<http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/421>

Zamora, F., & Mora, E. (2019). *Influencia de la cal hidratada en mezclas asfálticas drenantes* [Universidad Católica de Colombia].

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23895/1/TESIS%20Influencia%20de%20la%20cal%20hidratada.pdf>

Zuloaga, I. (2020). Llenante mineral. *Diccionario* .

<https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/llenante-mineral/>

Anexos

Anexo A. Descripción de los tipos de daños según el *Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*, INVIAS (2006)

Anexo B. Comparación teórica de los tipos de intervención establecidos por diferentes fuentes bibliográficas, de acuerdo a la severidad y al tipo de daño.

Anexo C. Descripción de los tipos de daños obtenidos en campo con su respectiva localización, registro fotográfico, medición e interpretación de posibles causas.

Anexo D. Resumen de daños con respecto al tramo vial y su año correspondiente.

Anexo E. Base de datos realizada en ArcMap con la visualización de los daños, categorización, tipo de intervención requerida y recomendación.

Anexo F. Mapas de los tramos viales generados por el software ArcMap.

Anexo G. Ubicación de daños en Google Earth.