

**Guía Forense como Herramienta Técnica para Evaluación y Seguimiento de Obras de
Pavimentos en el Territorio Colombiano**

Ing. José Gabriel Calvo Valenzuela

Ing. Sebastián Tarapuez Martínez

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Facultad de Ingeniería Civil

Popayán

2023

Guía Forense como Herramienta Técnica para Evaluación y Seguimiento de Obras de Pavimentos en el Territorio Colombiano

Informe final de trabajo de grado para optar al título de magister en ingeniería de pavimentos

José Gabriel Calvo Valenzuela – Ingeniero Civil

Sebastián Tarapuez Martínez – Ingeniero Civil

PhD Ferney Quiñones Sinisterra – director



UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Facultad de Ingeniería Civil

Popayán

2023



Resumen

Este trabajo expone el proceso de elaboración de una guía metodológica forense para la evaluación cuantitativa y cualitativa de obras de pavimentos. Para esto, los autores consultaron documentos homólogos, artículos relacionados y normativas técnicas vigentes; el uso de esta guía brinda una herramienta para verificar los hechos de manera oportuna, tomando decisiones según las condiciones presentadas, con esta, los encargados disponen de procedimientos técnicos, listas de ensayos in situ y de laboratorio, recomendaciones de análisis y criterios; reduciendo los tiempos de respuesta y permitiendo disponer los recursos de manera eficiente; se aplica el procedimiento planteado en tres obras de pavimentos, obteniendo información de interés; esta guía se convierte en una pieza fundamental durante el estudio de los hechos, donde, a través de los ensayos, su análisis y un procedimiento estandarizado, se pueden explicar de forma técnica las causas que conllevaron al detrimento patrimonial.

Palabras clave: Pavimentos; Auscultación; Ingeniería Forense; FWD; Geo-radar.



Abstract

This work presents the elaboration of a forensic guide for the quantitative and qualitative evaluation of pavement works. For this, the authors consulted homologous documents, related articles and technical regulations; the use of this guide provides a tool to verify the facts in a timely manner, making decisions according to the conditions presented, with this, the managers have technical procedures, on-site and laboratory test lists, analysis recommendations and criteria, reducing the response times and allowing resources to be arranged efficiently; the proposed procedure is applied in three pavement works, obtaining information of interest; this guide becomes a fundamental piece during the study of the facts, where, through the tests, their analysis and a standardized procedure, the causes that led to the patrimonial detriment can be explained in a technical way.

Keywords: Pavement, Pavement evaluation, Forensic Engineer, FWD, GPR.



Dedicatorias

Dedicamos esta experiencia a Dios, por permitirnos atravesar un sinnúmero de experiencias que culminan en este punto tan importante de nuestra formación como profesionales. A todas las personas que de una u otra manera manifestaron su apoyo incondicional durante esta trayectoria, A nuestros padres por ser nuestro cimiento más importante, demostrarnos siempre su cariño y acompañarnos durante nuestro camino.

A mi esposa por compartir momentos, vivencias, alegrías y demás emociones en la consecución de esta meta, por siempre estar dispuesta a escucharme y darme una mano en cualquier momento.

Agradecimientos

En primer lugar, al ingeniero Ferney Quiñones por la guianza y apoyo durante el desarrollo del presente documento. A nuestros jurados, los ingenieros Henry Mauricio Muñoz y Mateo Carvajal, quienes revisaron el trabajo y realizaron aportes valiosos para incrementar su calidad. A la Universidad del Cauca y todo su personal por ser parte vital de nuestro desarrollo. Al Ingeniero Eduard Sandoval, quien nos facilitó material gráfico que representa diferentes procesos de la ingeniería de pavimentos.



PROYECTO DE GRADO
GUIA FORENSE COMO HERRAMIENTA TÉCNICA PARA EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PAVIMENTOS EN EL
TERRITORIO COLOMBIANO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS – UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Popayán, cauca, abril de 2023



Tabla de Contenido

Resumen	ii
Abstract.....	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos.....	iv
Listado de Ilustraciones.....	viii
Listado de tablas.....	ix
1. Introducción.....	1
1.1. Descripción del problema de investigación	2
1.2. Justificación	3
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. Alcance	6
1.6. Organización.....	7
2. Revisión de literatura.....	8
2.1. Ingeniería forense	8
2.2. Ingeniero forense	12
2.2.1. Ética en una investigación forense.....	14
2.2.2. El Ingeniero como testigo	14
2.3. Pavimentos	17
2.3.1. Partes de un pavimento	18
2.3.2. Funcionamiento de un pavimento	32
2.3.3. Patologías en obras de pavimentos	34
2.4. Evaluación de pavimentos	40
2.4.1. Inspección visual	40
2.4.2. Ensayos no destructivos.....	41
2.4.3. Ensayos destructivos.....	42
2.4.4. Ensayos de laboratorio.....	43



3. Metodología.....	45
3.1. Recopilación de información secundaria.....	45
3.2. Recolección de información primaria.....	45
3.2.1. Trabajo de campo	46
3.2.2. Trabajo de oficina	46
3.3. Redacción guía.....	47
4. Resultados.....	49
4.1. Guía forense	49
4.2. Reporte de casos evaluados.....	52
4.2.1. Caso A: Mejoramiento de vía con deterioro prematuro	52
4.2.2. Caso B: Pavimento flexible con deterioro prematuro	58
4.2.3. Caso C: Pavimento flexible en buen estado.....	62
5. Conclusiones y recomendaciones.....	70
5.1. Conclusiones.....	70
5.2. Recomendaciones.....	72
5.3. Trabajo futuro	73
Bibliografía.....	74



Listado de Ilustraciones

Ilustración 2.1. Disipación de esfuerzos según el tipo de pavimento.....	32
Ilustración 2.2 Factores que afectan el desempeño de los pavimentos	33
Ilustración 2.3. Algunos de los deterioros manifestables en pavimentos flexibles	36
Ilustración 2.4. Algunos de los deterioros manifestables en pavimentos rígidos	37
Ilustración 3.1. Certificación de aprobación de curso en ingeniería forense.....	45
Ilustración 4.1. Portada guía forense para evaluación de pavimentos en Colombia	51
Ilustración 4.2. Deterioros presentados e incremento de su severidad.....	54
Ilustración 4.3. Chequeo del ancho del pavimento.....	55
Ilustración 4.4. Desventajas del uso de MAF.....	55
Ilustración 4.5. Necesidad de mantenimiento y obras de drenaje en la construcción de una vía con crudo pesado.....	56
Ilustración 4.6. Cunetas naturales taponadas por falta de rocería y limpieza.....	57
Ilustración 4.7. Pérdida de capa de rodadura que permite evidencia saturación de la subrasante.....	57
Ilustración 4.8. Comparación entre estructura construida y estructura recomendada por INVIAS para las condiciones presentadas.	58
Ilustración 4.9. Referenciación de puntos por GPS.....	58
Ilustración 4.10. Levantamiento de daños.....	59
Ilustración 4.11. Deterioros presentados	59
Ilustración 4.12. Zona con capa de rodadura de bajo espesor.	60
Ilustración 4.13. Extracción de núcleos de pavimento para chequeo de espesor.	60
Ilustración 4.14. Registro fotográfico de núcleo extraído.	60
Ilustración 4.15. Variación en espesores de núcleos.	61
Ilustración 4.16. Núcleo extraído del sitio.....	62
Ilustración 4.17. Intervención inicial en pavimento flexible	63
Ilustración 4.18. Etapa de recolección documental, soportes del diseñador	64
Ilustración 4.19. Proceso de intervención final	65
Ilustración 4.20. Cuantificación de gaviones.	66
Ilustración 4.21. Apique en terreno alledaño.....	66
Ilustración 4.22. Comparación entre material encontrado en sitio y en apique alledaño.	68
Ilustración 4.23. Núcleo extraído en obra	68
Ilustración 4.24. Radargramas a 1 y 3 m para verificación de obra oculta.....	69
Ilustración 4.25. Uso de radargrama para localización de filtro en obra.....	69



Listado de tablas

Tabla 2.1. Ensayos destructivos y no destructivos utilizados en Canadá y Estados Unidos.	10
Tabla 2.2. Acciones ejecutadas por el Laboratorio de revisión de obras en el periodo 2017 – 2018.....	11
Tabla 2.3. Tipos de pavimentos.....	18
Tabla 2.4. Elementos estructurales de pavimentos flexibles	19
Tabla 2.5. Elementos estructurales de pavimentos rígidos.....	20
Tabla 2.6. Elementos estructurales de pavimentos articulados.	21
Tabla 2.7. Indicadores de las características que se miden en los pavimentos.....	33
Tabla 4.1. Resultados del levantamiento de daños.....	55
Tabla 4.2. Espesores de núcleos extraídos durante la intervención.....	61
Tabla 4.3. Resultados de análisis presupuestal.....	65



1. Introducción

Colombia atraviesa una crisis en el campo de la construcción. El déficit en infraestructura es el principal factor detrás del pobre desempeño logístico de Colombia (OECD, 2015). De acuerdo con la Contraloría General de la Nación (Contraloría General de la República de Colombia, 2018), «Colombia presenta rezagos muy importantes en la infraestructura de carreteras, especialmente frente a los países emergentes y de mayor desarrollo». Las cifras indican que el 46% de la red vial pavimentada se encuentra en estado regular/malo pese al dinero destinado a la construcción de vías (Instituto Nacional de Vías, 2019). La condición que presente la estructura de pavimento es un factor que influye directamente en el desarrollo económico, físico y social. Vías en mal estado conllevan a zonas con menor potencial de crecimiento y desarrollo (Departamento Nacional de Planeación, 2017), perjudicando la calidad de vida de sus habitantes. La poca durabilidad de la red vial se atribuye en parte a fallas prematuras de pavimentos que no cumplen los requerimientos mínimos.

Los entes de control se encargan de desenmascarar posibles irregularidades (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a), supervisando los procedimientos ejecutados, el desempeño de las obras contratadas y velando por un correcto manejo de los recursos públicos. Éstos se enfocan principalmente en análisis de cifras, contabilidad, balances (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a), documentos y evaluación visual (Contraloría General de la República de Colombia, 2018). No tienen procedimientos definidos, herramientas, ni personal calificado para verificar cantidades y calidades de obra, destinando tiempo y recursos excesivos para este fin.

Las políticas actuales están encaminadas al uso de nuevas técnicas para demostrar posibles irregularidades (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a), entre los factores que se propone emplear para lograr este objetivo se encuentra la ingeniería forense, profesión destinada a explicar las razones de falla de una obra; de igual manera, un proceso sistematizado proporciona elementos para aprovechar eficientemente los recursos disponibles, reducir el tiempo de respuesta, y es garante para determinar las causas del fallo (Smith, 2004). La combinación de estos factores da como resultado una guía forense. Encuestas realizadas a 33 Departamentos de transporte de Estados Unidos y Canadá, muestran que el 12% de los estados y/o provincias utilizan una guía forense para examinar la condición de los pavimentos, mientras que otro 39% está interesado en implementar este tipo de documento (Johnson, Chorzepa, Durham, & Kim, 2017).

La redacción de una guía forense aplicable a pavimentos rígidos y flexibles en el entorno nacional, permitirá que los encargados de investigar pavimentos posean procedimientos definidos para las etapas a tratar, desde la recolección de documentos: contratos, informes, actas, facturas y ensayos, hasta la



elaboración del informe final con todos los requerimientos técnicos y legales, incluyendo testimonios, evaluaciones visuales para generar hipótesis del problema y, elaboración de ensayos destructivos, no destructivos y de laboratorio para corroborarlas. Aplicar la guía permitirá certificar la calidad de los elementos, verificar las dimensiones contratadas a lo largo de la vía, acceder a métodos de ensayos, criterios, técnicas de recolección de información, y a casos reales que sirvan de pauta durante los procesos. Se espera incrementar el control de la inversión pública y la participación de profesionales en investigaciones que involucren pavimentos, reducir los tiempos de respuesta, utilizar eficientemente los recursos disponibles y disminuir la participación de terceros que puedan influir en la alteración de los resultados.

1.1. Descripción del problema de investigación

Los recursos se utilizan de manera inadecuada en el sector de la construcción (Contraloría General de la República de Colombia, 2018). La Contraloría General de la Nación (Contraloría General de la República de Colombia, 2018) establece 15 hallazgos de pertinencia y consideración técnica de obra civil mediante auditoría realizada a 13 proyectos de construcción y mejoramiento de vías terciarias; el ente solicita al gobierno garantizar obras de mediana o larga duración (Escobar J.C., 2018). La contraloría evidencia deterioro prematuro en los casos donde se adopta la construcción de pavimento flexible y con placa huella (Contraloría General de la República de Colombia, 2018), resaltando que el ente realiza inspección visual sin investigar las causas detrás del fallo; señala deficiencia en la fase de estudios previos y diseños que derivan en modificaciones sustanciales en términos de especificaciones, calidad de materiales, actividades y cantidades de obra, acarreado así mayores tiempos de ejecución, mayor gasto y obras de menor calidad y durabilidad (Contraloría General de la República de Colombia, 2018). Aun cuando se invirtieron 79 billones de pesos en el periodo comprendido entre 2010 y 2017 (Departamento Nacional de Planeación, 2018), 3962 km de la red vial pavimentada presenta un estado regular/malo (Instituto Nacional de Vías, 2019); la evidencia indica que los actores incurren en diversos errores a lo largo de las etapas de construcción, en caso de detrimento, se debe llevar una investigación a fondo para identificar a quien atribuirle la responsabilidad.

Los fallos de obra se generan por problemas físicos, técnicos y combinación entre ellos, influenciados usualmente por: ignorancia, incompetencia, negligencia y avaricia, factores humanos llamados “los cuatro jinetes del apocalipsis ingenieril” (Carper, 2000). Según Leonards (1982), “el fallo es una diferencia inaceptable entre el desempeño esperado y el observado”. Carper (Carper, 2000), clasifica las causas de fallo en 6 grupos: Errores de selección de sitio y desarrollo in situ, deficiencias de programación, errores de diseño, errores de construcción, deficiencias de material y errores operacionales. La anterior clasificación se evidencia en: mantenimientos inadecuados, calidades por debajo de las



acordadas, personal inapropiado, carencia de estudios previos, etcétera. Se han llevado diversas investigaciones a pavimentos en la nación, no obstante, la información es de acceso restringido en la mayoría de los casos; Usualmente no se registran adecuadamente las acciones realizadas, evitando así la generación de nuevos conocimientos y dificultando la reproducción de los métodos por parte de otros profesionales.

Las pérdidas económicas del estado por inconsistencias constructivas producen un déficit del presupuesto anual, afectan las cuantías destinadas a construcción de obras de servicios básicos, vías terciarias y subsidios económicos (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a). Esta serie de condiciones reducen las oportunidades de desarrollo integral de la población aledaña (Departamento Nacional de Planeación, 2017), aumentan el desgaste de los vehículos y disminuyen la seguridad y comodidad de los usuarios (Smith, 2004). Según la Contraloría General de la República de Colombia, existen grupos que saquean de manera sistemática al Estado (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a), acción aplicable a la ingeniería de pavimentos en términos de poca apropiación de buenas prácticas de ejecución (Contraloría General de la República de Colombia, 2018), evidenciando procesos constructivos que no cumplen requisitos normados y/o contratados, cantidades que difieren a las plasmadas en actas de recibo final, adiciones injustificadas durante la ejecución de los contratos y obra no ejecutada.

Los entes de control asumen la responsabilidad de llevar a cabo investigaciones para destapar irregularidades (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a). A estos organismos se les dificulta demostrar un detrimento al no poseer herramientas ni equipos técnicos que permitan la caracterización de los materiales usados para realizar comparaciones con especificaciones técnicas y, solicitar la corrección de los trabajos donde se hayan incumplido los estándares de obra (Contraloría General de la Ciudad de México, 2018a); en las visitas a obra realizan inspección visual y revisión documental, en el mejor de los casos, recurren a laboratorios de terceros que pueden presentar demora de plazos, sobrecostos, conflictos de interés, alteración de resultados o conceptos subjetivos. Si no se cuenta con personal especializado en el campo a tratar, existe la posibilidad que no se usen criterios adecuados para evaluar fallos o ejecuten procesos erróneos para tomar muestras e identificar los factores contribuyentes al evento, aumentando costos y la duración de las actividades (Smith, 2004). Después de realizada la inspección, aún quedan incógnitas que representan obstáculos para el debido control, se imposibilita el certificar la ejecución de todas las actividades contractuales, dificultando la solución de dichos conflictos.

1.2. Justificación

La infraestructura vial es uno de los factores que determina la calidad de vida de las personas (Departamento Nacional de Planeación, 2017). La condición de los caminos afecta la seguridad y comodidad de los usuarios. Vías en mal estado incrementan los tiempos de viaje, costos de transporte y



alimentos, derivando en mayores índices de deserción escolar, conflicto armado, etcétera (Departamento Nacional de Planeación, 2017). Colombia se sitúa entre los países con mayor precio de transporte de tonelada por kilómetro, lo que pone en desventaja a los agricultores y productores. La competitividad se ve afectada al tener un producto que se debe vender a un mayor precio por las condiciones nacionales; El precio de transporte hasta el puerto es de hasta el doble del promedio en países de América del Sur y el triple de los países de la OECD (Contraloría General de la República de Colombia, 2018b).

Debe hacerse control a la inversión pública en obras. Las obras viales fueron el sector que mayor porcentaje recibió del presupuesto de regalías en el periodo 2012 – 2018 [38.2%], movilizan el 73% de la carga total nacional (Departamento Nacional de Planeación, 2018). Es de los rubros que mayor afectación tiene en el desarrollo del país. La misión de la Contraloría General de la Nación es revisar si la inversión se hace como se debe (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a). Un referente en el tema es la Contraloría General de la Ciudad de México (Contraloría General de la Ciudad de México, 2018a), que adopta políticas para asegurar que los recursos sean manejados de manera eficiente y responsable, atacando las causas que propicien la corrupción y reducir los espacios de discrecionalidad y opacidad, asegurar obras que cumplan con la calidad acordada, evitando el gasto de mayores recursos para su corrección y conclusión; de igual manera, La OECD recomienda a Colombia mejorar el manejo y monitoreo de las inversiones regionales (OECD, 2015). Recientemente el congreso aprobó los pliegos tipo como mecanismo para vigilar la inversión en vista a la poca pluralidad de oferentes (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a); sin embargo, gran parte de las irregularidades se presentan durante el periodo de construcción, se deben aumentar las herramientas de evaluación para realizar investigaciones eficientes.

Existe la necesidad de sistematizar estos procesos a través de una guía para otorgar lineamientos y asistir a profesionales. De acuerdo con Fermini (2014) “La investigación, entonces, necesita de una metodología. Como Wahyuni (2012) sostiene, la metodología es la base teórica e ideológica de un método, es como una ruta o un modelo para conducir la investigación y tiene su fundamento en un paradigma y contexto particulares”. La implementación de la guía brindará herramientas para que el ente de control verifique los hechos de manera oportuna, tomando decisiones según las condiciones reales de obra; dará paso a la inclusión de ensayos a las estructuras de pavimentos utilizadas en Colombia. Estas técnicas permitirán determinar la cantidad, resistencia y serviciabilidad de los sistemas.

Los beneficios de una investigación técnica, constante y ordenada se expresan en reducción de plazos y eliminación de sobrecostos (Davis, Rens, Wipf, & Klaiber, 2002); De igual manera, otorga evidencia para conducir procesos de responsabilidad fiscal, toda vez que los entes de control buscan



implementar sanciones drásticas y efectivas para aquellos que se apropian de los recursos públicos indebidamente (Contraloría General de la República de Colombia, 2018a). El método que se propone fomentará la prevención de malas prácticas; atacando el problema que aqueja al sector de la construcción. De igual manera, investigaciones de este estilo permitirán identificar errores que se cometan generalmente, retroalimentar los parámetros de diseño actuales y/o identificar parámetros que hasta la fecha no se hayan tenido en cuenta durante la concepción de estas obras (Rada, Jones, Harvey, Senn, & Thomas, 2013).

1.3. Hipótesis

La aplicación de una guía forense provee la metodología para evaluar cuantitativa y cualitativamente obras de pavimento que están involucradas en procesos de investigación jurídica.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Elaborar una guía metodológica forense para la evaluación cuantitativa y cualitativa de obras de pavimento.

1.4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Recopilar información bibliográfica sobre procesos homólogos a la guía forense propuesta.
- ✓ Redactar los procesos y criterios a utilizar para evaluar la ejecución de los recursos durante el seguimiento y/o post ejecución de obras de pavimento.
- ✓ Establecer procedimientos de recolección de evidencia técnica y material probatorio del sitio de análisis como soporte técnico-científico en disputas de construcción de pavimentos.
- ✓ Analizar y reportar el cumplimiento de los requerimientos técnicos de tres obras de pavimento.
- ✓ Estimar la afectación económica ocasionada por malas prácticas durante la ejecución de las obras de pavimento tomadas como estudio de caso, si a ello hubiere lugar.

1.5. Alcance

El siguiente documento se realiza en el marco de la maestría en ingeniería de pavimentos, se considera pavimentos rígidos y flexibles, acogiéndose el entorno y normativa nacional, en él se tratan temas de personal, ensayos, criterios de evaluación, elaboración de informes y recolección de muestras, documentos y testimonios.

Se encuadra el presente trabajo en la categoría de investigación mixta, tomando elementos de la investigación descriptiva y de la explicativa. Se complementa la información con 3 estudios de caso.

Se llevan a cabo tres evaluaciones a pavimentos, aplicando el procedimiento propuesto con ensayos los ensayos requeridos según el caso, se compara el planteamiento teórico con el ejercicio práctico, asimismo, se recopilan investigaciones forenses internacionales en pavimentos para enriquecer los casos presentados en el documento.



1.6.Organización

El documento cuenta con 5 capítulos donde se desarrolla la temática.

El capítulo uno abarca el planteamiento del problema, su justificación, objetivos planteados, hipótesis, alcance y organización del documento.

En el segundo capítulo se recopila información relevante para el presente trabajo, empezando por una serie de conceptos básicos, seguidos de teoría y criterios más elaborados.

El capítulo tres expone la metodología y desarrollo de cada una de las fases propuestas, recopilación bibliográfica, toma de datos, trabajo de campo y proceso de redacción.

Los resultados y análisis de estos se consignan en el capítulo cuatro.

Finalmente, en el capítulo cinco se otorgan conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos de acuerdo con la investigación realizada.



2. Revisión de literatura

2.1. Ingeniería forense

En la antigüedad, la Ingeniería forense se refería únicamente a aquellos profesionales que, con conocimientos legales, se limitaban a lidiar con la parte ingenieril de una disputa legal (Carper, 2000) y que, en general, implicaba la pérdida de vidas humanas. Esto es porque, desglosando el término, y apoyándose en las definiciones dadas por Franck & Franck (2012), la Ingeniería es la ciencia de utilizar el conocimiento científico para usos prácticos. Por otra parte, Webster define Forense como “Adecuado para una corte, debate público o argumento formal, especializándose en o teniendo que ver con la aplicación de conocimiento científico para asuntos legales, debates o argumentación formal y el uso de conocimiento y técnicas derivadas de varias ciencias” (Franck & Franck, 2012). Lo anterior limitaba el enfoque de los ingenieros forenses a un campo específico y restringía el uso de las técnicas a un número de especialidades.

Como lo hacen notar Rada, Jones, Harvey, Senn, & Thomas (2013), se aplica erróneamente el término forense cuando es usado lejos del campo legal o distante de las cortes, sin embargo, la palabra se ha asociado con el campo científico por lo que ahora su significado se asimila al de las ciencias forenses. Teniendo en cuenta esto, actualmente la expresión forense abarca la metodología científica y normas bajo las cuales los hechos de un evento son estudiados. Es decir, que el fin de esta, es validar los supuestos de un evento mediante evidencia y análisis, obteniendo así la reconstrucción de los hechos.

En consecuencia, el concepto se ha ampliado con la variedad de enfoques y usos ajenos a la corte, que parten desde los principios de la ingeniería forense: estudio de obras para determinar las variables que definen su comportamiento, mejora de métodos de diseño, recolección de información para proyectos de rehabilitación, evaluación del comportamiento de nuevo métodos de diseño y productos para pavimentación, etc. Se puede decir entonces que la ingeniería forense es la aplicación de los principios de Ingeniería y de una metodología para contestar preguntas de hecho (Noon, 2001). La tendencia indica un incremento del uso de técnicas forenses alrededor del mundo en los últimos años.

Inicialmente no existían organismos o estándares que regularan la ingeniería forense, por lo que, la disciplina se creó a partir de profesionales que enfrentaban casos únicamente con su experiencia; con el paso del tiempo y a medida que se resolvían más casos, se fueron desarrollando compilaciones de estudio de Ingeniería forense en sitios como Estados Unidos, Japón y Europa (Gagg, Reynolds, & Rhys Lewis, 2003). Esta práctica se continua hoy en día, pues cada año se publican libros que se enfocan principalmente en la reconstrucción de accidentes industriales, accidentes aéreos, accidentes de tráfico, incendios, fallos



estructurales, fallos geotécnicos, entre otros; lo que indica una creciente tendencia a la aplicación de técnicas forenses y a la difusión del conocimiento.

Con el paso del tiempo, el sector público fue regulando y aplicando esta disciplina, entre los ejemplos a nivel internacional se tiene el de Estados Unidos, país en el que, como exponen Franck & Franck (2012, p4), el senado decretó la creación de documentos de tipo “mejores prácticas” y guías para la recolección y análisis de evidencia forense, buscando fortalecer la calidad de los procedimientos. Así mismo, durante estas sesiones se presentaron observaciones sobre la carencia de protocolos estandarizados por el gobierno para la práctica forense, por lo que el comité recomendó la creación de un código nacional de ética para estas disciplinas; por último, dentro de la formalización de las prácticas forenses, existen instituciones dedicadas al desarrollo de guías, protocolos y estándares para la ingeniería forense, como lo son la American Academy of Forensic Sciences o la National Academy of Forensic Engineering derivada de la National Society of Professional Engineers.

Enfocándose al estudio y control de obras de pavimentos, se tiene que, según una encuesta realizada en el 2016 a 33 departamentos de transporte de Canadá y Estados Unidos (Johnson, Chorzepa, Durham, & Kim, 2017), el 12% utiliza una guía forense para examinar la condición del pavimento mientras que el 39% está interesado en implementar un documento de este tipo; los ensayos no destructivos que destacaron en la encuesta fueron el Deflectómetro de impacto/Falling Weight Deflectometer con 91% de uso y con 96% de recomendación de uso y el Georradar/Ground Penetrating Radar con 59% de uso y 95% de recomendación.

Los departamentos de transporte aumentaron el uso de técnicas forenses y agruparon parte de sus criterios gracias al reporte 747 de la NCHRP (2013), documento donde se proponen modelos y actividades para el empleo de la ingeniería forense a pavimentos; un caso específico se ve en el artículo “Forensic Investigation of Continuously Reinforced Concrete Pavements in Fair and Poor Condition” donde el departamento de transporte de Georgia, implementa los lineamientos planteados en el reporte 747 a modo de evaluación; esta investigación determinó las variables que afectan al funcionamiento de pavimentos de concreto continuamente reforzados; después de este caso, el DoT de Georgia estableció el reporte 747 como su guía forense.



Tabla 2.1. *Ensayos destructivos y no destructivos utilizados en Canadá y Estados Unidos.*

State/province	FWD	GPR	RCP	DCP	RDD
Alberta	Y	Y	—	—	—
Arizona	Y	—	Y	Y	—
Arkansas	Y	Y	—	—	—
Colorado	Y	—	Y	—	—
Connecticut	—	—	—	—	—
Georgia	Y	—	—	—	—
Idaho	Y	Y	—	—	—
Illinois	Y	—	—	Y	—
Indiana	Y	Y	—	Y	—
Iowa	Y	Y	—	Y	—
Kansas	Y	—	Y	Y	—
Kentucky	—	Y	—	—	—
Louisiana	Y	Y	—	Y	—
Maine	Y	Y	—	Y	—
Manitoba	Y	Y	—	—	—
Maryland	Y	Y	—	—	—
Michigan	Y	Y	—	—	—
Mississippi	Y	—	—	—	—
Missouri	Y	Y	Y	Y	—
Montana	Y	Y	—	Y	—
Nebraska	Y	—	Y	—	—
New Jersey	Y	Y	—	Y	—
North Dakota	Y	—	—	—	—
Oregon	Y	Y	—	Y	—
Quebec	Y	—	—	Y	—
Rhode Island	Y	Y	—	—	—
Saskatchewan	Y	—	—	—	—
South Carolina	Y	—	Y	Y	—
South Dakota	Y	Y	—	Y	—
Utah	Y	Y	—	Y	—
Virginia	Y	Y	—	Y	—
Washington	—	—	—	—	—
Wyoming	Y	—	Y	—	—
Responses	30	19	7	16	0
%	91	59	22	50	0

Note: Y = yes; — = no (or no response).

Fuente: Johnson et al (2017)¹.

La contraloría general de la ciudad de México permite evidenciar un caso de aplicación de técnicas forenses en diferentes ramas Ingenieriles por organismos gubernamentales; en el año 2017 se inaugura el laboratorio de revisión de obras, que evalúa las especificaciones y normas de calidad de manera eficiente y eficaz (Contraloría General de la Ciudad de México, 2016, p 43). El laboratorio de revisión de obras cuenta con 30 pruebas para evaluar de manera preventiva que materiales como asfalto, concreto y acero cumplan con las propiedades exigidas².

Adicional a los ejemplos anteriores, los departamentos de transporte cuentan con equipos de ingeniería forense de pavimentos que datan desde antes de 1998 (Chen & Scullion, 2008). Así mismo, en

¹ FWD: Falling Weight Deflectometer, Deflectómetro de impacto

GPR: Ground Penetrating Radar, Georradar

RCP: Rapid Chloride Permeability, Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros

DCP: Dynamic Cone Penetration, Penetrómetro dinámico de cono

RDD: Rolling Dynamic Deflectometer, Deflectómetro dinámico rodante

² Sacado de: <https://cicm.org.mx/evitaran-fallas-en-obra-publica-laboratorio-de-la-contraloria/>



Australia, Richard Boyd Smith presentó en el año 2004, el documento “Forensic Investigation of Pavement Failures”, en el cual, con ayuda del “Queensland Department of Main Roads”, realiza la recolección de literatura y experiencias según las condiciones de aquel país, todo esto complementado con casos de fallos en pavimentos locales.

Tabla 2.2. Acciones ejecutadas por el Laboratorio de revisión de obras en el periodo 2017 – 2018.

Verificación Preventiva de la Obra Pública		
Obras	Acciones	Resultados
Línea 7 de Metro Bus Paseo de la Reforma	Se realizaron pruebas de laboratorio al terreno natural en un área de 3.8 miles de metros cuadrados, a la carpeta asfáltica en un área de 37.8 miles de metros cuadrados, verificación de 39 mil metros cuadrados de losa de rodamiento de pavimento rígido.	Se realizó la restitución de losa de rodamiento de carril confinado, la cual estaba fuera de especificación
Construcción del edificio sede alterna de la Defensoría Pública	Se realizaron pruebas al espesor de recubrimiento en columnas metálicas con un área de 240 metros cuadrados, revisión de cambios de especificación en los pernos conectores de cortante para el anclaje de lámina de los acero, verificación de muros de mampostería y muros de concreto.	Se realizó la demolición y sustitución de muro de mampostería al no cumplir con lo establecido en el Reglamento de Construcción de la Administración Pública del Distrito Federal
Construcción del Tribunal de Justicia para Adolescentes	Se realizaron pruebas de resistencia a la tensión del muestreo de 138 toneladas de acero de refuerzo, verificación de Muros Mán y Muros de Acompañamiento; revisión topográfica a los niveles de la edificación y análisis estructural para la cimentación, verificación de la colocación de prefabricados para las lozas.	Se garantizó la calidad de los materiales, así como el correcto comportamiento en presencia del agua en el suelo de la edificación así como el deterioro del concreto y acero por la humedad en los muros de la cimentación
Obras de mantenimiento a la carpeta asfáltica de diversas vialidades	Se realizaron pruebas de laboratorio a la carpeta asfáltica en un área de 227 mil metros cuadrados.	Se realizó la restitución de la carpeta asfáltica, la cual no cumplía con el espesor especificado contractualmente, garantizando la vida útil del pavimento.
Distribuidor Vial las Palmas	Se realizó un muestreo de 27 metros cúbicos de concreto fresco utilizado para pilas principales	A la fecha no se ha acreditado la atención a las recomendaciones emitidas.

Fuente: Contraloría General de la Ciudad de México (2018b)

En la comunidad hispana, cada día se motiva más a la propagación del conocimiento en este tema, por ejemplo, en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, España se dictó durante el año 2020 el curso “Ingeniería forense de infraestructuras pavimentadas, connotaciones periciales”. Colombia ha avanzado en el tema por medio de diplomados en auditoria forense para aplicación general en diferentes ramas.

La ingeniería forense otorga técnicas y metodologías para descifrar el funcionamiento de una estructura, lo cual es la base para:

- Presentar evidencia de soporte en disputas legales.
- Definir métodos de rehabilitación efectivos para cada caso.
- Determinar los factores relevantes en el comportamiento del pavimento.
- Evaluar la respuesta del desempeño de construcciones con nuevos métodos o productos.



- Asegurar el buen uso de los recursos, evitando sobrecostos, detrimentos y ampliación de plazos en rehabilitaciones, investigaciones y evaluación de construcciones.

El documento “Forensic Investigations of Roadway Pavement Failures”(Chen & Scullion, 2008), relata una investigación forense llevada a cabo en el estado de Texas a pesar que el distrito ya había seleccionado los métodos de rehabilitación para un pavimento. El reporte final concluyó que la rehabilitación escogida originalmente para dos de los tres casos era inadecuada, y que, la investigación previa no había sido suficiente para identificar las causas que originaron el problema. En uno de los casos, el problema principal era una base húmeda y el método de rehabilitación seleccionado se enfocaba en reemplazo de carpeta asfáltica; según relata el autor, de haberse implementado la opción original, se hubieran invertido \$ 463,085 USD que hubiesen sido de poco impacto porque, según el análisis presentado, el deterioro presentado se manifestaría de nuevo en un periodo de entre 3 a 5 años. De manera similar, en el segundo caso se había realizado reemplazo de 50 mm de carpeta en 1996 y 2001, pero para el año 2004, la patología se manifestaba nuevamente. Existían dos problemas mayores, una capa porosa a una profundidad de 75 – 100 mm que causaba separación del sistema y, secciones inadecuadas estructuralmente. Entre las conclusiones de los autores se encuentra la importancia de una investigación forense, al momento de identificar adecuadamente las causas de fallo de pavimentos y así seleccionar las técnicas de rehabilitación adecuadas para la situación presentada.

2.2. Ingeniero forense

El ingeniero forense de ingeniería pavimentos debe estar en la capacidad de entender los procesos y variables que determinan el comportamiento del pavimento, comprender su funcionamiento, las posibles patologías que se puedan presentar, la manera en la que surgen, los factores que incrementan su magnitud, entre otras cosas; por esto, durante los siguientes numerales, se consignará información que contribuirá a que el ingeniero logre este fin.

La principal función del ingeniero forense es interpretar los hechos y evidencias para explicar un determinado comportamiento y formular conclusiones respecto a las causas de fallo. Este profesional tiene que estar capacitado para fungir como un investigador y lidiar con todos los factores de una investigación. En el caso de obras en pavimentos debe poseer un título en ingeniería civil o afines, y contar con experiencia específica en el campo. Cuanto mayor sea el reconocimiento del forense, el público percibirá con mayor facilidad la autenticidad de la investigación; por esto, es importante que el ingeniero tenga un extenso historial profesional y académico. Los factores que aportan a un buen historial son: trabajos en el área de pavimentos, cursos realizados, posgrados, reconocimientos y afiliación a organizaciones. Todo esto incrementará la credibilidad del ingeniero, indica respeto por parte de sus pares y certifica el cumplimiento



de requisitos para hacer parte de la investigación. La competencia es el resultado de educación y experiencia (Carper, 2000).

El conocimiento que se obtiene de una investigación es especializado y preciso; se entiende que hay forma de verificar los resultados y obtener explicaciones reales y éticas sobre los problemas estudiados. Para Abello (2009), la objetividad, la rigurosidad y la precisión, son criterios exigidos.

Las diferentes funciones que realiza el ingeniero componen la investigación forense. El eje de la investigación es responder ¿Quién?, ¿Qué?, ¿Cuándo?, ¿Por qué? y ¿Cómo?, esto se logra recreando los hechos. Cuando un fallo particular ha sido explicado con cada uno de los factores intervinientes, se dice que el fallo ha sido “reconstruido”. Por esto, también se conoce a los ingenieros forenses como expertos en reconstrucción (Noon, 2001).

Para conseguir el objetivo principal de la investigación, el ingeniero debe realizar tareas de recopilación, organización, análisis, preparación y ejecución de actividades que conlleven al esclarecimiento de la verdad; algunas de las actividades son:

- Preparación y ejecución de entrevistas a cada una de las partes involucradas.
- Efectuar la recolección y análisis documental.
- Realizar reportes de estado.
- Supervisar la ejecución de los ensayos.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Generar hipótesis de acuerdo a los resultados y su experiencia.
- Determinar las condiciones iniciales del sitio.
- Fungir como consultor que aporte a la resolución de disputas.
- El ingeniero forense puede hacer una contribución neutral y objetiva para ayudar a investigar y determinar la causa del accidente (Gagg et al., 2003).
- Llegar a conclusiones que se sustenten en los hechos y resultados de investigación.
- Preparación y exposición del informe final de investigación.

El punto de partida de la reconstrucción, son las condiciones posteriores al evento a estudiar. En este punto, el ingeniero debe realizar las etapas de recolección de documentos y evidencia, sentando una base para la aplicación de la pirámide de investigación. Paso seguido, debe hacer visitas a obra donde generará hipótesis preliminares basándose en observaciones visuales, efectuará ensayos y realizará análisis de resultados para ampliar la cantidad de información disponible. Teniendo en cuenta los hechos, análisis, interpretación de evidencia, por medio de los principios y metodologías científicas, el ingeniero entonces debe hacer “Ingeniería Inversa”, resultando en hipótesis plausibles que expliquen como las condiciones



previas se convirtieron en las condiciones posteriores (Noon, 2001). Requerirá poseer o ampliar la cantidad de evidencia para validar o refutar las hipótesis planteadas y, de acuerdo a Noon (2001), si los hechos son ordenados lógicamente y sistemáticamente, las conclusiones deberían ser casi evidentes. Asimismo, Carper (2000) afirma que la evidencia es un testigo silencioso que habla por sí solo. Finalmente, el forense debe consignar el trabajo realizado en el informe de investigación final y presentarlo ante un jurado, donde, después de determinar la causa del fallo, ofrecerá opiniones respecto a la asignación de responsabilidad de este.

2.2.1. Ética en una investigación forense

La característica más importante de un ingeniero forense son sus altos estándares de ética

Kenneth Carper (2000:29)

En esta profesión, la ética y los principios profesionales son puestos a prueba más a menudo y a un grado más alto que en cualquier otra labor ingenieril

Kenneth Carper (2000)

El ingeniero tiene que conservar la objetividad en todo momento, no puede permitir que sus creencias u otros factores guíen el proceso, debe mantener una relación estrictamente profesional con las partes, donde no puede recibir favores o pactar beneficios en caso de fallo positivo para alguno de ellos, esto, puede nublar su juicio. A pesar que el profesional esté empleado por una de las partes, él no tiene que apoyarla si los hechos no la respaldan. Su única obligación es con la verdad y debe velar porque ésta salga a la luz así sea en contra de la parte que él representa. En ningún caso se puede falsear datos para validar hipótesis (Fermini, 2014); es decir, que el ingeniero no debe alterar resultados o encaminar la información de manera parcializada por ningún motivo.

En ciertos casos la prensa puede ser parte del proceso, el ingeniero debe manejar con cautela las comunicaciones que haga, pues, cualquier afirmación no comprobada o prematura puede afectar negativamente la reputación personal y profesional de los involucrados, donde se estaría vulnerando su derecho al buen nombre.

2.2.2. El Ingeniero como testigo

El ingeniero forense puede participar durante una disputa a pesar de no haber estado presente durante el evento a estudiar. Este tipo de participación se designa como “perito” y se diferencia de los testigos ordinarios. El testigo es aquel individuo que percibió un evento mediante algún sentido y puede dar la información que advirtió. Un perito es una persona con vastos conocimientos en una ciencia, técnica o arte y que participa para dar un concepto desde el punto de vista profesional en su materia. Noon (2001)



sostiene que, “el testigo puede generar sus propias opiniones o conclusiones del hecho”. Se debe entonces asegurar que el testigo se apegue únicamente a lo sustentable y no dar juicios de ningún tipo. Por otra parte, Carper (2000) indica que “el ingeniero forense puede testificar y ofrecer una opinión de la causa del fallo, dado que aquella opinión ayudara al juez a entender la evidencia que está por fuera de su esfera de competencia”.

Cuando el ingeniero se desempeña como testigo, debe ceñirse a los estándares de ética. El testimonio será el resultado de una investigación bien realizada; será público y todo lo que diga, influirá en la reputación a largo plazo de él y de las partes. No se pueden dar acuerdos entre ingeniero y abogado para direccionar el testimonio en cierto sentido. Es más, tratar de direccionar una investigación puede resultar con efecto contrario en casos donde la parte contraria cuente con un experto que note los puntos débiles de la argumentación. Según afirma Noon (2001), la contraparte intentará tildar al testigo experto como “incompetente” y cuestionará el carácter y profesionalismo de este. El ingeniero debe estar preparado para no dejar afectarse por estas acusaciones.

La relación entre el abogado e ingeniero influye en el éxito del testimonio, es importante trabajar en conjunto y mantenerse informados de los avances individuales para puedan desarrollar el caso desde los dos puntos de vista profesionales, de esta manera, se genera una dinámica de retroalimentación donde se enfocan en las debilidades y fortalezas del caso. El ingeniero debe compartir aquellos detalles de su investigación o de su vida personal que puedan ser cuestionados en la corte. Como lo relata Noon (2001), «El ingeniero forense hace mejor su trabajo cuando informa al abogado todos los aspectos del caso que ha descubierto. El otro lado quizá cuente con el beneficio de un excelente ingeniero que señale las “malas cosas” en la corte. Por lo que, si el abogado no está apropiadamente informado de las “malas cosas”, no podrá preparar apropiadamente el caso para la presentación en la corte».

A excepción de determinados escenarios, a los casos se presentarán a personas con poco conocimiento en Ingeniería. De acuerdo con Carper (2000), “En un procedimiento legal, el ingeniero se desempeña en dos funciones como testigo experto. Primero, el ingeniero testifica su opinión profesional como ingeniero. En segundo lugar, e igual de importante, el ingeniero educa a la corte sobre los problemas técnicos, permitiéndoles entender la opinión del ingeniero”. Esto significa que el ingeniero tiene la obligación de fungir como educador, explicando conceptos y comportamientos complejos en palabras sencillas, de tal manera que aquellos no familiarizados en el tema comprendan lo sucedido y puedan tener en cuenta el argumento dado a la hora de tomar una decisión. De esto depende el éxito del ingeniero, su concepto será expuesto de una manera argumentada y entendible. Existe la posibilidad de que el juez no



PROYECTO DE GRADO
GUIA FORENSE COMO HERRAMIENTA TÉCNICA PARA EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PAVIMENTOS EN EL
TERRITORIO COLOMBIANO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS – UNIVERSIDAD DEL CAUCA

tenga en cuenta el testimonio si no se logra convencer por los argumentos o considera que aún después de la explicación, no entiende lo suficiente para guiarse por la evidencia y concepto profesional del ingeniero.



2.3. Pavimentos

Un pavimento es un sistema estructural de disipación de esfuerzos, cuya función es resistir, durante el periodo esperado, las cargas y condiciones climáticas para las que fue diseñado. Está constituido por capas compactas de materiales seleccionados superpuestas entre sí. Se espera que los pavimentos otorguen un medio seguro para transitar, sean cómodos para los usuarios y que su diseño contemple una estructura eficiente y economía. La importancia de estos sistemas reside en sus efectos positivos a la salud de la población aledaña, otorgando un valor agregado en cuanto a la seguridad y comodidad de los usuarios, de igual manera reduce tiempos y costos de transporte.

Los materiales empleados en la construcción de un pavimento deben tener propiedades idóneas para que el sistema se comporte adecuadamente. Los criterios de selección dependerán de las especificaciones elegidas para el proyecto, entre los ejemplos se tiene el Instituto nacional de vías, el cual cuenta con sus normas de ensayo de materiales para carreteras (2013) y especificaciones generales de construcción de carreteras 2022; otro caso a resaltar es del IDU, con sus Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C.; El material que compone cada capa varía ya que las capas deben ofrecer un soporte adecuado para el estrato superior y la distribución entre estas satisface a principios de economía y eficiencia. Como lo expresan Sánchez & Campagnoli (2016) “Cuanto más arriba se encuentre la capa dentro de la estructura, el material es más costoso de obtener o elaborar”; esto se debe a que las capas están ordenadas para que su capacidad de carga disminuya a medida que se profundiza en el terreno, es decir que usualmente, las de mejor calidad son las que están ubicadas en la superficie. Según Montejo (2002), las características que debe cumplir un pavimento son:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.

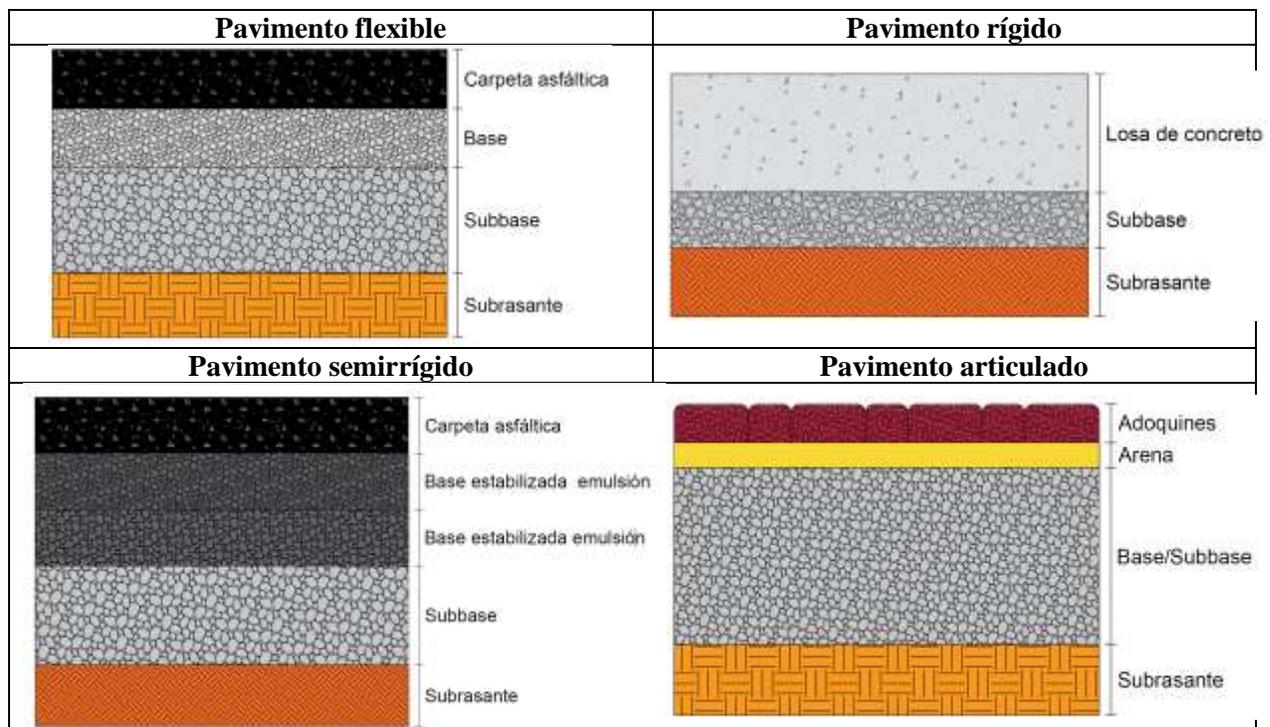


- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

Los pavimentos se pueden clasificar en cinco (5) diferentes tipos:

- Pavimentos flexibles.
- Pavimentos rígidos.
- Pavimentos semirrígidos.
- Pavimentos articulados.
- Pavimentos con placa huella

Tabla 2.3. Tipos de pavimentos



Fuente: Autoría propia.

2.3.1. Partes de un pavimento

Un pavimento es un sistema de capas que trabajan en conjunto para cumplir un fin general, cada elemento puede poseer distintos materiales, clasificación y función particular, todo esto dependiendo del tipo de estructura de la cual haga parte.



Tabla 2.4. Elementos estructurales de pavimentos flexibles

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	1. Según sección <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en corte • Subrasante en terraplén • Subrasante mixta 2. Según el material <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en roca • Subrasante en suelo arenoso • Subrasante en suelo limoso • Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Roca • Suelos • Agua
Bases y/o subbases	1. Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> • Gradación abierta • Gradación densa • Gradación intermedia • Uniforme 2. Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> • Suelos - cemento • Suelo -cal • Suelo - asfalto • Suelos - aditivos químicos 3. Bases asfálticas <ul style="list-style-type: none"> • Granular estabilizada con asfalto • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Función económica • Capa de transición • Disminución de deformaciones • Resistencia • Drenaje • Amortiguador cambios de volumen de la subrasante • Facilitar la construcción • Servir de rodadura provisional 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Agua • Suelo • Cemento • Asfalto • Otros
Riego de imprimación	1. • Imprimación	<ul style="list-style-type: none"> • Ligar • Impermeabilizar 	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto Liquido • Emulsiones asfálticas
Carpeta asfáltica	1. Tratamientos superficiales <ul style="list-style-type: none"> • Simple • Doble • Triple • Cuádruple 2. Macadam asfáltico 3. Concreto asfáltico <ul style="list-style-type: none"> • Mezcla en vía • Mezcla en planta en frio o en caliente • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Proveer una superficie de rodadura suave, segura y cómoda • Impermeabilizar la estructura • Mejorar la capacidad estructural - resistencia • Limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Asfalto • Otros

Fuente: Fernández (1985) en Higuera (2011).



Tabla 2.5. Elementos estructurales de pavimentos rígidos

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	1. Según sección <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en corte • Subrasante en terraplén • Subrasante mixta 2. Según el material <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en roca • Subrasante en suelo arenoso • Subrasante en suelo limoso • Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Roca • Suelos • Agua
Bases y/o subbases	1. Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> • Gradación abierta • Gradación densa • Gradación intermedia • Uniforme 2. Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> • Suelos - cemento • Suelo -cal • Suelo - asfalto • Suelos - aditivos químicos 3. Bases asfálticas <ul style="list-style-type: none"> • Granular estabilizada con asfalto • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Capa de transición • Dar capacidad al pavimento • Amortiguador cambios de volumen de la subrasante • Facilitar el drenaje • Facilitar la construcción • Servir de rodadura provisional • Prevenir el fenómeno de bombeo 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Agua • Suelo • Cemento • Asfalto • Otros
Elemento antifriccionante	<ul style="list-style-type: none"> • Riegos asfálticos • Tela de polietileno • Otros 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir fricción entre la base y la losa 	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto • Polietileno • Otros
Losa	<ul style="list-style-type: none"> • De concreto simple • De concreto reforzado • De concreto preesforzado 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia estructural • Superficie de rodadura • Impermeabilización 	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto • Acero de refuerzo
Juntas	1. Según su función <ul style="list-style-type: none"> • De construcción - contracción • De expansión y alabeo 2. Según su posición <ul style="list-style-type: none"> • Longitudinal • Transversal 3. Según su forma <ul style="list-style-type: none"> • Al tope, caras planas • Con luz 4. Según refuerzo <ul style="list-style-type: none"> • Sin pasadores • Con pasadores (transferencia) 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilitar la construcción • Controlar el agrietamiento por expansión, contracción o alabeo de las losas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Llenante • Sellantes • Acero

Fuente: Fernández (1985) en Higuera (2011).



Tabla 2.6. Elementos estructurales de pavimentos articulados.

ELEMENTO	TIPOS	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
Subrasante	1. Según sección <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en corte • Subrasante en terraplén • Subrasante mixta 2. Según el material <ul style="list-style-type: none"> • Subrasante en roca • Subrasante en suelo arenoso • Subrasante en suelo limoso • Subrasante en suelo plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Servir de fundación al pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Roca • Suelos • Agua
Bases y/o subbases	1. Bases granulares simples <ul style="list-style-type: none"> • Gradación abierta • Gradación densa • Gradación intermedia • Uniforme 2. Bases de suelo estabilizada <ul style="list-style-type: none"> • Suelos - cemento • Suelo - cal • Suelo - asfalto • Suelos - aditivos químicos 3. Bases asfálticas <ul style="list-style-type: none"> • Granular estabilizada con asfalto • Macadam asfáltico • Concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Dar capacidad al pavimento • Amortiguar cambios de volumen de la subrasante • Facilitar el drenaje • Facilitar la construcción • Servir de rodadura provisional • Prevenir el bombeo 	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados • Agua • Suelo • Cemento • Asfalto • Otros
Elementos de superficie	1. Bloque en piedra 2. Bloque en madera 3. Bloque en ladrillo 4. Bloque de concreto 5. Bloque de otros materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Proveer una superficie suave y segura • Mejorar la capacidad estructural • Impermeabilizar • Limpieza • Ornato 	<ul style="list-style-type: none"> • Piedra • Madera • Ladrillo • Concreto • Otros

Fuente: Fernández (1985) en Higuera (2011).

SUBRASANTE

La subrasante es la fundación de la vía, en otras palabras, el soporte del paquete estructural del pavimento y para tal fin, debe poseer determinadas propiedades estructurales; Su función es ofrecer un medio homogéneo y uniforme a las capas a la vez que recibe los esfuerzos remanentes de estas. La subrasante puede estar conformada por el suelo que se encuentra in situ si se demuestra que es apto para tal fin, en caso contrario es necesario mejorar las propiedades presentadas u optar por materiales de reemplazo. Para que un suelo sea adecuado como subrasante debe poseer una resistencia tal que no sufra deformaciones ni desgastes por aplicación de cargas o agentes atmosféricos, además, no debe ser susceptible a la presencia de agua, potenciales de cambio volumétrico altos pueden generar patologías en la estructura a menos de que



se aplique un método de impermeabilización o estabilización; Es importante tener en cuenta que la capacidad de soporte de la subrasante es uno de los factores de diseño de pavimento, a mayor resistencia menor será el espesor de las capas superiores, una leve mejora en este parámetro se traducirá en menor gasto de materiales y, teniendo en cuenta que usualmente la subrasante es el material de menor valor, es una opción viable para reducir significativamente costos.

SUBBASE GRANULAR

Descansando en la subrasante se encuentra la subbase granular, cuya importancia, en el caso de estructura de pavimento flexible, se basa en otorgar un material económico con capacidades suficientes para soportar el nivel de esfuerzos experimentados a esa profundidad, de separación entre la base y la subrasante para evitar contaminación en pavimentos flexibles, disminución de deformaciones, adecuado manejo del agua y dispersión de esfuerzos para transmitirlos adecuadamente a la subrasante. Cuando se tiene un pavimento rígido sus funciones son: suministrar un apoyo uniforme y estable a la losa de pavimento, disminución de cambios volumétricos y evitar el fenómeno de bombeo en juntas, grietas y bordes.

Se compone de materiales granulares los cuales deben ser evaluados para garantizar un adecuado comportamiento en servicio. El resultado de evaluación de propiedades como: dureza, durabilidad, resistencia del material, entre otras, permitirá dividir las subbases en A, B y C, clasificación que las reconocerá aptas para soportar niveles de tránsito NT3, NT2 y NT1, respectivamente; además, en función de la granulometría, pueden emplearse subbases tipo SBG-38 y SBG-50. Los espesores construidos de esta capa oscilan entre 10 y 50 cm para pavimentos asfálticos y entre 10 y 25 cm en pavimentos rígidos. Se recomienda que, al momento de su instalación, se divida el material en capas iguales de entre 10 a 20 cm de espesor para asegurar una compactación en toda la capa sin afectar las propiedades de los materiales.

BASE GRANULAR

La base granular es utilizada generalmente en los pavimentos flexibles y, en caso de utilizarla, soporta a la capa de rodadura; Se compone de materiales granulares y posee una resistencia mayor a la otorgada por la subbase, sus propiedades son suficientes para recibir los esfuerzos entregados por la capa de rodadura y transmitirlos a las capas subyacentes; el espesor de base también tiene como función reducir costos tomando en cuenta que su precio es menor al de la capa de rodadura. Al igual que para la subbase granular, INVIAS divide las bases en clases A, B y C para soportar niveles de tránsito NT3, NT2 y NT1, respectivamente. Según su granulometría, las bases serán de gradación gruesa (BG-40 y BG-27) o de gradación fina (BG-38 y BG-25). Los espesores de esta capa varían entre los 10 y 30 cm en un pavimento flexible y entre 10 y 25cm en uno rígido. Al igual que con la subrasante, se recomienda dividir el espesor a instalar de base en capas iguales de entre 10 a 20 cm.



BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA GRANULAR

Este proceso es una alternativa para aquellos proyectos donde se requiera modificar el comportamiento de la base; Colombia regula el uso de bases estabilizadas con emulsión por medio del artículo 340-22 de las especificaciones técnicas INVIAS 2022, en donde se presentan los requerimientos de los materiales, el equipo a emplear y los procedimientos a seguir.

La estabilización con emulsión se refiere a la mezcla de un material, granular o suelo, con emulsión asfáltica, agua y aditivos, si se requieren. Las características principales de una estabilización con emulsión asfáltica es la obtención de una capa flexible, resistente a la fatiga y con mayor resistencia a la humedad, es decir que, la emulsión asfáltica provee: incremento a la resistencia ante esfuerzos cortantes, impermeabilización parcial o total de la capa, incremento a la durabilidad de la capa, reducción de cambios volumétricos, estabilidad ante sollicitación de cargas, incremento a la flexibilidad de la capa, entre otros. La principal diferencia de la estabilización con emulsión asfáltica a la estabilización con cal o cemento, es la obtención de un material flexible, evitando así la posibilidad de reflexión de fisuras a las capas superiores.

RIEGO DE LIGA

Se refiere a la aplicación de una emulsión asfáltica de rompimiento rápido para adherir una capa bituminosa sobre una capa asfáltica o sobre una losa de concreto. Se emplea durante la construcción de pavimentos con más de una capa asfáltica o durante el refuerzo a una estructura de pavimento existente. Una deficiente aplicación de riego de liga ocasionará desplazamiento de la mezcla, deterioro superficial prematuro y pérdida de la superficie del pavimento. INVIAS (2022) especifica que para riegos de liga deben utilizarse únicamente emulsiones de tipo CRR-60, CRR-65, CRR-1m o CRR-2m cumpliendo los requisitos de los artículos 411 o 415 según aplique.

RIEGO DE IMPRIMACIÓN

Consiste en la aplicación de emulsión asfáltica de rompimiento lento o de asfalto líquido MC 30 para mejorar la adherencia en interfaz entre capas granular/asfáltica o granular/tratamiento bituminoso, como ventajas adicionales se encuentra la impermeabilización de la capa granular, endurecimiento de la superficie y sello de vacíos; manteniendo así la humedad de compactación hasta la aplicación del material superior.

MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO

Los materiales tratados con cemento se refieren a la mezcla uniforme de cemento, agua, aditivos y, suelos o agregados, para la construcción de una capa estructural del pavimento. Se encuentra reglamentado



según el artículo 350-22 de las especificaciones técnicas INVIAS 2022. El Instituto Nacional de Vías deja a consideración de constructor e interventor el considerar la capa resultante como una capa de base mejorada u otra capa según su desempeño y las condiciones requeridas en la estructura. El procedimiento de mezclado con cemento incrementará las propiedades de los agregados disponibles, por lo que es una alternativa cuando no se cumplen los requerimientos del proyecto. Montejo (1998) indica que el uso de cemento incrementará la rigidez de la capa, lo que permite una reducción de espesores.

Reyes & Rondón (2015) indican que tanto las partículas de suelo como de agregado pétreo no podrán ser mayores a la mitad del espesor de la capa compactada, además, deberá estar libre de cualquier elemento que se considere perjudicial para el comportamiento a futuro del pavimento.

Al trabajar con un material que desarrolla una gran rigidez, se debe determinar durante el diseño, si existe la necesidad de realizar prefisuración de la capa; la compactación deberá realizarse en un lapso no mayor dos (2) horas desde el inicio de la mezcla. Una vez compactada la capa estructural tratada con cemento, se debe proteger de la pérdida de humedad del material por mínimo siete (7) días; por esta razón, es necesario aplicar un riego de curado con una emulsión asfáltica tipo CRR-60 según lo especificado en el artículo 350-22; la apertura al tránsito se dará después de siete (7) días de realizado el proceso de compactación. Según lo especificado en la norma, la capa no deberá presentar irregularidades considerables, una condición de recibo de los trabajos se dará por medio de una evaluación del IRI.

CAPA DE ARENA

Se trata de una capa de arena de origen aluvial, sin trituración, gruesa y limpia cuyo uso se restringe a los pavimentos articulados, posee tres funciones, la de servir como capa de soporte para la colocación de los adoquines, actuar como filtro para el agua que se infiltre en las juntas existentes y efectuar amarre entre adoquines cuando penetra arena por las juntas. Según Reyes & Rondón (2015), el espesor de la capa de arena varía entre 30 a 50 mm compactos. El criterio para selección de espesor dependerá entonces de la existencia de capa base, tal como lo indica Montejo (1998), si se coloca base, el espesor de la capa de arena será de 30 mm, en caso contrario, el espesor debe ser de 50 mm.

SELLO DE ARENA

Es un sello constituido por arena de origen aluvial, sin trituración, fina y limpia, se utiliza para impermeabilizar, fijar y sellar las juntas entre adoquines, por ende, contribuye a que estos trabajen como un elemento conjunto.



ADOQUINES

Los adoquines son elementos rígidos prefabricados que componen la capa de rodadura de los pavimentos articulados; se pueden adquirir en diferentes formas, dimensiones y colores, razón por la cual se consideran en proyectos con fines estéticos. La resistencia del adoquín debe ser tal que soporte las cargas de tránsito y desgaste previstos, a la vez que brinden una superficie cómoda y segura para transitar.

Montejo (1998) recomienda que los adoquines tengan espesores de 60, 80, 100, 120 o 140 mm, siendo los de 60 y 80 mm los más comúnmente empleados, espesores superiores se utilizarán únicamente en zonas de tráfico muy pesado. Así mismo, señala que para ningún caso la longitud de los elementos excederá los 250 mm y que las tolerancias permitidas son de ± 2 mm para largo y ancho y de ± 3 mm para espesores. Por otra parte, el artículo 510 – 22 de INVIAS establece que en caso de que las dimensiones de los adoquines no se especifiquen en el proyecto, serán de 20 cm de largo, 10 cm de ancho y 8 cm de espesor.

Según INVIAS (2022), el parámetro de evaluación de los adoquines es la resistencia a la compresión, cuyo valor deberá ser mayor a 50 MPa para elementos individuales y, el promedio de 5 elementos, mayor a 55 MPa; mientras tanto, Montejo recomienda que los adoquines sean ensayados a flexión, con un módulo de rotura promedio de 4.5 MPa para la muestra y un valor individual superior a 3.6 MPa.

PLACAS HUELLA

Son franjas de concreto reforzado de 0.15 m o 0.2 m de espesor; sus dimensiones dependen de la geometría de la vía, en tangente, cada placa cuenta con 2.8 m de longitud y 0.9 m de ancho, mientras que, en curvas, su largo varía de 1 a 2.8 m y su ancho puede variar entre 0.9m, 1.35m y 1.8m. Son el elemento principal para la circulación de tránsito, por esto, la separación entre huellas coincide con la ubicación de las llantas de los vehículos. La placa huella puede fundirse sobre la subrasante o sobre una capa de apoyo, compuesta por material granular o suelo cemento; su refuerzo longitudinal consiste en el uso de varillas número 4 o número 5, con separación variable según los parámetros escogidos, véase Tabla 47, el refuerzo transversal es de una varilla número 2 cada treinta centímetros; para un funcionamiento adecuado, este acero se entrecruza con el de la riostra y con el de la siguiente placa huella; por esto, al ser una estructura monolítica, su comportamiento se asemeja al de un pavimento de concreto con refuerzo continuo, es decir, que se presentarán fisuras en toda la longitud que serán controladas por el acero de refuerzo. Para su construcción se emplea concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.



RIOSTRAS

Las riostras son vigas en concreto reforzado, de acuerdo con la guía INVIAS (2017), cuentan con un ancho de veinte centímetros (0.20 m), espesor de treinta centímetros (0.3 m) y longitud variable según el ancho de la sección; su refuerzo consiste en cuatro (4) varillas longitudinales número 4 y estribos en varilla número 2 cada 15 centímetros; en contraste, según los planos de la cartilla de obras menores (INVIAS, 2019b), la riostra posee una sección transversal de veinte centímetros (0.20 m) de ancho, veinticinco centímetros (0.25 m) de espesor y cuatro (4) varillas longitudinales número 3 con estribos en varilla número 3 cada veinticinco centímetros (0.25 m); el acero de la riostra se entrecruza con el de las placas huellas con el fin de que trabajen monolíticamente. De acuerdo con el INVIAS (2017), la función de la riostra es dar confinamiento transversal y longitudinal de los elementos del pavimento.

PIEDRA PEGADA

La guía de diseño de INVIAS (2017) denomina piedra pegada a las franjas de concreto ciclópeo que forman parte de la capa de rodadura de los pavimentos con placa huella, este material está compuesto por concreto y canto rodado, especificándose una resistencia a la compresión de 14 MPa a los 28 días (INVIAS, 2019b); Según INVIAS (2017), las funciones de la piedra pegada son:

- Disminuir costos de construcción al emplear un elemento de menor valor
- Propiciar canalización del tránsito por la alta rugosidad y falta de uniformidad que presenta la piedra pegada; motivando a los conductores a moverse por las placas huellas
- Contribuir a la estética del camino
- Las franjas de piedra pegada tienen un ancho de 0.9 m en tangente, sin embargo, en curvas y debido al sobre ancho de vehículos, son reemplazadas por incrementos en el ancho de las placas huellas.

CAPA DE RODADURA

Se refiere a la superficie de rodamiento del pavimento, es la encargada, entre otras cosas, de proveer una superficie segura para los usuarios por medio de uniformidad, textura y colores adecuados, soportar el tránsito actuante, evacuar el agua de escorrentía para evitar afectaciones en las capas inferiores. Generalmente, la capa de rodadura se compone de agregados enlazados por medio de un ligante, el cual puede ser asfalto o cemento hidráulico; una categorización de los pavimentos está en función del cementante empleado, denominando pavimentos flexibles aquellos con asfalto y pavimentos rígidos los que poseen cemento hidráulico. La capa de rodadura deberá cumplir funciones estructurales y funcionales, siendo la



capa exterior, será la que reciba y disipe los esfuerzos de mayor magnitud, así mismo y según Montejo (2002), debe proveer una superficie uniforme y resistente para el paso del tránsito.

Las estructuras de pavimento flexible tienen un sistema conformado inicialmente por la subrasante, capas granulares y las capas asfálticas. Con método de disipación de esfuerzos gradual a través de cada una de las capas y la importancia de cada una de estas reside en la transmisión y soporte de cada esfuerzo. A modo de chequeo, los esfuerzos máximos se pueden evaluar en distintos puntos de la estructura a través de programas como WESLEA y Openpave, los resultados se reemplazan en las leyes de fatiga y comportamiento que apliquen, por ejemplo, la ley de fatiga de Shell y posteriormente, en el modelo del Instituto Norteamericano del Asfalto INA para determinar la vida útil del sistema.

Las estructuras de pavimento en concreto rígido se caracterizan por contar con losas de alta rigidez que soportan la mayor parte de los esfuerzos generados, disminuyendo la magnitud de las cargas transmitidas, permitiendo así, disminuir espesores; además, pueden poseer una variedad de capas inferiores que otorguen un soporte uniforme al concreto y controlen el fenómeno de bombeo (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2016, pp 12-13). Los pavimentos articulados cuentan con adoquines y su comportamiento dependerá del tipo de material que conforme la capa de apoyo.

Los pavimentos con placa huella son un tipo de estructura de origen colombiano, consiste en el uso de franjas de concreto reforzado, de concreto ciclópeo y de vigas transversales conocidas como “riostras”. Según expone INVIAS (2017), su modo de falla se denomina “carga última”, donde la ruptura ocurrirá ante esfuerzos que superen la resistencia última de los elementos de concreto reforzado; lo anterior implica que la sección fallará ante una única pasada de un vehículo cuya configuración genere solicitaciones mayores a las de diseño. Son una alternativa para vías terciarias con volúmenes de tránsito bajos, concibiéndose con el propósito de garantizar circulación satisfactoria a un valor menor de construcción y mantenimiento convencional, por esta razón, no requieren mantenimiento de la capa de rodadura, no se modifica en grandes proporciones la geometría existente y, durante su construcción, se emplean materiales y mano de obra del sitio.

BERMAS

Las bermas son franjas ubicadas contiguamente a los carriles de circulación extremos, de acuerdo con Sánchez & Campagnoli (2016) “deben tener ancho constante, estar libres de obstáculos y presentar una estructura homogénea en toda su sección”. Son elementos de utilidad tanto para la estructura del pavimento como para la seguridad de todos los actores viales. Entre las funciones que cumplen se tiene:

- Dar confinamiento lateral a la superficie de rodadura



- Controlar la humedad y las posibles erosiones de la calzada
 - Incrementar la seguridad de los usuarios otorgando una franja de separación con el tránsito
 - Proporcionar un espacio adecuado para estacionamiento de vehículos en caso de emergencia.
- Brindar espacio para llevar a cabo operaciones de mantenimiento rutinario con seguridad
- Permitir la circulación de bicicletas en caso que no exista ciclo vía.
- Mejorar la distancia de visibilidad de parada en curvas horizontales

Las bermas deberán cumplir con lo especificado en el Manual de diseño geométrico de carreteras del Invías en cuanto a términos de seguridad. Refiriéndose a la estructura, estas deben diseñarse de tal manera que soporten las cargas estáticas ocasionales de los vehículos que transitan, De acuerdo con Sánchez & Campagnoli (2016) es factible construir las bermas con la misma estructura del pavimento, pues el costo adicional se compensa con la simplificación del método constructivo y la homogeneidad estructural. Por otra parte, es deseable que exista continuidad superficial entre la calzada y la berma, sin embargo, los usuarios deben poder diferenciar visualmente entre estos elementos e identificar el límite entre ellos, para esto, pueden complementarse con elementos alertadores como bandas o tachas.

OBRAS DE DRENAJE Y SUBDRENAJE

Se refieren a las obras destinadas a controlar el flujo de agua proveniente del área de influencia de la construcción. La acción excesiva del agua es una de las principales razones del deterioro prematuro de las estructuras pues el exceso de humedad origina una amplia gama de patologías. Por lo anterior, se puede afirmar que la existencia y la condición en la que se encuentran el drenaje influye en gran medida a la vida útil del pavimento, razones por las que se deberá evaluar el diseño y el estado de los componentes del drenaje durante una investigación forense. De acuerdo con Montejó (2002) y Sánchez & Campagnoli (2016) Los objetivos que debe cumplir el drenaje son:

- Controlar el agua que llega a la vía y evitar que afecte al pavimento por escurrimiento superficial.
- Facilitar la ejecución de las explanaciones durante la fase de construcción de la carretera.
- Aumentar la capacidad portante de la subrasante y reducir así el espesor del pavimento.
- Contribuir en la estabilidad de los taludes mediante la orientación más favorable de los flujos de agua interna, reducción de presiones intersticiales y en consecuencia el mejoramiento de las propiedades geotécnicas.
- Interceptar las filtraciones subterráneas para impedir afloramientos de agua en el pavimento.
- Drenar el agua superficial que se infiltre en el pavimento y en las estructuras de contención.

Entre los elementos que conforman el drenaje se pueden encontrar:



Bombeo y peralte: El bombeo es la pendiente transversal que se le da a la capa de rodadura para conducir el agua de esorrentía hacia los costados, por otra parte, el peralte es la inclinación dada al perfil transversal en las curvas horizontales para contrarrestar el efecto de la fuerza centrífuga que actúa sobre los vehículos. Son especialmente importante en terrenos planos donde las carreteras no cuentan con pendiente longitudinal para evacuar el agua, además, contribuyen a la seguridad de los usuarios pues disminuyen la posibilidad que los vehículos experimenten el fenómeno de hidroplaneo.

Bordillos: Son dispositivos de contención ubicados en los extremos de la vía. Funcionan como barrera para mantener el agua proveniente del bombeo dentro del sistema de drenaje y así evitar erosión o saturación de taludes, terraplenes y zonas aledañas.

Descoles: Son canales que cumplen con la función de transportar el agua entregada por las cunetas hasta zonas alejadas donde no representen daño hacia la estructura o taludes.

Cunetas: Son zanjas, usualmente naturales o en concreto, ubicadas en los extremos de la vía cuyo objetivo es el de recibir y conducir longitudinalmente el agua superficial, hasta aliviaderos o alcantarillas y así evitar la erosión o saturación de los taludes, terraplenes y zonas aledañas. De acuerdo con el INVIAS (2009), las secciones recomendadas son: transversales parabólicas, triangulares y rectangulares o trapezoidales. Se deben limpiar rutinariamente para evitar estancamientos de agua y posterior afectación al pavimento.

Vegetación: La vegetación se considera la protección más efectiva contra la acción erosiva del agua; Montejo (2002) resalta que la plantación de especies vegetales retarda el escurrimiento y por ende disminuye la energía del agua, propiciando el equilibrio de humedad entre los suelos de corte y terraplén.

Zanjas de coronación: Son zanjas destinadas a evitar la erosión de taludes y el colapso del sistema de drenaje superficial de la vía, se localizan en la parte superior de los taludes de corte para interceptar y transportar las aguas que escurren por las pendientes naturales hasta un sitio seguro.

Alcantarillas: Son estructuras encargadas de transportar transversalmente y por debajo del pavimento, el agua recogida por un costado de la vía y entregarla a un descole. Su sección puede variar, siendo las circulares las más comunes.

Subdrenes longitudinales: Son elementos de que hacen parte del subdrenaje, están ubicados en zonas de corte y, de acuerdo a Montejo (2002), sus principales funciones son el abatimiento de nivel freático, eliminación de aguas de filtración y derivación de fuentes de aguas situadas debajo de la subrasante.



SEÑALIZACIÓN

Son todos aquellos elementos y marcas destinadas a guiar adecuadamente a los conductores a lo largo de su trayecto. Entre sus funciones, son elementos de seguridad vial que condicionan el modo de manejo dentro de una vía y previenen a los usuarios de peligros cercanos, disminuyendo la accidentalidad y optimizando los tiempos de circulación; por esta razón, el INVIAS, indica que los mensajes en los dispositivos de regulación de tránsito serán de fácil y rápida interpretación, trasmitiéndolos por medio de símbolos, elementos y leyendas. Los requisitos para pintura, elementos y procedimientos a emplear se especifican en el capítulo 7 de las especificaciones técnicas INVIAS 2022. El manual de señalización vial (INVIAS, 2015) clasifica las posibles señales en:

- Señalización vertical
 - Señales reglamentarias
 - Señales preventivas
 - Señales informativas
 - Señales transitorias
- Señalización horizontal
- Señalización y medidas de seguridad para obras en la vía
- Otros dispositivos para la regulación de tránsito

Son elementos a tener en cuenta durante una investigación forense porque denotan cambios a lo largo de la vía, lo cual puede contribuir a identificar tramos donde el comportamiento del pavimento cambia según alguno de los siguientes parámetros: velocidad de diseño y operación, reductores de velocidad, incorporación de tráfico pesado, distribución de carril, entre otros. Asimismo, se podrá comparar la señalización actual con las de diseño, obteniendo así hipótesis referidas al comportamiento de los vehículos durante la etapa post construcción.

OBRAS DE CONTENCIÓN

Son aquellas estructuras erigidas para estabilizar terrenos inclinados, su principal objetivo es evitar movimientos en masa que puedan afectar al pavimento, viviendas e infraestructura aledaña; son necesarias en el ámbito vial por haber tramos donde, la topografía del lugar, obliga a construir zonas de corte, provocando que el pavimento se cimente sobre una ladera o que se encuentre en la parte inferior de un terreno inclinado. Las obras de contención están relacionadas con el manejo de aguas, siendo las obras de drenaje y la vegetación, factores que contribuyen a la estabilidad de la banca. Estos sistemas de protección deben diseñarse teniendo en cuenta el tipo de material, la pendiente del terreno, las cargas a soportar, la estratificación del suelo, el clima de la zona, las corrientes de agua cercanas y los eventos sísmicos e hidrológicos durante el periodo de diseño.



Entre las obras de contención más utilizadas se tienen los muros de contención, las barreras flexibles, los sistemas de anclaje, entre otros; en adición, la estabilidad de los puntos críticos se beneficia por:

Drenaje: Conduce el agua y evita la erosión del terreno

Vegetación: Estabiliza la ladera y evita problemas por erosión, desmoronamiento, entre otros.

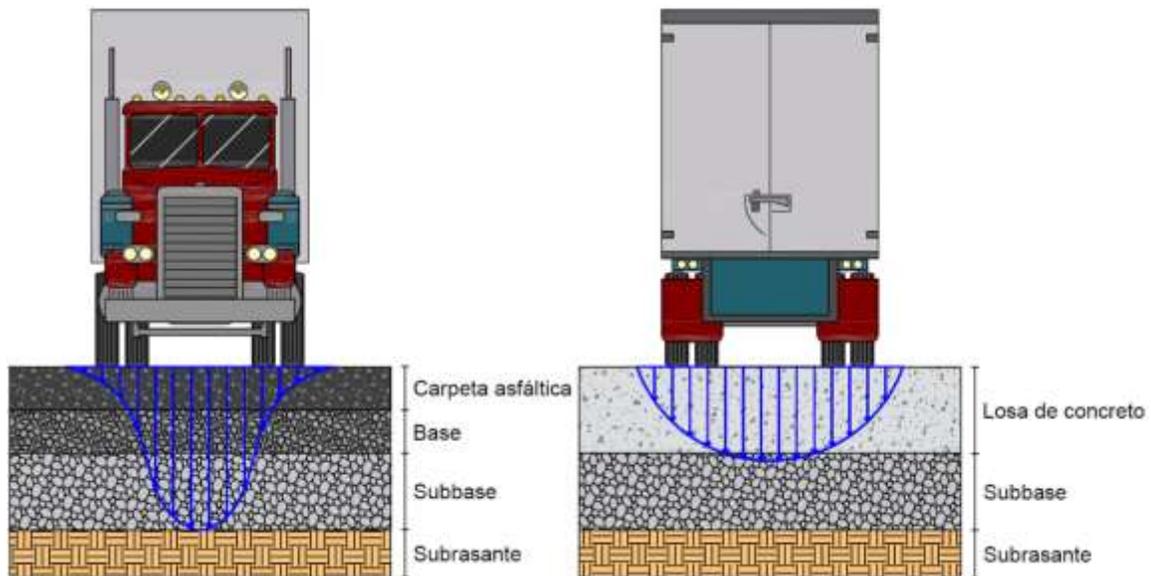
Geo-sintéticos: Refuerzan el terreno gracias a su capacidad de soportar esfuerzos



2.3.2. Funcionamiento de un pavimento

Los pavimentos son estructuras destinadas al tránsito de vehículos, la función del pavimento es disipar los esfuerzos generados por el paso de carga a la vez que otorga un medio seguro y cómodo para transitar. El modo en que la estructura funcione dependerá del tipo de pavimento, que a su vez estará definido por los materiales utilizados. Los pavimentos flexibles reciben las cargas del tránsito y las disipan gradualmente a lo largo de los estratos inferiores, se caracterizan por presentar deflexiones altas. Los pavimentos rígidos distribuyen las cargas en áreas considerables, por lo que se reducen significativamente los esfuerzos experimentados por las capas subyacentes; la rigidez de la losa produce que los elementos manifiesten deflexiones bajas ante las solicitaciones. Por último, el comportamiento de los pavimentos articulados está condicionado por la capa de soporte, su comportamiento será el de un pavimento flexible si posee una capa granular no ligada; En caso de tener una base estabilizada con cemento, su comportamiento se asemejará al de una estructura semirrígida.

Ilustración 2.1. Disipación de esfuerzos según el tipo de pavimento



Fuente: Autoría propia.

Para calificar el funcionamiento de un pavimento, hay que tener presente los conceptos de capacidad estructural y condición superficial. Se define la capacidad estructural de un pavimento como su aptitud para soportar, absorber y disipar las cargas provenientes del tránsito durante el periodo de vida útil. La condición superficial está relacionada con la capacidad que tiene la capa de rodadura de ofrecer un medio seguro y cómodo a los usuarios, este aspecto depende de propiedades como: regularidad superficial, adherencia neumático-pavimento, ruido de rodadura y visibilidad.



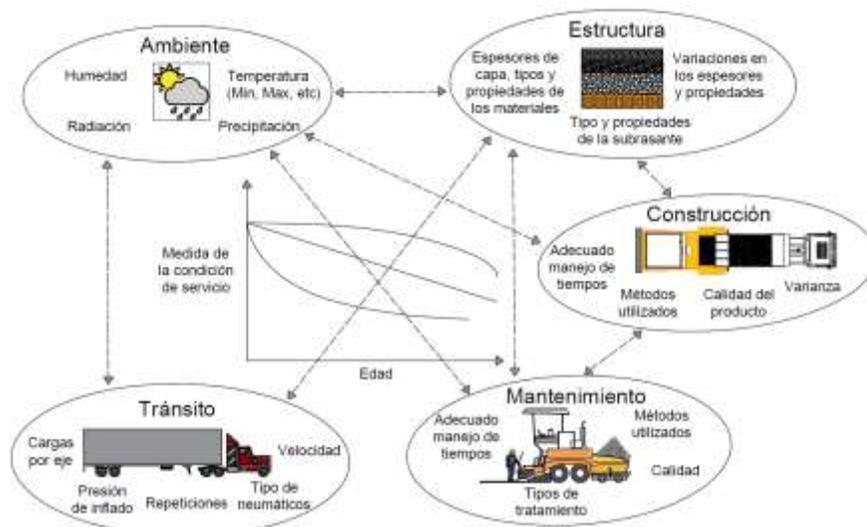
Tabla 2.7. Indicadores de las características que se miden en los pavimentos

Tipo de estudio	Función del pavimento que se evalúa	Característica de que se mide	Ejemplos de indicadores e índices
Funcional	Comodidad	Rugosidad	Índice de rugosidad internacional (IRI)
			Índice de servicio presente (PSI)
			Índice del cuarto de carro (QI)
	Seguridad	Ruido	Nivel de presión sonora (SPL)
		Textura	Macrotextura
			Microtextura
Resistencia al deslizamiento	Coficiente de resistencia al deslizamiento		
Estructural	Capacidad estructural	Propiedades mecánicas	Índice de fricción internacional (IFI)
			Deflexiones
		Deterioros ³	Espesores
			Agrietamiento
			Otros defectos superficiales

Fuente: Instituto Nacional de Vías INVIAS (2016).

El comportamiento del pavimento se verá definido por la interacción entre los factores principales de la estructura y sus solicitaciones: las cargas de tránsito, el clima del lugar, los materiales empleados, los métodos constructivos, la estructura escogida, el mantenimiento dado, etc.

Ilustración 2.2 Factores que afectan el desempeño de los pavimentos



Fuente: Adaptado de Haas R, Falls L C, MacLeod D, and Tighe S (2004)

³ Los deterioros de los pavimentos pueden tener origen y efecto tanto funcional como estructural. Su ubicación en el grupo estructural es simplemente una simplificación para resumir la información de la tabla. (INVIAS 2016b)



2.3.3. Patologías en obras de pavimentos

Fallo

“El fallo es una diferencia inaceptable entre el desempeño esperado y el observado”

Leonards (1982) en Carper (2000:38)

La diversidad de patologías que afectan un pavimento son generalmente producto de un determinado número de causas que evolucionan hasta transformarse en el fallo final. Estas causas pueden ser categorizadas de diferentes maneras, sin embargo, la mayoría comparte su origen, el factor humano. Según el estudio de Carper, la causa subyacente de un fallo, en ocasiones se encuentra en: ignorancia, incompetencia, negligencia y avaricia; fallos humanos conocidos como “los 4 jinetes del apocalipsis ingenieril”. Profundizando en sus palabras, podemos ver ejemplos de ignorancia en casos donde se asignan contratos a personas sin conocimiento claro en los procedimientos contratados; incompetencia a través del uso de profesionales que no cumplen con los requerimientos mínimos de experiencia; negligencia al no ejecutar la cantidad requerida de ensayos, supervisión en obra e incumpliendo con el seguimiento del control de calidad; por último, avaricia en el uso de materiales que no cumplen las especificaciones mínimas y/o cantidades menores a las que se están pagando.

Estas fallas humanas se reflejan en errores de diferentes tipos; Carper (2000), clasifica y define las causas de fallos en estructuras civiles de la siguiente manera:

1. Selección del sitio y errores de desarrollo in situ

Errores en la planeación del uso del suelo, estudios geotécnicos insuficientes o no existentes, exposición innecesaria a peligros naturales

2. Deficiencias de programación

Expectaciones pobremente definidas, falta de definición del alcance del proyecto.

3. Errores de diseño

Errores en concepto, fallos al considerar las cargas, errores de cálculo, uso erróneo de software de computador, problemas de detalle incluyendo la selección de materiales incompatibles, fallo al considerar los requerimientos de mantenimiento y durabilidad, especificaciones inadecuadas o inexistentes para los materiales o calidad de trabajo esperado.



4. Errores de construcción

No conformidad a la intención del diseño, accidentes de equipo o excavación, excesivas cargas de construcción, errores de secuencia, apertura prematura.

5. Deficiencias de material

Inconsistencias materiales, deterioración prematura, defectos de manufacturación o fabricación.

6. Errores de operación

Alteraciones a la estructura, cambio en el uso, sobrecarga negligente, mantenimiento inadecuado.

Lo anterior puede manifestarse a lo largo del proyecto, ejemplos de cada categoría se perciben en: falta de ensayos para diseño, empleo de modelos no aplicables a las condiciones locales, falta de experiencia de personal de diseño, construcción o supervisión, procedimientos o equipos de construcción no compatibles con el tipo de material u obra, pobre control de calidad de materias primas e ítems construidos, disminución de cantidades, carencia de mantenimiento, entre otras. Similar a lo planteado por Carper, son las posibles causas de fallos en obras de pavimentos descritas por Montejó (2002), las cuales son:

- Elevado incremento de las cargas circulantes y de su frecuencia con respecto a las previstas en el diseño original
- Deficiencias durante el proceso constructivo en la calidad real de los materiales, en espesores o en las operaciones de construcción, particularmente en la densificación de capas
- Diseños deficientes
- Factores climáticos regionales desfavorables
- Deficiente mantenimiento por escasez de recursos económicos disponibles, equipo, maquinaria especializada y personal capacitado
- Problemas de aprovisionamiento por agotamiento de materiales adecuados, obligando a mayores distancias de acarreo.

Es importante identificar las causas origen, para esto se debe aislar el error o combinación de errores que evolucionaron hasta convertirse en el fallo de la obra, es recomendable dedicar un análisis profundo a esta actividad ya que de esta emanará la recolección de evidencia, argumentación del caso y reconstrucción de los hechos; para esto, el ingeniero debe conocer los comportamientos de fallos y deterioros en pavimentos.

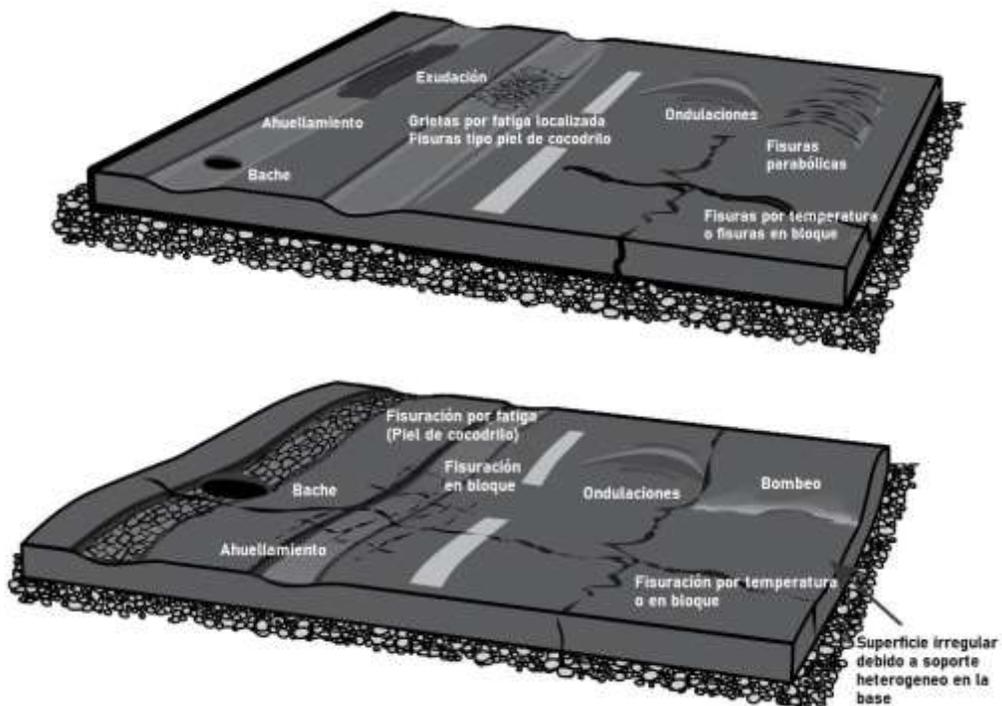


De acuerdo a la bibliografía nacional, se pueden clasificar los fallos de pavimentos en dos categorías: fallo estructural y fallo funcional.

Podemos definir el fallo estructural como el estado en el cual un pavimento pierde la capacidad de absorber y transmitir cargas sin que se generen deterioros. INVIAS (2008) plantea que esto ocurre cuando se degrada una o más capas constitutivas a tal punto que se concluye que la capa afectada ha alcanzado su periodo de diseño. Los deterioros de tipo estructural más conocidos en pavimentos son las fisuras y deformaciones.

El fallo funcional se refiere a la pérdida de alguna de las características que componen la condición superficial del pavimento. Estos deterioros se experimentan en la capa de rodadura y afectan la seguridad y comodidad de los usuarios ya que se relacionan propiedades como: resistencia al deslizamiento, macrotextura, microtextura, regularidad superficial, entre otros. Algunos deterioros funcionales son: pérdida de agregado, pérdida de ligante, descascaramiento.

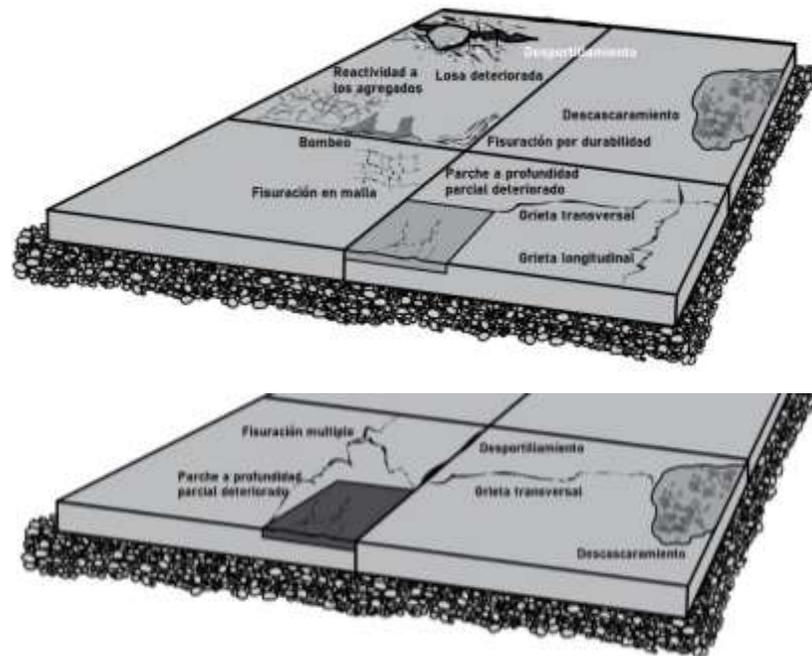
Ilustración 2.3. Algunos de los deterioros manifestables en pavimentos flexibles



Fuente: Editado & traducido de Smith, Harrington, Pierce, Ram, & Smith (2014)



Ilustración 2.4. Algunos de los deterioros manifestables en pavimentos rígidos



Fuente: Editado & traducido de Smith et al (2014)

Patologías

Las patologías son los síntomas y señales que se presentan en un pavimento como manifestación de un fallo. Su estudio es importante ya que permite identificar el tipo de problema a tratar, su causa y el método de rehabilitación a emplear. El área afectada por los deterioros se denomina “extensión”, mientras que, a la gravedad del daño se le conoce como “severidad”. En la medida que se ignoren las patologías en un pavimento, aumentarán su extensión y severidad, derivando en otro tipo de daños; es decir que, entre más tiempo se permita el desarrollo de los pavimentos, este se verá afectado de una manera más rápida y requerirá más dinero para su rehabilitación.

En el entorno nacional existen diferentes manuales que detallan los diferentes fallos de pavimentos, se resalta en especial los documentos del INVIAS, los cuales presentan información muy completa sobre las patologías, con detalles como: su ilustración, definición, causas probables, unidad de medición, criterios de severidad y evolución probable. Los criterios varían según el documento, por lo que se recomienda revisar el listado de manuales al tiempo para complementar la información requerida, la lista está compuesta por los siguientes estudios:

- Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, Instituto nacional de vías, Universidad nacional de Colombia, 2006.



- Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos, Instituto nacional de vías, Universidad nacional de Colombia, 2006.
- Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (pavimentada y en afirmado), Ministerio de transporte, Universidad Javeriana, 2008.
- Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, Instituto nacional de vías, 2008.
- Manual de mantenimiento de carreteras, Volumen 1 & 2, Instituto nacional de vías, 2016.

Guiándose en la información consignada en INVIAS (2006), los daños en pavimentos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Fisuras
- Deformaciones
- Daños en juntas
- Pérdidas de capa
- Daños superficiales
- Otros (Afloración de agua y finos, desplazamiento de bermas, etc.)

El manual de mantenimiento del INVIAS (2016) no emplea la anterior categorización, sin embargo, para una comprensión mejor de cada tipo de deterioro, se da una breve descripción de cada categoría.

FISURAS:

Las fisuras son aberturas alargadas que constituyen una discontinuidad en la capa de rodadura. Su aparición indica la existencia de un daño avanzado en el sitio. Inicialmente no afectan la comodidad del usuario, sin embargo, con el paso del tiempo y ante las condiciones de la zona (clima, tránsito, humedad), evolucionarán en fallos que representan un gran riesgo en la seguridad de los conductores; De acuerdo a los manuales de inspección visual del Invias (2006), las fisuras con alta severidad pueden transformarse en: pérdida de agregado, desintegración, descascamientos, desportillamientos, asentamientos, baches, abultamientos escalonamientos y fracturación de la losa. Las fisuras son de diferentes tipos y pueden ser clasificadas de acuerdo a su forma o a su origen.

DEFORMACIONES:

Son cambios permanentes en el acabado del pavimento, se identifican por ser anomalías en la rodadura con forma de depresiones, ondulaciones y abultamientos; su origen puede ser de dos formas, la primera, en las capas superiores, al haber una acumulación importante de deformaciones plásticas, potenciadas por las propiedades de los materiales o por las condiciones de servicio, tráfico y clima; la segunda, en las capas inferiores, siendo un fallo de carácter estructural por la pérdida del soporte del



material; estos daños se manifestarán en la superficie sin importar que capa esté comprometida, sin embargo, la forma adoptada ayudará a identificar el origen.

En general, estos deterioros se asocian a: problemas en la compactación de capas, temperaturas altas, cargas altas de tránsito, velocidades bajas, cambios en las velocidades, contenido de ligante, mal drenaje, entre otros; Las deformaciones de baja severidad pueden ser desapercibidas, pero, a medida que evolucionan, condicionarán la movilidad hasta el punto de afectar considerablemente la seguridad y confort de los usuarios. INVIAS (2006), identifica como deterioros pertenecientes a la categoría de deformaciones a las ondulaciones, los abultamientos, los hundimientos y los ahuellamientos.

PERDIDAS DE CAPA:

Son patologías que consisten en algún tipo de desprendimiento de material, afectando la comodidad del usuario, el comportamiento de la capa de rodadura e incrementando la susceptibilidad de la capa a factores externos. Los deterioros que componen esta categoría son: descascaramientos, baches y parches.

DAÑOS SUPERFICIALES:

Se refiere a los deterioros que, inicialmente, afectan el aspecto funcional del pavimento, es decir, que se localizan en la capa de rodadura; la evolución desmedida de estos deterioros creará desintegración de la capa e incrementará la exposición de las capas inferiores a agentes externos. Los deterioros categorizados como daños superficiales son:

- Desgaste superficial
- Pérdida de agregado
- Pulimento del agregado
- Cabezas duras
- Exudación
- Surcos
- Desportillamiento de juntas
- Desintegración
- Pulimento
- Escalonamiento de juntas longitudinales y transversales
- Levantamientos localizados
- Desgaste de la superficie

OTROS:

Son patologías que, por su naturaleza, no pueden asignarse a las anteriores categorías. Se encuentran compuestos por los siguientes deterioros:

- Corrimiento vertical de la berma



- Separación de la berma
- Afloramiento de finos
- Afloramiento de agua
- Punzonamiento
- Fisuración por retracción
- Fisuración ligera de aparición temprana
- Fisuración por durabilidad
- Cruce de vía férrea
- Descamado
- Bombeo sobre la junta transversal, bombeo sobre la junta longitudinal
- Descenso de la berma
- Separación entre la berma y el pavimento

En el anexo No. 1 se presenta una tabla resumen que contiene la descripción de las diferentes patologías, sus causas, evolución e ilustración.

2.4. Evaluación de pavimentos

El estado de una vía varía a lo largo de su vida útil. Después de años ante la constante aplicación de cargas e interacción con las condiciones locales, es normal que se presente un deterioro gradual y cambio en las propiedades de las capas. Se hace necesario evaluar el pavimento, para determinar las condiciones en las que se encuentra, por motivos múltiples: como parte de un sistema de gestión de pavimentos, por un deterioro acelerado que amenaza la integridad del pavimento, para determinar las causas que llevaron al fallo y plantear reparaciones que garanticen una solución adecuada, para evaluar el funcionamiento de nuevas técnicas o productos, para asignar responsabilidades por fallo, entre otras. La evaluación está conformada por todas las actividades, procedimientos y ensayos que permiten valorar y obtener información de la estructura.

2.4.1. Inspección visual

La inspección visual es un proceso que permite identificar y cuantificar los deterioros presentes en el pavimento, facilitando la información necesaria para estimar la condición de la vía y así desarrollar un plan de intervención para las siguientes etapas. Se realiza tempranamente al tener características que lo hacen un primer acercamiento adecuado, pues se recorre y detalla la totalidad de la vía, se extrae gran cantidad de información que puede ser empleada para conseguir de manera exitosa el objetivo de la investigación, otorga ideas de los ensayos a emplear y los sitios o secciones para ejecutarlos, además, como menciona, Smith (2004), es una forma de evaluación relativamente económica en comparación con procedimientos de ensayo más costosos. La inspección visual se considera uno de los procesos más eficientes para evaluar el pavimento, por esta razón, el INVIAS desarrolla este método en sus manuales de inspección visual, manuales de rehabilitación y manuales de mantenimiento; la experiencia del equipo de



investigación definirá en gran medida los aportes obtenidos por este procedimiento, debido a la naturaleza de la inspección visual, los resultados variarán según el nivel de detalle que los profesionales puedan captar

También conocido como levantamiento de daños, permite hacer supuestos sobre las razones de falla en pavimentos. Entre los procedimientos a emplear para evaluar el estado del pavimento están el método VIZIR y el Pavement Condition Index -PCI-, los cuales, a través de observación y medición de áreas, cuantifican el estado de la estructura. El Instituto Nacional de Vías cuenta con dos manuales de inspección visual de pavimentos, herramienta a usar para producir hipótesis del comportamiento de los pavimentos, en estos documentos se tratan temas como fisuras, deformaciones, pérdidas de capa, daños superficiales, etcétera. El fin de esta etapa es la elaboración de un reporte de daños con formatos anexos donde residan las patologías presentadas, las severidades de estas y la extensión de cada una.

Para ejecutar la inspección visual de una obra de pavimentos, se recomienda iniciar con un recorrido vehicular a la obra, el objetivo es observar y grabar las patologías presentadas, el trayecto será de ida y vuelta para registrar un sentido y/o carril por pasada. La inspección detallada se realizará a pie o de manera automatizada, se identifican los deterioros y se consigna la descripción de la patología, clase, extensión, severidad, esquema, punto y coordenadas del GPS, y los datos de la diligencia (fecha, hora, tramo, etc.). El fin de esta etapa es la elaboración de un reporte de daños con formatos anexos donde residan las patologías presentadas, las severidades de estas y la extensión de cada una. Las posibles observaciones tendrán que contribuir con el plan de intervención provisional o anotaciones para el análisis del ingeniero, es decir, equipos de evaluación a emplear posteriormente y/o factores presentados que aporten al incremento del daño.

2.4.2. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos, END, son aquellos equipos que permiten evaluar las características del pavimento sin afectar la estructura. Se emplean en fases iniciales de la investigación donde se conoce que zonas evaluar, pero todavía se tienen interrogantes de la causa del fallo. La principal característica de los ensayos no destructivos es que permite evaluar zonas extensas en un periodo de tiempo relativamente bajo y que, al emplearlos, se obtiene información sobre diferentes parámetros del pavimento. De acuerdo con Amran et al (2021), el uso de END incrementa la calidad de la información al eliminar cualquier subjetividad asociada con los métodos de inspección visual empleados. La fase de ensayos no destructivos, deberá emplearse cuando el plan de investigación inicial esté aprobado ya que garantiza que se conocen que secciones se van a evaluar y se tiene una idea de que es probable encontrar.



Entre las ventajas destacadas se tiene que su menor costo hace de los END una solución viable para obtener información en las etapas iniciales, como se muestra en la siguiente tabla, la variedad de ensayos no destructivos permite obtener información tanto funcional como estructural, además, en términos económicos, se ahorra dinero en términos de operación y reparación de pavimento. Los ensayos no destructivos más conocidos son: El georradar, el Deflectómetro de impacto, los densímetros, los equipos automatizados de inspección visual, los medidores de rugosidad y textura, entre otros; Desde otra perspectiva, la desventaja más inmediata de los ensayos no destructivos es que no entregan evidencia física, lo cual obliga a ejecutar una fase de evaluación destructiva para obtener los elementos materiales probatorios que se requieran, además, son muy susceptibles al análisis de resultados, es decir que la experiencia del profesional juega un papel muy importante para no malinterpretar las gráficas o valores obtenidos por el equipo de ensayo.

Sin los ensayos no destructivos, no solo sería muy costoso hacer una intervención, quizás ni siquiera se obtengan resultados satisfactorios; por ejemplo, un problema de evaluar destructivamente un pavimento, es que si tiene una gran extensión, se deberá hacer una evaluación a intervalos constantes o en sitios definidos por el ingeniero, sin embargo, los costos se aumentarán muchísimo, más horas de trabajo incrementan el valor del personal, de viáticos y de reparación, más aún, existe la posibilidad que la zona donde se localice evidencia física importante sea evaluada muy adentrada la investigación o que incluso, no se evalúe. Lo anterior muestra la importancia del uso de ensayos no destructivos como complemento de los ensayos destructivos, de esta manera, el ingeniero forense asegura un uso adecuado y eficiente de los recursos.

2.4.3. Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos otorgan información precisa al tener contacto directo con la estructura, sirven para recolectar evidencia física y permiten comprobar los resultados obtenidos con los ensayos no destructivos, si no se sabe que elemento del pavimento se va a evaluar, resultan poco dicentes y costosos (Smith, 2004); estos ensayos son necesarios para soportar el motivo de falla en aquellos casos donde solo se puede extraer cierta cantidad de información de ensayos no destructivos (Mooney, Miller, Yin The, & Bong, 2000).

La etapa de ensayos destructivos se refiere a la intervención invasiva a la estructura del pavimento, consiste en el empleo de equipos de extracción para visualización del estado interno del sistema y la obtención de muestras para la evaluación de propiedades. Se recomienda que los ensayos destructivos se ejecuten en las etapas intermedias de la investigación, cuando ya se tiene conocimiento del estado del



pavimento, se han planteado hipótesis preliminares y se ha direccionado la investigación según los resultados obtenidos en la fase de ensayos no destructivos. La ventaja de este tipo de ensayos es una evaluación precisa de las propiedades, la intervención directa con las muestras del pavimento, la verificación de resultados obtenidos durante los END y la obtención de evidencia física del sitio. Los ensayos destructivos se consideran costosos y arduos de ejecutar, por eso, un número desmedido de intervenciones de este tipo resultará en una investigación costosa, extensa y con información extra sin aportes significativos.

Una de las principales características de la etapa de evaluación destructiva es la obtención de muestras alteradas e inalteradas; las muestras alteradas se refieren a aquellas que no conservan las propiedades del suelo en su estado natural, principalmente en su estructura, este tipo de muestras permiten la evaluación de propiedades básicas: granulometría, límites de atterberg, contenido de materia orgánica, entre otros. Las muestras no alteradas mantienen la configuración natural del suelo y permiten una mayor variedad de ensayos.

La planeación de los ensayos destructivos será de particular interés dada la naturaleza de la intervención; el ingeniero deberá tener en cuenta ciertos aspectos para minimizar daños a la vía, a la población y a las muestras. Antes de la ejecución de los ensayos destructivos, se deberá obtener información del lugar y coordinar los recursos requeridos: sitios de intervención, aviso a las autoridades pertinentes, obtención de permisos, señalización vial a emplear, plan de manejo de tránsito, planos de localización de obras de servicios públicos existentes, materiales de reemplazo, procesos de reparación a emplear, etc.

2.4.4. Ensayos de laboratorio

Son ensayos sobre muestras extraídas en campo, otorgan información específica sobre una o más propiedades deseadas; se realizan en un laboratorio por diferentes razones, entre esas, el hecho de que algunos equipos son demasiado grandes y/o delicados como para transportarlos a obra, además, algunas normas técnicas exigen condiciones de ensayo específicas que requieren herramientas y/o circunstancias ideales. El transporte de muestras hasta el laboratorio exige un esquema que consiste en: recolección, embalaje, identificación, transporte y almacenamiento; para de esta manera, garantizar la autenticidad, calidad y estado de las muestras. La evaluación se ejecuta como parte del plan de intervención final, donde se han identificado propiedades que probablemente expliquen los deterioros presentados.

La principal ventaja de este tipo de evaluación consiste en la obtención de resultados sobre parámetros de interés, es decir, que cuando se ejecutan, se obtienen datos para definitivamente descartar alguna hipótesis o, en caso contrario, la información requerida para sustentar el caso técnica y objetivamente, en este punto de la intervención, usualmente se manejan supuestos muy específicos y



relacionados, por esto, la ejecución de ensayos de laboratorio esclarecerá cual es la verdadera razón del deterioro;

Un requerimiento importante de los ensayos de laboratorio es una planeación adecuada; para ejecutarlos correctamente, se debe conocer con antelación los sitios a intervenir, la cantidad de muestra a extraer, el esquema de transporte, entre otros. Las principales desventajas de los ensayos de laboratorio son la necesidad de personal especializado para la ejecución y evaluación de resultados, los tiempos de ensayo, la posible alteración de la muestra por manejos inadecuados, entre otros.



3. Metodología

3.1. Recopilación de información secundaria

Se buscó información secundaria relacionada al tema de investigación, los documentos fueron obtenidos de bases bibliográficas y artículos de internet; la compilación posee revistas, libros, manuales, leyes, decretos, trabajos de grado, guías, artículos y videos. Los campos de interés son: ingeniería forense, pavimentos, propiedades de pavimentos, ensayos a pavimentos, control de la inversión pública, problemática en la construcción colombiana, y redacción de documentos y tesis de grado.

Después de evaluar cada uno de los documentos se realizan fichas bibliográficas donde se consignó: título, autor, año de publicación, país de publicación, palabras claves del documento y un breve resumen; por otra parte, se consigna y amplía la información en base de datos en Excel, se otorga un nivel de importancia para la investigación y se especifica si aplica para la redacción de la guía forense y/o el presente documento. Se indica la manera apropiada para citar cada documento.

3.2. Recolección de información primaria

La información primaria se compone de los conocimientos personales en el campo de la ingeniería forense, como parte de esta, se tiene la experiencia laboral, capacitaciones realizadas y trabajo de campo. En el ámbito laboral, los autores han tenido la oportunidad de afrontar casos de pavimentos con deterioros prematuros, lo que ha permitido que adquieran experiencia referente a fallos en obras de pavimento.

Como parte de la investigación para el desarrollo del presente proyecto, los autores participaron en modalidad telepresencial del curso “Ingeniería forense de infraestructuras pavimentadas. Connotaciones periciales”, el cual fue dictado en el Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos de Madrid, España.

Por último, como complemento de este documento, se lleva a cabo la evaluación de 3 obras, de las cuales, se obtuvo diferente información: contratos, documentos de diseño, resultados ensayos de la etapa de diseño, registros de construcción, actas, resultados ensayos de la etapa de construcción, informes de interventoría, testimonios, entre otros. Los casos abordados presentan las siguientes condiciones:

Caso A – Mejoramiento de vía con deterioro prematuro

Caso B – Pavimento flexible con deterioro prematuro

Caso C – Pavimento flexible en buen estado

Ilustración 3.1. Certificación de aprobación de curso en ingeniería forense



Fuente: Autoría propia.

3.2.1. Trabajo de campo

Para la ejecución del trabajo de campo fue necesaria la movilización a los lugares donde se desarrollaron los casos estudiados. La intervención ejecutada fue planificada y documentada con dos objetivos principales: (1) consignarla en el presente documento y (2) emplearla para retroalimentar el modelo y los procedimientos redactados en la guía forense. Entre las actividades llevadas a cabo durante la visita a obra se tienen: manejo de personal; toma de fotografías; levantamiento de daños; medición de obra a la vista; chequeo de espesores de capas; inspección del estado de obras de drenaje y elementos complementarios del pavimento; ejecución de ensayos no destructivos: georradar y densímetro nuclear; ejecución de ensayos destructivos: apiques, sondeos y extracción de núcleos; recolección de muestras para ensayos de laboratorio; rotulo, embalaje y transporte de muestras, reparación de zonas intervenidas; entre otros.

3.2.2. Trabajo de oficina

El trabajo de oficina fue empleado para plasmar las actividades ejecutadas durante el trabajo de campo y para llevar a cabo la redacción de la guía forense. Entre los procedimientos que hicieron parte de esta etapa se encuentran: elaboración de imágenes, tablas y diagramas; redacción de conceptos, procesos y criterios relacionados a la ingeniería forense, análisis documental, análisis presupuestal, búsqueda de



imágenes propias para ilustración de los temas tratados, traducción de información secundaria, análisis de resultados obtenidos durante la intervención, redacción de guía, evaluación de casos, entre otros.

3.3. Redacción guía

La guía forense se redactó a partir de la bibliografía consultada y la experiencia de los autores en el tema; el método propuesto se basa en el procedimiento presentado en el reporte 747 de la NCHRP (Rada et al,2013), el cual ha sido adoptado por diferentes Departamentos de Transporte con resultados positivos; dicho reporte se encuentra concebido para el uso de ingenieros especialistas pertenecientes a organizaciones enfocadas a los campos de infraestructura vial, por esto, se permiten prescindir de información básica para la comprensión de los mecanismos enfrentados; dado el anterior contexto, el documento de Rada puede ser subestimado por alguien ajeno a ese entorno, e inclusive, resultar perjudicial si es empleado por alguien que no conoce las nociones de la ingeniería forense de pavimentos.

Teniendo en cuenta lo anterior, e identificando la necesidad de algunas entidades de recurrir a un documento que permita llevar a cabo una intervención forense de manera adecuada, se concibe la guía forense para evaluación de pavimentos en Colombia; la cual, entrega las herramientas necesarias para que el lector se instruya adecuadamente y pueda llevar a cabo una diligencia de este tipo, por eso, presenta conceptos de ingeniería de pavimentos, teoría involucrada en los mecanismos de falla, el desarrollo de los procedimientos más empleados y los factores a tener en cuenta durante las etapas de obra e investigación.

La guía fue elaborada para reunir en un solo documento la información básica de ingeniería forense de pavimentos, permitiendo que la persona encargada conozca los elementos involucrados en el comportamiento de los pavimentos y sepa qué datos necesita según el caso enfrentado; el documento fue planteado para cumplir ciertos objetivos (1) incentivar el uso adecuado de técnicas para la supervisión de la inversión pública, (2) manejar eficientemente los recursos disponibles, (3) traducir información a la que algunos no acceden por encontrarse en inglés y (4) disminuir la posibilidad de cometer errores durante una diligencia. Por esto, entre los ejes en los que se profundizados, se encuentran:

- Contexto nacional de la infraestructura vial y manejo de recursos
- Ingeniería forense aplicada a pavimentos
- Perfil del Ingeniero forense, aptitudes y funciones.
- Tipos y partes de pavimentos
- Funcionamiento de pavimentos
- Variables que influyen al comportamiento de un pavimento
- Patologías, clasificación, causas y evolución



- Etapas de construcción y fallos relacionados a cada etapa
- Fases en una investigación forense
- Análisis documental y presupuestal de la documentación recolectada
- Inspección visual
- Índices de estado
- Uso e interpretación de resultados de diferentes ensayos
- Ensayos no destructivos
- Ensayos destructivos
- Ensayos de laboratorio
- Recolección y manejo de muestras extraídas
- Redacción de informes forenses
- Aplicación de fotografías en ámbitos forenses
- Procedimientos para realizar en una investigación forense.



4. Resultados

4.1. Guía forense

Se llevó a cabo la redacción del documento “Guía forense para evaluación de pavimentos en Colombia” según los objetivos planteados en el proyecto, la guía, se encuentra dividida en 13 capítulos donde los temas tratados son:

Capítulo 1 – Introducción. Presenta un breve preámbulo de los temas a tratar en la guía, describe la importancia de esta ciencia para la investigación de los sucesos relacionados a una obra de pavimentos, expone los avances de otros países en términos de ingeniería forense y, argumenta la importancia de aplicar un documento de este estilo en el ámbito nacional.

Capítulo 2 – Ingeniería forense. En este capítulo se describe la disciplina base de esta guía, la ingeniería forense, se presenta la evolución que ha tenido esta profesión con el paso del tiempo, criterios, requerimientos y funciones de un ingeniero forense, por último, se definen las fases de una investigación forense.

Capítulo 3 – Conceptos y revisión de literatura. Contiene una recopilación conceptual de ingeniería de pavimentos, su función es servir como material introductorio o de refuerzo. Se presentan los acrónimos más comunes a usar, la definición de pavimento, su clasificación, componentes y propiedades. El capítulo continúa describiendo el funcionamiento del pavimento y las variables en el diseño. Posterior a esto, adentrándose en la ingeniería forense, se discuten los tipos de fallos en pavimentos, las causas de los fallos en obras civiles, y las patologías que se producen en los pavimentos. Se finaliza con las etapas existentes en la construcción y la normativa nacional.

Capítulo 4 – Inicio de la investigación. Expone las situaciones que se presentan al recibir información de un posible hallazgo, el proceso de evaluación para determinar la validez de la denuncia, la decisión de iniciar una investigación y el procedimiento para realizar el primer acercamiento al caso.

Capítulo 5 – Investigación preliminar. El objetivo de este capítulo es plantear la reconstrucción inicial del caso; para ello, se explican las fases de análisis documental y análisis presupuestal, enunciando los documentos requeridos en cada procedimiento, también se abordan temas como el primer acercamiento a los intervinientes y la elaboración del reporte preliminar de investigación.

Capítulo 6 – Inicio de actuaciones. En este capítulo se presentan los procedimientos de selección de personal, se precisan los aspectos a tener en cuenta durante la primera visita a obra y se desarrollan los



métodos de inspección visual; Finalmente se muestran los criterios recomendados para formular la hipótesis inicial y elaborar, en base a esta, el plan inicial de investigación.

Capítulo 7 – Ensayos no destructivos. Se da una definición de que son los ensayos no destructivos; se argumenta la importancia de estos durante una evaluación de pavimentos. Se presentan diferentes ensayos no destructivos (END) y para cada uno se plantea su uso, alcance, interpretación de resultados, calibración del equipo y recomendaciones de manejo.

Capítulo 8 – Proceso de intervención final. Discute el procedimiento para evaluar y plantear la fase final de la intervención. El capítulo desarrolla la revisión del avance de investigación, chequeo de hipótesis, selección del enfoque a seguir y planteamiento de objetivos finales. Se presentan tablas para selección de los ensayos de laboratorio y requisitos de planeación. Se presenta el método de elaboración de la propuesta de intervención final y se muestran los diferentes escenarios durante la asignación de recursos por parte de la entidad. Por último, se desarrolla el procedimiento a seguir durante un análisis de resultados y se consignan algunos métodos de evaluación de las hipótesis planteadas.

Capítulo 9 – Ensayos destructivos. En este capítulo se entrega la definición de ensayos destructivos; se discuten los más comunes y se tratan las ventajas y desventajas de emplear este tipo de ensayos. El capítulo continúa describiendo el método para localizar los puntos de intervención y dando directrices para el manejo de los elementos extraídos, es decir, recolección de la evidencia, embalaje, rotulo y elaboración de cadena de custodia.

Capítulo 10 – Redacción de informe final. Constituye la etapa final de la investigación, se describe el procedimiento para elaborar y exponer el reporte definitivo, se desarrollan cada una de las partes que componen el documento: descripción del proyecto, cronología de los hechos, criterios adoptados en la investigación, toma de decisiones, registros de intervención, soportes de los ensayos ejecutados, elementos probatorios, análisis de la información disponible y formulación del concepto técnico.

Capítulo 11 – Fotografías. El objetivo de este capítulo es establecer el papel fundamental de la fotografía dentro de la ingeniería forense. Se muestran las diferencias entre fotografías documentales y fotografías métricas, también se enseñan las técnicas a seguir para obtener imágenes precisas e informativas que retraten la situación presentada en el sitio. por último, se dan consejos a tener en cuenta durante la toma de imágenes.

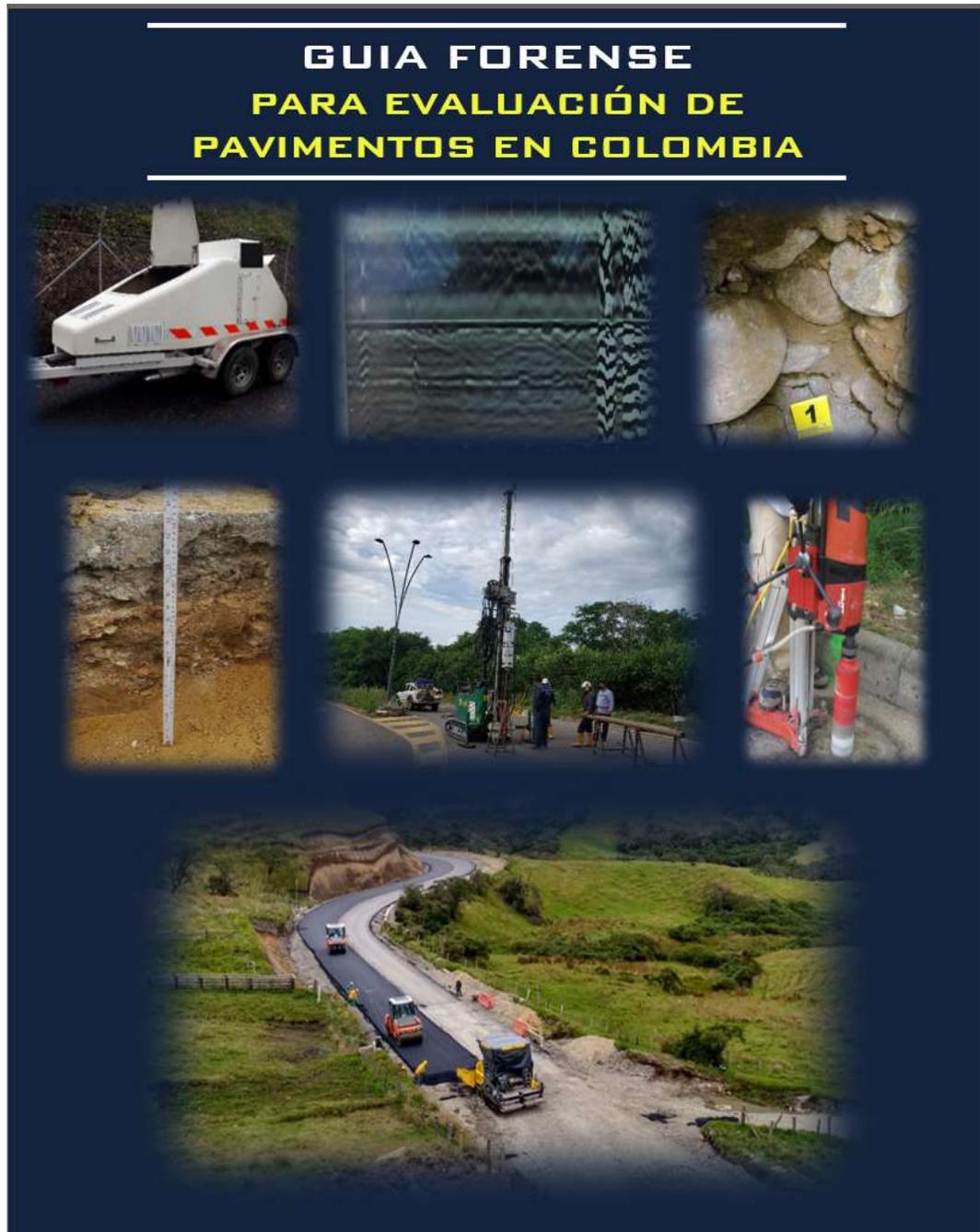
Capítulo 12 – Recopilación de casos. En este apartado se exponen los casos afrontados por los autores durante la redacción de este documento, adicional a esto, se presentan investigaciones de varios



países que sirven como ejemplo del desarrollo de una investigación forense y del uso de diversos tipos de ensayos.

Capítulo 13 – Bibliografía. Presenta las fuentes consultadas durante el proceso de redacción de esta guía.

Ilustración 4.1. Portada guía forense para evaluación de pavimentos en Colombia



Fuente: Autoría propia.



La guía forense es un documento enfocado a servir a los entes de control y a todos aquellos que quieran llevar a cabo una investigación a pavimentos sin saber cómo empezar, sin un procedimiento definido o buscando maneras de mejorar la intervención propuesta. Este trabajo se diferencia de los documentos nacionales teniendo en cuenta que fue planteado según la problemática en la construcción que atraviesa Colombia, retratada en el libro “grandes hallazgos” de la contraloría general de la nación; se fundamenta en documentos y propuestas forenses de otros países que se consideran de utilidad si se aplican a Colombia, dicho esto, se redactan los temas más importantes de la ingeniería de pavimentos, elementos, funcionamiento, modos de falla y métodos de ensayos; así mismo, se definen los requisitos a cumplir para fungir como ingeniero forense, comportamiento, cualidades, características, entre otros. Se desarrolla la metodología de acuerdo a estos dos factores y se establecen procedimientos de recolección de evidencia técnica y material probatorio del sitio. La finalidad de este documento es que la persona que lo emplee pueda identificar la causa del fallo del pavimento de manera confiable siempre y cuando combine esta guía con un equipo técnico investigador apto y los ensayos adecuados para tal fin.

Una diferencia importante a tener en cuenta, es el hecho de que la literatura internacional busca principalmente mejorar métodos de diseño y recomienda no disponer recursos si los problemas presentados se han evaluado en obras previas. A través de la aplicación de esta guía se busca demostrar detrimentos en todos los casos, teniendo en cuenta que se basa en un principio de vigilancia a la inversión que se está llevando a cabo en el país mediante controles de obra, se propone abordar la totalidad de los casos para otorgar la evidencia física y elementos materiales probatorios necesarios para esclarecer la verdad en cada obra. Adicionalmente, la guía enfrenta 2 grandes problemas que han retrasado el uso de las técnicas forenses, rompe la barrera de lenguaje, es decir, que entrega información valiosa en español para aquellos profesionales que no manejen otro idioma, por otro lado, compila y presenta experiencias de documentos que han pasado desapercibidos por desconocimiento de los mismos o por ser de variadas fuentes.

4.2. Reporte de casos evaluados

4.2.1. Caso A: Mejoramiento de vía con deterioro prematuro

El caso abordado corresponde a un contrato celebrado con objeto: “Mejoramiento de la vía”, la estructura se compone de una capa de rodadura con un ligante tipo crudo pesado que, por su temperatura de mezcla, se considera una mezcla asfáltica en frío; el acta de entrega se firma 3 años después y, 2 años más tarde, se encuentra una vía bastante deteriorada.



Antecedentes:

El contrato cuenta con estudios e informes que sustentan el diseño estructural; se entregan diferentes alternativas de las cuales la entidad opta por una estructura compuesta por: capa de rodadura de 5cm y estabilización de 30 cm al suelo de subrasante.

Etapas de Evaluación:

Tal como se recomienda en el capítulo 4, la investigación forense comenzó con la etapa de recopilación documental; los principales documentos obtenidos fueron: contratos de obra e interventoría, presupuesto, informes de diseño, informes de interventoría, actas de obra, actas de entrega, actas de socialización, manual de operación y mantenimiento, entre otros.

Se llevó a cabo la trazabilidad documental, entre los datos a resaltar se encuentran: una serie de suspensiones y prorrogas al contrato; la estructura se entregó casi 3 años después del acta de inicio; 2 años después del acta de entrega la capa de rodadura se encuentra deteriorada en diferentes secciones.

Durante la etapa de análisis documental se identificaron varios puntos clave. En el diseño estructural se entregan una serie de recomendaciones para el funcionamiento adecuado de la vía: estructura conformada por capa de rodadura de 5cm y estabilización de 30 cm al suelo de subrasante, la capa de rodadura debe funcionar adecuadamente para evitar filtraciones que afecten la estabilización, conformación de cunetas a lo largo de la vía ya que las existentes son naturales

El análisis presupuestal indica que los principales cambios en la inversión se enfocan en un mayor movimiento de tierras; las partes decidieron disminuir la cantidad de obras de drenaje para mantener el valor del contrato, ejecutando un tercio de las alcantarillas presupuestadas y suprimiendo la totalidad de cunetas revestidas; en el capítulo de no previstos se adicionan 34 m de tubería de 36” distribuidas entre 4 alcantarillas y 800 m de filtro tipo francés para una vía de más de 4km de longitud.

Con la etapa preliminar de investigación avanzada, se decide hacer una visita a obra en compañía de representantes del contratista, interventor y entidad contratante. Se hizo un levantamiento de daños siguiendo la metodología del INVIAS, el levantamiento arrojó que el 35 % de la superficie presentaba algún tipo de patología, se identificaron 5 tipos de deterioro: desintegración, ojos de pescado, fisuras en bloque, baches y piel de cocodrilo.



Ilustración 4.2. Deterioros presentados e incremento de su severidad



Fuente: Autoría propia.



Ilustración 4.3. Chequeo del ancho del pavimento.



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.4. Desventajas del uso de MAF

- Por su alta porosidad son de baja rigidez y resistencia mecánica.
- Se disgregan fácilmente.
- El asfalto dentro de la mezcla se oxida y envejece rápidamente debido a la fácil entrada y posterior evaporación del agua.
- Son por lo general de baja durabilidad.

Fuente: Reyes & Rondón (2015)

Siguiendo los lineamientos del manual de mantenimiento del INVIAS (2016), se realiza la inspección y análisis de la condición general del drenaje, el cual consiste en la evaluación de parámetros para determinar la incidencia del agua en la rapidez de evolución de los deterioros del pavimento. Las variables evaluadas fueron: 1. Impermeabilidad del revestimiento (R=2), 2. Drenaje superficial (A=2), 3. Ambiente hidrogeológico del pavimento (H=1), 4. Drenaje subsuperficial (D=2), 5. Sensibilidad de la subrasante al agua (S=2) y sensibilidad de las capas inferiores del pavimento (M=1).

Conclusiones:

El levantamiento de daños arrojó los datos consignados en la próxima tabla. Se observa que el daño con mayor extensión es desintegración, presente en un 30.35 % de la superficie y cuantificando el 87% de los daños totales. Se recomendó una rehabilitación pronta debido al deterioro avanzado que presenta en desintegración, el 21.83% del área total del pavimento posee una severidad alta mientras que el 8.53% muestra severidad media.

Tabla 4.1. Resultados del levantamiento de daños

Fisuras en bloque			Piel de cocodrilo			Bachas			Ojos de pescado			Parche (PCH)			Desintegración		
Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
		0.03%		0.67%	0.01%		0.00%	1.16%		0.01%	2.61%	0.02%				8.53%	21.83%
	0.03%			0.69%			1.16%			2.62%			0.02%			30.35%	
	0.09%			1.97%			3.34%			7.50%			0.07%			87.04%	

Fuente: Autoría propia.



Se estableció una combinación de factores que explican el comportamiento presentado, en primer lugar, se optó por utilizar un ligante susceptible a la humedad, generando poca adherencia con los agregados pétreos; por otra parte, en el transcurso de obra se descartó la construcción de cunetas revestidas, ejecutando excavaciones a modo de canales naturales, dichos canales se encuentran en muy mal estado, con agua estancada por la presencia de basuras y vegetación, indicadores de falta de mantenimiento. Entonces, los factores contribuyentes son: la topografía del sitio, terreno plano; tráfico no adecuado, llantas para trabajo agrícola; alta rigidez de la capa con espesor bajo, falta de mantenimiento, asfalto envejecido prematuramente debido a presencia de agua en la mezcla por ausencia de un sistema adecuado de drenaje.

Se evidencia un ligante envejecido prematuramente a lo largo de la vía. El crudo empleado tiene una composición particular que exige condiciones especiales para un correcto funcionamiento. Los crudos pesados son especialmente susceptibles a la presencia de humedad, el agua afecta la adherencia del agregado con el ligante e incrementa su tasa de envejecimiento, factores que originan los deterioros observados en la visita a obra.

Ilustración 4.5. Necesidad de mantenimiento y obras de drenaje en la construcción de una vía con crudo pesado

9. PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

9.1 CRUDOS PESADOS

El proceso constructivo es similar al utilizado con un asfalto líquido industrial o una emulsión asfáltica y comprende las siguientes etapas:

1. Mantenimiento y construcción del sistema de drenaje
2. Preparación de la superficie de apoyo

Fuente: CORASFALTOS (2004)

La existencia de obras de drenaje adecuadas y la frecuencia de mantenimientos toman una importancia mayor en la vida útil de la estructura; como se mencionó anteriormente, se descartó la construcción de cunetas y de acuerdo con los testimonios recolectados, nunca se ha ejecutado ningún tipo de mantenimiento.

La inspección y análisis de la condición general del drenaje según el procedimiento del SETRA arrojó un valor de 10, correspondiente a una clasificación de riesgo alto, de la cual se afirma “Las condiciones prevalecientes son determinantes para causar rápida degradación de la estructura por presencia de agua” y que “Se justifica plenamente darles prelación a las intervenciones sobre el drenaje”.



Ilustración 4.6. Cunetas naturales taponadas por falta de rocería y limpieza



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.7. Perdida de capa de rodadura que permite evidencia saturación de la subrasante.



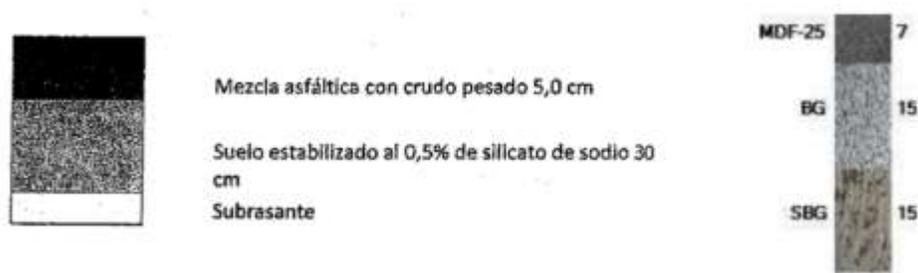
Fuente: Autoría propia.

Arenas (2006) describe la pérdida de adherencia o stripping como “el debilitamiento o pérdida de las características adhesivas del ligante y la superficie de la partícula de agregado en presencia de humedad” y asegura que, aunque la presencia de esta patología depende de muchas variables, “la presencia de agua es su común denominador”. La pérdida de adherencia resulta en desgaste superficial, evidenciado en desintegración de la capa de rodadura, desprendimientos y partículas sueltas sobre la calzada.

En adición a lo anterior, para las condiciones del sitio y los materiales empleados – TMAP entre 26 a 30 °C, Mezcla en frío (temperatura de mezcla menor a 90 °C según lo recomendado para crudos), Tránsito $T1 \leq 150.000$ ejes equivalentes y una subrasante con módulo resiliente entre 70 y 100 kg/cm² – el INVIAS (2018), recomienda que la estructura esté compuesta por 7 cm de capa de rodadura, 15 cm de base granular y 15 cm de subbase granular, variando así de la estructura instalada conformada por 5 cm de capa de rodadura y 30 cm de suelo estabilizado. Según Arenas (2006), el envejecimiento prematuro del ligante en conjunto con una capa de rodadura delgada contribuye al desarrollo de fisuramientos.



Ilustración 4.8. Comparación entre estructura construida y estructura recomendada por INVIAS para las condiciones presentadas.



Fuente: Diseño estructural & Invias (2018).

4.2.2. Caso B: Pavimento flexible con deterioro prematuro

Se presenta un contrato cuyo objeto es: “Construcción de pavimento flexible”, conformado por diferentes tramos viales que constituyen más de 10 km de longitud. La vía presenta múltiples deterioros 4 años después de la firma del contrato.

Antecedentes:

El contrato cuenta con estudios e informes que sustentan el diseño estructural; el contratista fue seleccionado mediante un proceso de licitación pública. Se dio apertura al tráfico a medida que se avanzaba en la construcción debido a la gran longitud del pavimento y a la comunicación que representa entre centros poblados.

Etapas de Evaluación:

La etapa de investigación preliminar permitió observar una reducción de 5cm del espesor de diseño, la estructura se encuentra deteriorada en una extensión considerable. Durante las visitas a obra se decidió llevar a cabo el levantamiento de daños y, posteriormente, la extracción de núcleos para chequeo de espesores, se hizo la georreferenciación de cada punto, para localización de sitios de interés.

Ilustración 4.9. Referenciación de puntos por GPS



Fuente: Autoría propia.



Ilustración 4.10. Levantamiento de daños.



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.11. Deterioros presentados



Fuente: Autoría propia.

La decisión de ejecutar extracción de núcleos se tomó durante el levantamiento de daños, donde se observan deterioros tipo “ojos de pescado” que permiten evidenciar un espesor de capa de rodadura menor al espesor contratado, la situación se repitió a lo largo de diferentes tramos.



Ilustración 4.12. Zona con capa de rodadura de bajo espesor.



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.13. Extracción de núcleos de pavimento para chequeo de espesor.



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.14. Registro fotográfico de núcleo extraído.



Fuente: Autoría propia.



Finalizado el proceso de extracción de núcleos se hallaron zonas con un espesor menor al contratado; delimitando los resultados obtenidos se observa que el espesor de diseño se cumple únicamente en los centros poblados y que, en las zonas alejadas, se disminuye, encontrando testigos de hasta 1.5 cm. Estos espesores contribuyen a la presencia de los deterioros observados, además que, el haber construido espesores menos a los contratados y cobrados constituye un detrimento patrimonial.

Ilustración 4.16. Núcleo extraído del sitio.



Fuente: Autoría propia.

4.2.3. Caso C: Pavimento flexible en buen estado

Corresponde a un contrato de obra que experimentó modificaciones durante su ejecución, la vía se encontraba en buen estado, motivo por el que se optó por hacer un control ya que, a pesar de adicionar un 50% del valor inicial del contrato, se disminuyó la extensión de la vía.

Antecedentes:

El contrato objeto se refiere a la construcción de vía, se cuenta con estudios y diseños sustentados mediante ensayos de laboratorio y memorias de cálculo. Durante el desarrollo del contrato de obra se modifican cantidades de obra y se incrementa el valor del contrato de obra.

Etapas de Evaluación:

La evaluación consistió inicialmente en la recopilación documental, fase de entrevistas y ejecución del análisis documental y presupuestal; se decide intervenir ya que se evidencia falta de soportes técnicos para la toma de decisiones. El análisis presupuestal arroja un porcentaje de modificación de obra del 89,49%, donde se evidencia cambios importantes en la estructura, en el cual se aumentó el valor del contrato a la vez que se redujo la extensión del pavimento en un 37%.



Ilustración 4.18. Etapa de recolección documental, soportes del diseñador

Fecha	Documento
XX-abr-XX	Contrato estatal de obra pública
XX-abr-XX	Contrato consultoría - Modalidad Interventoría
XX-abr-XX	Acta de inicio de obra
XX-may-XX	Acta de suspensión No. 1
XX-oct-XX	Acta de reiniciación de obra No. 1
XX-oct-XX	Evaluación de la Subrasante
XX-oct-XX	Acta de suspensión de obra No. 2
XX-nov-XX	Acta de reinicio de obra No. 2
XX-nov-XX	Acta parcial de obra N. 1
XX-nov-XX	Acta de justificación contrato adicional (50%)
XX-nov-XX	Acta de justificación contrato adicional 50% + acta de cantidades de obra
XX-nov-XX	Análisis viabilidad técnica para suscripción de adición contrato de obra pública
XX-dic-XX	Contrato adicional al contrato de obra pública (50%)
XX-dic-XX	Otro si al contrato adicional al contrato de obra pública
XX-dic-XX	Acta de interventoría
XX-dic-XX	Informe final contrato interventoría
XX-dic-XX	Acta parcial de obra N. 2
XX-dic-XX	Acta de suspensión N° 3
XX-ene-XX	Acta de reinicio de obra No. 3
XX-feb-XX	Acta de recibo final de obra
XX-jul-XX	Acta de liquidación

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO
 PROYECTO: ...
 LONGITUD: 3.5 Km.
 No. CALZADAS CON SEPARADOR CENTRAL: 2
 No. CARRILES/CARRILADA: 2
 PERIODO DE DISEÑO: 20 AÑOS A FACTOR DEL 2005
 MUDOSIDAD: ...

CONCRETO ASFÁLTICO
 BASE GRANULAR DE C.B.R. 50%
 SUBRASANTE

Fuente: Autoría propia.

El análisis presupuestal arroja un porcentaje de obra modificada del 84,49%, un porcentaje de obra no ejecutada de 38,96% y el ítem que mayor modificación tuvo fue el de conformación de relleno, incrementando en un 676% la cantidad contratada; así mismo, el cajeo mecánico de la vía aumentó 246% su cantidad inicial. Teniendo en cuenta la extensión contratada y ejecutada, el m² de pavimento se liquidó a 241% su valor inicial.



Tabla 4.3. Resultados de análisis presupuestal

Concepto	Costo Total (SMML)	Extensión (M ²)	%
Vía Contratada	1410	5.000	100%
Vía Liquidada	2123	3.124	241%

Indicadores de modificación	
Obra contratada	100%
Obra adicionada	50,53%
Obra liquidada	150,53%
Obra modificada	-89,49%
Obra no ejecutada	38,96%

Fuente: Autoría propia.

La fase final de investigación consistió en la ejecución de 6 apiques y 5 sondeos para la verificación de la estructura e ítems ocultos, este proceso fue realizado por un laboratorio externo y, se llevaron a cabo ensayos de caracterización de los materiales, granulometrías, límites, CBR. Se realizó el rotulo y embalaje de los elementos, los cuales poseían su respectiva cadena de custodia.

Ilustración 4.19. Proceso de intervención final



Fuente: Autoría propia

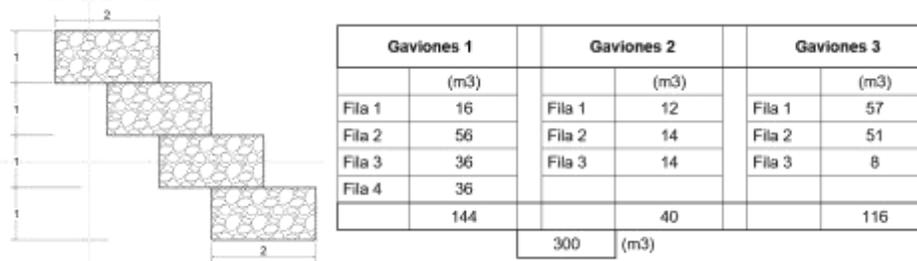


Conclusiones:

Se determina que el costo de la obra por metro cuadrado fue de 241% del valor contratado; a pesar de que fueron solicitadas a las partes, no se encontraron soportes técnicos para las modificaciones al contrato y creación de nuevos ítems; las obras de drenaje, construcción de obras de contención, aumento de espesor del relleno, indican que, estas no fueron avaladas por un diseñador o especialista.

En el acta final fueron recibidos 386 m³ de gaviones, sin embargo, en la verificación en obra se contabilizaron 300 m³ incluyendo la obra oculta, posterior a esto y, gracias a una entrevista con el administrador de un conjunto aledaño, determinando que 40 de los 300 m³ fueron contratados por la unidad residencial, quedando únicamente 260 m³ construidos durante la ejecución del contrato.

Ilustración 4.20. Cuantificación de gaviones.



Fuente: Autoría propia.

La justificación para aumentar el volumen de relleno fue la existencia de basuras en ciertas abscisas del sitio, no se adjunta registro fotográfico, se decide hacer un apique de verificación aledaño a la obra en el cual no se evidencia la existencia de desechos, se registran partículas de gran tamaño. No fue posible comparar los resultados de CBR ya que los ensayos del diseñador se hicieron en condiciones secas y las muestras extraídas se dejaron en 3 días de inmersión.

Ilustración 4.21. Apique en terreno aledaño.



Fuente: Autoría propia.



Ilustración 4.22 Descripción de estratigráfica según diseñador y resultados obtenidos durante la intervención realizada

Descripción	
ARENA arcillosa de color habano oscuro	Material arenoso-arcilloso color café, humedad media, plasticidad baja, presencia de núcleos de roca de 4" a 10", presencia de raíces.
ARENA arcillosa de color habano oscuro	
ARENA arcillosa de color habano oscuro	Material arenoso-arcilloso color café, de humedad medio-alta, densidad medio-alta, plasticidad media, Extracción de CM inyectada (prof= 1,20m-1,25m)

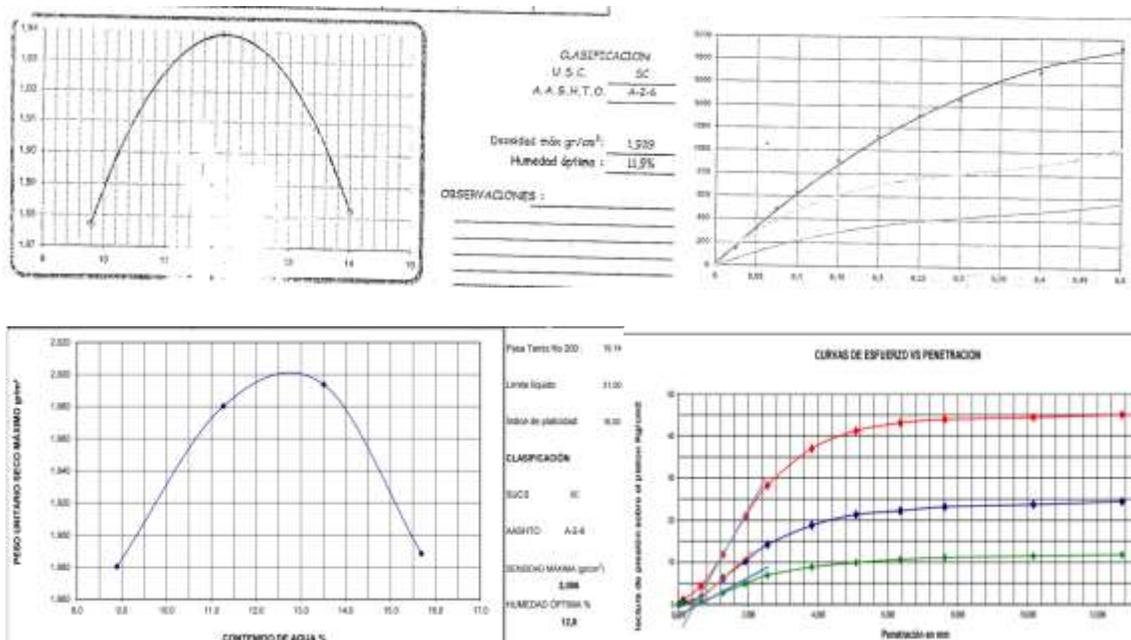
Fuente: Autoría propia

Ilustración 4.23 Ensayos de clasificación realizados por el diseñador y resultados de la intervención realizada

RESULTADOS		RESULTADOS	
Humedad Muestra	7,5 %	HUMEDAD NATURAL %	
Límite Líquido	30,8 %	LÍMITE LIQUIDO %	31
Límite Plástico	18,4 %	LÍMITE PLASTICO %	16
Índice de Plasticidad	12,4 %	ÍNDICE PLASTICIDAD %	15
Índice de Liquidez			
Actividad Arcilla			
CLASIFICACIÓN		CLASIFICACIÓN	
Índice de Grupo	0	SUCS:	SC
A.A.S.H.T.O.	A-2-6	AASHTO:	A-2-6
U.S.C.	SC	ÍNDICE DE GRUPO	0

Fuente: Autoría propia

Ilustración 4.24 Comparación de resultados obtenidos entre diseñador y en apique aledaño



Fuente: Autoría propia



Debido a que el suelo reportado por el diseñador y el encontrado en el sitio coinciden, además de no evidenciar desechos en los puntos evaluados, no se ve motivo para realizar el reemplazo de material.

Revisando el registro contable, las facturas entregadas no sustentan la totalidad de material de relleno instalado y, teniendo en cuenta que es el ítem que más aumentó, instalando 7,8 veces la cantidad presupuestada, se decide hacer apiques y sondeos para la verificación de la estructura. Al revisar el registro fotográfico se observa material acopiado característico del suelo natural del sitio en los lugares predispuestos para relleno. En los apiques ejecutados se evidencian sobre tamaños con características similares a los apiques en terreno aledaño, por lo que, se determina que el contratista empleó material del sitio, haciendo necesario modificar los análisis de precios unitarios, eliminando el costo correspondiente a compra y transporte de material.

Ilustración 4.25. Comparación entre material encontrado en sitio y en apique aledaño.



Fuente: Autoría propia.

El espesor de la capa de pavimento y capas granulares chequeó a lo largo de la vía.

Ilustración 4.26. Núcleo extraído en obra

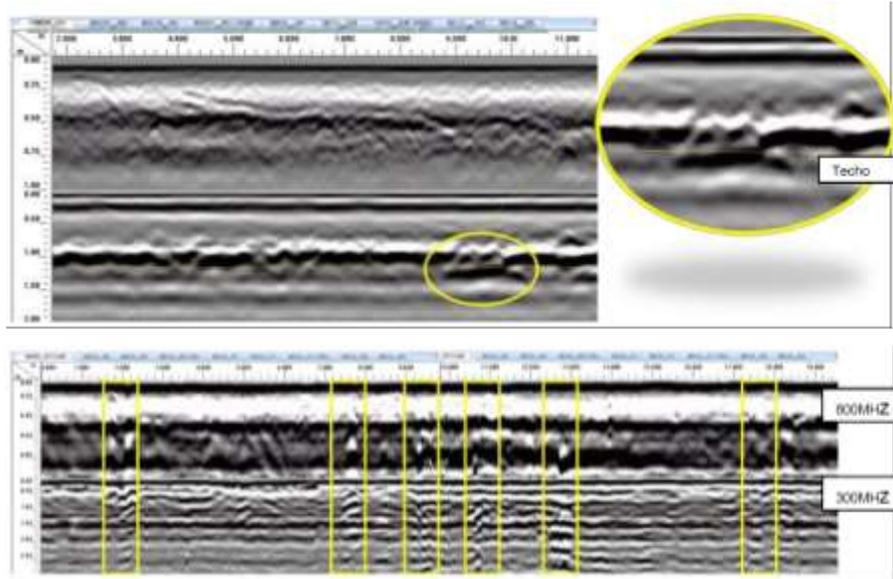


Fuente: Autoría propia.



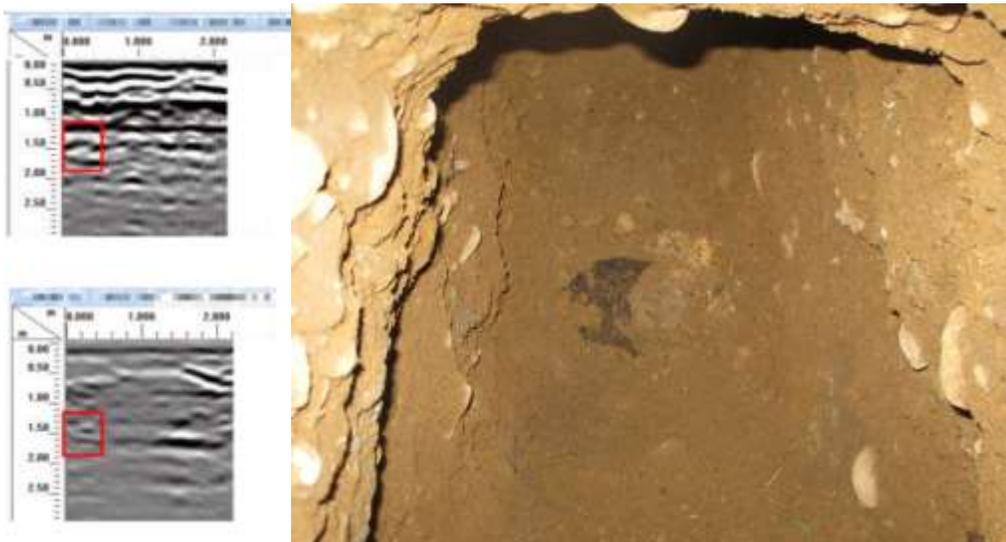
El georradar fue de gran utilidad para la verificación de obra a oculta, gracias a él se chequeó la ubicación de gaviones, box culvert y se verificó la instalación de filtro. Se utilizó a 800 MHz para evaluación hasta 1 m de profundidad y a 300 MHz para verificación de hasta 3m.

Ilustración 4.27. Radargramas a 1 y 3 m para verificación de obra oculta.



Fuente: Autoría propia.

Ilustración 4.28. Uso de radargrama para localización de filtro en obra.



Fuente: Autoría propia.



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se comete un delito al estado cuando se disminuye la calidad de los materiales cobrando el precio correspondiente a uno de mejor desempeño, se instalan cantidades mayores a las requeridas sin justa causa, menores a las que se consignan en las actas de cobro o se realizan procesos de construcción deficientes. El hecho de que exista ítems de menor valor no implica que estos no sean importantes para el comportamiento del pavimento, cambios no autorizados en la calidad o cantidad de las obras de drenaje, subrasante, obras de confinamiento, riegos, sello de juntas u otros, tienen un impacto significativo en el pavimento y, con el paso del tiempo, pueden generar un deterioro total de la estructura.

La guía forense entrega un método de evaluación de obras para emplear los recursos de una manera eficiente, permitiendo reducir costos de intervención no justificada y disminuyendo los plazos de respuesta actuales.

Para llevar a cabo una investigación forense de manera exitosa es necesario contar con un equipo adecuado para ejecutar las diferentes actividades, esto incluye: ingenieros forenses, ingenieros de apoyo, geotecnólogos, mano de obra, especialistas en diferentes áreas, entre otros.

La experiencia juega un papel importante en una intervención forense; representa una gran ventaja en procedimientos susceptibles a la interpretación del profesional: inspección visual, análisis de resultados y generación de hipótesis o diagnósticos. El escenario ideal se da cuando la diligencia es llevada a cabo por un ingeniero de vasta experiencia, sin embargo, la guía entrega tablas, esquemas, imágenes y descripciones, para apoyar a profesionales que apenas estén iniciando en el campo o aquellos que necesiten reforzar conceptos.

Se encontró que la guía responde bien al uso de personas con poca experiencia, los resultados en campo fueron positivos, al encontrar información de interés e identificar los factores contribuyentes a los fallos presentados.

El conocer las capacidades de los ensayos disponibles será de utilidad para plantear las actividades de intervención, un aspecto a tener en cuenta es la importancia de cada tipo de ensayo durante las diferentes etapas de la investigación; en las fases iniciales, se realiza el levantamiento de daños y se ejecutan los ensayos no destructivos seleccionados, encontrando zonas débiles o deterioradas y, posteriormente, se entra a intervenir con ensayos destructivos que proveen datos y muestras importantes, siempre y cuando se hayan identificado adecuadamente los sitios de interés.



El caso A es producto de una variedad de errores en las diferentes etapas de construcción, en el periodo de diseño se opta por un ligante tipo crudo pesado, susceptible a la humedad; durante la construcción, las partes deciden prescindir de obras de drenaje revestidas para incrementar la extensión del pavimento y, en la etapa post-ejecución, la rodadura recibe aplicaciones de carga de maquinaria agrícola en el borde de la calzada y los encargados no realizan mantenimiento a las cunetas naturales, encontrándose obstruidas y evidenciando infiltración de agua a la estructura del pavimento. La evaluación de la incidencia de la condición del drenaje apunta a que la estructura se degradará rápidamente por el sistema actual. La vía presenta deterioros en 30% del área total, correspondiente a un valor de 2300 SMML, con la amenaza de un incremento acelerado al estar encontrarse en condiciones críticas para la superficie (sistema de drenaje inadecuado, terreno plano, cargas distintas a las de diseño aplicadas en el borde, ligante susceptible a la humedad).

En el caso B se evidencia afectaciones puntuales y tramos deteriorados debido a un pobre control de calidad, se manifiestan diferentes deterioros, evidencia más de un problema en la etapa de construcción; el espesor de la capa de pavimento es menor que el de diseño en algunas zonas, llegando a encontrar testigos de pavimento asfáltico de 1.5 cm.

En el caso C se presenta una obra donde, a pesar de que el presupuesto se incrementó en un 50%, la extensión del pavimento se vio reducida, esto resulta en que el valor por m² de obra sea un 241% el valor original. Entre las irregularidades encontradas, no se encuentra justificación para el reemplazo del material de sitio ya que los resultados obtenidos de apique aledaño fueron similares a obtenidos por el diseñador, no se evidencian basuras en contradicción a lo reportado durante obra y, no existe registro fotográfico de su existencia; por otra parte, se encuentra el uso de material característico del sitio para relleno, donde, adicional a esto, los soportes contables no sustentan la totalidad del material de relleno instalado, lo anterior altera los costos referentes a la compra y transporte de material consignados en los APU; los problemas evidenciados se resumen en el incremento de ítems de construcción sin justificación técnica, el pago de cantidades de obra mayores a las construidas y el incremento sustancial en actividades de cajeo y relleno. El valor de las irregularidades asciende a 512 SMML.

Durante el desarrollo del trabajo práctico se contaron una serie de limitaciones que no permitieron realizar actividades que complementan muy bien la intervención, toma de decisiones y presentación de argumentos; en diligencias legales habrán casos especiales, donde se debe evaluar todos los elementos involucrados y, contar con la información necesaria para presentar de una manera técnica, la situación real en obra y comparar respecto al proyecto diseñado; al no realizarse ensayos de caracterización de las capas estabilizadas y de rodadura, no es posible realizar un análisis mecanicista para concluir cuantitativamente



sobre el periodo de vida de las obras, la efectividad de los estabilizantes, entre otros. Información de este estilo permitirá retratar adecuadamente la condición de todos los factores involucrados en la estructura, presentar argumentos más sólidos para la toma de decisiones y justificar los conceptos alcanzados por el ingeniero.

Existen eventos que no han sido tenido en cuenta durante la contratación, por esta razón, no son amparados por las correspondientes pólizas; en el caso de irregularidades como menores cantidades de obra, pueden no representar una afectación a la estructura, sin embargo, existe un detrimento; por otra parte, los cambios injustificados del proyecto deben analizarse adecuadamente para determinar la afectación producida a la vida útil y, tomar decisiones según el concepto obtenido; teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario evaluar los términos de las garantías, se hace necesario contemplar casos especiales donde, se pueda requerir al infractor aún por fuera de los plazos de estabilidad actualmente establecidos.

Colombia tiene el potencial para hacer una evaluación constante a la manera en la que se está ejecutando la inversión pública a través de las herramientas forenses, esto no solo servirá para tomar al país como ejemplo en el uso de estas tecnologías, sino que garantizará la duración de los pavimentos y beneficiará los campos relacionados a estos.

5.2.Recomendaciones

Se recomienda a los entes de control tener en cuenta esta guía. ya que puede emplearse como el primer escalón para toda una división de Ingeniería forense donde se realicen investigaciones en diferentes campos. Como mencionan H. Franck & D Franck (2012), “aunque existan distintas especialidades en Ingenierías, los ingenieros forenses mantienen un enfoque en los fundamentos generales ya que el núcleo es común para todas las especialidades. La práctica es tan diversa que enfocarse en una limitada especialidad reduciría el número de asignaciones”. Lo anterior es válido ya que no solo el proceso de investigación es adaptable a los diferentes campos, sino que algunos ensayos se utilizan para distintas obras, el GPR tiene uso para chequear existencia y profundidad de tuberías de acueducto, el ferroscañ y los ensayos a suelos aplican para investigaciones a estructuras, Etc.

Debido a los diferentes problemas que se pueden presentar en obra y volverse objeto de investigación, se recomienda a todas las partes un registro adecuado de la información, incluyendo registro fotográfico de los eventos; así, en caso de requerirlo, se podrán sustentar las decisiones tomadas a lo largo del proyecto.

En una investigación oficial, es imperativo realizar una intervención de mayor magnitud a la ejecutada en el presente trabajo, se recomienda llevar a cabo las actividades esenciales para valorar



adecuadamente el pavimento; se debe tener presente los métodos de evaluación disponibles y las variables de entrada requeridas para cada uno, por ejemplo, para cada para desarrollar un análisis mecanicista, se debe contar con los espesores, módulos y solicitaciones de la estructura; un informe completo presentará técnicamente el comportamiento de las capas, la eficacia de los elementos empleados y el funcionamiento general del sistema.

Se recomienda que las entidades públicas adopten las prácticas planteadas, o similares, que adquieran equipos y contraten personal especializado para llevar procesos de intervención en las etapas de diseño, construcción y post-ejecución, reduciendo así las afectaciones producidas a la comunidad y al dinero público. También se motiva a que adquieran equipos y contraten personal especializado para llevar a cabo las intervenciones; en términos de plazos, costos y seguridad, es conveniente realizar estos procedimientos de manera interna, requiriendo profesionales externos en casos específicos y necesarios. Esto último no implica mala fe de laboratorios, sin embargo, estas medidas incrementan el control, y disminuyen los tiempo de respuesta y la posibilidad de alteración de la información teniendo en cuenta nuevamente lo planteado por la Contraloría General de Colombia.

5.3. Trabajo futuro

El método presentado aquí es replicable a otras ramas de ingeniería; se invita a modificar la guía presentada aquí para evaluar daños en otro tipo de estructuras o especialidades.

Se considera importante que, en un futuro ejercicio práctico, durante la toma de muestras se involucren a las veedurías y partes implicadas para que verifiquen las actividades realizadas y estén al tanto del proceso de intervención.

Como se mencionó anteriormente, la reproducibilidad es una parte importante en la transmisión del conocimiento. En caso de aplicación por los entes de control, se recomienda realizar una base de datos para recolección de información de casos forenses para que personas con poco conocimiento en el tema puedan observar cómo se han abordado casos similares en ocasiones anteriores.



Bibliografía

- Amran T.S.T., Amin M.S.M, Ahmad M.R., Azreen N.M., Sani S., Adnan M.A.K., Razak N.A. & Sayuti S. (2021) NDT Methods in inspecting road and highway structures. IOP Conference series: Materials Science and Engineering 1106.
- Arbaiza Fermini, L. (2014). Como elaborar una tesis de grado. Lima, Perú.
- Arenas Lozano, H. L. Tecnología del cemento asfáltico - Quinta Ed., Popayán: FAiD Ediciones, 2006.
- Carper, K. L. (2000). FORENSIC ENGINEERING (Second). CRC Press.
- Castro Mesa, J., & Orobio, A. (2014). PCAcálculo - Diseño de pavimentos rígidos por la metodología PCA - 1984. 17.
- Chen, D. H., & Scullion, T. (2008). Forensic Investigations of Roadway Pavement Failures. Journal of Performance of Constructed Facilities, 22(1), 35–44.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2008\)22:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2008)22:1(35))
- Congreso de la República de Colombia. (2000). LEY_610_de_2000. 1.
- Contraloría General de la Ciudad de México. (2016). Informe de Avance trimestral enero - diciembre 2016. (179), 1–48.
- Contraloría General de la Ciudad de México. (2018a). PROGRAMA ANUAL DE TRABAJO 2018. 4, 1–28.
- Contraloría General de la Ciudad de México. (2018b). INFORME ANUAL. 126.
- Contraloría General de la República de Colombia. (2018). INFORME DE AUDITORÍA DE DESEMPEÑO - Proyectos de inversión para el sector vías terciarias ejecutados con recursos del Sistema General de Regalías. 06.
- Contraloría General de la República de Colombia. (2018a). GRANDES HALLAZGOS. 170.
- Corporación para la investigación y desarrollo en asfaltos en el sector transporte e industrial CORASFALTOS. (2004). Proyecto de investigación en crudos pesados y asfaltos naturales para la construcción de vías secundarias y terciarias.



- Dai, K. H. S. (2017). Congress on Technical Advancement 2017 71. 1978, 71–78.
- Davis, A. G., Rens, K. L., Wipf, T. J., & Klaiber, F. W. (2002). Review of Nondestructive Evaluation Techniques of Civil Infrastructure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 13(1), 47–48. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(1999\)13:1\(47\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(1999)13:1(47))
- Departamento Nacional de Planeación. (2017). Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden. 1–64.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). COLOMBIA PRODUCTIVA Y SOSTENIBLE.
- Escobar, J. C. (2018, octubre, 31). EL TIEMPO. Recuperado de:
<https://www.eltiempo.com/justicia/investigacion/contraloria-revela-fallas-en-construccion-de-vias-terciarias-en-colombia-288146>
- Franck, H., & Franck, D. (2012). Forensic engineering fundamentals. In *Forensic Engineering Fundamentals*. <https://doi.org/10.1201/b13690>
- Gagg, C., Reynolds, K., & Rhys Lewis, P. (2003). Forensic Materials Engineering. In *Forensic Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780203484531>
- Higuera-Sandoval, C. H. (2011). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
- Instituto Nacional de Vías (2019). Estado de la Red Vial
- Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2019b). Obras menores de drenaje y estructuras viales: Colombia Rural.
- Instituto Nacional de Vías INVIAS, Instituto Colombiano de productores de Concreto ICPC, Ministerio de transporte. (2013). ICPC – Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.
- Instituto Nacional de vías INVIAS, Universidad del Cauca, Ministerio de transporte. (2018). Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito., Popayán.



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

Instituto Nacional de vías INVIAS. (2006b). Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos.

Instituto Nacional de vías INVIAS. (2008). Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.

Instituto Nacional de vías INVIAS. (2009). Manual de Drenaje para carreteras.

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2013). Normas de ensayo de materiales para carreteras y especificaciones generales de construcción de carreteras

Instituto Nacional de vías INVIAS. (2015). Manual de señalización vial

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2017). Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella (p. 244).

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022.

Johnson, C., Chorzepa, M. G., Durham, S., & Kim, S. S. (2017). Forensic Investigation of Pavement: Practices in North America and a Pilot Investigation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4), 10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001029](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001029)

Leonards, G.A. 1982. Investigation of Structural Failures, *Journal of the Geotechnical Engineering Division* (ASCE) 108, No. GT2 (Febrero).

Montejo Fonseca, A. (1998). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Montejo Fonseca, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2da Edición.

Mooney, M., Miller, G., Yin The, S., & Bong, W. (2000). Importance of invasive measures in assesment of existing pavements. November, 149–154.

Noon, R. (2001). Forensic engineering investigation. In *Choice Reviews Online* (Vol. 38). <https://doi.org/10.5860/choice.38-6213>



OECD. (2015). POLICY PRIORITIES FOR INCLUSIVE DEVELOPMENT. January.

Orobio, A., & Orobio, J. C. (2016). Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D. *Dyna*, 83(199), 9. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.55350>

Pokines, J. T., Symes, S. A., Lyman, R. L. E. E., & Edition, S. (2001). FORENSIC Edited by. In New York.

Rada, G. R., Jones, D. J., Harvey, J. T., Senn, K. A., & Thomas, M. (2013). Guide for Conducting Forensic Investigations of Highway Pavements. In Guide for Conducting Forensic Investigations of Highway Pavements. <https://doi.org/10.17226/22507>

Reyes Lizcano, F., & Rondón Quintana, H. (2015). Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. ECOE ediciones.

Sánchez Sabogal, F. & Campagnoli Martínez, S. (2016). Pavimentos asfálticos de carreteras: guía práctica para los estudios y diseños. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Smith, K. D., Harrington, D. S., Pierce, L., Ram, P., & Smith, K. L. (2014). Concrete pavement preservation guide (No. FHWA-HIF-14-014). United States. Federal Highway Administration.

Smith, R. B. (2004). Forensic Investigation of Pavement Failures. October, Civil.

Zeng, S., Zhao, J., Gan, X.-Y., & Xiao, J.-P. (2011). Computational Method for Determining Voids under Concrete Slabs through FWD Deflections. 2822–2830.
[https://doi.org/10.1061/41165\(397\)289](https://doi.org/10.1061/41165(397)289)



PROYECTO DE GRADO
GUIA FORENSE COMO HERRAMIENTA TÉCNICA PARA EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DE PAVIMENTOS EN EL
TERRITORIO COLOMBIANO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS – UNIVERSIDAD DEL CAUCA

ANEXO No. 1

Tabla 1. Deterioros en pavimentos

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Fisuras longitudinales¹</p>	<p>Discontinuidad en la carpeta asfáltica paralela al eje de la vía; son indicios de existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado. La localización del deterioro es importante para identificar las causas del fallo, es necesario anotar si las fisuras se encuentran sobre las huellas, en la mitad del carril, en la mitad de la cazada o en el borde.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidización de la mezcla asfáltica por exceso de filler • Envejecimiento del asfalto por altas temperaturas o gradientes térmicos altos • Uso de ligantes asfálticos muy duros • Reflexión de grietas de las capas inferiores • Zonas de contacto entre corte y terraplén • Cantidad insuficiente de riego de liga • Espesor insuficiente de la capa de rodadura • Asentamiento terraplenes 	<ul style="list-style-type: none"> • Fisuras tipo piel de cocodrilo • Desintegración • Descascaramientos • Asentamientos • Fisuras en bloque <p>Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia. Severidades altas afectan la movilidad</p>	
<p>Fisuras transversales²</p>	<p>Discontinuidad en la carpeta asfáltica perpendicular al eje de la vía; son indicios de existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidización de la mezcla asfáltica por exceso de filler • Rigidización de la mezcla asfáltica por envejecimiento del asfalto por altas temperaturas o gradientes térmicos altos • Uso de ligantes asfálticos muy duros • Reflexión de grietas de las capas inferiores • Espesor insuficiente • Asentamiento corte/relleno 	<ul style="list-style-type: none"> • Fisuras tipo piel de cocodrilo • Desintegración • Descascaramientos • Asentamientos • Fisuras en bloque <p>Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia. Severidades altas afectan la movilidad</p>	
<p>Fisuras en juntas de construcción²</p>	<p>Fisuras en sentido longitudinal y transversal coincidentes con juntas de construcción.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de ligante en las paredes de la junta • Deficiencia en la compactación de la mezcla • Deficiencia en corte vertical de franjas • Unión de materiales con diferente rigidez 	<ul style="list-style-type: none"> • Abultamiento en las superficies • Pérdida de agregado • Descascaramiento • Asentamientos • Fisuras tipo piel de cocodrilo • Desportillamientos <p>Afectación a la movilidad por los cambios de nivel abruptos</p>	

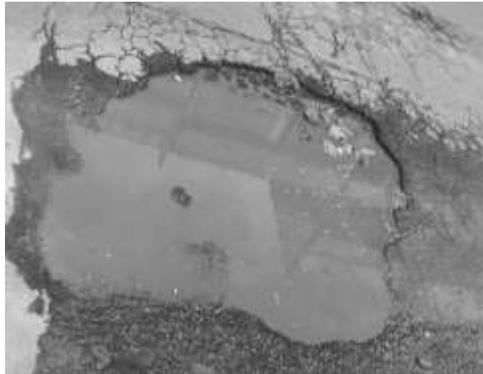
Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Fisuras por reflexión de placas de concreto o elementos de mayor rigidez³	Fisuras que se manifiestan en capas de rodadura de pavimento flexible cuando esta se encuentra sobre placas de concreto rígido u otros; las fisuras con patrón regular pueden ser proyecciones de las juntas; patrones irregulares pueden corresponder a grietas en las losas. Se debe conocer las dimensiones de las losas para chequear el patrón manifestado	<ul style="list-style-type: none"> • Movimiento de las juntas de placas de concreto o bloques formados por grietas existentes • La acción del tránsito puede provocar fisuración en zonas aleñadas, incrementando el daño • Estructuras de rigidez superior debajo de la estructura 	<ul style="list-style-type: none"> • Fisuras en bloque • Descascaramiento • Baches Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia.	
Fisuras en medialuna²	Fisuras de forma parabólica asociadas al movimiento de la banca, usualmente se presentan acompañadas de hundimientos	<ul style="list-style-type: none"> • Inestabilidad de la banca • Efectos locales de desecación • Falla lateral del talud en zonas de terraplén • Falla de talud en zonas de corte a media ladera • Ausencia o falla de obras de contención en la banca • Desecación producida por la presencia de árboles muy cerca al borde de la vía • Consolidación de rellenos que acompañan las obras de contención 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del área afectada • Aumento del hundimiento • Pérdida de la banca Permiten el ingreso del agua, incrementando la afectación a la banca	
Fisuras de borde⁴	Fisuras con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de confinamiento lateral: ausencia de berma, carencia de bordillos, ancho de berma insuficiente, sobrecarpetas a desnivel con la berma • Tráfico que circula muy cerca del borde • Falta de compactación del borde del pavimento • Cambios volumétricos en la subrasante por humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Desprendimiento del borde • Descascaramiento Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia.	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Fisuras por fatiga o tipo piel de cocodrilo⁴</p>	<p>Fisuras interconectadas formando polígonos de tamaño variables, semejando una malla o piel de cocodrilo. Ocurren en zonas sujetas a aplicación repetida de cargas. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores. Se pueden encontrar en zonas con deformaciones no relacionadas a falla estructural; es decir, en sitios con mal drenaje, falta de compactación, reparaciones mal ejecutadas y subrasantes expansivas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Espesor de estructura o rodadura insuficiente • Deformación de la subrasante • Oxidación del asfalto o envejecimiento) • Problemas de drenaje que afecten a los materiales granulares • Compactación deficiente de las capas granulas o asfálticas • Construcción en zonas blandas o capas húmedas • Deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica: exceso de mortero en la mezcla, uso de asfalto de alta penetración • Reparaciones deficientes • Cumplimiento de la vida útil 	<ul style="list-style-type: none"> • Deformaciones • Descascaramiento • Baches <p>Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia.</p>	
<p>Fisuración por deslizamiento de capas o grietas parabólicas²</p>	<p>Fisuras en forma de semicírculo o medialuna, con curvaturas definidas de acuerdo con la fuerza de tracción que produce la llanta sobre el pavimento (al acelerar o frenar). Este tipo de fisuras se genera por acción de arranque o frenado de vehículos, provocando que la superficie se deslice y se deforme. Se manifiesta en curvas, pendientes altas y zonas de frenado/aceleración.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla de la superficie de baja resistencia o estabilidad • Escasa adherencia entre capas superficiales • Paso de tráfico muy pesado y muy lento • Espesores bajos de carpeta • Alto contenido de arena en la mezcla • Exceso de ligante o polvo durante le ejecución de riego de liga • Carencia de imprimación en bases granulares 	<ul style="list-style-type: none"> • Descascaramiento • Baches • Hundimientos • Abultamientos 	
<p>Fisuración incipiente⁵</p>	<p>Fisuras contiguas y cerradas, sin un patrón regular, que generalmente no se interceptan. Suelen afectar el concreto asfáltico de manera superficial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia de temperatura entre la mezcla y el medio ambiente en el momento de la colocación (temperatura ambiente baja) • Lluvia durante la colocación del concreto asfáltico 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo en pequeños bloques • Pérdida de agregados • Fisuras en bloque 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Fisuras en bloque o fisuras por contracción térmica⁶	División de la carpeta en bloque con lado promedio mayor a 0.30 m. Aparece en zonas no sometidas a cargas. La presencia de estas fisuras indica que el asfalto se ha endurecido	<ul style="list-style-type: none"> • Contracción del concreto asfáltico debido a los gradientes de temperatura • Envejecimiento de la mezcla o uso de asfalto inadecuado para las condiciones climáticas de la zona • Reflejo de grietas de contracción provenientes de materiales estabilizados • Combinación del cambio volumétrico del agregado fino de la mezcla con el uso de asfalto de baja penetración 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo • Descascaramiento <p>Permiten el ingreso del agua, reaccionando con la capa asfáltica e interactuando con las capas inferiores, suavizándolas y reduciendo su resistencia.</p>	
Ondulación y corrugación⁷	Deformación plástica de la capa de rodadura, paralela al eje de la vía o perpendicular, se caracteriza por ondas en la superficie del pavimento, con longitudes entre crestas usualmente menor a 1 m. Secciones críticas presentan agrietamientos en forma circular	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica • Exceso de compactación de la carpeta asfáltica • Exceso o mala calidad del asfalto • Insuficiencia de caras fracturadas • Falta de curado de las mezclas en vía • Acción del tránsito en zonas de frenado y estacionamiento • Deslizamiento de la rodadura por exceso de liga • Excesiva humedad en la base o vacíos en mezcla 	<ul style="list-style-type: none"> • Exudación • Ahuellamiento <p>Disminuye la comodidad del usuario</p>	
Abultamiento⁸	Prominencias que se presentan en la superficie del pavimento, en algunos casos se encuentran acompañados por fisuras	<ul style="list-style-type: none"> • Expansión de la subrasante • Presión bajo capa asfáltica por procesos de bombeo (si existen placas de concreto por debajo) • Baja estabilidad de la capa • Ondulación localizada • Insuficiente compactación • Exceso de asfalto • Falta de contención • Contaminación por derrame de aceite 	<ul style="list-style-type: none"> • Fisuración • Desprendimiento • Exudación • Ahuellamiento 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Hundimiento ^{4,2}	Depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante. Su orientación puede ser longitudinal o transversal al eje de la vía o con forma de media luna.	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamientos de la subrasante • Daños de tubería de acueducto o alcantarillado • Deficiencia en compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en zonas de acceso a otras obras de arte • Deficiencias en drenaje que afecta capas granulares • Diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante en los sectores de transición entre corte y terraplén • Deficiencias en compactación de rellenos en zanjas que atraviesan la calzada • Inestabilidad de la banca • Circulación de tránsito muy pesado 	<ul style="list-style-type: none"> • Fisuración • Desprendimiento • Movimiento en masa <p>Pueden generar problemas cuando contienen agua por efecto de hidroplaneo. Afecta la comodidad de los usuarios, obligando a reducir velocidades de manejo y constituyendo un riesgo a la seguridad cuando presenta severidades altas</p>	
Ahuellamiento ^{3,9}	Deformación vertical permanente localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos; depresiones longitudinales que van acompañadas de elevación de áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración.	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación plástica del concreto asfáltico • Deformación de la subrasante por fatiga ante repetición de cargas • Altas temperaturas de servicio • Compactación inadecuada de las capas asfálticas durante la construcción • Uso de asfaltos blandos • Empleo de agregados redondeados • Cargas de tránsito muy altas • Exceso de asfalto en la mezcla • Insuficiente espesor del pavimento • Uso de materiales sin cohesión en climas secos 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo • Desprendimiento <p>Puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar hidroplaneo por almacenamiento de agua. Afecta la comodidad de los usuarios, obligando a reducir velocidades de manejo y constituyendo un riesgo a la seguridad cuando presenta severidades altas</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Descascaramiento⁴	Pérdidas de fragmentos de la capa asfáltica superficial, sin afectar las capas inferiores	<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza insuficiente previa a tratamientos superficiales • Espesor insuficiente de capa de rodadura asfáltica • Riego de liga deficiente • Mezcla asfáltica muy permeable • Baja afinidad entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo • Distribución heterogénea del ligante asfáltico • Ligante asfáltico inadecuado • Dosificación inadecuada de los agregados pétreos y del ligante asfáltico • Colocación de la capa de tratamiento superficial con lluvia o exceso de agua en la capa de apoyo • Envejecimiento del ligante 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo • Bache <p>Altera la calidad del viaje, permite el almacenamiento e infiltración del agua, incrementando su severidad</p>	
Ojos de pescado o bache superficial^{4,10}	Desprendimiento del material de la base en la que se apoya la capa de rodadura después de la pérdida de esta, cavidad redondeada con bordes más o menos bien definidos y sin hundimientos. Se tiene en cuenta en evaluaciones de daño superficial y su nivel de severidad se asigna según la cantidad y diámetro.	<ul style="list-style-type: none"> • Insuficiente penetración del riego de imprimación en bases hidráulicas • Dosificación insuficiente de ligante asfáltico en bases tratados con cemento asfáltico, aplicado en caliente, diluido o emulsificado • Ligante asfáltico inadecuado o de mala calidad • Espesor insuficiente de la capa de rodadura • Evolución del daño por piel de cocodrilo hasta tener pérdida de material • Evolución del daño por depresiones o desintegraciones localizadas • Debilidad local del pavimento por escasez y/o endurecimiento del asfalto • Exceso de finos en la mezcla 	<ul style="list-style-type: none"> • Desintegración • Bache <p>Altera la calidad del viaje, permite el almacenamiento e infiltración del agua, incrementando su severidad.</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Baches⁹	Hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada, pérdida parcial de la capa de rodadura y de la capa de apoyo.	<ul style="list-style-type: none"> • Retención de agua en zonas fisuradas • Insuficiente penetración del riego de imprimación en bases hidráulicas • Ligante asfáltico inadecuado o de mala calidad • Espesor insuficiente de la capa de rodadura • Evolución del daño por piel de cocodrilo hasta pérdida de material, depresiones o desintegraciones localizadas • Debilidad local del pavimento por escasez y/o endurecimiento del asfalto • Exceso de finos en la mezcla 	<ul style="list-style-type: none"> • Destrucción de la estructura <p>Altera la calidad del viaje, permite el almacenamiento e infiltración del agua, incrementando su severidad. Afecta la comodidad de los usuarios, obligando a reducir velocidades de manejo y constituyendo un riesgo a la seguridad cuando presenta severidades altas</p>	
Parches y bacheos⁴	Área de la rodadura que ha sido removida y reemplazada por un material similar o diferente para reparación de la capa o instalación de redes de servicio. Se deben identificar pues indican la localización de un deterioro previo. Se denomina “parcheo” si el deterioro solo comprendió capas asfálticas y “bacheo” cuando se involucró alguna capa granular	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos constructivos deficientes, o capacidad estructural insuficiente • Progresión del daño inicial por el cual debió realizarse el parche (cuando la intervención no fue adecuada para solucionar el problema) • Deficiencia de las juntas • Propagación de daños existentes en las áreas aledañas al parche • Deficiencia en el drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la naturaleza original del daño, aceleración del deterioro general del pavimento <p>Dependiendo el terminado del parche, puede afectar la comodidad de los usuarios, al igual, si evoluciona el deterioro hasta severidad alta, pues se pueden manifestar agrietamientos, hundimientos o bombeo.</p>	
Desgaste superficial o pérdida de ligante⁴	Pérdida de ligante y mortero, generalmente localizado en zonas donde transitan los vehículos.	<ul style="list-style-type: none"> • Agentes agresivos como solventes, o erosivos • Envejecimiento significativo del asfalto • Mala adherencia asfalto/agregado • Hidrofilia de los agregados • Deficiente dosificación de asfalto en la mezcla (baja) • Acción intensa del agua o tránsito • Contaminación del agregado 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de agregado <p>Este daño provoca un deterioro acelerado del pavimento por acción del medio ambiente y del tránsito</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Pérdida de agregado o Desintegración⁴	Disgregación superficial de la capa de rodadura debido a una pérdida gradual de agregados, haciendo la superficie más rugosa y exponiendo de manera progresiva los materiales a la acción del tránsito y agentes climáticos. Común en tratamientos superficiales, caso donde se reportan como surcos	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación irregular del ligante en tratamientos superficiales • Problemas de adherencia entre el ligante y agregado • Uso de agregados muy absorbentes o contaminados con finos • Lluvia durante la aplicación o el fraguado del ligante asfáltico • Endurecimiento significativo del asfalto • Deficiencia de compactación de la carpeta asfáltica • Contaminación de la capa de rodadura con solventes. 	Este daño afecta el frenado de los usuarios, permite el ingreso de agua y afectación a las capas inferiores, la severidad incrementará rápidamente ante la acción continua de agua y tráfico.	
Pulimento del agregado¹¹	Presencia de agregados con caras planas en la superficie o ausencia de agregados angulares	<ul style="list-style-type: none"> • Baja resistencia o susceptibilidad de los agregados al pulimento (por ejemplo, agregados calizos) • Excesiva fricción en la superficie por vehículos grandes, especialmente en curvas 	Afecta la seguridad vial al reducir la fricción en el contacto entre el neumático y el pavimento.	
Cabezas duras⁹	Presencia de agregados expuestos fuera del mortero arena-asfalto	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de agregados gruesos con tamaño inadecuado • Distribución granulométrica deficiente en el rango de las arenas • Segregación de los agregados durante su manejo en obra • Heterogeneidad en la dureza de los agregados • Defecto en la dosificación del ligante asfáltico 	Puede llegar a aumentar la rugosidad del pavimento, provocando ruido excesivo para el conductor	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Exudación o afloramiento del ligante asfáltico⁸	Presencia de una película de asfalto libre en la superficie del pavimento, la cual presenta un aspecto brillante y pegajoso	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidades excesivas de asfalto • Contenido de vacíos con aire bajo • Uso de asfaltos muy blandos • Derrame de ciertos solventes • Exceso en la imprimación o riego de liga 	Produce pérdidas importantes de fricción, especialmente bajo condición de superficie húmeda, por lo que representa un riesgo para la seguridad vial.	
Surcos⁴	Franjas longitudinales donde se han perdido los agregados de la mezcla asfáltica	<ul style="list-style-type: none"> • En tratamientos superficiales se da por distribución transversal defectuosa del ligante bituminoso o del agregado, generando desprendimiento de agregados • En concreto asfáltico se da por erosión por agua en zonas de altas pendiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de agregado • Bache • Desprendimientos 	
Segregación¹⁰	Distribución no uniforme de los agregados finos y gruesos	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de asfalto inadecuado • Gradación incorrecta con curvas discontinuas • Incorrecto almacenamiento de materiales (tolvas altas) 	Falta de homogeneidad en las propiedades y características de la mezcla, principalmente en los parámetros estructurales y de textura, acortando su durabilidad.	
Corrimiento vertical de la berma¹⁰	Diferencia de elevación entre la calzada y la berma.	<ul style="list-style-type: none"> • Diferencia entre los materiales de la berma y el pavimento • Bombeo del material de base en la berma • Inestabilidad de los taludes • Condiciones que generan circulación de vehículos en berma • Desnivel por construcción 	Permite la infiltración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento, provocando su deterioro.	

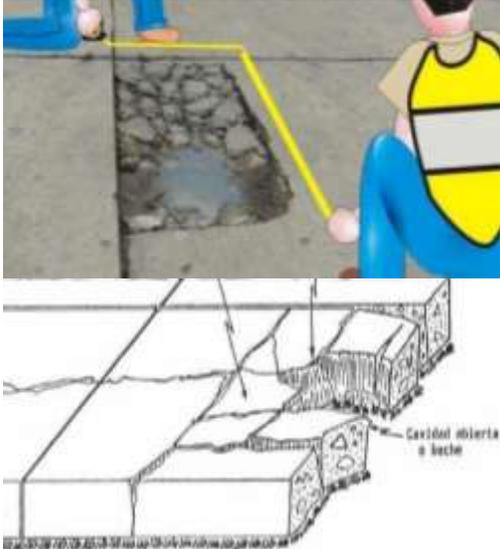
Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Separación de la berma²	Incremento en el ancho de la junta existente entre la calzada y la berma	<ul style="list-style-type: none"> • Movimiento de la berma debido a problemas de inestabilidad de taludes adedaños • Ausencia de liga entre calzada y berma cuando se construyen por separado 	Permite la infiltración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento, provocando su deterioro.	
Desintegración de los bordes del pavimento⁴	Pérdida de la capa de rodadura en los bordes	<ul style="list-style-type: none"> • Bermas no revestidas • Circulación o estacionamiento de vehículos en los bordes del pavimento 	Desaparición del revestimiento asfáltico	
Erosión de la berma¹⁰	Destrucción de bermas revestidas y no revestidas	<ul style="list-style-type: none"> • Inadecuado sistema de drenaje superficial 	Severidades altas representan un riesgo para la estabilidad de la calzada y la seguridad de los usuarios	
Afloramiento de agua²	Presencia del líquido en instantes en los cuales no hay lluvia; se manifiesta por medio de fisuras y por áreas segregadas del pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema inadecuado de drenaje interno • Ausencia de drenaje interno • Filtración de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo • Descascaramiento • Baches 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Afloramiento de finos¹</p>	<p>Salida de agua infiltrada junto con materiales finos de la capa de base por grietas, cuando circulan sobre ellas las carcas de tránsito. Se evidencia por machas o material acumulado en la superficie al borde de las grietas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema inadecuado de drenaje interno • Ausencia de drenaje interno • Exceso de finos en la estructura 	<ul style="list-style-type: none"> • Piel de cocodrilo • Descascaramiento • Baches 	
DETERIOROS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS				
<p>Grietas de esquina¹⁰</p>	<p>Grieta que interseca una junta transversal con una longitudinal o borde de la calzada, generalmente formando un ángulo igual o mayor a 45° respecto al eje del pavimento. El punto de partida en ambas juntas debe ser la mitad de la longitud de ese lado o antes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de la base y/o la subrasante • Falta de apoyo de la losa, originado por la erosión de la base • Alabeo térmico • Sobrecarga en las esquinas • Deficiente transmisión de cargas entre las losas adyacentes • Losas con ángulos agudos 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación o incremento de escalonamientos • Fracturas múltiples en las losas • Desportillamientos <p>Afecta la movilidad del usuario, representando riesgo para la seguridad cuando presente severidad alta</p>	
<p>Grietas longitudinales⁴</p>	<p>Grietas predominantemente paralelas al eje de la vía o que se extienden desde una junta transversal hasta el borde de la losa, pero la intersección se produce a una distancia (L) mucho mayor que la mitad de la longitud de la losa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de la base y/o la subrasante • Falta de apoyo de la losa, originado por la erosión de la base • Alabeo térmico • Losa de ancho excesivo • Carencia de una junta longitudinal • Mal posicionamiento de las dovelas y/o barras de anclaje • Aserrado tardío de la junta • Contracción del concreto • Espesor de calzada insuficiente • Reflexión de juntas o fisuras en capas inferiores 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación o incremento de escalonamientos • Fracturas múltiples en las losas • Desportillamientos <p>Afecta la movilidad del usuario en severidades medias y altas. Permite el ingreso del agua afectando las capas inferiores</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p align="center">Grietas transversales⁴</p>	<p>Grietas predominantemente perpendiculares al eje de la vía o que se extienden desde una junta transversal hasta la junta longitudinal, pero los catetos del triángulo formado deben ser menores a la mitad de la longitud del lado de la losa donde se originan</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de la base y/o la subrasante • Alabeo térmico • Losa de longitud excesiva • Aserrado tardío de la junta • Problemas de drenaje generando erosión del soporte • Espesor de losa insuficiente • Cargas excesivas • Reflexión de juntas o fisuras en capas inferiores • Losas en voladizo a causa del bombeo, agrietándose 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación o incremento de escalonamientos • Grietas en bloque • Desportillamientos <p>Afecta la movilidad del usuario en severidades medias y altas. Permite el ingreso del agua afectando las capas inferiores</p>	
<p align="center">Grietas en los extremos de los pasadores¹²</p>	<p>Grietas cercanas al extremo de los pasadores o dovelas. Pueden ser ocasionadas por mala ubicación de los pasadores o por su movimiento durante el proceso constructivo. Tipo de daño presentado en placas de concreto simple y placas de concreto reforzado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mala ubicación de los pasadores • Corrosión o desalineamiento de los pasadores • Movimiento durante el proceso constructivo de los pasadores • Diámetros de barras muy pequeños y cargas de tráfico muy altas 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación o incremento de escalonamientos • Grietas en bloque • Desportillamientos 	
<p align="center">Grietas en bloque o fracturación múltiple o losa fracturada^{4, 4}</p>	<p>Unión de grietas longitudinales y transversales formando bloques a lo largo de la placa. Este grupo también comprende uniones en “Y”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Repetición de cargas pesadas • Diseño estructural erróneo • Condiciones de soporte deficiente • Resultado de evolución de fisuras 	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro total de la estructura y/o hundimientos <p>Afecta la movilidad del usuario en severidades medias y altas. Permite el ingreso del agua afectando las capas inferiores</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Grietas en pozos y sumideros⁴	Grietas relacionadas con la presencia de pozos o sumideros	<ul style="list-style-type: none"> • Variación en la distribución de esfuerzos debido a la presencia de pozos o sumideros; la geometría irregular no permite seguir los principios de regulación de losas 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo • Deterioro total 	
Separación de juntas longitudinales¹³	Abertura en la junta longitudinal del pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • Contracción o expansión diferencial de losas debido a la ausencia de barras de anclaje entre carriles adyacentes • Desplazamiento lateral de las losas motivado por un asentamiento diferencial en la subrasante • Ausencia de bermas • Asentamiento diferencial de la subrasante 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo • Pérdida del perfil longitudinal 	
Deterioro del sello^{14,14}	<p>Cualquier condición que hace posible que suelo o partículas granulares se acumulen en las juntas o que permite una infiltración significativa del agua. La acumulación de materiales restringe la expansión de la losa. Algunas situaciones aplicables son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desprendimiento del sellante • Expulsión del sellante • Crecimiento de hierba • Endurecimiento del material llenante • Pérdida de adherencia entre el material y los bordes • Falta o ausencia de sellante en la junta 	<ul style="list-style-type: none"> • Mala calidad o envejecimiento del sello • Sellado mal colocado, reservorio mal diseñado, paredes sucias en el momento de aplicación del sello • Procedimiento de colocación deficiente, movimiento relativo excesivo entre losas aledañas, poca consistencia del material de ello, humedad en la junta • Exceso de sello, Incremento severo de temperatura, ablandamiento del material, puesta en servicio antes de fraguado del sello • Bermas no pavimentadas o caída de materiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentación • Levantamiento • Desportilladura • Bombeo 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Desportillamiento o spalling¹²	Desintegración de las aristas de una junta o fisura, con pérdida de trozos, que puede afectar hasta 0.15 m a lado y lado de la junta	<ul style="list-style-type: none"> • Debilitamiento de los bordes de la junta debido a defectos constructivos • Desintegración del concreto por mala calidad del material • Presencia de material incompresible en la junta, el cual genera concentración de esfuerzos y falla ante el paso de vehículos • Mal procedimiento de corte de la junta • Aplicación de cargas antes de conseguir la resistencia mínima recomendada del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo 	
Desportillamiento de esquinas¹²	Desintegración de la losa aproximadamente dentro de los primeros 0.5 m a partir de la esquina, se diferencia de una grieta de esquina porque la desportilladura se inclina hacia abajo para intersectarse con la junta, mientras que la grieta se extiende verticalmente a través de la esquina de la losa.	<ul style="list-style-type: none"> • Debilitamiento de los bordes de la junta debido a defectos constructivos • Desintegración del concreto por mala calidad del material • Presencia de material incompresible en la junta, el cual genera concentración de esfuerzos y falla ante el paso de vehículos • Mal procedimiento de corte de la junta 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo 	
Descascaramiento o descamado scaling^{13,15}	Rotura de la superficie de la losa por desprendimientos de pequeños trozos de concreto. Deterioración física de la parte superior de la losa, normalmente de 3 a 13 mm; puede ocurrir en cualquier parte del pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de acabado del concreto, produciendo exudación del mortero y agua, dando lugar a una superficie débil ante la retracción • Fisuras capilares • Armaduras muy próximas a la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Desintegración 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Desintegración o saltaduras o popouts¹⁴</p>	<p>Consiste en cavidades de forma redondeada por desprendimientos del concreto en la superficie del pavimento, su diámetro varía entre 25 mm y 100 mm y profundidad entre 13 mm y 50 mm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Efecto abrasivo del tránsito sobre concreto de calidad pobre por dosificaciones inadecuadas (bajo contenido de cemento, exceso de agua, agregados de inapropiada granulometría) o deficiencias en su ejecución (segregación de mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso • Material inapropiado en el interior del hormigón, tal como terrones de arcilla o cal viva • Mortero poco homogéneo • Deficiente calidad de los materiales • Agregados expansivos o de baja durabilidad • Reparaciones hechas sin seguir recomendaciones técnicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Baches 	
<p>Baches^{11, 7}</p>	<p>Desintegración de la losa de concreto y la remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares que incluso puede dejar expuesto el material de base</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fundación y capas inferiores inestables • Espesores del pavimento estructuralmente insuficientes • Retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas • Acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento 	<p>Altera la calidad del viaje, permite el almacenamiento e infiltración del agua, incrementando su severidad. Afecta la comodidad de los usuarios, obligando a reducir velocidades de manejo y constituyendo un riesgo a la seguridad cuando presenta severidades altas</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Pulimento¹³	Carencia o pérdida de la textura superficial necesaria para que exista una fricción adecuada entre el pavimento y los neumáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Tránsito que produce desgaste superficial de los agregados, especialmente cuando la mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente: <ul style="list-style-type: none"> - Inadecuada dosificación del hormigón (bajo contenido de cemento, alta relación agua/cemento) - Adición de agua a la superficie durante las operaciones de terminación - Técnicas de terminación superficial inadecuadas - Agregados pétreos degradables 	<ul style="list-style-type: none"> • Cabezas duras <p>Afecta la seguridad vial al reducir la fricción en el contacto entre el neumático y el pavimento, representando un riesgo para la conducción.</p>	
Escalonamiento de juntas¹⁶	Desnivel de la losa en su junta respecto a una losa vecina	<ul style="list-style-type: none"> • Transferencia de cargas deficiente • Erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta (ej.: bombeo) • Asentamiento diferencial de la base o subrasante • Falta de capacidad de soporte de la subrasante 	<ul style="list-style-type: none"> • Fractura de losas <p>Permite el ingreso de agua en la junta, lo cual, ante la aplicación de cargas, genera el fenómeno de bombeo, erosionando la base hasta el punto de fractura</p>	
Estallido/ Levantamiento localizado¹⁴	Elevación abrupta de la superficie en zonas contiguas a una junta o grieta, donde habitualmente el concreto de una o ambas losas se fragmenta	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción en el movimiento de las losas de concreto • Fuerzas diagonales al plano de junta o excéntricas a la sección • Mala colocación de barras de transferencia • Presencia de estratos de suelos expansivos a poca profundidad • Gradiente térmico alto en losas con longitud excesiva • Evolución de desportillamiento • Raíces a poca profundidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Grietas en bloque • Deterioros en el sello <p>Afecta la comodidad de los usuarios, obligando a reducir velocidades de manejo y constituyendo un riesgo a la seguridad e impidiendo el tránsito cuando presenta severidades altas</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Parches 4.13.1</p>	<p>Área de la rodadura que ha sido removida y reemplazada por un material similar o diferente para reparación de la capa o instalación de redes de servicio. Se deben identificar pues indican la localización de un deterioro previo. Se debe identificar el material con el que se construyó el parche para el análisis (diferencias de rigidez, requisitos, entre otros).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En parches asfálticos, la capacidad estructural del parche es insuficiente o se practicó un deficiente proceso constructivo • En parches de concreto de pequeñas dimensiones, la retracción por fraguado puede separar el parche de concreto antiguo, si no utiliza un epóxico como material de adhesión • En el caso de parches de concreto, si hubo reemplazo de por lo menos la mitad de una losa de concreto, el traspaso de carga entre el parche y la losa es insuficiente por falta de dovelas o barras de amarre y/o por defectos en el proceso constructivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Daño total del parche y de las zonas aledañas al mismo, el parche puede adoptar agrietamientos, hundimientos, entre otros 	
<p>Hundimientos o asentamientos¹⁶</p>	<p>Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada; puede estar acompañado de agrietamiento significativo, debido al asentamiento de las losas. Generalmente es un fallo de tipo puntual, originado por causas localizadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento o consolidación de terraplenes sobre fundaciones de suelos compresibles • Deficiente compactación de la subbase o de materiales de relleno contiguos a estructuras de drenaje o muros de contención • Pérdida de soporte de la subrasante • Deficiencia durante el proceso de construcción de losa y/o subbases 	<ul style="list-style-type: none"> • Agrietamiento total de la losa <p>Afecta la movilidad de los conductores, generando balanceos, saltos, incomodidad, representando un riesgo cuando presenta severidades altas para la seguridad del conductor y estado del vehículo</p>	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
<p>Fisuración por retracción o en malla¹³</p>	<p>Fisuras limitadas solo a la superficie del pavimento, no atraviesan todo el espesor de la losa. Frecuentemente, las grietas de mayores dimensiones se orientan en sentido longitudinal y se encuentran interconectadas por grietas más finas distribuidas en forma aleatoria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Curado inapropiado del concreto, condiciones desfavorables • Exceso de amasado superficial y/o adición de agua durante el alisado de la superficie • Acción del clima o de productos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Descascaramiento 	
<p>Deterioros por reactividad a los agregados¹⁶</p>	<p>Agrietamiento en forma de mapa o malla cerrada, decoloramiento de la superficie, descascaramiento, y desportillamiento producto de la reactividad de ciertos agregados pétreos con el cemento. Los daños pueden originarse en juntas y grietas y extenderse, las fisuras son finas, pero atraviesan todo el espesor de la losa; Se evidencia material fino blanco en fisuras y grietas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Agregados que se expanden en presencia de un medio alcalino, provocando la ruptura de la matriz de cemento agregado que constituye el concreto. Puede ser reacción sílica – alcalina o carbonato - alcalino 	<ul style="list-style-type: none"> • Desintegración de la losa 	
<p>Fisuras ligeras de aparición temprana⁴</p>	<p>Fisuras delgadas, que afectan únicamente la superficie de la losa; la mayoría de las veces adquieren tendencia a ser paralelas entre sí y eventualmente con 45° de orientación con respecto al eje de la vía. Asociado con fisuración en malla</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contracción plástica del concreto, que aparece antes del fraguado final, por secado prematuro, 3 escenarios: <ul style="list-style-type: none"> - Curado inicial defectuoso frente a condiciones desfavorables (tiempo caluroso, seco y ventoso) - Debilitamiento de la superficie por exceso de terminado en la construcción - Deficiente consolidación del concreto durante colocación o puesta en obra 	<ul style="list-style-type: none"> • Descascaramiento 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Fisuración por durabilidad¹⁴	<p>Expansión de las partículas de mayor tamaño del agregado pétreo debido al proceso congelamiento y descongelamiento que, con el tiempo, va degradando el concreto. Se presenta como un patrón de grietas paralelas y cercanas a una junta o una grieta lineal; es común encontrar un depósito de color oscuro en inmediaciones de las grietas pues el concreto se satura de estas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Empleo de agregados no resistentes a los ciclos de congelamiento y deshielo (no aplicable en el entorno nacional) • Reacción álcali-sílice • Ambientes alcalinos • Humedecimiento excesivo en el borde del pavimento sumado a excesos de carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Descascaramiento de las superficies del concreto 	
Delaminación¹⁶	<p>Desarrollo de una fisura horizontal que resulta en la separación de la superficie a una profundidad de 1 a 5 cm; similar al descascaramiento y desportillamiento, sin embargo, su mecanismo de falla es diferente. La profundidad del deterioro es una variable que depende del mecanismo de falla.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inconsistencias en la colocación del concreto resultando en una junta fría • Exceso de terminación del concreto y excesiva evaporación de la superficie antes del texturizado • Curado inadecuado o tardío con un gradiente de humedad en la superficie que genera esfuerzos • Aserrado tardío 	<ul style="list-style-type: none"> • La superficie remanente es susceptible a formación de fisuramiento en malla 	
Bombeo sobre juntas^{14, 16}	<p>Expulsión de finos a través de las juntas o fisuras; producto del ingreso de agua que sale expulsada con partículas ante la aplicación de carga en las losas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presencia de agua superficial que penetra entre la base y la losa de concreto • Material erodable en la base • Tráfico de vehículos pesados frecuente • Trasmisión inadecuada de cargas entre las losas 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de soporte, resultando en agrietamiento longitudinal, transversal, de esquina y/o en bloque • Escalonamiento 	

Deterioro	Descripción	Causas posibles	Evolución probable / efecto	Ilustración
Ondulaciones¹⁶	Deformaciones en la superficie, generadas por un inadecuado proceso durante la construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de agregados con pobre resistencia a la abrasión • Repeticiones de tráfico altas • Técnicas inadecuadas de acabado y curado 		
Desnivel entre carril y berma¹⁰	Diferencia de nivel entre la superficie de la losa y la superficie de la berma	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento de la berma por compactación insuficiente • Erosión de la berma por acción del tráfico o agua, solo aplica en cunetas no revestidas • Inestabilidad de la banca • Deseñel según diseño 	<ul style="list-style-type: none"> • Separación entre la berma y la losa • Desportillamiento en la arista próxima a la berma <p>Representa un riesgo para la seguridad vial a severidades altas</p>	
Separación entre la berma y el pavimento¹³	Incremento en la abertura de la junta longitudinal entre la berma y el pavimento	<ul style="list-style-type: none"> • Asentamiento con desplazamiento por compactación insuficiente o falta de compactación en la cara lateral del pavimento • Escurrimiento de agua sobre la berma cuando existe un desnivel entre ella y el pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo • Escalonamiento • Fisuras longitudinales • Fisuras en bloque 	

1. Imagen sacada de Distress Identification Manual – Miller & Bellinger (2014)

2. Imagen sacada de Manual de inspección visual de pavimentos flexibles – INVIAS (2006)

3. Imagen sacada de M-E Pavement Design Manual – CDT (2021)

4. Imagen de autoría propia
5. Imagen sacada de Inspección patológica de pavimentos flexibles – Higuera Jaime (2018)
6. Imagen sacada de Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos – Higuera (2012)
7. Imagen sacada de Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación – Irigoyen & Simo (2016).
8. Imagen sacada de Forensic Investigation of pavement failures – Smith (2004)
9. Imagen sacada de Pavimentos: Materiales, diseño, construcción – Reyes & Rondón (2015)
10. Imagen sacada de Manual de mantenimiento de carreteras volumen 1 – INVIAS (2016)
11. Imagen sacada de Manual de mantenimiento de la red vial secundaria – Ministerio de transporte (2008)
12. Imagen sacada de Guía para la inspección y reparación de deterioros en pavimentos de concreto hidráulico – Lanamme (2021)
13. Imagen sacada de Manual de inspección visual de pavimentos rígidos – INVIAS (2006)
14. Imagen sacada de Reparación para pavimentos de hormigón – Calo (2018)
15. Imagen sacada de Concrete pavement distress assessments and solutions – Ayers et al (2018)
16. Imagen sacada de Concrete pavement preservation guide – Smith et al (2022)