



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE PAVIMENTOS EMPLEADOS EN
VÍAS URBANAS, EN NÚCLEOS DE PEQUEÑO
Y MEDIANO FORMATO. IDONEIDAD DE USO
RESPECTO A LOS COSTES DE
IMPLANTACIÓN, Y A LOS DE
CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO.**

Alumno: Manuel Antonio Urbano López

Tutores: Manuel Gómez González
Francisco José Serrano Catena

Depto.: Ingeniería Mecánica

Junio, 2016

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se propone ayudar a los municipios de pequeño y mediano formato a gestionar de un modo eficiente los recursos destinados al diseño y mantenimiento de sus firmes urbanos. Con este objetivo, en primer lugar, se han establecido unos pilares teóricos, complementados por un trabajo de campo llevado a cabo en diferentes municipios de la Campiña cordobesa, que fundamentan los estudios posteriores. Seguidamente, se propone un sistema de gestión de la conservación de los firmes como una herramienta que ayude a mantener los pavimentos en buenas condiciones a un coste mínimo. Por último, con un estudio de costes de construcción y un estudio cualitativo del mantenimiento, se analiza cuál es la tipología de firme más rentable al final de su vida útil, con un mantenimiento adecuado y sin él. Este trabajo aporta material original adaptado a la pavimentación de vías con las características mencionadas, para las que no existe normativa específica que las regule.

Palabras clave: firmes urbanos, municipios de pequeño y mediano formato, costes de construcción, mantenimiento, deterioros, gestión de la conservación.

ABSTRACT

This dissertation intends to assist small and medium-sized municipalities to manage efficiently the resources destined to the design and maintenance of urban pavements. With this aim, firstly, this work establishes a theoretical base, which is improved by the information from the field work that has been carried out in different municipalities of the Southern region of Cordoba. It will support the subsequent researches. Secondly, the author presents a conservation management system as a tool to keep pavements in good conditions at minimum cost. Finally, the study of the cost of construction and the qualitative study of maintenance will reveal which typology of pavement is the most profitable at the end of its service life, with a proper maintenance and without it. This work provides original material adapted to the paving of roads with the mentioned characteristics, for which there is not specific legislation that regulates them.

Key words: urban pavements, small and medium-sized municipalities, costs of construction, maintenance, damages, conservation management.

ÍNDICE

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS.....	11
METODOLOGÍA	13
BLOQUE I: MARCO TEÓRICO	15
1. Conceptos básicos.....	15
1.1. Definición de un firme o pavimento.....	15
1.2. Elementos estructurales que integran un firme.....	16
1.2.1. Capa de rodadura	17
1.2.2. Capa de base	19
1.2.3. Capa de subbase	21
1.2.4. Explanada.....	22
1.3. Tipos de firmes	23
1.3.1. Firmes flexibles	24
1.3.2. Firmes rígidos.....	25
1.3.3. Firmes articulados.....	25
1.3.4. Firmes semiflexibles.....	26
1.3.5. Firmes semirrígidos.....	26
1.3.6. Diferencia en el comportamiento de los principales firmes.....	27
2. Dimensionamiento de un firme	29
2.1. Factores para el dimensionamiento de firmes urbanos.....	29
2.1.1. Análisis de antecedentes	30
2.1.2. Período de servicio o vida útil de un firme	30
2.1.3. Categoría de tráfico	31
2.1.4. Categoría de explanada	32
2.1.5. Climatología	33
2.1.6. Materiales	34
2.1.7. Criterios estéticos	34
2.1.8. Redes subterráneas	34
2.2. Métodos de dimensionamiento	35
3. Tipos de deterioros	37
3.1. En firmes flexibles.....	39

3.2. En firmes rígidos	41
3.3. En firmes articulados	42
4. Tipos de reparaciones	44
4.1. Mantenimiento preventivo	46
4.2. Mantenimiento curativo o correctivo	46
4.3. Rehabilitaciones.....	47
4.3.1. Rehabilitación superficial.....	48
4.3.2. Rehabilitación estructural.....	48
5. Sistema de gestión de la conservación de firmes urbanos	50
5.1. Inventario	52
5.2. Evaluación del estado del firme	52
5.3. Determinación del tipo de mantenimiento.....	53
5.4. Identificación de prioridades.....	53
5.5. Estimación de recursos y estrategias de conservación	53
5.6. Revisión del comportamiento	54
5.7. Fichas para la evaluación del estado de firmes.....	54
5.8. Fichas de reparaciones	57
5.9. Conclusiones sistema de gestión de la conservación.....	58
6. Curvas de deterioro-vida útil	59
7. Firmes sostenibles	62
7.1. Reciclaje de residuos de demolición	63
BLOQUE II: ESTUDIO ECONÓMICO Y CUALITATIVO.....	65
1. Estructura del bloque	65
1.1. Selección de las secciones de firmes	65
1.2. Estudio del coste de construcción	66
1.3. Estudio cualitativo del mantenimiento	66
2. Selección de las secciones de firmes	66
2.1. Factores para el diseño.....	66
2.2. Materiales.....	71
3. Estudio económico: cálculo costes de construcción	74
3.1. Cálculo del coste de construcción de secciones para tráfico T41	77
3.1.1. Observaciones comparativas de precios	77
3.2. Cálculo del coste de construcción de secciones para tráfico T42	80
3.2.1. Observaciones comparativas de precios	81

3.3. Interpretación de resultados	84
4. Estudio cualitativo del mantenimiento	85
4.1. Firme flexible	87
4.1.1. Tipos de deterioros en firme flexible	88
4.1.2. Deterioros y reparaciones.....	89
4.2. Firme rígido.....	90
4.2.1. Tipos de deterioros en firme rígido	90
4.2.2. Deterioros y reparaciones.....	91
4.3. Firme articulado.....	92
4.3.1. Tipos de deterioros en firme articulado	92
4.3.2. Deterioros y reparaciones.....	93
4.4. Análisis de resultados	93
CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

BLOQUE I

Figura 1.1: Estructura general de un firme. Elaboración propia.

Figura 1.2: Estructura general de un firme, remarcando la capa de rodadura. Elaboración propia.

Figura 1.3: Fotografías de diferentes tipos de capas de rodadura en la ciudad de Cabra. Capa de rodadura de mezcla asfáltica (arriba a la izquierda); Capa de rodadura de hormigón (arriba a la derecha); Capa de rodadura de adoquines (abajo).

Figura 1.4: Estructura general de un firme, remarcando la capa base. Elaboración propia.

Figura 1.5: Base de hormigón para firme de adoquín en Calle Dionisio Alcalá Galiano de Cabra. Elaboración propia.

Figura 1.6: Base de zahorra. ((<http://www.excavaciones-mayte.com/obra-civil.html>))

Figura 1.7: Estructura general de un firme, remarcando la capa subbase. Elaboración propia.

Figura 1.8: Estructura general de un firme, remarcando la explanada. Elaboración propia.

Figura 1.9: Firme flexible. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, noviembre de 2013.

Figura 1.10: Firme rígido. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.

Figura 1.11: Firme articulado. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.

Figura 1.12: Firme semirrígido. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.

Figura 1.13: Diferencia en la distribución de cargas de dos tipos de pavimentos. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.

Figura 1.14: Distribución de cargas en un pavimento flexible. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.

Figura 1.15: Distribución de cargas en un pavimento rígido flexible. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.

Figura 1.16: Histograma cuantitativo de desempeño de un pavimento. Tomada de Intermountain Slurry seal, Inc y de Principles of Pavement Preservation de FHWA.

BLOQUE II

Figura 2.1: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E1.
Elaboración propia.

Figura 2.2: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E2.
Elaboración propia.

Figura 2.3: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E3.
Elaboración propia.

Figura 2.4: Coste medio implantación secciones con tráfico T41, en función de la calidad de la explanada. Elaboración propia.

Figura 2.5: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E1.
Elaboración propia.

Figura 2.6: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E2.
Elaboración propia.

Figura 2.7: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E3.
Elaboración propia.

Figura 2.8: Coste medio implantación secciones con tráfico T42, en función de la calidad de la explanada. Elaboración propia.

ÍNDICE DE TABLAS

BLOQUE I

Tabla 1.1: Comparativa del nivel de tráfico establecido por varias normativas y guías. Monografía nº2/ELSAN-PACSA. “Las vías urbanas”, Diciembre 2003.

Tabla 1.2: Categoría de la explanada según Normativa 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

Tabla 1.3: Distintos criterios de clasificación del tráfico en las vías urbanas. Monografía nº2/ELSAN-PACSA. “Las vías urbanas”, Diciembre 2003.

Tabla 1.4: Relación de clasificación y designación para tipos de vías. Elaboración propia.

BLOQUE II

Tabla 2.1: Tabla 1.B, Norma 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

Tabla 2.2: Módulo de comprensibilidad en el segundo ciclo de carga, tabla 2 de la Norma 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

Tabla 2.3: Secciones para tráfico T41. Elaboración propia.

Tabla 2.4: Secciones para tráfico T42. Elaboración propia.

Tabla 2.5: Coste medio partidas construcción pavimentos. Elaboración propia.

Tabla 2.6: Coste secciones tráfico T41. Elaboración propia.

Tabla 2.7: Coste secciones tráfico T42. Elaboración propia.

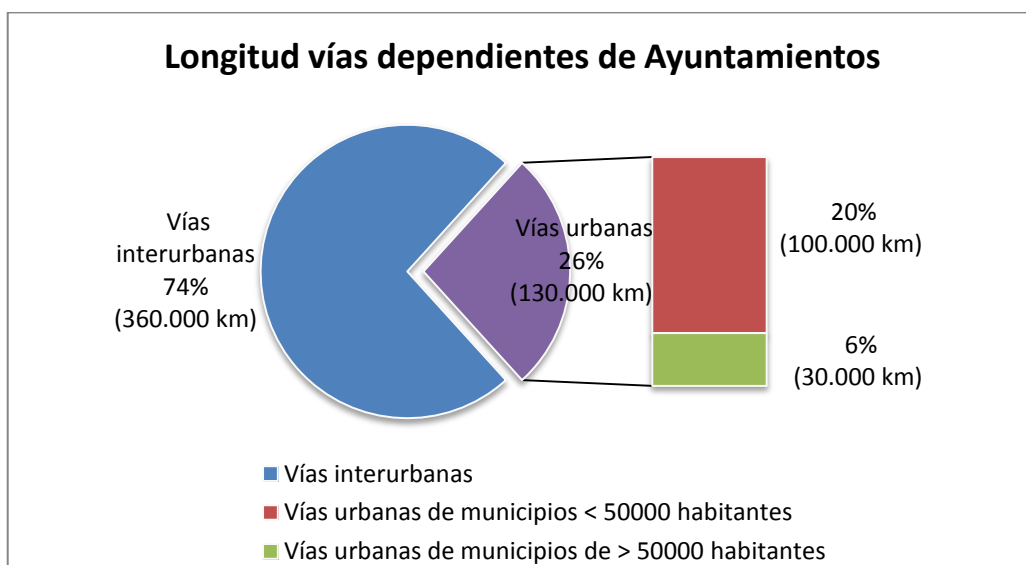
INTRODUCCIÓN

La red vial urbana de un municipio es aquella que sustenta el desarrollo de las actividades diarias de sus habitantes al facilitar la articulación, el traslado y la interacción de estos dentro del núcleo urbano. Estas vías son utilizadas por peatones, vehículos privados de varios tipos, vehículos de reparto de mercancías y vehículos y máquinas de servicio público.

La investigación llevada a cabo en España por la Subdirección General de Estadística y Estudios (SGEE), encuadrada en la Dirección General de Programación Económica y Presupuestaria del Ministerio de Fomento, a lo largo de año 1998, permitió alcanzar una estimación sobre la longitud, tipología y características de las vías de dependencia municipal del país. Los datos concluidos de esta investigación son los últimos disponibles de forma oficial hasta la fecha y, aunque previsiblemente habrán variado más notablemente durante la época de bonanza y el *boom* de la construcción anterior a la crisis de 2008, sirven de referencia para aproximarnos a la realidad actual.

En España, las vías de dependencia municipal suponen en el conjunto de la red viaria total cerca de tres cuartas partes, aproximadamente 490.000 km de los 665.000 totales. Dentro de esta red a cargo de los ayuntamientos, se incluyen las vías urbanas, que ocupan un cuarto de la longitud total, cerca de 130.000 km, y las vías interurbanas, los tres cuartos restantes, unos 360.000 km, que incluyen tanto carreteras como caminos rurales y forestales que se encuentran fuera del entorno urbano pero dentro de la delimitación territorial de los municipios. Finalmente, de los 130.000 km de vías urbanas, 100.000 km corresponden a municipios de menos de 50.000 habitantes.

Figura 1: Gráfico de longitud de redes urbanas.



He aquí el centro de aplicación de este Trabajo de Fin de Grado, que focaliza su estudio en los firmes de la red vial urbana de municipios con menos de 50.000 habitantes, aquí definidos como municipios de pequeño y mediano formato. Éstos constituyen la mayor parte de los municipios de España, 7.982 de los 8.095 existentes, albergando en su conjunto una parte muy importante del total de la red viaria nacional, con un valor patrimonial elevado.

En la actualidad, los estudios sobre este tipo de vías son muy escasos por soportar intensidades de tráfico relativamente bajas, ignorándose el hecho de que ocupan un porcentaje más que considerable dentro de la red vial nacional. De su importancia dentro del cómputo total deriva la pertinencia de este trabajo. A esto se suma la ausencia de investigaciones sobre pavimentación centradas en pequeños y medianos municipios, que mejoren y sistematicen el diseño de las secciones de los firmes, tal y como se procede en carreteras.

Generalmente, el estado de los firmes de estos municipios no es el mejor posible, ya sea por falta de mantenimiento o por la elección de firmes más económicos que se vuelven insuficientes a los pocos años, lo que se traduce en incrementos de costos tanto para los usuarios como para el gobierno municipal. Estas deficiencias conciernen en parte a la fase constructiva, pero principalmente a la parte de diseño y gestión del mantenimiento. La carencia de estudios de diseño específicos y de programas de mantenimiento conlleva una falta de eficiencia en el uso de los recursos económicos. Esto impide tener una red vial en el mejor estado posible con los recursos disponibles.

Para ayudar a solucionar estos problemas, este trabajo estudia la implementación de un sistema de gestión de la conservación creado por el autor, adaptado a las necesidades de estos firmes urbanos, que posibilite un mejor aprovechamiento de los recursos destinados a la conservación. Además, se realizarán dos estudios, uno sobre costes de construcción y otro sobre mantenimiento, con los que se pretende llegar a la tipología de firme más económica al final de su vida útil.

En las páginas que se desarrollan a continuación se realizará una aproximación teórica al estado del arte que servirá como fundamento para el análisis empírico posterior, que pretende acrecentar los escasos estudios desarrollados en la materia hasta día de hoy.

OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Grado, enmarcado dentro de los firmes urbanos de municipios de pequeño y mediano formato, tiene como objetivo principal proponer y facilitar una gestión eficaz de los recursos destinados a la construcción y mantenimiento de estos firmes, buscando la tipología más rentable al final de su vida útil, es decir, aquella cuyos costes globales de construcción y mantenimiento sean los menores posibles. Esto supondría un gran beneficio económico para los organismos responsables de las vías urbanas, además de asegurar un mejor servicio para el usuario. Para llegar a este propósito, es necesario alcanzar una serie de objetivos específicos:

- Conocer y presentar los principales criterios para el correcto diseño de las secciones de los firmes urbanos (para los cuales no existe normativa específica, sólo algunos catálogos de grandes ciudades).
- Crear un catálogo de secciones de firmes urbanos adaptado a las necesidades de estos municipios.
- Establecer qué tipología de firme tiene un menor coste de construcción inicial.
- Analizar el mantenimiento requerido por cada tipología de firme para mantener un buen nivel de servicio.
- Identificar la tipología de firme que genere un menor gasto de mantenimiento al final de su vida útil.
- Elaborar un sistema de gestión de la conservación adaptado a este tipo de municipios que ayude a llevar a cabo las inversiones en conservación de un modo eficiente.
- Como objetivo complementario, crear una serie de tablas de los deterioros más comunes de cada tipología de firme y sus reparaciones, que recojan la información necesaria para la consecución de los objetivos relacionados con el mantenimiento.

Como objetivos generales:

- Crear una recopilación de material teórico de fácil acceso sobre los firmes urbanos con aportaciones personales para su consulta
- Llevar a cabo una aproximación y aprendizaje sobre la materia de la Ingeniería de Pavimentos.
- Conocer y dar a conocer el trabajo de los técnicos municipales, responsables del diseño y mantenimiento de los firmes urbanos.

- Estudiar los deterioros más comunes de cada tipología de firme así como sus reparaciones.
- Demostrar la importancia y beneficios de un buen mantenimiento del firme.
- Fomentar y facilitar la implantación de estrategias de conservación.
- Contribuir a las investigaciones sobre la materia.

De este modo, se pretende que el estudio empírico que se aporta con este trabajo, en conjunto con el sistema de gestión de la conservación propuesto, contribuya a la gestión eficiente de los recursos disponibles en municipios de pequeño y mediano formato y en todos aquellos a los que les sea posible su aplicación.

METODOLOGÍA

Como ya se ha explicado en los apartados Introducción y Objetivos, este Trabajo de Fin de Grado pretende dar a conocer la tipología de firme para vías urbanas de baja intensidad de tráfico que suponga un menor coste global al final de su vida útil. Para lograr su objetivo, este trabajo desarrolla dos estudios aplicados a las tres tipologías de firmes más usados (flexibles, rígidos y articulados): un primer estudio de costes de construcción y un estudio cualitativo del mantenimiento. Para ello resulta esencial el establecimiento previo de unos pilares teóricos -elaborados en el primer bloque de este trabajo- sobre los que asentar el estudio práctico posterior -presente en el segundo bloque-, para finalmente, en un tercer bloque, discutir los resultados y desarrollar las conclusiones de este Trabajo de Fin de Grado.

Para constituir este trabajo, se ha realizado una labor previa de documentación y recopilación de información a partir de publicaciones y normativas, de forma que conforme un acercamiento a la ciencia de la Ingeniería de Pavimentos. Para profundizar en la materia y para contrastar estas informaciones teóricas con la realidad de los municipios, se han llevado a cabo numerosas visitas a más de una docena de municipios de la Campiña cordobesa (por proximidad a la residencia del autor), que han posibilitado una primera inspección general de sus firmes urbanos, además de un contacto directo con los técnicos municipales responsables de las vías urbanas de cada ayuntamiento. De estas entrevistas se han extraído unas encuestas sobre la situación actual de los firmes urbanos, con el fin de documentar y conocer, entre otras cosas, los tipos de firmes más usados y sus problemáticas más frecuentes.

Una vez conocida *in situ* la realidad actual del estado de la materia, se ha procedido a la elaboración del marco teórico, que define el concepto de firme urbano e indica los elementos estructurales que lo componen y sus tipologías, así como los factores que definen su dimensionamiento, los tipos de deterioros y sus reparaciones. En segundo lugar, a raíz de la información recabada de las encuestas, se ha elaborado un sistema simplificado de gestión de la conservación adaptada a las necesidades de los pequeños y medianos municipios. Su formato simplificado sigue las líneas generales de otros sistemas más complejos utilizados para carreteras o grandes ciudades, adaptándose a las limitaciones de los municipios que aquí se estudian. Para finalizar este primer bloque, se incluye un repaso de las posibles medidas a tomar para contribuir a la reducción de la contaminación a lo largo de todo el proceso de fabricación de los materiales y hasta el final de la vida útil del firme con su demolición.

En el segundo bloque se desarrollan los estudios de costes y mantenimiento. Para ello, se ha escogido una selección de las secciones de firmes urbanos a estudiar, tras un análisis de varios catálogos de firmes y manuales de pavimentación. La elección de estas secciones se ha efectuado en función de dos factores, categoría del tráfico y categoría de la explanada, de modo que se correspondan con las características y necesidades de las vías urbanas de municipios de pequeño y mediano formato.

Por una parte, para el estudio económico de los costes de construcción será necesario establecer el precio medio unitario de cada una de las unidades de obra que componen las distintas secciones. Para llegar a ello, se han consultado distintas bases de precios oficiales y algunos presupuestos de proyectos de pavimentación urbana obtenidos en los ayuntamientos de los municipios visitados. Finalmente se obtendrá un ratio de costes de cada tipología de firme para su comparación.

Por otra parte, para llevar a cabo el estudio cualitativo del mantenimiento, se ha realizado una inspección visual detallada de los firmes de los municipios estudiados, que ha permitido reconocer los deterioros más frecuentes de cada tipología. A partir de los datos obtenidos y con apoyo en los documentos consultados, se han elaborado un conjunto de tablas que se recogen en el Anexo II e incluyen la siguiente información de cada deterioro: descripción, causas, grados de severidad, evolución probable, reparaciones posibles y fotografías tomadas por el autor. Estas tablas tienen como fin conocer la frecuencia y complejidad de las labores de conservación que requerirá cada tipología de firme para mantener un buen nivel de servicio con un uso eficiente de los recursos.

Finalmente, en el último apartado se desarrollan las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados de este Trabajo Fin de Grado.

BLOQUE I: MARCO TEÓRICO

El presente bloque muestra los principales pilares teóricos que fundamentan la ciencia de los firmes urbanos. La comprensión y asimilación de estos conocimientos se evidencian necesarias para abordar el desarrollo del segundo bloque, destinado al estudio de costes de construcción y mantenimiento de firmes urbanos para vías de baja intensidad de tráfico, predominantes en núcleos de pequeño y mediano formato. Además, se presentará como aportación del autor (apartado 5) un sistema simplificado de gestión de la conservación que pretende fomentar el mantenimiento adecuado de los firmes urbanos en este tipo de municipios, los cuales carecen normalmente de un plan de conservación que gestione de un modo eficiente los recursos limitados de los que disponen.

Este bloque se divide en siete puntos interconectados. A partir de la aproximación teórica aquí aportada se procederá al estudio empírico posterior.

1. Conceptos básicos

Este primer apartado recoge y analiza la definición de los firmes urbanos, sus clasificaciones y las distintas capas junto con los materiales que las componen, además de las diferencias de su comportamiento estructural.

1.1. Definición de un firme o pavimento

Para definir qué es un firme y comprender su funcionalidad estructural, se toma lo establecido en la *Norma 6.1-IC “Secciones de firme”* de la Instrucción de Carreteras, siendo esta la más usada en nuestro país en el contexto de la ingeniería civil. Por tanto, *“un firme es un conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, y, generalmente, tratados, que constituyen la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tráfico y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad”*.

Esta definición por sí sola queda un poco incompleta. Es necesario añadir que su diseño, construcción y mantenimiento debe tener la finalidad de lograr un comportamiento funcional y estructural óptimo que asegure una buena actuación durante su periodo de servicio.

Se entiende como comportamiento funcional todos aquellos aspectos que afectan a la calidad de la capa de rodadura y, por ello, están relacionados con la comodidad y seguridad de los usuarios de la vía. Por su parte, el comportamiento estructural hace referencia a aquellos aspectos relacionados con la integridad como estructura del

pavimento, es decir, a la capacidad del pavimento para soportar la acción combinada del tránsito y de los agentes atmosféricos (Becerra Salas, 2012).

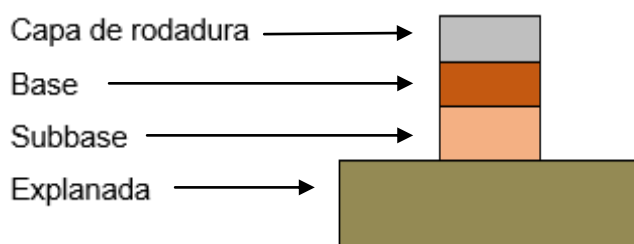
Este trabajo trata el caso concreto de los firmes urbanos, en los que los esfuerzos soportados son diferentes a los que reciben los firmes interurbanos. En firmes urbanos predominan los esfuerzos tangenciales, consecuencia de los numerosos frenazos y arrancadas de los vehículos en estas vías, y los esfuerzos de torsión, producidos en zonas puntuales, como en la maniobra de aparcamiento de vehículos. Estos detalles junto con otros marcarán la diferencia en el comportamiento y necesidades que requerirán los firmes urbanos en comparación con los interurbanos.

En cuanto a la comparativa de firme y pavimento, algunos autores utilizan la palabra “pavimento” para denominar la totalidad del firme, mientras que otros limitan su significado a la capa superior de este. Para evitar confusiones, en este trabajo, se empleará “pavimento” y “firme” como sinónimos y “capa de rodadura” para referirnos a la capa superior del mismo.

1.2. Elementos estructurales que integran un firme

A continuación, se muestran las posibles capas de un firme en orden decreciente de calidad de los materiales que las conforman, lo que se encuentra directamente relacionado con la disposición que ocupan dentro de la sección del mismo, siendo la capa de rodadura, además de la más superficial, la de mayor calidad.

Figura 1.1: Estructura general de un firme. Elaboración propia.



Generalmente, en el caso de vías urbanas, la sección estructural del firme está formada principalmente por la capa base y la de rodadura, a lo que se le puede sumar en algunas ocasiones, la capa de subbase.

Estas capas se apoyan sobre la explanada y deben soportar el efecto que las cargas tanto de los peatones como del tráfico pudieran producir sobre esta, además de contribuir a la resistencia conjunta de todo el firme durante el periodo de proyecto para el que ha sido diseñado.

En la estructura del firme se produce un progresivo reparto de las cargas a través de las distintas capas, lo que permite que la calidad de los materiales empleados en las mismas pueda disminuir con la profundidad, siendo la capa de mayor calidad, la más superficial.

Esta estructura debe cumplir como conjunto una serie de funciones que, según refleja Bañón Blázquez (2000) en su “*Manual de Carreteras*” son las siguientes:

1. *Proporcionar una superficie de rodadura segura y cómoda, cuyas características se mantengan uniformes durante el periodo de funcionamiento de la vía, pudiendo producirse a lo largo de éste deformaciones admisibles y deterioros que puedan ser objeto de actuaciones eventuales de conservación y mantenimiento, por otra parte lógicas en cualquier tipo de infraestructuras.*
2. *Resistir las solicitaciones del tráfico previsto durante el período de proyecto del firme, así como servir de colchón de amortiguamiento de las cargas verticales para las capas inferiores, de forma que a la explanada llegue una pequeña parte de aquéllas, compatible con su capacidad portante.*
3. *Resguardar la explanada de la intemperie, especialmente de las precipitaciones y del agua en cualquiera de sus formas, ya que en determinados suelos produce una merma considerable en sus características resistentes, pudiendo además provocar lavados de parte del material e incluso fenómenos de deslizamiento.*

En resumen, puede decirse que la función final de un pavimento no es otra que la de soportar la acción de los vehículos que circulan sobre él, proporcionando en todo momento una superficie de rodadura cómoda, segura y duradera.

A continuación, se recoge una breve descripción de cada una de las capas, citando sus principales funciones y los materiales más usados en vías urbanas.

1.2.1. Capa de rodadura

La capa de rodadura es la capa más superficial del pavimento y la que soporta directamente las solicitaciones combinadas del tráfico, los peatones y los agentes atmosféricos, transmitiéndolas suficientemente amortiguadas al resto de capas. Esta tiene como principal propósito proporcionar una superficie cómoda y segura para el tránsito de los vehículos.

Esta capa puede estar compuesta de diferentes materiales que deben tener como característica principal una alta resistencia a la abrasión y a los agentes atmosféricos. Los más usados son:

- Mezcla bituminosa en caliente: Tipo de hormigón bituminoso formado por la combinación de un ligante hidrocarbonatado, áridos con granulometría continua y eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea del ligante y los áridos y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente. Tiene un buen comportamiento ante el ruido y escasa calidad visual. En general, menor rugosidad y durabilidad que los pavimentos de hormigón. Estas mezclas deberán cumplir, excepto en el caso que se mencionen expresamente otras, las especificaciones que se establecen en el artículo 542 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
- Hormigón: Constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales. Tiene una buena adherencia y durabilidad, además de un impacto visual medio y nivel medio de ruido. Su mantenimiento es escaso. Los procesos y materiales utilizados para su ejecución deben cumplir con las prescripciones del artículo 550 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
- Adoquín: Pueden ser de hormigón o de piedra natural. De efectos favorables en la reducción de velocidad y gran durabilidad. Permiten gran variedad de formas y colores, lo cual puede ser apropiado para centros históricos y lugares de interés turístico. Tienen un efecto negativo de aumento de ruido, pero no es excesivo ya que se reduce la velocidad en la vía. La alta resistencia al deslizamiento de los adoquines aumenta la seguridad. Los materiales empleados en la fabricación de adoquines cumplirán lo establecido por la norma UNE-EN 1338:2004, sin perjuicio de lo establecido en la vigente “Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)”.

Figura 1.2: Estructura general de un firme, remarcando la capa de rodadura. Elaboración propia.

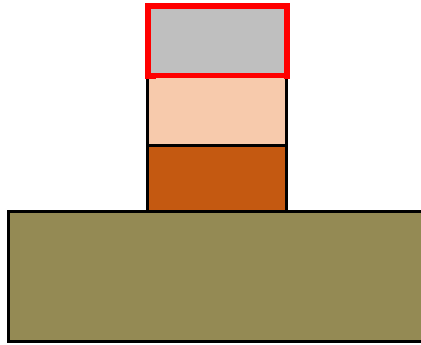


Figura 1.3: Fotografías de diferentes tipos de capas de rodadura en la ciudad de Cabra. Capa de rodadura de mezcla asfáltica (arriba a la izquierda); Capa de rodadura de hormigón (arriba a la derecha); Capa de rodadura de adoquines (abajo).



1.2.2. Capa base

Por debajo de la capa de rodadura se coloca la denominada capa base, que confiere parte de la resistencia mecánica necesaria para soportar las cargas inducidas por el tráfico. La base tiene como función principal distribuir las cargas del tránsito a la subbase y ésta a la explanada. Debido a la alta concentración de esfuerzos a los que se ve sometida esta capa, los materiales que la componen deben ser de alta calidad para evitar la falla o deformaciones excesivas (Guía de Diseño de Pavimentos con Bajos Volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá D.C., 2013). Además,

tiene otras funciones como por ejemplo la económica, para permitir reducir el espesor de la capa de rodadura, que es la más costosa.

Las capas de base pueden clasificarse en función del material que se utilice para su formación, siendo estas las siguientes:

- Bases granulares: los materiales empleados aquí pueden ser grava o piedra triturada, suelo y arena, donde la estabilidad del material depende de su fricción interna y de su cohesión. Esta fricción interna se consigue con agregados bien graduados, de forma irregular, y con una pequeña cantidad de finos limo – arenosos. En función de su granulometría, pueden ser continuas (zahorras) o discontinuas (macadam).
- Bases estabilizadas: emplean suelo con sustancias aglomerantes como puede ser cemento Portland, cal o asfalto, para mejorar sus cualidades resistentes y aumentar su rigidez. Se recurre a ella por motivos económicos, hay casos en los que resulta más rentable recurrir al mejoramiento del suelo existente en el lugar, sin tener que transportar otros materiales desde grandes distancias.
- Base de hormigón: las bases estabilizadas suelen sustituirse por bases de hormigón que presentan, en general, una mayor uniformidad en sus características mecánicas.

Se emplearán unos u otros materiales en función de la calidad exigida por las solicitaciones del tráfico y calidad de la explanada.

Figura 1.4: Estructura general de un firme, remarcando la capa base. Elaboración propia.

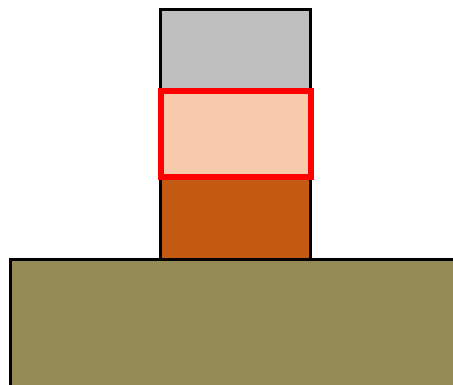


Figura 1.5: Base de hormigón para firme de adoquín en Calle Dionisio Alcalá Galiano, Cabra.

Elaboración propia.



Figura 1.6: Base de zahorra. (<http://www.excavaciones-mayte.com/obra-civil.html>)



En cualquier caso, los materiales a utilizar deben estar exentos de arcilla, marga u otras materias extrañas y deben cumplir las condiciones especificadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

1.2.3. Capa subbase

Inmediatamente debajo de la capa de base y sobre la explanada, puede encontrarse una tercera capa, denominada subbase, que contribuye a la resistencia conjunta de todo el firme y que sirve como cimiento uniforme para la capa de base. Además, ayuda a suavizar aquellas deformaciones perjudiciales que se producen en la explanada, como por ejemplo los cambios volumétricos producidos por cambios de humedad, evitando que se reflejen en la superficie del pavimento.

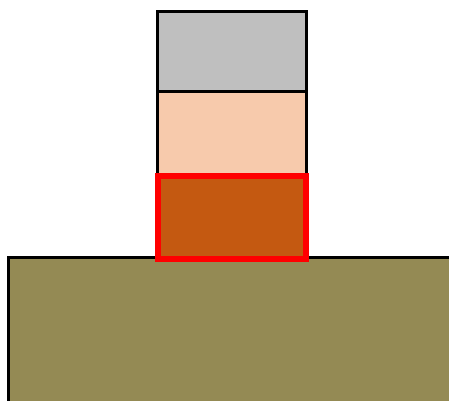
Esta puede no ser necesaria en el caso de explanadas granulares con elevada capacidad portante o bien obtenidas mediante la estabilización “in situ” del suelo existente con cal o con cemento.

Realmente se trata de una base de peor calidad, dado que no tiene que resistir cargas excesivas del tráfico, al llegarle muy atenuadas por efecto de las capas superiores; se limita a proporcionar una buena capa de asiento a la base, de forma que se facilite su puesta en obra y compactación (Bañón Blázquez, 2000).

En cuanto a su composición, esta capa puede formarse con los siguientes materiales:

- Áridos naturales o procedentes de machaqueo.
- Gravas naturales o machacadas.
- Suelos seleccionados o estabilizados con cemento.
- Material de la explanada convenientemente estabilizado.

Figura 1.7: Estructura general de un firme, remarcando la capa subbase. Elaboración propia.



Al igual que para la capa de base, los materiales a utilizar deben estar exentos de arcilla, margas u otras materias extrañas y deben cumplir las condiciones especificadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras Y Puentes (PG-3).

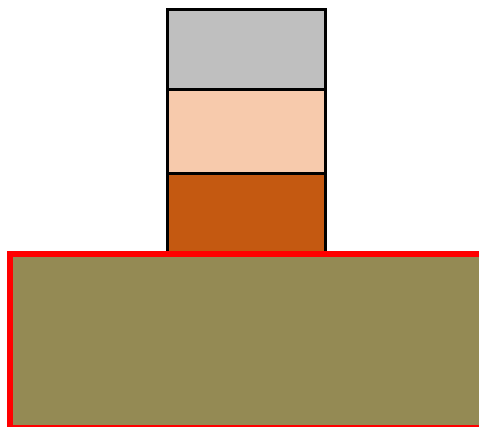
1.2.4. Explanada

La explanada es la parte superior del terreno natural sobre el que se apoya un firme, obtenida al llevar a cabo las obras de explanación o excavación.

Esta capa tiene como función principal la absorción de las cargas que le transmite el firme y por tanto, su capacidad portante es uno de los factores que determina las características de este, debiendo mantener el mayor valor posible de soporte. Además, el

movimiento diferencial vertical debe ser mínimo, de esta forma las ondulaciones en la superficie serán menores y el rodamiento vehicular será más suave.

Figura 1.8: Estructura general de un firme, remarcando la explanada. Elaboración propia.



La capacidad resistente de la explanada, depende del tipo de terreno natural existente o de la calidad del material aportado en el caso que fuere necesario, siendo este uno de los factores determinantes para el dimensionamiento del firme.

En resumen, esta dota al firme de una base uniforme y de buena capacidad portante.

1.3. Tipos de firmes

En este apartado se muestran los principales tipos de firmes que serán estudiados en el segundo bloque.

Con el trabajo de campo y la información obtenida de las encuestas realizadas a diferentes técnicos municipales, adjuntas como Anexo I, se ha podido comprobar que los firmes más implantados para vías urbanas son:

- Firmes flexibles.
- Firmes rígidos.
- Firmes discontinuos o articulados.

La gran diferencia entre unos y otros es la forma en la que transmiten las cargas de tránsito, rigiendo este concepto la posterior concepción de su estructura (Becerra Salas, 2012).

A partir de estos firmes surgen otros, aunque menos usados en estas vías, como son:

- Firmes mixtos.

- Firms semiflexibles (base mezcla bituminosa).
- Firms semirrígidos (base estabilizada con cemento o cal).

Para la elaboración de la explicación conceptual y funcional de cada tipo de pavimento presentado a continuación se ha utilizado la siguiente relación de documentos:

- Instrucción 6.1-IC. “*Secciones de firme*” de la Dirección General de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.
- Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana, 1ª Edición, noviembre de 2013.
- Euroadoquín, “*Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines (MTCE-04)*”.
- Fichas Técnicas IECA, “*Firms de hormigón en carreteras*”.

1.3.1. *Firms flexibles*

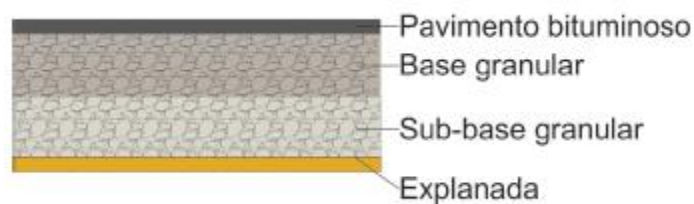
Los firms flexibles son los constituidos por capas granulares, base y/o subbase, bajo una superficie de rodadura, que generalmente suele ser mezcla en caliente elaborada en planta.

En este tipo de firme se requiere un mayor número de capas granulares que deben soportar las solicitaciones del tráfico y transmitir las a la explanada suficientemente amortiguadas para que puedan ser soportadas por ésta. El reparto de tensiones aquí realizado es mayor que en el caso de firms rígidos, por lo que las deformaciones localizadas tienen una magnitud también mayor, si bien se recuperan en su mayor parte al cesar la aplicación de la carga.

Son firms cuyas capas granulares se caracterizan de abajo arriba por una capacidad de soporte creciente y una permeabilidad decreciente.

Es un pavimento económico y de rápida construcción que requiere explanadas de cierta calidad para soportar las tensiones que llegan a ellas y que además pueden tener problemas con las redes de servicios subterráneos tanto en la fase de construcción como para las reparaciones y reposiciones, ya que las zanjas en este tipo de firms son siempre puntos débiles del conjunto. Con cargas elevadas, es decir para tráficos pesados, hay problemas de roderas y deformaciones importantes.

Figura 1.9: Firme flexible. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, noviembre de 2013.

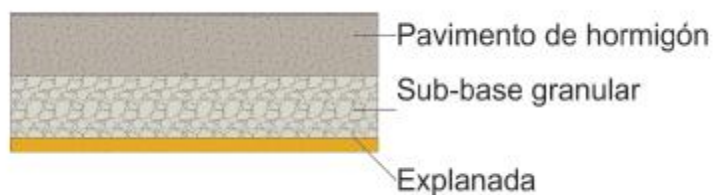


1.3.2. Firmes rígidos

Los firmes rígidos están formados por una base hidráulica o una subbase y una losa de hormigón, pudiendo tener o no un refuerzo de acero, en cuyo caso, normalmente se utiliza una malla electro soldada. Estos firmes se caracterizan porque la absorción de las tensiones producidas por las cargas del tráfico se distribuyen de manera uniforme sobre un área grande y con presiones muy reducidas, llegando muy amortiguadas a la explanada.

Por lo tanto, la propia losa de hormigón tiene la principal función resistente, asegurando una adecuada transferencia de cargas. Sin embargo, la capa de base resulta necesaria en ciertos casos para obtener una buena plataforma de apoyo y de trabajo para el pavimento. Ésta ha de ser estable y no erosionable por el agua que entra en el firme a través de las juntas de construcción y de las fisuras del hormigón.

Figura 1.10: Firme rígido. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.



1.3.3. Firmes articulados

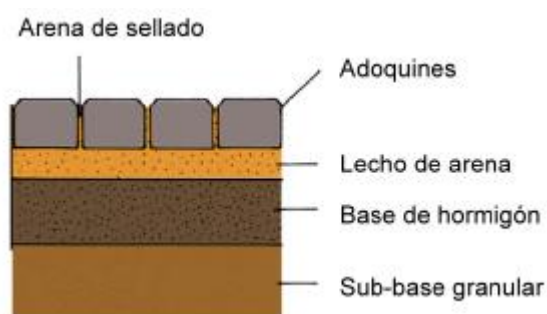
Los firmes discontinuos o articulados, se denominan también adoquinados y son aquellos en los que la capa superior del pavimento está constituida por elementos prefabricados, generalmente adoquines, que siguiendo un patrón modular pueden instalarse bien sobre lecho de arena o mortero. Estos a su vez se pueden apoyar sobre una base de hormigón o una base granular, lo que definirá la mayor o menor rigidez de la

estructura, consiguiendo que el comportamiento global del firme se asemeje más a los firmes rígidos o a los flexibles.

Cuando se utilizan sobre base flexible con una arena de sellado entre las piezas articuladas, las reparaciones y reposiciones de los servicios subterráneos son extremadamente sencillas, rápidas y económicas pues permiten volver a utilizar las mismas piezas iniciales en el pavimento. (Monografía nº2 ELSAN-PACSA, 2003)

Generalmente, en vías urbanas y siempre que haya servicios subterráneos por debajo de este tipo de firme, se recomienda que la base sea de tipo rígido, ya que mejora la uniformidad del firme y aumenta su vida útil. Adicionalmente, se colocará bajo esta base una subbase granular que sirva como apoyo estable y absorba las posibles deficiencias del terreno.

Figura 1.11: Firme articulado. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.



1.3.4. Firmes semiflexibles

Los firmes semiflexibles son los constituidos por mezclas bituminosas tanto en la capa de rodadura como en la capa de base, con diferentes características en función de la ubicación dentro del paquete de firme. Estos firmes no son utilizados para vías urbanas debido a que son apropiados para grandes volúmenes de tráfico y su coste es muy elevado.

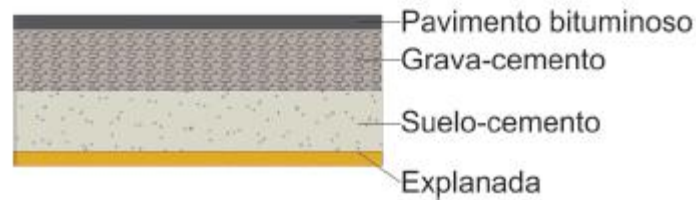
1.3.5. Firmes semirrígidos

Los firmes semirrígidos son aquellos que se caracterizan por estar formados por capas de rodadura de mezclas bituminosas y capas de base tratadas o estabilizadas con cemento, las cuales proporcionan la capacidad estructural necesaria para resistir la acción de tráficos medios o pesados.

Este tipo de firmes no ha tenido una buena aceptación en vías urbanas, ya que para la estabilización del suelo in situ se necesita un tipo de maquinaria de la que no es

posible disponer en vías urbanas debido a su gran tamaño, además del excesivo ruido y vibraciones.

Figura 1.12: Firme semirrígido. Guía de pavimentos de hormigón, Generalitat Valenciana. 1ª Edición, 2013.



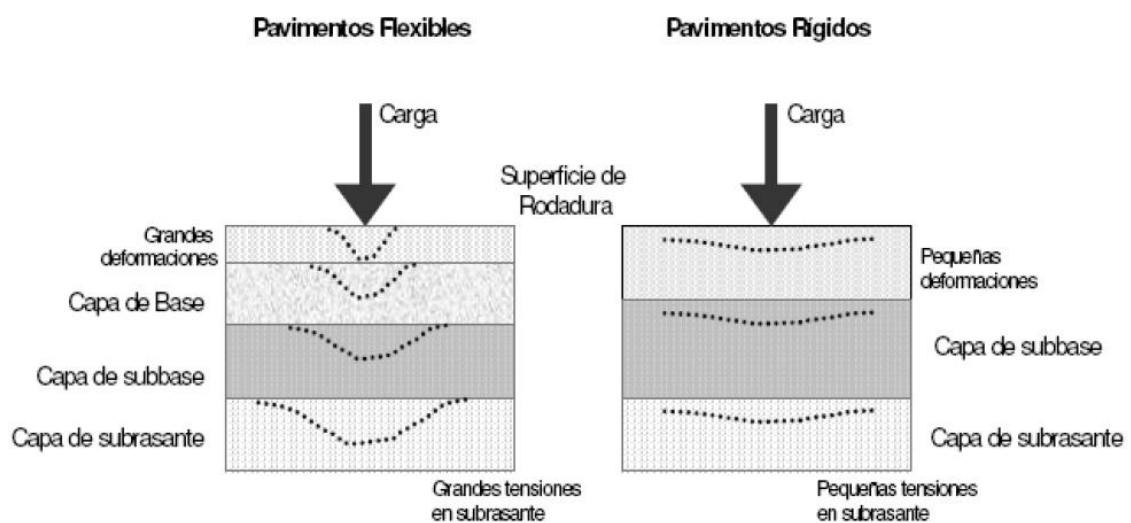
La estructura de un firme debe resistir las sollicitaciones mecánicas generadas por el paso de las cargas impuestas por el tránsito y garantizar un nivel de servicio durante su periodo de diseño, de tal manera que no se ponga en riesgo la seguridad y comodidad de los usuarios y no se superen los niveles máximos de esfuerzo o deformación admisibles por el firme.

1.3.6. Diferencias en el comportamiento de los principales firmes

El modo en que un firme absorbe y distribuye las cargas a lo largo y ancho de su estructura es muy diferente, dependiendo de la naturaleza de su estructura.

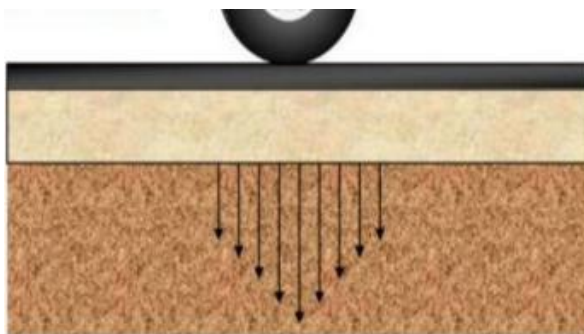
A continuación, se muestra una imagen en la que se puede observar la diferencia en la distribución de cargas según la naturaleza del pavimento.

Figura 1.13: Diferencia en la distribución de cargas de dos tipos de pavimentos. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.



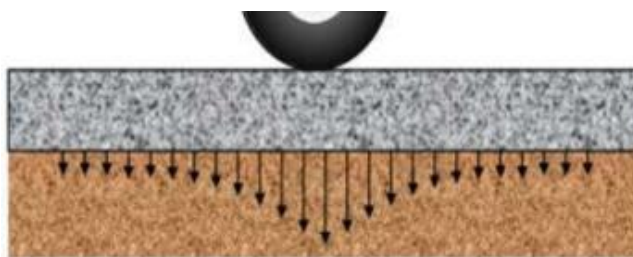
En un pavimento flexible, la resistencia a la deformación de las capas es decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie. La superficie de rodadura en este tipo de firme tiene una menor rigidez y se deforma bajo la acción de las cargas, por lo que se producen mayores tensiones concentradas en áreas más pequeñas de la explanada.

Figura 1.14: Pavimento flexible. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.



En un pavimento rígido, debido a su módulo de elasticidad alto y a su rigidez, la capa de rodadura se mantiene como una placa, sin deformarse y distribuye las cargas sobre un área mayor de la explanada, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores, por esta razón, las variaciones en la resistencia del terreno de soporte, la explanada, tienen poca influencia en la capacidad estructural del pavimento.

Figura 1.15: Distribución de cargas en un pavimento rígido. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.



En un pavimento articulado, los adoquines se comportan como piezas aisladas, transmitiendo las cargas en el plano horizontal a través del árido de relleno de sus juntas. Este material de relleno servirá para amortiguar la transmisión de cargas entre ellos sin que se produzca rotura. Al igual ocurre con el lecho de arena entre la losa de hormigón y la capa de rodadura, que actúa como agente amortiguador para transmitir los esfuerzos sin acumulación de tensiones que provoque la rotura de los mismos. Las tolerancias de los adoquines se compensan con la separación entre adoquines y con el lecho de arena. Si el firme articulado necesita de una losa de hormigón su comportamiento, en cuanto a transmisión de cargas a las capas inferiores será similar al de los firmes rígidos.

Por último, estas propiedades funcionales y comportamientos diferentes ante los agentes de deterioro, deben tenerse en cuenta para el dimensionamiento de la estructura del firme, así como para su mantenimiento y rehabilitación. Para que un proyecto de pavimentación urbana tenga éxito, además de los anteriores factores internos deben tenerse en cuenta otros factores procedentes del entorno donde se ejecuta la obra. Todos estos factores serán presentados a continuación.

2. Dimensionamiento de un firme

El dimensionamiento de firmes es un proceso cuya finalidad es determinar los espesores y materiales de las distintas capas que lo constituyen, de manera que se alcance una vida de servicio determinada y una superficie cómoda y segura. Un correcto dimensionamiento será aquel que satisfaga los requisitos necesarios del servicio a costo mínimo.

De un modo general, para un correcto dimensionamiento se requiere de una serie de factores de diseño a través de los cuales se obtiene información necesaria del entorno, que permita una correcta elección del tipo de firme y de su sección concreta por medio de alguno de los diferentes catálogos de firmes existentes, creados a partir de métodos de cálculo, tanto empíricos como analíticos. Estos criterios deben tener en cuenta que la principal diferencia de los firmes urbanos con los interurbanos son las sollicitaciones que reciben además de las características del entorno por el que discurren.

2.1. Factores para el dimensionamiento de firmes urbanos

Los factores que influyen en el dimensionamiento, son aquellos que permiten comprender con detalle el futuro comportamiento del firme, además de tener un conocimiento más amplio de su entorno para proponer las mejores alternativas que se adapten a sus requisitos y necesidades. Estos factores cuyo estudio resulta imprescindible a la hora de abordar un proyecto de pavimentación son específicos para vías urbanas, aunque algunos de ellos coinciden para vías interurbanas, y son:

- Análisis de antecedentes.
- Periodo de servicio.
- Tipo de tráfico.
- Calidad de la explanada.
- Climatología.
- Los materiales y sus características.

- Criterios estéticos.
- Redes subterráneas.

Para la descripción de cada uno de estos factores se utilizarán los siguientes documentos:

- Instrucción 6.1-IC. “*Secciones de firme*” de la Dirección General de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.
- Monografía nº2/ELSAN-PACSA. “Las vías urbanas”, Diciembre 2003.
- Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.
- Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto. Bañón Blázquez, L., y Beviá García, J. F. (2000a).

2.1.1. *Análisis de antecedentes*

Los antecedentes que se pueden utilizar para proyectos de pavimentación pueden ser estudios técnicos de proyectos similares ya realizados y estudios urbanos, como planos reguladores y catastros viales.

El análisis debe orientarse hacia alternativas de solución planteadas para problemas similares y junto con ello, a los estudios técnicos respectivos.

2.1.2. *Período de servicio o vida útil de un firme*

El periodo de servicio de un firme corresponde al periodo en el cual este firme debe proveer de un adecuado nivel de servicio que asegure la movilidad, accesibilidad y seguridad en la vía. Para que este nivel se cumpla satisfactoriamente durante toda la vida útil, deben aplicarse unos estándares mínimos de conservación.

La información sobre la vida útil para cada pavimento no viene recogida en la Instrucción 6.1-IC, por lo que ésta se ha obtenido de la comparación de proyectos y de las entrevistas con varios expertos. Desde hace tiempo se viene estableciendo de manera generalizada para firmes flexibles y semiflexibles una vida útil de 20 años, y para firmes rígidos y articulados, 30 años. Esto se debe a la durabilidad de cada uno, que está íntimamente ligada con la calidad de las capas.

- Firme flexible: es el que tiene una vida útil más corta, requiriendo un adecuado y costoso mantenimiento anual para cumplir los 20 años de vida útil con un buen nivel de servicio. Si se quiere llegar a los 30 años requerirá de una rehabilitación.

- Firme rígido: tiene una vida útil más larga que el anterior y ofrece un comportamiento a la fatiga muy bueno, requiriendo durante su periodo de servicio escasas labores de conservación. Estos pueden superar los años para los que son diseñados, con un buen un adecuado nivel de servicio.
- Firme articulado: la vida útil de este pavimento puede llegar a los 30 años con una conservación mínima, que consiste en rellenar periódicamente las juntas entre los adoquines con arena, además de reparaciones por daños en piezas. Estas reparaciones no modifican el aspecto del mismo, por lo que su conservación es económica, sencilla y estética.

Por lo tanto, es necesario tener en cuenta la vida útil de cada pavimento a la hora de calcular los costes globales, sabiendo que la vida útil de un pavimento de hormigón o adoquín será mucho mayor que la de un pavimento flexible.

2.1.3. Categoría de tráfico

Conocer el tráfico que va a circular por una vía así como sus características, constituye uno de los factores determinantes del proyecto. Los vehículos ligeros no contribuyen significativamente al daño estructural de las capas del firme, por lo que se consideran sólo los vehículos pesados para estimar la cantidad de solicitudes que afectarán al firme durante su periodo de servicio.

Para clasificar el tipo de tráfico, lo más común es determinar la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea en la vía de proyecto en el año de puesta en servicio. Este parámetro es el utilizado por la Norma 6.1-IC para su clasificación del tráfico pesado, la cual será utilizada en este trabajo para la selección de las secciones a estudiar.

Cuando no existen datos sobre el tráfico de vehículos pesados, por ejemplo en el caso de vías urbanas, se recurre a estimaciones en función, principalmente, de las características urbanas de la zona (residencial, comercial, industrial, etc.). En la siguiente tabla se recogen algunos de los criterios usados por distintos organismos, ayuntamientos y publicaciones sobre vías urbanas para la clasificación del tráfico en ellas. En esta clasificación aparecen las equivalencias de distintas nomenclaturas, como la de la Norma 6.1-IC “Secciones de firmes” antes comentada.

Tabla 1.1: Comparativa del nivel de tráfico establecido por varias normativas y guías. Monografía n°2/ELSAN-PACSA. “Las vías urbanas”, Diciembre 2003.

Vehículos pesados/día carril de proyecto	Instrucciones 6.1 y 6.2 I.C. O.C. 10/2002 del M. Fomento	Pavimentos de hormigón en vías de B.I.T. del IECA	LIBRO DE TITULO: (1)	LIBRO DE TITULO: (2)	Criterios de evaluación del tráfico según el tipo de vía o de espacio urbano que corresponde, definidos en LIBRO DE TITULO: (2)
≤ 4000	T00		V1 (>270)	A (>800)	• Grandes avenidas. • Carril bus con mucho tráfico. • Vías colectoras de polígonos industriales importantes. • Aparcamiento vehículos pesados. • Intercambiadores importantes.
200 a 4000	T0				
800 a 2000	T1				
270 a 800	T2		V2	B	• Avenidas y calles arteriales de tipo medio. • Vías colectoras industriales de tráfico medio. • Carril bus de tráfico medio.
200 a 270					
150 a 200	T31			C	• Avenidas y calles arteriales de tráfico poco elevado con servicio de autobuses de intensidad media. • Estaciones de servicio. • Paradas de autobuses. • Calles locales industriales.
100 a 150					
50 a 100	T32	CO			
25 a 50	T41	C1	V3	D	• Calles colectoras, con líneas autobuses de baja intensidad. • Calles locales industriales de bajo tráfico. • Calles comerciales.
15 a 25	T42	C2			
5 a 15		C3	V4	E	• Calles colectoras locales. • Calzada de dos carriles sin línea regular de autobuses. • Aparcamiento vehículos ligeros.
0 a 5		C4	V5	F	• Zonas peatonales con acceso de vehículos de emergencia. • Calles estrechas, solo residencial. • Pistas ciclistas segregadas. • Calles residenciales de coexistencia de tráficos.

(1) "INFRAESTRUCTURAS URBANAS" de Eduard Alabern i Valentí y Carles Guilemany y Casadamon.

(2) "RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO Y DISEÑO DEL VIARIO URBANO" de L. Felipe Manchón y Juan A. Santamera.

La DGT, incluye bajo la denominación de vehículos pesados a los automóviles destinados al transporte de mercancías cuya masa máxima autorizada (M.M.A.) exceda a 3.500 kilogramos, y los de transporte de personas que tengan, además del asiento del conductor, más de 8 plazas.

2.1.4. Categoría de explanada

La calidad de la explanada influye en gran parte del comportamiento del pavimento y en su durabilidad. Esta debe ser lo suficientemente resistente para soportar las tensiones que le transmita la estructura del firme, en caso de que resistir, deberá recurrirse a medidas de mejora de la explanada.

En este trabajo, las explanadas se han clasificado siguiendo la nomenclatura de la Instrucción 6.1-IC “Secciones de firme”. Orden FOM/3460/2003. Esta clasificación define la categoría de la explanada según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de

carga (E_{v2}), obtenido de acuerdo con la NLT-357 “Ensayo de carga con placa”, cuyos valores se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 1.2: Categoría de la explanada según Instrucción 6.1-IC “Secciones de firme” de la Dirección General de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Por otra parte, existen otras clasificaciones que utilizan el índice CBR y la inspección visual como pauta para determinar la categoría de la explanada.

Tabla 1.3: Distintos criterios de clasificación del tráfico en las vías urbanas. Monografía nº2/ELSAN-PACSA. “Las vías urbanas”, Diciembre 2003.

TIPO DE EXPLANADA	Índice CBR	TIPO DE SUELO	CRITERIOS MEDIANTE UNA INSPECCIÓN VISUAL
S0	3 a 5	TOLERABLE	Terrenos de mala calidad bastantes deformables. El paso de algunos vehículos pesados sobre la explanada húmeda produce roderas importantes. Están formados por partículas finas y plásticas. Pueden estar formados por rellenos recientes poco compactados, reconocibles por la presencia de plásticos, cascotes, etc.
S1	5 a 10	ADECUADO	Terrenos de calidad media, deformables. El paso de algunos vehículos sobre la explanada húmeda produce algo deformación que no impide la circulación de otros vehículos. Son suelos granulares con algunas partículas finas plásticas.
S2	>10	SELECCIONADO	Terrenos de buena calidad. El paso de vehículos pesados con la explanada húmeda produce huella casi inapreciable. Están compuestos por gravas y arenas con muy pocos finos plásticos.

Generalmente en los pueblos y ciudades, el suelo donde se va a asentar el pavimento es muy heterogéneo y a veces está formado por rellenos antrópicos, tierra vegetal o suelos finos plásticos muy sensibles al agua. Por tanto, en obras de nueva construcción es conveniente realizar previamente un análisis del suelo, ya que influirá determinadamente en la vida útil del pavimento. Si por el contrario el proyecto es de reconstrucción, la explanada estará lo suficientemente compactada como para que no sea imprescindible realizar un estudio geotécnico, a no ser que exista un problema diagnosticado que provoque un deterioro estructural del pavimento.

2.1.5. Climatología

El factor climático es determinante a la hora de llevar a cabo la selección y dimensionamiento del pavimento óptimo en cada caso. La Instrucción de Carreteras 6.1-IC establece una serie de regiones térmicas y pluviométricas dentro de las cuales se

configuran todos los escenarios posibles. Este factor influye en aspectos tales como las necesidades de impermeabilización y elementos constructivos como juntas de dilatación.

2.1.6. Materiales

Este criterio hace referencia a los materiales utilizados para la construcción de las capas que conforman el pavimento. Todos los materiales empleados en la construcción del pavimento deben cumplir con la normativa específica que le sea aplicable.

Por razones económicas y de protección medioambiental, siempre se intenta emplear los materiales disponibles en la zona (teniendo en cuenta sus características y posibilidades técnicas) para tratar de alcanzar, la mejor solución técnica y económica. Las características de los materiales influyen directamente en la resistencia estructural del firme.

2.1.7. Criterios estéticos

“Cuando la relevancia de la edificación lo requiera, la pavimentación debe subordinarse a ella sin perder la funcionalidad.” (Monografía nº2/ELSAN-PACSA, 2003).

Debe tenerse en cuenta que en vías urbanas hay una tendencia a la normalización del uso de ciertos elementos constructivos que representan una seña de identidad de la ciudad, lo que lleva a utilizar materiales en los que prima la estética ante la economía.

2.1.8. Redes subterráneas

En todas las vías urbanas existen unas redes subterráneas de servicios, formadas por las conducciones de agua, gas, redes de cableado eléctrico y telefónico, etc. Generalmente, en municipios de pequeño y mediano formato, todos estos servicios discurren de forma subterránea por debajo de la calzada, debido a las limitaciones geométricas.

La presencia de estas redes subterráneas, sus características y la profundidad a la que se encuentran, son factores influyentes en la elección del pavimento más adecuado y de los materiales que lo conformarán. Estas redes también limitan en algunos casos el uso de cierto tipo de maquinaria para la construcción de la vía y en cualquier operación de refuerzo o rehabilitación.

Las calas y canalizaciones realizadas para el arreglo o reposición de estas redes subterráneas, una vez rellenadas y con el pavimento reparado, se convierten en puntos

potenciales de deterioro. Esto se debe a que estas operaciones de reparación del pavimento no se encuentran reguladas por ninguna normativa que establezca espesores mínimos, grados de compactación o limitación de materiales. Por lo tanto, cada operario las realiza “a su manera”, no quedando estas zonas, en la mayoría de los casos, con una resistencia equivalente a la del resto de la vía, lo que a medio plazo puede provocar levantamiento del árido, escalonado, hundimientos, rotura del pavimento inmediatamente contiguo, etc.

Estos criterios nos ofrecen datos particulares de cada caso concreto que servirán para definir la tipología de firme más adecuada, sin embargo, sólo dos de ellos serán utilizados para el dimensionamiento de su estructura con diferentes opciones según los materiales, estos criterios serán: categoría de tráfico y categoría de explanada.

El dimensionamiento usado para este trabajo tendrá como base catálogos creados con métodos de cálculos empíricos y analíticos, que se presentan a continuación.

2.2. Métodos de dimensionamiento

Los métodos de dimensionamiento son las distintas formas de analizar la estructura y su respuesta ante las sollicitaciones con el fin de llevar a cabo el diseño del firme. Existen dos categorías en las que se pueden clasificar los métodos de dimensionamiento.

- Métodos empíricos: basados en la experiencia, que se traduce en catálogos, ábacos y tablas que se revisan con cierta periodicidad. Estos métodos proponen secciones estructurales cuyo comportamiento ha sido contrastado experimentalmente, pero que a menudo han sido también comprobadas analíticamente.
- Métodos analíticos: la respuesta del firme se conoce, en forma de tensiones o deformaciones, a través de modelos matemáticos, que se relaciona con el comportamiento de la estructura y su deterioro gracias a datos empíricos.

Existen diferentes normativas para carreteras que utilizan los anteriores métodos. Concretamente en España la más utilizada es la Instrucción 6.1-IC “Secciones de firme” de la Dirección General de Carreteras.

La Instrucción 6.1-IC, para comprobar que el dimensionamiento de las secciones de firmes que recoge son correctas, se utiliza el método analítico-empírico o mecanicista-empírico. Por un lado, se emplean modelos de respuesta multicapa basados

en la teoría de Burmister y, por el otro, modelos de comportamiento de los materiales del firme basados en diversas leyes empíricas obtenidas y calibradas en el laboratorio.

Además, existen otras instrucciones fundamentadas en la anterior como la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía de 2006, que basa su dimensionamiento en un proceso de tipo analítico, para secciones con pavimento bituminoso, y semiempírico para las secciones con pavimento de hormigón. Para facilitar la labor del proyectista, esta normativa ha desarrollado además una aplicación informática, ICAFIR, que incorpora el método de diseño de la Instrucción.

Después existen manuales específicos para vías urbanas pero apenas son conocidos y/o utilizados fuera del lugar de creación, como:

- *“Manual Técnico de los Euroadoquines”* de la Asociación española para la investigación y el desarrollo del adoquín de hormigón (2004).

Este manual crea un catálogo de secciones tipo a partir de métodos abreviados. Con los datos de tipo de explanada y categoría de tráfico para dos casos concretos: viales y zonas de aparcamiento; y zonas industriales.

En general, se carece en la actualidad del desarrollo de modelos estructurales que evalúen el análisis del comportamiento de los adoquines como sólidos rígidos en un medio flexible como puede ser el constituido por la capas granulares inferiores.

- *“Catálogo de firmes y pavimentos de la ciudad de Valencia”*. Servicio de Coordinación de Obras e Infraestructuras. Ayuntamiento de Valencia, 2007.

Para el dimensionamiento de las secciones que se presentan se han empleado métodos analíticos que emplean modelos de respuesta que tratan de analizar el comportamiento de las estructuras de firme sometidas a las cargas del tráfico.

- Manual de Pavimentos de Hormigón para Vías urbanas de baja intensidad de tráfico. Guías Técnicas, IECA.

A partir de los resultados de las encuestas se ha podido comprobar que muchos técnicos no utilizan los manuales existentes específicos para vías urbanas, sino que utilizan la Instrucción 6.1-IC para carreteras. Esto hace pensar que sería necesario realizar por parte del Gobierno de España alguna normativa específica para firmes de vías urbanas, ya que éstas tienen unas necesidades diferentes a los firmes de carreteras.

Las soluciones de dimensionamiento que se obtendrán en este trabajo a partir de los anteriores documentos, se presentarán en forma de tabla en el segundo bloque donde

se realizará su estudio económico. De entre las posibles secciones de firme para este trabajo, se han escogido aquellas que se vislumbran más adecuadas técnicamente, disponiendo de espesores mínimos siempre que la ejecución lo permitiese. Estas son unas recomendaciones que no excluyen la posibilidad de otros tipos de soluciones que se justifiquen debidamente.

Con la complementariedad de los dos procesos (factores de diseño y métodos de cálculo) se puede llegar a la selección del tipo de firme más adecuado en cada caso, siguiendo una serie de etapas, resumidas a continuación:

1. Primero se estudian los factores que influyen en el diseño del firme, con los que se obtiene la información necesaria sobre el entorno.
2. Para la determinación del dimensionamiento sólo se utilizarán dos de los anteriores factores: categoría de tráfico pesado y categoría de explanada.
3. Estos dos factores serán los utilizados para la selección de las posibles secciones estructurales del firme en el catálogo correspondiente, para las distintas alternativas de tipo de pavimento y materiales.
4. La última fase es la de selección del tipo de firme, espesores y materiales que lo constituyen en función de los demás factores de diseño (zona climática, periodo de vida, criterios estéticos, redes subterráneas, etc.), además del estudio de costes y de consideraciones técnicas y medioambientales.

El siguiente paso tras el dimensionamiento del firme será su ejecución. Este trabajo no entrará en los procedimientos de construcción que aseguren su correcta ejecución, ya que se supondrá que estos son los adecuados para que este proceso no influya en el desarrollo de deterioros.

Después del diseño e implantación del firme, cabe esperar la aparición en él de deterioros. A continuación, se presentarán brevemente los deterioros más comunes de cada tipo de firme que se desarrollarán con más profundidad en el segundo bloque.

3. Tipos de deterioros

Al igual que el estudio de los factores de diseño es vital para el buen comportamiento del firme, estudiar en profundidad los deterioros de cada tipo de pavimento es necesario para conocer el grado y tipo de mantenimiento que estos requerirán a lo largo de su vida útil.

La estructura de un pavimento sufrirá con el tiempo deterioro aun cuando sea diseñado correctamente y construido de acuerdo con todas las especificaciones y normas de calidad. Por ello estos tienen una vida definida y alcanzarán un punto de falla aún con un mantenimiento óptimo (Augusto Jugo B., 1993, versión revisada 2005).

El deterioro de un pavimento puede clasificarse como estructural o funcional (superficial). El deterioro estructural está asociado con la capacidad de carga del pavimento y normalmente se refiere a la fatiga de la estructura (para su reparación se requiere de actuaciones de refuerzo o rehabilitación estructural, de las que se hablará en el siguiente punto). En cambio, el funcional o superficial es generalmente definido como la incapacidad del pavimento para proveer una superficie que permita un rodaje cómodo y seguro de los usuarios, ya sea a pie o en vehículo, dependiendo del pavimento a estudiar, acera o calzada.

Augusto Jugo (1993) señala que “el modo de deterioro de un pavimento varía sustancialmente, en función de la interacción de varios factores, que adicionalmente controlan la rata de deterioro”. Así es, que cada tipo de firme presenta un modo de deterioro diferente que está directamente relacionado con la estructura y materiales que lo conforman y que además, definen su resistencia. Sin embargo, existen otros factores externos al firme que también condicionan su forma de deterioro, como son:

- a. El volumen de tráfico y el tipo de cargas.
- b. Políticas de mantenimiento.

Este trabajo se centrará en el segundo punto, mantenimiento, ya que es un factor muy amplio que puede mejorar mucho la vida del firme si se lleva a cabo de una forma adecuada. En cuanto al primer punto, el volumen y tipo de tráfico, deberá ser bien definido con respecto a la realidad, ya que será decisivo para un correcto diseño del firme que asegure un buen nivel de servicio, previendo los posibles aumentos de los mismos, con un adecuado control de la vía.

Continuando con los deterioros, se ha realizado una recopilación de los posibles deterioros más frecuentes en cada tipo de firme para vías urbanas, que no sirve más que para dar a conocer su existencia. A partir del estudio bibliográfico de los siguientes documentos:

- Firmes asfálticos. Composición, deterioro y rehabilitación. Jorge Alarcón Ibarra (2003).

- Manual de carreteras. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana. Luis Bañón Blázquez y José Francisco Bevia García.
- Manual de mantenimiento y rehabilitaciones de pavimentos flexibles. Caracas 1993 (Acciones Básicas-Versión revisada 2005). Augusto Jugo B.
- Jornadas de actualización técnica. Proyecto y ejecución de reparaciones en pavimentos. Dirección Nacional de vialidad, Mayo 2013. Diego H. Calo y Edgardo Souza.
- Propuesta para la implementación de un Sistema de Administración de Pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán, Sin. Rafael Eduardo Osuna Ruiz. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., 2008.
- Catálogo deterioros de pavimentos rígidos. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. Volumen nº12. 2002.
- Catálogo deterioros de pavimentos flexibles. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. Volumen nº11. 2002.
- Tesis “Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos”, Universidad Austral de Chile, Ricardo Javier Miranda Rebolledo, Valdivia (Chile), 2010.
- Patología de Pavimentos Articulados. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 9, núm.17, julio-diciembre, 2010, pp. 5-94. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.

Los anteriores documentos se utilizarán también para el estudio de los deterioros en el segundo bloque. Este estudio se aplicará a los tipos de deterioros que se observen más frecuentes en cada tipología de pavimento, a partir del trabajo de campo realizado, revisión *in situ* de varios firmes urbanos en vías de municipios de la Campiña cordobesa.

Los deterioros de los firmes de calzada son los más importantes, ya que estos soportan las mayores cargas, debidas al paso del tráfico y además reciben muchas actuaciones por reparaciones y renovaciones de redes subterráneas que los debilitan.

3.1. *En firmes flexibles*

Los deterioros de los pavimentos asfálticos se clasifican en función de su origen en deterioros superficiales y deterioros de la estructura.

3.1.1. Deterioros superficiales

- Exposición de agregados: presencia de agregados parcialmente expuestos debido a la pérdida de ligante y mortero. Deterioro ocasionado principalmente por la acción del tráfico.
- Pérdida de agregado: 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 los agentes climáticos.
- Peladuras: pérdida de capa de rodadura
- Bache superficial: desprendimiento del material de la base en la que se apoya la capa de rodadura después de la pérdida de ésta.
- Exudaciones: presencia de asfalto sin árido en la superficie.
- Áridos pulimentados: desgaste de los áridos superficiales, presentando una cara plana en la superficie, generalmente embebidos en el ligante de la capa de rodadura. Ocasionado por la abrasión del tráfico.

3.1.2. Deterioros de la estructura

3.1.2.1. Deformaciones

- Roderas: deformación longitudinal del perfil transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, generando una deformación permanente a largo plazo y una posterior fluencia del material bituminoso que origina cordones laterales.
- Abultamiento: prominencias que se presentan en la superficie del pavimento. Pueden presentarse bruscamente ocupando pequeñas áreas o gradualmente en áreas grandes, acompañados en algunos casos por fisuras.
- Hundimiento: son alteraciones en la cota transversal de la rasante que pueden crear desniveles importantes, generalmente acompañado de grietas.
- Blandón o socavón: asiento localizado en la superficie de la calzada que la configura en forma de hundimiento, menor que el hundimiento.
- Bache profundo: desprendimiento del material de la base y capas inferiores en la que se apoya la capa de rodadura después de la pérdida de ésta.

3.1.2.2. Grietas y roturas

- Grietas longitudinales: rotura longitudinal paralela al eje de la vía, con abertura mayor de 3 mm.

- Grietas transversales: rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje de la vía, con abertura mayor de 3 mm. Son indicio de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado. Se miden en metros lineales.
- Grietas térmicas: son aquellas con una regularidad y equispaciamiento entre sí determinada, lo que puede hablar del comportamiento del asfalto al dilatarse y contraer según las distintas amplitudes térmicas a las que se ve expuesto.
- Agrietamientos en malla ancha: formados por roturas del pavimento en forma de polígonos irregulares con diagonales de longitud comprendida entre 20 y 25 cm.
- Agrietamientos en malla fina: son una serie de grietas o fisuras interconectadas con patrones irregulares, localizadas en zonas sujetas a repeticiones de cargas. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas.
- Agrietamientos por reflexión: estos generalmente comienzan en las capas inferiores del pavimento continuando su desarrollo a través de las capas que componen el mismo hasta que aparecen en la superficie de la capa de rodadura.
- Agrietamientos en bloque: se producen generalmente de forma prismática por los efectos de impacto en las canalizaciones de la vía pública, en el encintado separador y de contención entre dos pavimentos.

3.2. En firmes rígidos

3.2.1. Deterioro superficial

3.2.1.1. Juntas

- Deficiencia de sellado: deterioro del sello de las juntas que permite la acumulación de material incomprensible en las juntas o que permita la infiltración de una cantidad considerable de agua superficial.
- Juntas saltadas: desintegración de las arista de una junta, longitudinal o transversal o una grieta, con pérdida de trozos.
- Separación de la junta longitudinal: corresponde a una abertura de la junta longitudinal del pavimento.

- Descarnadura o desintegración: desintegración progresiva de la superficie perdiéndose primero la textura y luego el mortero, quedando el árido grueso expuesto.
- Fisuras por retracción (tipo malla): grietas capilares (fisuras) limitadas sólo a la superficie del pavimento.

3.2.1.2. Roturas y grietas

- Grietas longitudinales: grietas predominantemente paralelas al eje de la calzada.
- Grietas transversales: grietas predominantemente perpendiculares al eje de la calzada.
- Grietas de esquina: defecto producido en las proximidades de las esquinas entre junta transversal y longitudinal o borde de losa.
- Bache: cavidad, normalmente de forma redondeada, que se forma al desprenderse hormigón de la superficie. Su diámetro varía entre unos 25 mm y 100 mm y la profundidad supera los 15 mm.

3.2.2. Otros deterioros

- Parches deteriorados.
- Escalonamiento de juntas y grietas: desnivel entre dos superficies del pavimento, separadas por una junta transversal o grieta.

3.3. En firmes articulados

3.3.1. Deterioros superficiales

3.3.1.1. Desprendimientos

- Desgaste superficial: es la pérdida de finos en la superficie del adoquín, creando una textura superficial rugosa, se forman cavidades y deja expuesto el agregado grueso.
- Pérdida de arena: es la aparición de partículas de arena alrededor y sobre los adoquines.

3.3.1.2. Desplazamientos

- Deslizamiento de borde: son corrimientos localizados de los adoquines junto a los elementos de confinamiento.

- Desplazamiento de juntas: los adoquines se apartan de su alineamiento inicial. Generalmente se da en hiladas de adoquines rectangulares.

3.3.1.3. *Fracturas*

- Fracturas: son corrimientos localizados de los adoquines junto a los elementos de confinamiento.
- Fracturas de confinamientos externos: es el deterioro y destrucción parcial o total de los confinamientos externos.

3.3.2. *Deterioros de la estructura*

- Depresiones: son hundimientos localizados en forma circular o semejante a ella, sin pérdida de material.
- Ahuellamiento: depresión que se presenta a lo largo del sentido del tráfico, bajo las huellas de los vehículos.
- Abultamiento: son levantamientos o protuberancias que se presentan en la superficie del pavimento.

3.3.3. *Otros deterioros*

- Escalonamiento entre adoquines: es el cambio brusco de nivel entre hiladas de adoquines.
- Escalonamiento entre adoquines y confinamiento: es el cambio brusco de nivel entre los elementos de confinamientos y los adoquines.
- Juntas abiertas: es una separación entre juntas superior a 3 mm, permitiendo la pérdida de arena de sello y la incrustación de partículas a través de las juntas, propiciando la destrucción de las aristas de los adoquines.
- Vegetación en calzada: es la invasión o crecimiento de vegetación a través de las juntas en la calzada. La vegetación puede llegar a levantar el adoquinado.

Estos deterioros, que se producen paulatinamente con el tiempo bajo la acción del tráfico y de los elementos ambientales, son el principal factor por el que las vías necesitan de una conservación en los momentos adecuados que no permita que los deterioros se desarrollen y los pavimentos necesiten de reparaciones más costosas. De modo que, sin una conservación bien estructurada, ejecutada a tiempo, estas vías no mantendrán un nivel aceptable de servicio durante su periodo de vida útil, lo que ocurre en la mayoría de núcleos de pequeño y mediano formato, por lo que se ha podido comprobar con las encuestas. Por lo tanto, para que la ejecución de esta conservación sea más accesible y pueda llevarse a cabo de un modo eficiente, aprovechando los

recursos, se ha visto necesario crear un sistema de gestión de la conservación adaptado para vías urbanas de núcleos de pequeño y mediano formato, que evalúe el estado de las mismas y seleccione las estrategias de conservación más adecuadas. Para la creación de este sistema más simple, se han tomado como base otros sistemas para carreteras y grandes ciudades, los cuales no pueden ser implantados para núcleos de pequeño y mediano formato, debido a la cantidad de parámetros utilizados y a la tecnología necesaria para llevar a cabo las mediciones.

Antes de la presentación del sistema se deben definir los principales tipos de reparaciones, que también serán de interés para el desarrollo del sistema.

4. Tipos de reparaciones

Se entiende por mantenimiento de un firme al conjunto de trabajos necesarios para preservarlo en condiciones aceptables de servicio de modo que presten el servicio para el cual fueron diseñados de una manera eficiente.

Cualquier firme, por mejor diseñado o construido que esté, necesita un mantenimiento adecuado, de lo contrario se deteriorará rápidamente. Como dicen Rafael Alberto Alonzo, José Alfredo Flores López y José Rafael Sánchez Beltrán (2012) en su “Manual de mantenimiento en vías urbanas, utilizando mezclas asfálticas en caliente, tibia y en frío”, el mantenimiento vial permite conservar una vía inclusive más allá de su periodo de diseño, lo que significa, a la larga, un ahorro de recursos económicos.

Según Jorge Alarcón Ibarra (2003), en su artículo titulado “Deterioro y rehabilitación de firmes asfálticos”, las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación de los firmes persiguen los siguientes objetivos:

- Asegurar una circulación cómoda y segura, manteniendo la adecuada resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento.
- Conservar una regularidad superficial acorde con el trazado de la vía y con las velocidades normales de recorrido, de manera que la rodadura sea cómoda para el usuario.
- Asegurar una resistencia estructural suficiente para el tráfico que han de soportar las distintas vías.
- Preservar el valor patrimonial de las mismas.

En resumen, estas operaciones de mantenimiento tienen como finalidad mejorar o mantener el estado del firme para que sus condiciones superficiales y/o estructurales sean adecuadas para los niveles de servicio y prestaciones previstos.

Siguiendo con lo descrito por Jorge Alarcón Ibarra, las modalidades de conservación se pueden dividir en función del momento en que su aplicación sea necesaria, en tres:

- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento curativo o correctivo.
- Mantenimiento renovador o de rehabilitación.

Estas tres formas de conservación están cronológicamente unidas a la vida del firme y a la duración de éste. Si están bien programadas y se actúa a tiempo, el coste de mantenimiento será el mínimo necesario para conservar el correcto nivel de la vía durante su periodo de servicio.

En primer lugar, se diferencia el mantenimiento preventivo, el cual consiste en un conjunto de operaciones destinadas a retardar la aparición de los deterioros, identificados por señales y síntomas.

En segundo lugar, se encuentra el mantenimiento correctivo, formado por el conjunto de actuaciones que reparan deterioros puntuales y evitan la evolución de estos hasta el punto en que su reparación sea mucho más costosa que los costes de mantenimiento.

En tercer lugar, se encuentra el mantenimiento renovador o rehabilitación, son operaciones que se realizan en periodos programados para elevar la vía a un nivel de servicio bueno o muy bueno, suele necesitarse cuando va a alcanzar su periodo de servicio.

Lo ideal para la conservación de las vías urbanas es comenzar con una conservación preventiva que alargue su vida útil, provocando un retardo en la aparición de los mismos, además de reparaciones curativas y de una rehabilitación cuando sea necesario. Si estas se ejecutan en el momento preciso, esto deriva en un ahorro económico al no dejar que el firme se deteriore excesivamente y haya que realizar reparaciones más costosas prematuramente como una rehabilitación, o incluso peor, una reconstrucción, que se llevaría gran parte del presupuesto destinado a firmes.

Sin embargo, la realidad de los municipios de pequeño y mediano formato es otra, por lo que se ha podido comprobar con las encuestas realizadas a técnicos municipales de diferentes municipios andaluces, adjuntas en el *Anexo I*. Los presupuestos insuficientes destinados a conservación y la falta de suficiente personal cualificado no permiten realizar una conservación preventiva con garantías de calidad. Por lo tanto, los deterioros siguen agravándose y se acude al mantenimiento curativo, es decir, se reparan cuando el deterioro supone un peligro para la circulación de los usuarios. Sin embargo, cuando estos deterioros son mayores y además de comprometer la seguridad de los usuarios, comprometen la funcionalidad estructural del firme, se recurre a su rehabilitación.

4.1. Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento incluye aquellas actividades realizadas para proteger el pavimento y prevenir deterioros antes de que estos ocurran. Este mantenimiento es muy efectivo ya que al prevenir posibles deterioros en alguno de los elementos de una vía se evita que falle a corto, mediano o largo plazo y evita que su reparación o reemplazo represente un costo mucho más alto que el del mantenimiento en sí.

Con este tipo de mantenimiento se ayudará a evitar mantenimientos mayores, sin embargo, en algunas tipologías de firme esto será casi imposible, aun así contribuirá a retardar su deterioro.

Algunos de las actividades que realiza son: sello de fisuras y grietas, limpieza y relleno de juntas con material adecuado en firmes de hormigón, recebado de juntas de adoquín con arena.

4.2. Mantenimiento curativo o correctivo

Tipo de conservación formada por el conjunto de actuaciones de reparación de fallos localizados que se producen en la vía, debidos a diversas causas y que deben repararse con relativa rapidez, bien por el peligro que puedan presentar a la circulación peatonal o rodada, o bien para que no avancen de manera acelerada.

Estas labores son necesarias para que el firme conserve un nivel de servicio entre regular y bueno. Cuando este tipo de mantenimiento no se lleva a cabo de una forma adecuada o el firme se acerca al final de su periodo de servicio, los deterioros pueden extenderse al conjunto del firme más rápidamente, necesitando de una rehabilitación.

Aquí se pueden incluir los trabajos de bacheo superficial, bacheo profundo, renivelaciones con mezcla asfáltica, reparaciones aisladas en las capas de base, sub-

base, reparaciones necesarias debido a la instalación de servicios públicos, etc. muchos de estos serán vistos en el siguiente bloque.

4.3. Rehabilitaciones

Se denomina conservación renovadora o rehabilitación al conjunto de operaciones que se realizan periódicamente o de carácter extraordinario para recuperar los niveles de la vía que han ido perdiéndose a lo largo del tiempo, debido a las solicitaciones del tráfico con pérdida de las características iniciales, deterioro progresivo, corrección de fallos de construcción, etc. (Rama Francisco, 2013). En resumen, son un conjunto de operaciones cuyo objetivo es devolver las características funcionales y estructurales que poseía el firme en un principio, o incluso mejorarlo en el caso de que las solicitaciones hayan aumentado.

Estas labores representan los costos periódicos que deberá invertir el Ayuntamiento para restaurar el nivel de servicio del pavimento.

En función del grado de severidad y del tipo de deterioros que lleve asociados, esta puede ser:

- Rehabilitación superficial
- Rehabilitación estructural

Las primeras son necesarias cuando el deterioro afecta a la seguridad y al confort del tránsito, aún se encuentra dentro de la zona “óptima” de rehabilitación, mientras que las segundas son necesarias cuando además a los anteriores problemas se suma la disminución de la capacidad de carga del firme y comprometiendo su vida útil.

La naturaleza de los deterioros que se extienden a lo largo y ancho del firme, provocando la necesidad de rehabilitación son consecuencia de:

- No haber realizado a tiempo las reparaciones puntuales.
- Al paso del tiempo. El tiempo lleva asociados dos agentes de deterioro como son: la acción del tráfico y la climatología. Estos agentes que van deteriorando el pavimento con el paso del tiempo, producen un efecto mucho mayor en deterioros puntuales ya existentes, provocando una extensión de los mismos a lo largo y ancho del pavimento.
- Fallo de diseño o de los materiales utilizados. Este factor no se estudiará en este trabajo, porque se va a suponer que el diseño y los materiales utilizados serán los adecuados en cada caso.

Las rehabilitaciones son más comunes en firmes flexibles que rígidos, debido a la menor capacidad estructural de los primeros.

Los firmes rígidos no reciben frecuentemente rehabilitaciones y cuando las necesitan son normalmente superficiales debido a un mal curado. En este caso, suele realizarse un recrecimiento con mezclas bituminosas, con lo que se mejorará la calidad de rodadura a un precio relativamente bajo y con una vida útil baja.

En firmes flexibles, la rehabilitación superficial se lleva a cabo habitualmente por medio de un refuerzo o recrecimiento del firme. Esta técnica consiste en extender sobre el firme antiguo una o varias capas de materiales nuevos con espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural. En ocasiones, el mero recrecimiento presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo. Por esa razón puede resultar conveniente fresar una o varias capas del firme, para a continuación reponer el espesor eliminado, antes de proceder a un recrecimiento que lógicamente será de menor espesor que si no se hubiera fresado.

4.3.1. Rehabilitación superficial

Las deficiencias que, en determinado grado, pueden justificar una rehabilitación superficial del firme son las siguientes:

- Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
- Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
- Pavimento fisurado, descarnado o en proceso de desintegración superficial.

Si el daño que presenta un pavimento es leve, es decir, los deterioros que presenta son sólo funcionales o superficiales como los arriba citados, con una renovación superficial se podrá alargar muchos años su vida útil.

4.3.2. Rehabilitación estructural

Aquella que tiene como objetivo el aumento de la capacidad estructural del firme existente, adecuando esta capacidad a las condiciones de tráfico previsibles durante su vida útil. Esta rehabilitación comporta también una rehabilitación superficial, ya que mejora tanto la regularidad longitudinal y transversal como la textura de la superficie.

Cuando las fallas se presentan en forma generalizada, predominando fuertes deformaciones y agrietamientos, se requiere una rehabilitación, en el corto plazo, para evitar que se propaguen daños irreversibles.

La necesidad de una rehabilitación estructural se planteará si concurre alguna de las circunstancias siguientes:

1. Agotamiento estructural del firme.
2. Previsión de crecimiento importante de la intensidad de tráfico pesado.
3. Gastos excesivos de conservación ordinaria o curativa.

En el primer caso la rehabilitación resultará necesaria por haberse agotado, o estar próxima a agotarse, la vida útil del firme, aunque no se hubiesen cumplido las hipótesis de proyecto.

En el segundo caso será necesaria la rehabilitación del mismo para aumentar su resistencia debido al aumento de la intensidad de tráfico.

El tercer caso deberá ser consecuencia de la gestión de la conservación de la red, que podrá predeterminar cuáles son los gastos de conservación ordinaria normales para cada tipo de firme y carretera, y además establecer el umbral a partir del cual un incremento de estos gastos, en el tramo considerado, indicaría que se debe proceder a un cambio de estrategia de conservación.

La Norma 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes es la que regula la rehabilitación de firmes de carreteras. Esta norma nos sirve como base para la realización de rehabilitaciones en vías urbanas, ya que se carece de una más específica.

Previo a la ejecución de cualquier tipo de rehabilitación generalizada, se realizará una conservación curativa, se sanearán y repararán los deterioros puntuales y zonas singulares, para terminar con un acabado liso uniforme y para que no se reflejen los deterioros tipo grietas o fisuras en las nuevas capas del pavimento.

Para facilitar que estos municipios lleven a cabo un mantenimiento adecuado se ha creado un sistema de gestión de la conservación adaptado a sus necesidades y limitación de recursos, que además ayude en el segundo bloque al estudio del mantenimiento.

Con este sistema se está queriendo demostrar que es posible realizar un mantenimiento adecuado dentro de los límites económicos que tienen los municipios,

para en el segundo bloque tener en cuenta los beneficios que supondrá la implantación de un mantenimiento adecuado para el estudio global de costes.

5. Sistema de gestión de la conservación de firmes urbanos

Los sistemas de gestión de la conservación, son unas herramientas que según la OCDE constituyen el “procedimiento para coordinar y controlar las actividades de conservación, optimizando los recursos disponibles, es decir, maximizando el beneficio de los ciudadanos”.

En España, los primeros sistemas de conservación se aplicaron a redes interurbanas de competencia estatal o autonómica, y posteriormente a redes urbanas en ciudades de gran tamaño. Estos sistemas se basan en la recogida de datos con dispositivos automatizados y de alto rendimiento con los que se controla el estado de las vías para actuar consecuentemente dando prioridad a aquellas que lo necesiten. En general, aún no se tiene conciencia de que llevar a cabo una manutención o conservación de los firmes supone un ahorro económico a largo plazo, además de ofrecer mejor nivel de servicio para los usuarios. Sin embargo, existen algunas ciudades como Madrid, Valencia y Málaga, que debido a la gran disposición de recursos económicos y humanos, son pioneras en la aplicación y desarrollo de estos tipos de sistemas de conservación.

Los sistemas de conservación utilizados en grandes ciudades no pueden ser aplicados a los municipios aquí tratados, ya que los técnicos responsables de las vías dentro de los municipios no pueden poner en práctica estos complejos métodos de conservación por no disponer del personal suficiente ni de los medios necesarios. Como consecuencia, para poder llevar a cabo un sistema de conservación en estos municipios de menor formato, es necesario que éste se adapte a la realidad sobre la que trabaja. Por ello, en este trabajo se ha creado un sistema simplificado de gestión de la conservación de firmes urbanos adaptado a las necesidades y recursos de los núcleos de pequeño y mediano formato. Este sistema debe ser simple y rápido, que permita disponer de un registro general del estado de cada una de las vías del municipio mediante inspección visual realizada por los técnicos responsables de la conservación, y que ayude en los procesos de selección de las estrategias de conservación.

El fin del sistema de gestión de la conservación es crear unas estrategias de actuación de la conservación que ayuden a realizar una adecuada gestión de los

recursos, para tener un buen nivel de servicio en la red vial con el mínimo gasto posible y extender la vida útil del mismo. Las dos claves para conseguir este objetivo son:

- Seleccionar el tipo de reparación más adecuada, que con el mínimo gasto obtenga la mayor calidad posible.
- Realizar su ejecución en el momento preciso, impidiendo que su evolución encarezca la reparación.

El lema de la conservación de pavimentos en EUA ha sido la base para la creación de los dos puntos anteriores. Este lema tiene como fundamento la siguiente filosofía: “Selección del tratamiento adecuado con una aplicación al pavimento adecuado en el momento preciso”.

De esta filosofía se hace propio el hecho de que deben estudiarse diferentes alternativas de estrategias para cada caso y realizarse el análisis económico de costos de conservación que podría generar cada una de ellas, además de su resistencia con el paso del tiempo, para así determinar la más adecuada económicamente, con la que se reduzcan los costos generados por el firme al mínimo.

Cualquier firme, por mejor diseñado o construido que esté, necesita un mantenimiento adecuado; de lo contrario se deteriorará rápidamente. El mantenimiento vial nos permite conservar una vía inclusive más allá de su periodo de diseño, lo que significa, a la larga, un ahorro de recursos económicos (Rafael Alberto Alonso et al., 2012).

Para facilitar el estudio comparativo de vías urbanas con el mismo nivel de capacidad, se ha establecido una clasificación de tres tipos de vías, correspondiendo cada una de ellas a una categoría de tráfico pesado de la Instrucción 6.1–IC.

- Vías principales: con una intensidad de vehículos pesados por día entre 25 y 50, que corresponde con una categoría de tráfico pesado T41.
- Vías secundarias: con una intensidad de vehículos pesados por día menor de 25, que corresponde con una categoría de tráfico pesado T42.
- Vías terciarias: aquellas por las que no se permite pasar vehículos pesados, ya sea por limitaciones geométricas u otros factores estructurales, como presencia de ríos subterráneos, etc.

Debe ser bajo la responsabilidad de los técnicos formados en el ámbito de los firmes los que lleven a cabo el sistema de gestión con el objeto de que las acciones estén siempre bien sustentadas teóricamente.

A continuación, se presentan la secuencia de trabajos necesarios para que el sistema de gestión de la conservación sea completo y eficaz, cumpliendo los dos puntos clave.

5.1. Inventario

La primera labor importante para el sistema de gestión de la conservación será la realización de un registro de las características básicas de cada sección de firme a estudiar. Esto nos aportará información respecto a su estructura interna, espesor y materiales que forman cada capa, con el fin de comprender mejor su comportamiento, así como de las causas y evolución de sus deterioros. Para ello, será necesaria una inspección visual general de los firmes y una búsqueda de todos los datos de la sección concreta en su proyecto.

5.2. Evaluación del estado del firme

La evaluación de un firme se define como el conjunto de actividades destinadas a determinar el grado de severidad de cada deterioro y el estado general del firme a partir de síntomas y señales, todo ello enfocado a las necesidades de planeación de las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

Esto se realizará mediante operaciones periódicas que, además de investigar su evolución en el tiempo y en el espacio, intenten predecir el potencial desarrollo de los deterioros que ayude a la elección de las labores de conservación.

En municipios de pequeño y mediano formato, como trata este trabajo, no es posible realizar una evaluación del firme mediante instrumentos de auscultación, ya que no se dispone del presupuesto necesario para cubrir los costes de este proceso, que generalmente van a ser muy superiores a los de una inspección visual. Por lo tanto, la inspección visual será el método de identificación, medición y evaluación de patologías más apropiado para este caso, debido a la limitación de recursos disponibles.

La inexistencia de un sistema que facilite la gestión de la conservación de firmes en núcleos urbanos o municipios de pequeño y mediano formato hace necesaria la creación de unas Fichas de Inspección Visual (incluidas como *Anexo III*) para la evaluación de los mismos, que faciliten la obtención de datos genéricos relativos al estado estructural y funcional del firme. Esta evaluación consiste en una inspección visual realizada directamente sobre la vía por técnicos cualificados, que la pueden recorrer a pie o en un vehículo a marcha lenta, con objeto de recabar la máxima información posible acerca de los deterioros existentes de una forma fácil y concisa.

Además de estas Fichas de Inspección Visual, se han creado unas tablas-resumen con los grados de severidad de los deterioros más comunes de cada tipología de firme, recogidas en el *Anexo II* que sirven como apoyo al trabajo de campo de evaluación del estado de los firmes.

5.3. Determinación del tipo de mantenimiento

Tras la evaluación de los deterioros, se deben analizar técnica y económicamente las diferentes actividades o labores de reparación más acordes para cada deterioro, con el fin de proporcionar las mejores alternativas al mínimo coste. Este estudio incluye un análisis del coste de ejecución, durabilidad y necesidad de futuras rehabilitaciones de las reparaciones técnicamente posibles, que serán evaluadas en el siguiente punto, referente a las estrategias de conservación.

5.4. Identificación de prioridades

Una vez realizada la evaluación de los firmes con las fichas correspondientes y el análisis de las reparaciones, se deberá estudiar la asignación del orden de prioridad según:

- Nivel de la vía (principal, secundaria, terciaria).
- Grado de deterioro general del firme.

5.5. Estimación de recursos y estrategias de conservación

Normalmente, los municipios aquí estudiados disponen de unos recursos limitados, por lo que se deben gestionar de un modo eficiente. Aquí se seleccionan las reparaciones más prioritarias teniendo en cuenta los recursos disponibles, para mantener la red vial urbana con el mejor nivel de servicio posible; es decir, se escogerá el tratamiento preferido en base a su costo-beneficio. Este conjunto de labores o trabajos darán lugar a las estrategias de conservación que se llevarán a cabo para una red vial concreta en un determinado periodo de tiempo.

A la vez que son ejecutadas las labores de mantenimiento, estas serán recogidas en las correspondientes fichas de reparación propuestas (adjuntas en el *Anexo IV*) que servirán como consulta para futuros casos similares, además de para llevar un seguimiento de su evolución en el tiempo.

5.6. Revisión del comportamiento

Es la etapa posterior a la ejecución de las labores de mantenimiento, para controlar su calidad y efectividad. Se podrá realizar con las mismas fichas de recopilación de las reparaciones, especificando que se trata de una revisión.

En resumen, estos son los pasos a seguir para la implantación de un sistema de gestión de la conservación que propone hacer uso efectivo de los recursos económicos limitados, al identificar correctamente las fallas de los pavimentos tratados y empleando tratamientos correctos en el tiempo correcto, en función de los recursos disponibles.

A continuación, se presenta la estructura de las fichas utilizadas en este sistema de gestión de la conservación.

5.7. Fichas para la evaluación del estado de firmes

Estas fichas de inspección de deterioros adjuntas en el *Anexo III* han sido creadas a partir de complejas fichas de inspección visual ya existentes, consultadas en los siguientes documentos:

- “Manual para la Inspección visual de Pavimentos” de la Universidad Nacional de Colombia.
- Instituto de desarrollo urbano – Universidad Nacional de Colombia. “Manual de diagnóstico de fallas y mantenimiento de vías”. Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- Fichas de incidencias geotécnicas para apoyo de la conservación de la Red de Carreteras de Andalucía. Autores: J.C. Hernández del Pozo, Fernando Rivas Martínez, Abelardo Genaro Moya, etc.
- “El Viatest”. Gestión y mantenimiento de la infraestructura urbana. Carlos Guilemany y Andreu Guardia Riera.
- “Manual de mantenimiento en vías urbanas, utilizando mezclas asfálticas en caliente, tibia y en frío”. Rafael Alberto Alonso, José Alfredo Flores López y José Rafael Sánchez Beltrán. Universidad de El Salvador. Ciudad Universitaria. Octubre, 2012.

El fin de estas fichas es que sean utilizadas en los municipios por los técnicos responsables de las vías, ya que ayudan a realizar una eficiente gestión de la conservación.

Se han creado tres tipos de fichas, cada una corresponde a una de las tipologías estudiadas en este trabajo. La diferencia entre las distintas fichas son los deterioros enumerados en las mismas para facilitar su búsqueda.

A continuación se explica el contenido de cada campo:

- Sección 1 – Información básica o general

En el encabezado principal, se encuentra el título especificando el tipo de la vía y el número de la hoja. Justo debajo del título se recoge la información sobre la vía, el técnico que realiza la inspección y la fecha de realización.

- Nombre del municipio
- Nombre de la vía
- Nombre del técnico
- Fecha de realización de la inspección

Seguido de esto se encuentra la casilla destinada a definir la prioridad de la vía, es decir, el grado de importancia de la misma dentro de la red de vías del núcleo urbano, ya que no todas las vías pueden ser comparadas por igual.

- Tipo de vía dependiendo de la importancia del tráfico

Se estudiarán y archivarán en función de la importancia vial que tengan dentro del núcleo urbano. A cada tipo de vía que se recoge en la clasificación realizada al comienzo de este apartado, se le ha asignado una designación, tal y como se relaciona en la siguiente tabla:

Tabla 1.7: Relación de clasificación y designación para tipos de vías. Elaboración propia.

Designación	Descripción de la vía	IMDp	Nº de vehículos pesados día
1	Vías principales	T41	25 y 50
2	Vías secundarias	T42	Menos de 25
3	Vías terciarias	T42	No permiten paso vehículos pesados

- Sección 2 – Tipos de patologías o deterioros

Aquí aparecen enumerados los diferentes tipos de patologías según el tipo de pavimento a estudiar, recogidas en las tablas-resumen. Se ha creado una ficha diferente para cada tipo de firme, en la que cambia solamente este apartado.

- Sección 3 – Información de campo

Esta sección se destina al registro de los datos obtenidos del trabajo de campo correspondientes a la condición o estado del firme. Está formada por:

- Parte de la vía en la que se encuentra el deterioro: es necesario registrar la posición del daño, se especifica si el deterioro estudiado se encuentra en la calzada (indicar carril) o en la acera.
- Tipo de deterioro: en esta columna se coloca el tipo de deterioro concreto de acuerdo con el número establecido en la sección 2 de la ficha.
- Dimensiones: en esta casilla se escriben las dimensiones del daño o deterioro de acuerdo con su forma de medición.
- Severidad: en función de la gravedad del daño generado por el deterioro deberá seleccionarse un grado de severidad de los que aparecen en las tablas-resumen, con una de las siguientes letras:
 - B: Baja
 - M: Media
 - A: Alta
- Causas: posibles causas de la aparición del deterioro, puede ser información necesaria para la reparación.
- Aclaraciones: en esta sección deben registrarse todos los detalles adicionales encontrados durante la inspección de cada deterioro.

En el futuro, con la implantación de la valoración numérica se podrá obtener un valor que se corresponda con la suma del valor numérico del grado de severidad del deterioro junto con el valor numérico correspondiente al tipo de deterioro, según su importancia dentro de los deterioros de ese firme. Este valor será comparable entre deterioros de firmes de la misma tipología y nivel de vía.

Actualmente, no se dispone de esta valoración numérica por lo se deberán estudiar en conjunto los firmes evaluados, en la siguiente sección.

- Sección 4 – Grado de deterioro general del firme

En esta sección se deberán definir dos indicadores de daño, que permitan caracterizar la condición estructural y funcional del firme. Estos indicadores de daño son:

- La integridad de la estructura del pavimento, mediante la caracterización de la severidad y extensión de las fallas estructurales más significativas visibles en la superficie.
- La condición funcional de su superficie en relación a la aceptación de los usuarios, mediante la caracterización de la comodidad de manejo.

Actualmente, para decidir la prioridad en las reparaciones es necesario un estudio conjunto de los firmes evaluados para decidir la prioridad en las reparaciones a partir de la interpretación de los datos obtenidos y de las evaluaciones teóricas realizadas a cada firme. Por lo tanto, en un primer momento este método será más laborioso que cuando se disponga la valoración numérica. En un primer momento el técnico deberá definir por sí mismo el orden pero siguiendo los criterios establecidos.

La evaluación del grado y severidad de los deterioros será un aspecto a mejorar con la posible ampliación del trabajo. Podrá desarrollarse un sistema de valoración numérica del grado y severidad de los deterioros con la que se facilite a los técnicos la comparación entre vías del mismo nivel.

- Sección 5 – Comentarios generales

Se ha dispuesto de un apartado para comentarios referidos al estado general de la vía, en el que se puede registrar cualquier información adicional que el técnico considere importante, tal como problemas generalizados en el pavimento, tipo e intensidad de actuaciones de mantenimiento anteriores, información relevante suministrada por los vecinos de la zona, etc.

Antes de dar una evaluación definitiva del firme, el técnico debe comparar las diferentes vías de interés que correspondan al mismo nivel para concluir el reparto de prioridades definitivas.

5.8. *Ficha de reparaciones*

En este tipo de ficha (recogida como *Anexo IV*) se registran las reparaciones de cada deterioro correspondiente a la ficha de evaluación, ya sean puntuales o rehabilitaciones. Éstas podrán ser consultadas en un futuro para mejorar y reparar otras vías con condiciones semejantes, además de realizar un seguimiento de la reparación con la que comprobar su evolución, a partir de la cual se mejorará el conocimiento de su comportamiento pudiendo mejorar para próximas reparaciones.

La ficha de reparaciones está formada por dos secciones.

La primera sección contiene las casillas a rellenar con los datos correspondientes al municipio, además de fecha, técnico que realiza la inspección y número de hoja, que debe corresponder con el número de la hoja de evaluación de deterioros.

En la segunda sección se describen las reparaciones, tanto puntuales como rehabilitaciones realizadas en cada deterioro.

Ambas fichas, tanto las de inspección visual como estas de deterioros, deberán ser completadas por los técnicos responsables del mantenimiento de cada municipio, tanto en formato digital como en papel. El formato digital facilita la posterior búsqueda de deterioros o reparaciones concretas.

5.9. *Conclusiones sistema de gestión de la conservación*

Este sistema tiene como objetivo principal seleccionar estrategias de mantenimiento y rehabilitación con las que se reparta de manera eficiente los recursos, de modo que el mínimo gasto posible consiga mantener un buen nivel de servicio en los firmes durante todo el periodo de servicio para el que fueron diseñados, incluso ampliarlo. Además, este sistema proporcionará un soporte teórico y práctico que justifique correctamente el gasto en actividades de mantenimiento y rehabilitación.

Además de estos objetivos generales, con el estudio de la evaluación y mantenimiento se consiguen otros objetivos específicos.

Con la evaluación del estado del firme se obtiene:

- Una base de datos que además de evaluar el firme, servirá para consultar la evolución de los deterioros y conocer el momento adecuado para su reparación.
- Establece la condición o grado de severidad de la vía. Esta se llevará a cabo calificando individualmente cada uno de los deterioros del firme, según la frecuencia o extensión de las áreas afectadas por los mismos, para al final definir la condición general del firme. A partir de esto se definirá un orden de prioridad para la reparación de los firmes.

Con el estudio del mantenimiento se persigue:

- Estudiar el coste y durabilidad de los tipos de reparaciones técnicamente viables para en la posterior evaluación, seleccionar la más adecuada.

- Crear una base de datos o inventario de reparaciones con la que se consiga evaluar su evolución en el tiempo, con lo que poder mejorar su ejecución para futuros deterioros iguales o similares.
- Previsión de los presupuestos a establecer para cada tipo de vía.
- Mantener el valor patrimonial de la red viaria urbana.

En resumen, este método o sistema pretende principalmente facilitar la realización de una conservación que posibilite la reducción de costes a lo largo de la vida útil de firmes en vías de municipios de pequeño y mediano formato, que no disponen de los medios necesarios para llevar a sistemas de conservación más complejos.

Para este sistema es primordial que las municipalidades estén en disposición de llevar a cabo el cambio y la implementación de las ideas contenidas en esta investigación.

Este sistema ha sido creado porque se ha comprobado que la vida útil de los pavimentos se puede prolongar a menor costo cuando se implemente un sistema de conservación con acciones estratégicamente planeadas. Se ha establecido que los tratamientos de pavimentos no deben realizarse al azar, sino que se deben aplicar estratégicamente y de acuerdo a un programa que fomente la administración efectiva de la red vial.

Entonces, al poner en marcha este sistema de gestión de la conservación en un municipio, se podrá contar con información más exacta y accesible sobre el estado de su red vial, encaminada a la selección de las mejores estrategias de mantenimiento y sobre todo al uso más eficiente de los recursos disponibles por parte del gobierno municipal.

Tras la presentación del sistema de gestión de la conservación, se va mostrar que realmente con una buena conservación de los firmes de una red vial, se producen unos claros beneficios económicos que se verán reflejados al final de la vida útil de los firmes. Esto será demostrado a partir de unas curvas de deterioro-tiempo, ya utilizadas para otros sistemas de gestión.

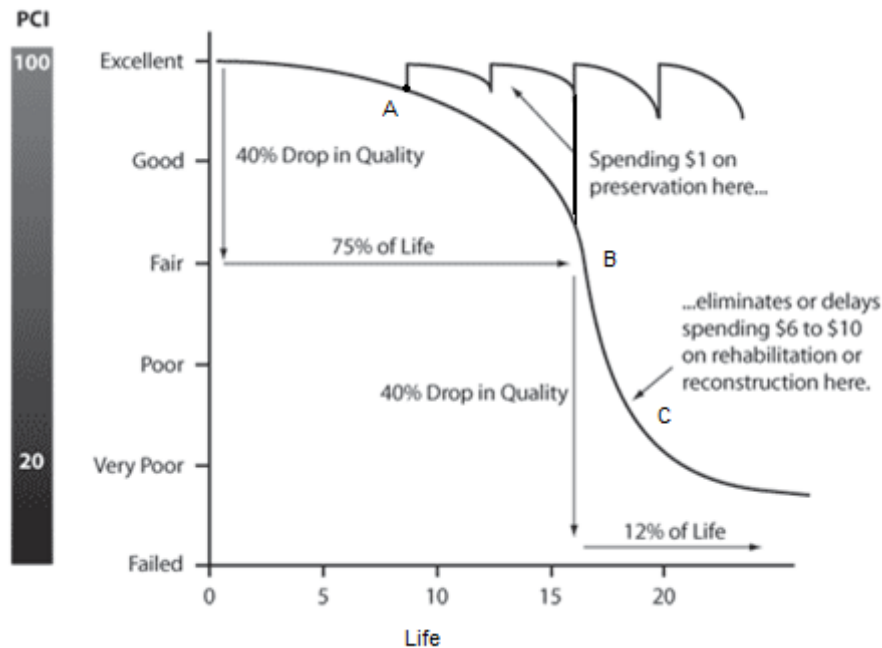
6. Curvas de deterioro-vida útil

A partir de las curvas deterioro-vida útil mostradas a continuación se ha demostrado que un mantenimiento adecuado, que lleve a cabo las actuaciones óptimas en el momento preciso, generará un beneficio económico en los firmes que se verá

reflejado en el costo acumulado al final del periodo de servicio para el que fueron diseñados.

Esta primera figura muestra una curva deterioro-vida útil, en la que se distinguen tres puntos de especial importancia para el mantenimiento de un firme que son explicados por Augusto Jugo B. (2005) de la siguiente forma:

Figura 1.16: Histograma cuantitativo de desempeño de un pavimento. Tomada de *Intermountain Slurry seal, Inc* y de *Principles of pavement preservation* de FHWA.



- Punto A, a esta altura de la vida útil el pavimento comienza a mostrar síntomas menores de deterioro que requieren el inicio de labores de mantenimiento preventivo y correctivo, las cuales son importantes para controlar el deterioro y mantener el buen funcionamiento de la vía. Además, el futuro gasto en rehabilitación será posiblemente para aumentar la vida útil del firme, ya que con las reparaciones correctivas podrá completar gran parte de su periodo de servicio en un buen estado.
- Punto B, si en el punto anterior no se llevan a cabo medidas de mantenimiento correctivo, la rata de deterioro comienza a crecer rápidamente, disminuyendo cerca del 40% de la calidad al paso del 75% de la vida útil del firme. Este es el punto adecuado para ejecutar una rehabilitación en caso de que no se hayan llevado a cabo labores correctivas, ya que mejorará considerablemente la condición y estructura del firme aunque con una inversión final mayor que la del punto anterior.

- Punto C, este punto se corresponde a la situación de que la condición del firme ha caído en un estado crítico, tanto desde el punto de vista funcional como estructural, debido a la ausencia de mantenimiento. Desde el punto B anterior, en un 12% del tiempo (referido al periodo de diseño), se produce una reducción adicional del 40% en calidad, debido al rápido incremento de la rata de deterioro, lo que se produce por la acción del tráfico sobre una estructura menos resistente y envejecida. Por lo tanto, se requieren costosos trabajos de mantenimiento mayor, como rehabilitación o reconstrucción, lo que supondrá un gasto mucho mayor que los anteriores mantenimientos al final de la vida útil del firme.

Por lo tanto, el mantenimiento preventivo junto con el correctivo implantado a tiempo supondrá el mínimo costo total al final de la vida del firme, incluso realizando una rehabilitación cerca del final de su periodo de servicio con el que se mejore su estado y se aumente su vida útil. Los restantes casos dejan pasar demasiado tiempo hasta que se realizan las reparaciones, lo que provoca un elevado deterioro del firme que deriva en costosas labores de reparación.

En definitiva, un sistema de gestión de la conservación de firmes bien estructurado puede prolongar la vida útil de un firme a menor costo, con lo que se ahorra en recursos económicos a largo plazo, además este será bien recibido por los usuarios, quienes como contribuyentes de impuestos proveen los fondos monetarios a las entidades gubernamentales.

Con miras al futuro del planeta, es necesario que desde todos los niveles de responsabilidad se tenga conciencia del problema que hoy en día se está generando con la excesiva contaminación tanto con emisiones contaminantes como con el excesivo consumismo que tan de moda está hoy en día.

Dentro de la gestión de pavimentos se pueden apoyar varias causas que son decisivas para el futuro del planeta, como son reducir las emisiones contaminantes con producciones sostenibles y apoyar el desarrollo sostenible de las ciudades.

Para poder mantener el valor patrimonial de una infraestructura, además de la implantación del anterior sistema de gestión de la conservación, se pueden llevar a cabo una serie de medidas sostenibles desde el proceso de fabricación de los materiales de pavimentación, que además ayuden a reducir las excesivas emisiones contaminantes que tanto daño están haciendo a nuestro planeta.

7. Firms sostenibles

Es necesario que desde todos los niveles se tenga conciencia del gran problema ambiental que nos afecta hoy en día. Por eso este trabajo desde su posición quiere buscar posibles medidas que en los diferentes niveles de desarrollo de un pavimento puedan contribuir al desarrollo sostenible del planeta.

Estas medidas abarcarán procesos desde el inicio de la actividad de fabricación de los materiales hasta el final de la vida útil del firme, con su demolición y pueden ser:

- Mejorar la eficiencia de los procesos de fabricación de materiales para firms y apoyar el uso de los menos contaminantes. Por ejemplo, en la fabricación de mezclas asfálticas se consume mucha más energía que en la de cemento para la obtención de hormigón. Usar pavimentos que al final de su vida útil hayan consumido menos recursos materiales, beneficio que se reflejará en su costo final.
- Investigar nuevos materiales que puedan ser incorporados en la construcción de firms, para hacerlos más económicos y sobretodo más sostenibles con el medio ambiente. Pueden añadirse materiales de desecho a los pavimentos para reducir su coste y solucionar problemas de residuos. Por ejemplo, en el del hormigón, usar residuos de demolición para su fabricación. En el caso de firms asfálticos, también es un problema el excesivo uso de recursos naturales limitados, por lo se han realizado muchas investigaciones para reciclar materiales desechados, como neumáticos usados, incorporándolos a la mezcla asfáltica y reducir así su coste final, además de reducir su huella de carbono.
- Mantenimiento y rehabilitación: optar por pavimentos fáciles de rehabilitar para alargar su vida útil, por lo que se reducen costes y recursos si se compara con otras tecnologías de pavimentos.

En este trabajo es de aplicación directa la medida del mantenimiento y rehabilitación, con la que se reducirá el consumo de recursos y el coste al final de su vida útil. Además, se contemplará el reciclado de residuos de demolición para la fabricación de firms. Para ello es necesario conocer los artículos concretos de las diferentes normativas que regulan y dirigen su uso en la formación de firms.

7.1. Reciclaje de residuos de demolición

En este caso se entiende el reciclado, como la reutilización de materiales procedentes de demolición de estructuras en la construcción de otras nuevas.

El reciclaje de pavimentos de carreteras está muy extendido en todo el mundo debido a que es rentable económicamente por el gran volumen de material con el que se trabaja, además de tener unos beneficios medioambientales importantísimos. En cambio, en municipios de pequeño y mediano formato el volumen de residuos es reducido por lo que hasta hace poco años no suscitaba un interés importante, pero esto ha cambiado con el Real Decreto 112/2012, de 26 de junio, que tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Estos residuos también deben reciclarse por los problemas medioambientales que conllevan, además del ahorro económico que producen en la fabricación de materiales para construcción.

Es importante destacar, que cada día más gobiernos adoptan políticas para minimizar el empleo de materiales nuevos, y promover el empleo de materiales reciclados, además de los grandes avances tecnológicos que en este campo se han logrado en los últimos años y que facilitan cada vez más su empleo.

Según Jorge Alarcón Ibarra (2003) en su *“Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta”*, señala que desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas. Estas reducen el consumo de grandes volúmenes productos naturales y energía, además del impacto negativo de los vertederos. Sin embargo, en España, el reciclado de mezclas bituminosas en caliente en planta no ha sido un procedimiento comúnmente empleado hasta este momento.

En el caso que trata este trabajo, construcción de firmes, se deben conocer los documentos que normalizan este tipo de actividades. Para cada tipo de firme:

En el anejo de la Orden Circular 8/2001 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, sobre reciclado de firmes, se recogen las especificaciones relativas a los tipos de reciclado considerados en la norma, en los siguientes artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4):

- Art. 20 (Reciclado in situ con emulsión en capas bituminosas).
- Art. 21 (Reciclado in situ con cemento de capas de firme).

- Art. 22 (Reciclado en caliente de capas bituminosas).
- Firme asfáltico

Conforme al artículo 542 del PG-3 según Orden Circular 24/2008, se admite la posibilidad de emplear “como áridos para capas de base e intermedias, incluidas las de alto módulo, el material procedente del fresado de mezclas bituminosas en caliente en proporciones inferiores al diez por ciento de la masa total de mezcla” (art. 542.2.2.1. Características generales). A los efectos de la aplicación de este artículo, una mezcla bituminosa reciclada contendrá una proporción en masa del material bituminoso a reciclar comprendida entre el diez (10) y el cincuenta por ciento (50%) de la masa total de la mezcla.
- Firme de hormigón

En España no existe normativa técnica específica para el reciclado de pavimentos de hormigón. Sin embargo, la ORDEN FOM/891/2004 (BOE de 6 de abril de 2004) actualiza determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) en los que se recoge la posibilidad de utilizar áridos reciclados procedentes de pavimentos de hormigón para los siguientes usos:

 - Art. 510 (Zahorras)
 - Art. 513 (Materiales tratados con cemento)
 - Art. 550 (Pavimentos de hormigón)
 - Art. 551 (Hormigón magro vibrado)
- Firme de adoquín

El reciclado de adoquines tiene dos variedades:

 - Si el adoquín está en condiciones para su uso sin necesidad de ningún proceso mecánico para su mejora.
 - Si el adoquín se encuentra en malas condiciones y se utiliza para obtención de áridos reciclados.

Sin embargo, estas actividades no se encuentran reguladas por ninguna normativa.

En este bloque han quedado expuestos los pilares teóricos necesarios para emprender los estudios de costes de construcción y mantenimiento que se presentan a continuación en el Bloque II.

BLOQUE II: ESTUDIO ECONÓMICO Y CUALITATIVO

Este segundo bloque pretende ayudar a los municipios de pequeño y mediano formato a identificar qué tan competitivas son desde el punto de vista económico unas tipologías de firme con respecto a otras, teniendo un mantenimiento adecuado y sin él, para llegar así a la tipología de firme más rentable al final de su vida útil. Para lograr esta meta es necesario realizar dos estudios: un estudio de costes de construcción y un estudio cualitativo del mantenimiento de cada tipología.

Uno de los principales problemas de los firmes en estos municipios es que la Administración local no destina un presupuesto suficiente para su conservación. No es apreciada como una prioridad a pesar de que, como se vio en el bloque anterior, puede producir grandes beneficios económicos si se gestiona de forma adecuada. Como consecuencia, los deterioros no se reparan en el momento adecuado (cuando su coste de reparación es el mínimo posible), ya que no se realiza una revisión periódica de los firmes que pueda prever el momento adecuado para cada reparación. De esta forma los deterioros crecen más rápidamente y no son reparados hasta que suponen un peligro para los usuarios, cuando el coste de la reparación ha aumentado considerablemente.

Asumiendo que, de ocurrir, la concienciación sobre la importancia de una buena gestión de la conservación será un proceso lento en la mayoría de los municipios, este trabajo, en la búsqueda del tipo de pavimento más económico al final de su vida útil, estudia dos situaciones: con mantenimiento adecuado y sin él. Es importante conocer los resultados en los dos casos, ya que ambos pueden darse en cualquiera de los municipios tratados.

1. Estructura del bloque

Este segundo bloque se estructura en tres partes diferenciadas complementarias, necesarias para conseguir los objetivos propuestos.

1.1. Selección de las secciones de firmes

Antes de comenzar con el estudio de costes de construcción, es necesario seleccionar las secciones de las diferentes tipologías de firmes a estudiar, ya que para este primer estudio se necesitarán las dimensiones y los materiales concretos de cada sección. Sin embargo, para el estudio de mantenimiento bastará con saber las tipologías de firmes a estudiar.

1.2. Estudio del coste de construcción

El objetivo fundamental de este apartado es el cálculo de los ratios de costes de implantación de los distintos tipos de pavimento. Este es el primer dato necesario obtenido en el camino para llegar a la tipología de pavimentación más económica.

1.3. Estudio cualitativo del mantenimiento.

Con este estudio se pretende conocer la evolución del estado de cada tipología de firme y su mantenimiento con una conservación adecuada y en ausencia de ella, ya que ambas realidades son probables en los municipios aquí tratados.

Por lo tanto, para obtener la tipología de firme más económica al final de su vida útil, deberán analizarse de forma conjunta los resultados obtenidos del estudio de costes de construcción junto con los resultados obtenidos para cada caso de mantenimiento.

2. Selección de secciones de firmes

Las secciones de firme escogidas para este estudio serán equivalentes para vías urbanas con condiciones hipotéticas similares de categoría de explanada e intensidad de tráfico, cumpliendo unos requisitos de funcionalidad obligatorios.

2.1. Factores para el diseño

Para el diseño de las secciones de firmes urbanos es habitual recurrir a catálogos de secciones de carreteras, de los cuales el más utilizado en España es el recogido en la Instrucción 6.1-IC del Ministerio de Fomento. Sin embargo, existen otros catálogos más ajustados a los tráficos y tipos de vías habituales en entornos urbanos pero estos son menos conocidos por no ser de carácter nacional.

- Catálogo de firmes y pavimentos de la ciudad de Valencia. Servicio de Coordinación de Obras e Infraestructuras. Ayuntamiento de Valencia, 2007.
- Manual Técnico de los Euroadoquines. 2004. Asociación española para la investigación y el desarrollo del adoquín de hormigón para periodos de veinte años.
- Manual de Pavimentos de Hormigón para Vías urbanas de baja intensidad de tráfico. Guías Técnicas, IECA.

Por lo tanto, la escasa literatura específica disponible sobre diseño de firmes urbanos conlleva que la mayoría de técnicos municipales tengan que basarse para el

diseño de las secciones de firmes urbanos en la Instrucción para carreteras 6.1-IC. Este trabajo considera que es necesario dar prioridad a aquellos catálogos de secciones específicos para vías urbanas. Es importante destacar que, aunque un firme de carretera y uno urbano tengan la misma intensidad de tráfico pesado y se encuentren sobre el mismo tipo de explanada, las características de las cargas que recibe son diferentes, además de la amplia casuística que conllevan los firmes urbanos. Por ejemplo, mientras el firme de carretera recibe principalmente cargas de vehículos de paso a alta velocidad, el firme urbano recibe cargas de vehículos a menor velocidad, con numerosos arranques, frenadas, giros y maniobras que transmiten al firme generalmente esfuerzos tangenciales y de torsión, que son distintos a los que reciben firmes de carreteras.

En primer lugar, para la selección de las secciones de firme a estudiar, es necesario la definición de las categorías de tráfico pesado para las cuales se van a dimensionar, garantizando su durabilidad y buen funcionamiento durante su periodo de servicio.

Tabla 2.1: Tabla 1.B, Norma 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

En rojo se encuentran marcadas las dos categorías de tráfico pesado usadas en este trabajo.

En segundo lugar, tras la caracterización del tráfico, se define la explanada, teniendo en cuenta los tipos de suelos existentes en el área de cada caso. Normalmente en vías urbanas, la explanada se encuentra lo suficientemente compactada, teniendo una adecuada capacidad portante.

Tabla 2.2: Módulo de comprensibilidad en el segundo ciclo de carga, tabla 2 de la Norma 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/2003.

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Finalmente, las secciones de firme a estudiar, dependen tanto de la categoría de explanada establecida, como del tráfico pesado de proyecto que tendrá que soportar la vía urbana.

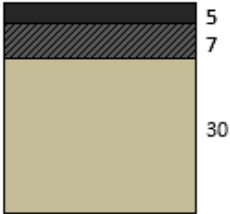
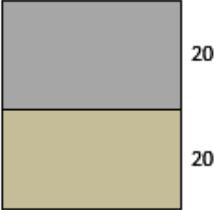
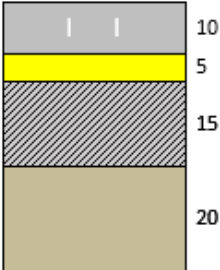
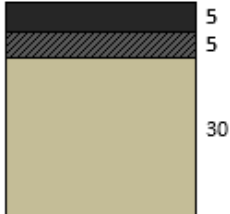
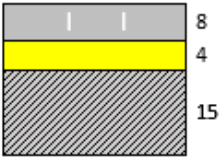
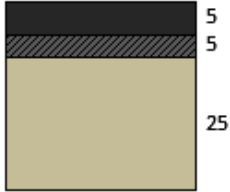
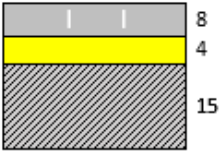
Para la selección de las secciones de firme se han seguido dos criterios generales:

- En primer lugar se seleccionarán las secciones con los materiales más comunes y más usados en la actualidad para la construcción de firmes urbanos. Estos han sido identificados a partir de una inspección previa de las vías urbanas, junto con las encuestas realizadas a diferentes técnicos municipales. Para cada conjunto de categoría de tráfico/explanada, este trabajo propone tres tipos de secciones de firmes, conformadas por los siguientes materiales:
 - Mezcla bituminosa en caliente (MB) y base de zahorra artificial (ZA).
 - Losa de hormigón (HF) apoyada sobre base de zahorra artificial (ZA).
 - Adoquinado (AD) sobre base de hormigón magro (HM) y subbase de zahorra artificial (ZA).
- En segundo lugar, no se escogerán las secciones con “espesores extremos” de entre todos los catálogos revisados, sino que se utilizarán valores medios, para que la probabilidad de seleccionar secciones infradimensionadas o sobredimensionadas sea menor.

A continuación, se presentan las estructuras de firme propuestas para las diferentes categorías de tráfico pesado y explanada.

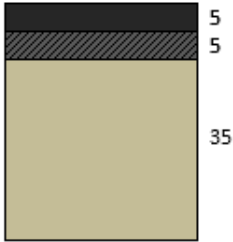
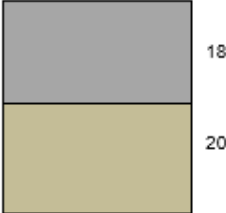
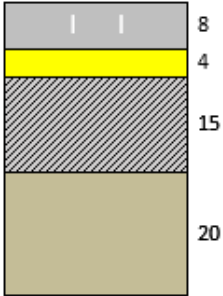
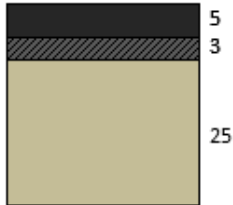
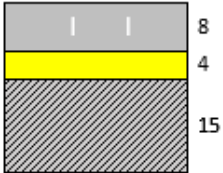
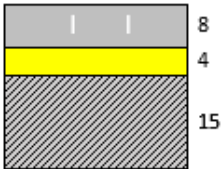
- Tráfico T41

Tabla 2.3: Secciones para tráfico T41. Elaboración propia.

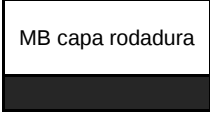
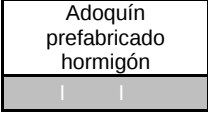
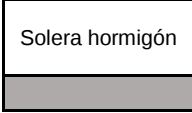
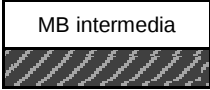
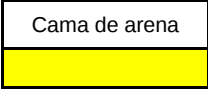
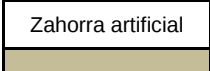
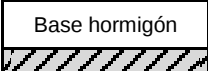
T41	CALZADA		
	FLEXIBLE	RÍGIDO	ARTICULADO
E1	 4111	 4112	 411A
E2	 4121	 4122	 412A
E3	 4131	 4132	 413A

- Tráfico T42

Tabla 2.4: Secciones para tráfico T42. Elaboración propia.

T42	CALZADA		
	FLEXIBLE	RÍGIDO	ARTICULADO
E1	 4211	 4212	 421A
E2	 4221	 4222	 422A
E3	 4231	 4232	 423A

Leyenda:

2.2. Materiales

Los materiales utilizados para las distintas capas de cada sección tendrán unas características específicas que deberán cumplir con una serie de exigencias para asegurar un buen comportamiento del firme. A continuación, se describen las características, disposición y espesores para cada una de ellas, además de los artículos de las normativas que deben cumplir.

a) Firme flexible

- Capa de rodadura: mezcla bituminosa en caliente

Esta será utilizada tanto para capa de rodadura como para intermedia y deberán cumplir con lo exigido en el artículo 542 de la Orden Circular 29/2011 sobre el del Pliego de Prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Estas mezclas bituminosas en caliente son las más utilizadas por las propiedades de resistencia, desgaste y durabilidad con respecto a los demás tipos de mezclas bituminosas. Técnicamente se definen como la combinación de un ligante hidrocarbonatado, áridos (filler inclusive) y eventualmente aditivos, de forma que todas las partículas queden recubiertas por el ligante de forma homogénea. El calificativo “en caliente” hace referencia a su temperatura de puesta en obra, muy superior a la ambiente, dado que es necesario que el ligante, que normalmente suele ser betún de penetración, posea una viscosidad suficientemente baja para poder trabajarlo.

Los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas bituminosas en caliente cumplirán las condiciones de granulometría, calidad, procedencia, angulosidad, finura, forma, resistencia a la fragmentación y limpieza exigidos para cada tipo de ellos (gruesos, finos y polvo mineral) en artículo 542.2.2 del PG-3.

Como ligante hidrocarbonado se utilizará el tipo betún asfáltico B 35/50 en mezclas bituminosas en caliente tipo AC 16 surf y AC 22 bin. Tanto emulsiones como betunes deberán de cumplir las condiciones generales de transporte, almacenamiento, recepción y especificaciones indicadas en los artículos 211 y 213 del PG-3.

La capa de rodadura de mezcla bituminosa en caliente será de 5 cm para todos los casos estudiados. Sin embargo, el espesor de la capa intermedia variará dependiendo del tráfico y explanada.

En cuanto a riegos entre capas, se colocará un riego de imprimación, emulsión tipo ECI, que es una emulsión catiónica de imprimación, entre la base de zahorra y la base bituminosa. Por otro lado, se colocará entre dos capas consecutivas de mezcla bituminosa, una emulsión catiónica de rotura rápida tipo 1, ECR-1.

- Capa de base: zahorra artificial

Antes de la colocación de estas capas, será necesario realizar la limpieza y desbroce (cuando proceda) del terreno natural. Para extender la zahorra será obligatorio rasantear, perfilar y compactar el fondo de excavación, actuaciones que no son necesarias para una base de hormigón.

Como capa de base se utilizará zahorra artificial, esta es una mezcla de áridos, total o parcialmente machacados, en la que la granulometría del conjunto de elementos que la componen es de tipo continuo. Debiendo cumplir lo exigido en la Orden Circular 24/2008 sobre el PG-3, correspondiente al artículo 510.

b) Firme rígido

- Capa de rodadura: hormigón de firme

Los hormigones para pavimentos se definen en la normativa española, según el artículo 550 “Pavimentos de hormigón” del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 del Ministerio de Fomento. En vías urbanas se utilizan dos tipos de hormigones: HF-3,5 y HF-4,0, cuyas resistencias características a flexotracción a los 28 días son de 3,5 MPa y 4,0 MPa, respectivamente. Aunque la relación entre la resistencia a flexotracción y a compresión depende de varios factores como, por ejemplo, el tipo de árido, se puede considerar, de manera aproximada, que un HF-3,5 equivale a un HM-25 y un HF-4,0 a un HM-30.

En este caso la losa de hormigón dispondrá de una malla electrosoldada, cuya función no es estructural, sino de control de la fisuración por retracción o gradientes térmicos.

Fenómenos como la retracción, los gradientes térmicos, la dilatación, las paradas de la puesta en obra o la limitación de los anchos a construir de una sola vez, hacen necesaria la disposición de juntas en el hormigón. Si dichas juntas no se ejecutasen aparecerían espontáneamente fisuras de forma irregular. Las más frecuentes son las juntas de contracción que deben disponerse a una distancia que es función del espesor de la losa, debiendo no ser mayor que 20 o 25 veces el mismo. Las losas deberán ser lo más cuadradas posible, siendo la relación de lados en el caso de ser rectangulares, inferior a 1,5:1. (Manual de Pavimentos de Hormigón para Vías de Baja Intensidad de Tráfico, 2002).

Finalmente, su puesta en obra se realizará según el artículo 71 de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).

Esta capa de hormigón de firme (HF-4,0) tendrá un espesor de 20 cm para tráficos pesados T41 y 18 cm para tráficos pesados T42, independientemente de la categoría de la explanada.

- Capa de base: zahorra artificial

Al igual que para la anterior capa de base, antes de la colocación de estas capas, será necesario realizar la limpieza y desbroce (cuando proceda) del terreno natural.

La capa de base aquí será de zahorra artificial, es una mezcla de áridos, total o parcialmente machacados, en la que la granulometría del conjunto de elementos que la componen es de tipo continuo. Debiendo cumplir lo exigido en la Orden Circular 24/2008 sobre el PG-3, correspondiente al artículo 510.

c) Firme articulado

- Capa de rodadura: adoquinado de hormigón

Los adoquines utilizados para firmes en vías urbanas deben cumplir una serie de características según la norma UNE-EN 1338 que define su forma, dimensiones, propiedades físicas y químicas y aspectos visuales.

Los materiales empleados en la fabricación de los adoquines cumplirán lo establecido por la norma UNE-EN 1338:2004, sin perjuicio de lo establecido en la vigente Instrucción de Hormigón Estructural (EHE- 08).

La formación de capa de rodadura con adoquín se realizará mediante adoquines de hormigón, con acabado superficial liso, según diseño, una vez colocados los adoquines sobre una capa de arena de 0,5 a 5 mm de diámetro, cuyo espesor será de 4-5 cm se vibrará el pavimento con bandeja vibrante, dejando entre ellos una junta de separación entre 2 y 3 mm, para su posterior relleno con arena natural, fina y seca y de granulometría comprendida entre 0 y 2 mm. Esto será realizado del mismo modo para todas las categorías de explanada y tráfico pesado.

El espesor de los adoquines será de 8 cm para todos los casos menos para el caso con tráfico T41 y calidad de la explanada E1, en el que se usarán adoquines con espesor de 10 cm.

- Capa de base: hormigón magro

Se define en el artículo 551 del PG-3 como hormigón magro la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base, con una dotación menor de cemento que en los pavimentos de hormigón, y que se compacta con vibración.

En este caso tendrá el mismo espesor para todos los casos, de 15 cm, ya que la capa que variará según el tráfico y explanada será la subbase.

- Capa de subbase: zahorra artificial

Para la colocación de esta capa se necesitan los mismos preparativos que para la capa de base con zahorra artificial.

La capa subbase también será ejecutada con zahorra artificial de las mismas características y exigencias que para el anterior firme.

Esta capa será colocada solamente para la calidad de explanada E1, con ambas categorías de tráfico.

3. Estudio económico: cálculo costes de construcción

Los costes de implantación de una sección de pavimento se obtienen como suma de los correspondientes a cada una de las unidades de obra que componen la sección. Son los costos asociados con la materialización de cada alternativa de construcción. Con ellos se obtiene un ratio de costes de cada tipología de pavimento.

Para obtener los precios medios de cada unidad de obra, se realiza un análisis de varias bases de precios:

- Base de Coste de la Construcción de Andalucía 2015, BCCA 2015.
- Base de precios de Construcción, PREOC 2015.
- Generador de precios de la construcción (CYPE Ingenieros).
- Presupuestos obtenidos de proyectos de diferentes municipios del sur de Córdoba.

Los criterios seguidos en la selección de las diferentes unidades de obra utilizadas en el cálculo de costes de las secciones son los siguientes:

- Para efectos de la comparación se ignoran los costos de los ítems no relacionados con el pavimento, así como aquellos que, refiriéndose al pavimento, sean comunes a todas las alternativas (como, por ejemplo, el coste de los trabajos destinados a la obtención de la explanada, que es común a cada grupo).
- El coste de las secciones de firme se efectúa por metro cuadrado de sección, estimando su coste de construcción (materiales, mano de obra, maquinaria y costes indirectos).
- Las unidades de obra contempladas incluyen el coste de ejecución material y los costes indirectos.
- Los materiales para bases incluyen, fabricación, transporte, preparación de la superficie de apoyo, extendido y compactación.
- Las mezclas bituminosas incluyen ya los porcentajes correspondientes de filler y betún, fabricación, puesta en obra, extendido y compactación.
- Los pavimentos de hormigón incluyen la parte proporcional del coste de la tipología de juntas que le corresponda, distinguiendo éstas según clase de pavimento.

Con estas particularidades y la ayuda de las fuentes mencionadas, se ha llegado a los siguientes costes medios de materiales y mano de obra, con los que se calcularán los precios de implantación de cada sección. La relación de cálculos realizados para obtener los costes de implantación de las secciones de firmes urbanos, se encuentran adjuntos en el *Anexo V*.

Tabla 2.5: Coste medio partidas construcción pavimentos. Elaboración propia.

	MATERIAL	COSTE MEDIO	UNIDAD
CAPA DE RODADURA	Mezcla bituminosa de aglomerado asfáltico para capa de rodadura (AC 16 surf S)	178	€/m ³
	Mezcla bituminosa de aglomerado asfáltico para capa intermedia (AC 22 bin S)	168	€/m ³
	Hormigón de firme HF-4,0 para capa de rodadura	130	€/m ³
	Adoquín hormigón de 10 cm de espesor sobre lecho de arena de 5 cm	17	€/m ²
	Adoquín hormigón de 8 cm de espesor sobre lecho de arena de 4 cm	16	€/m ²
BASE	Zahorra artificial	16	€/m ³
	Solera de hormigón armado HM-20 para capa de base	126	€/m ³

En los cálculos de costes de construcción, los precios no expresados en la unidad precisa, €/m², han sido transformados para que sea posible la suma, de la que se extrae el precio final de implantación por m².

La nomenclatura usada para definir cada sección será parecida a la de la Instrucción 6.1-IC, con una pequeña adición, pavimentos de adoquín, que no se incluyen en esta instrucción. La clasificación de cada sección quedará de la siguiente forma:

- Los dos primeros dígitos corresponden al tipo de tráfico, T41 y T42, quedando 41 y 42.
- El tercer dígito se corresponderá con la calidad de la explanada, E1, E2 y E3, y quedará 411, 412, 413 y 421, 422, 423.
- El último número se corresponde a la tipología de firme, siendo para firme flexible (1), firme de rígido (2) y firme articulado (A).

Por lo tanto, quedará:

- Para firmes flexibles con base granular: para tráfico T41 será 4111, 4121, 4131 y para tráfico T42 será 4211, 4221, 4231.
- Para firmes rígidos con base granular: para tráfico T41 será 4112, 4122, 4132 y para tráfico T42 será 4212, 4222, 4232.

- Para firmes articulados con base de hormigón: para tráfico T41 será 411A, 412A, 413A y para tráfico T42 será 421A, 422A, 423A.

Una vez explicado esto, se presenta el cálculo de costes de implantación de cada sección de firme, así como la discusión de los resultados, para cada categoría de tráfico.

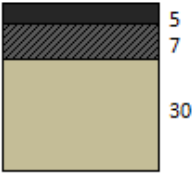
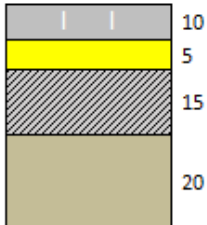
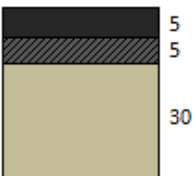
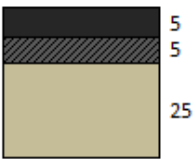
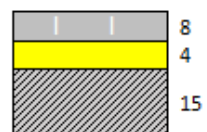
3.1. Cálculo del coste de construcción de secciones para tráfico T41

Los cálculos del coste de construcción o implantación de las secciones de firme para la categoría de tráfico T41, se encuentran desarrollados en el *Anexo V*, apartado 1. A continuación, se procede al análisis comparativo de los resultados obtenidos para cada tipología de firme.

3.1.1. Observaciones comparativas de precios

La siguiente tabla resume el diseño de las secciones así como sus costes de construcción para tráfico T41.

Tabla 2.6: Coste secciones tráfico T41. Elaboración propia.

T41	CALZADA		
	FLEXIBLE	RÍGIDO	ARTICULADO
E1	 4111	 4112	 411A
PRECIO (€/m²)	25,45	29,20	39,10
E2	 4121	 4122	 412A
PRECIO (€/m²)	22,10	26,00	34,90
E3	 4131	 4132	 413A
PRECIO (€/m²)	21,30	26,00	34,90
MEDIA (€/m²)	23,00	27,00	36,30

La visualización mediante gráficas facilita la observación de la diferencia de precios existente entre las tres tipologías de pavimentos para secciones equivalentes con tráfico T41 y ayuda a esclarecer los resultados que se exponen seguidamente.

Figura 2.1: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E1.
Elaboración propia.

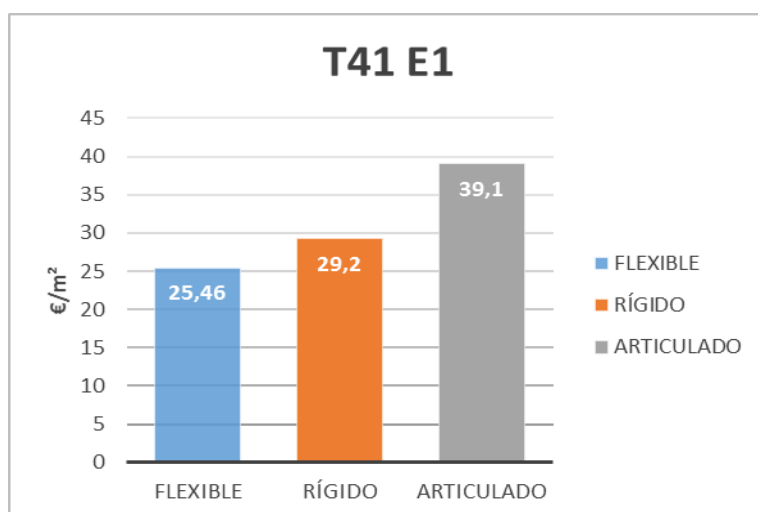


Figura 2.2: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E2.
Elaboración propia.

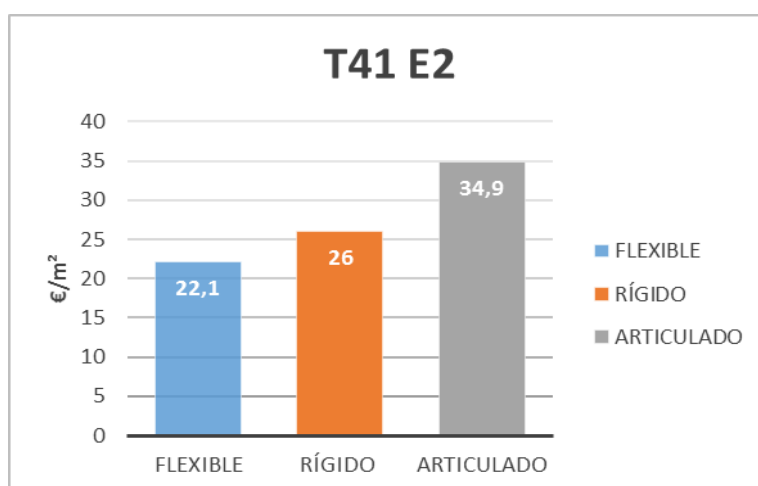
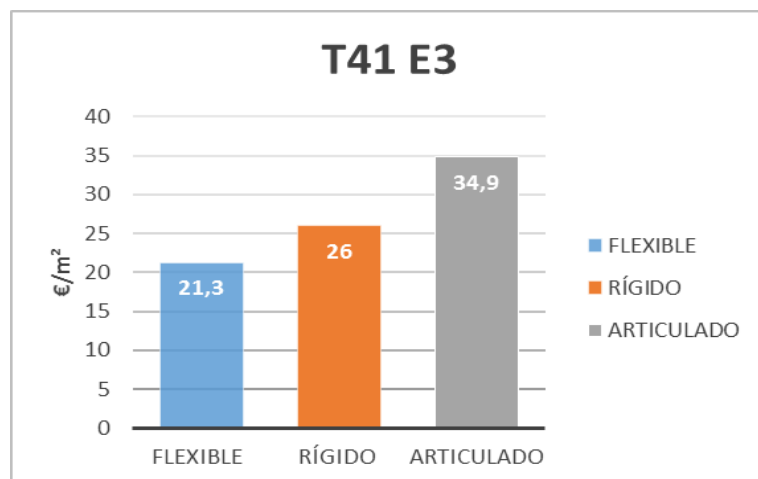
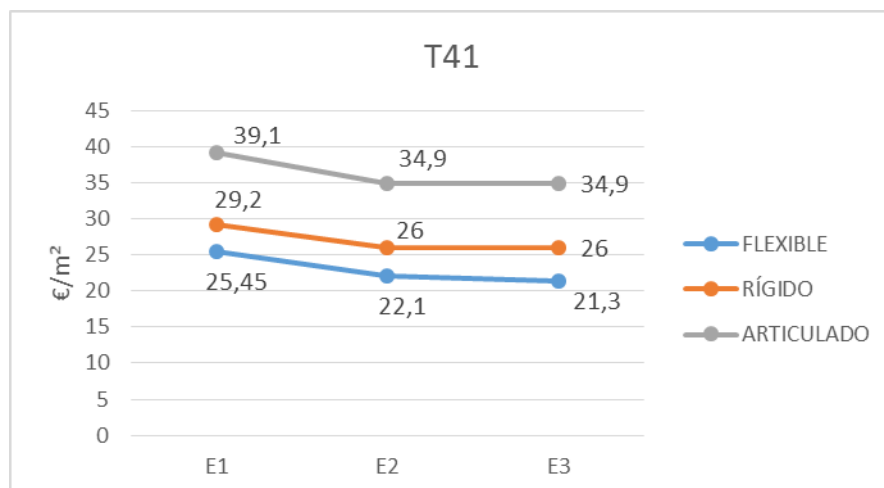


Figura 2.3: Coste implantación secciones con tráfico T41 y calidad de la explanada E3.
Elaboración propia.



La siguiente gráfica muestra la variación general de los precios medios en función de la calidad de la explanada para una intensidad de tráfico T41.

Figura 2.4: Coste medio implantación secciones con tráfico T41, en función de la calidad de la explanada. Elaboración propia.



A partir del análisis de las gráficas correspondientes a los costes medios de construcción de firmes urbanos para un tráfico T41 se puede observar que:

- El firme con un menor coste de construcción para esta categoría de tráfico y cualquier categoría de explanada es el flexible o asfáltico con un precio medio de 23,00 €.
- El firme articulado es con diferencia el de mayor precio, indistintamente de la calidad de la explanada.
- Para el firme rígido se obtiene un precio medio de 27,00 €, mucho más cercano a firme flexible. Este se encuentra generalmente alrededor de 4 € por encima del precio del firme flexible.
- El precio por m² de firme rígido y articulado no varía para una explanada E2 y E3, esto no quiere decir que las secciones para una explanada E3, la de mayor calidad, vayan a estar sobredimensionadas sino que su comportamiento será mucho mejor que para explanadas E2.

Por lo tanto, para un tráfico T41 los firmes flexibles y rígidos son los más semejantes en precios de construcción.

3.2. Cálculo del coste de construcción de secciones para tráfico T42

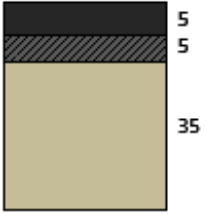
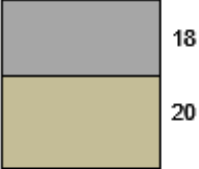
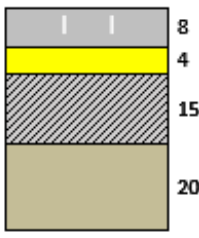
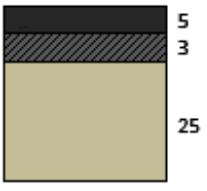
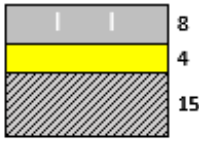
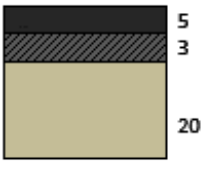
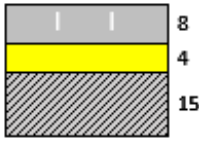
El cálculo del coste de construcción o implantación de las secciones de firme para la categoría de tráfico T42, se encuentran en el Anexo V, apartado 2.

Tras el cálculo del coste de construcción de cada una de las secciones correspondientes al tráfico T42, se procede a su análisis comparativo.

3.2.1. Observaciones comparativas de precios

La siguiente tabla resume el diseño de las secciones así como sus costes de construcción para tráfico T42.

Tabla 2.7: Coste secciones tráfico T42. Elaboración propia.

T42	CALZADA		
	ASFALTO	HORMIGÓN	ADOQUÍN
E1	 4211	 4214	 421A
PRECIO (€/m²)	22,40	26,60	38,10
E2	 4221	 4224	 422A
PRECIO (€/m²)	17,94	23,40	34,90
E3	 4231	 4234	 423A
PRECIO (€/m²)	17,14	23,40	34,90
MEDIA (€/m²)	19,20	24,50	36,00

Al igual que para el tráfico T41, con las siguientes gráficas se facilita la observación de la diferencia de precios existente entre las tres tipologías de firmes para secciones equivalentes con tráfico T42.

Figura 2.5: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E1.

Elaboración propia.

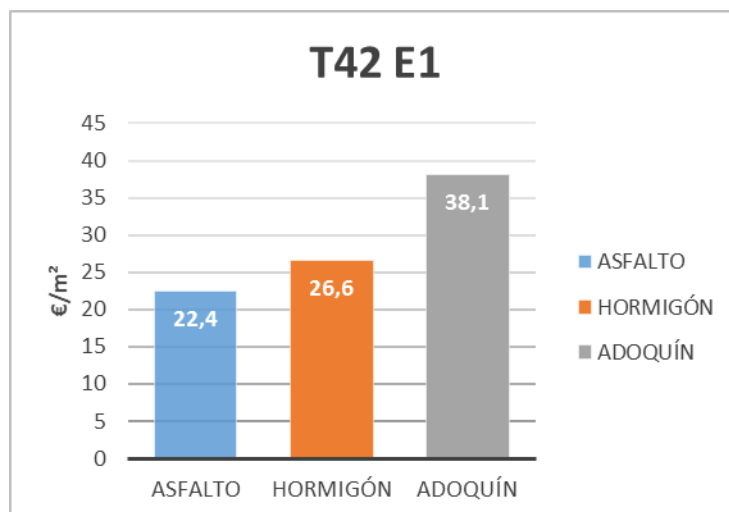


Figura 2.6: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E2.

Elaboración propia.

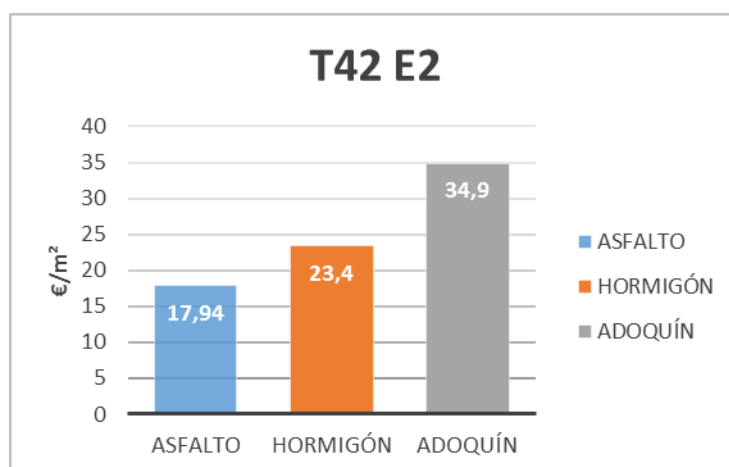
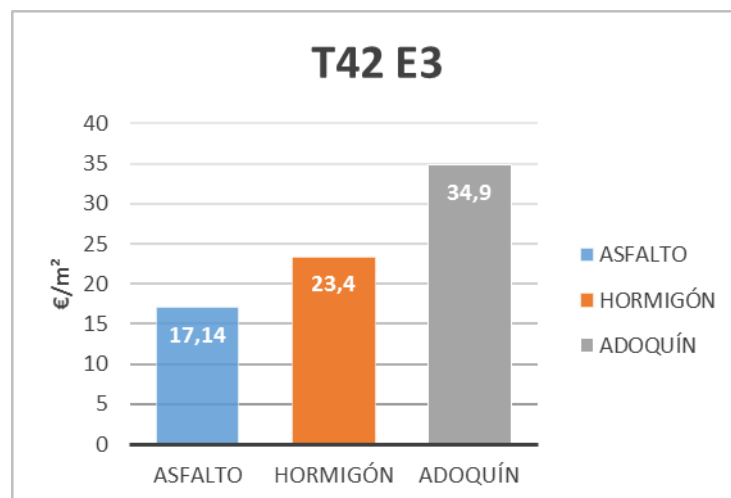


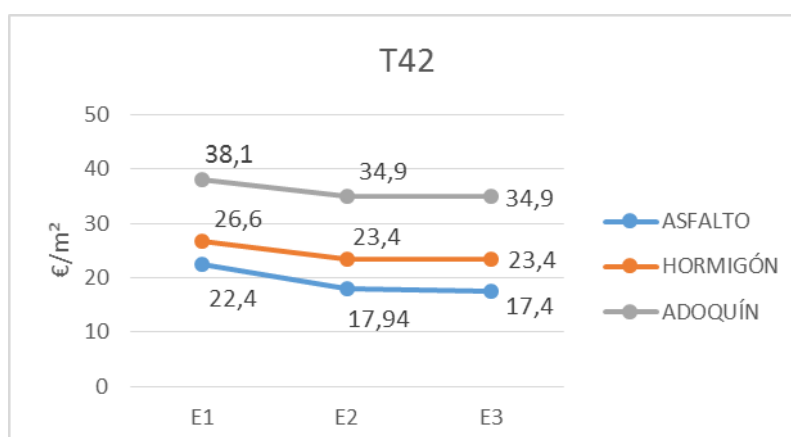
Figura 2.7: Coste implantación secciones con tráfico T42 y calidad de la explanada E3.

Elaboración propia.



La siguiente gráfica muestra la variación general de los precios medios en función de la calidad de la explanada, para una intensidad de tráfico T42.

Figura 2.8: Coste medio implantación secciones con tráfico T42, en función de la calidad de la explanada. Elaboración propia.



Del análisis de los datos recopilados correspondientes a los costes medios de construcción de firmes urbanos para un tráfico T42 se puede concluir lo siguiente:

- Aunque el orden en cuanto a precio sigue siendo el mismo, la diferencia entre unos y otros aumenta con la disminución de la intensidad de tráfico. El precio de las tipologías de firme rígido y articulado se distancian del precio del firme asfáltico.
- En cuanto a coste de construcción, el pavimento asfáltico sigue siendo el más económico para cualquier tipo de explanada.
- El pavimento de hormigón sigue estando entre 3 y 6 € por encima del precio por m² de pavimento asfáltico.

- El pavimento de adoquines continúa siendo con diferencia el firme con mayor precio, indistintamente de la calidad de la explanada.

3.3. Interpretación de los resultados del estudio de costes de construcción

Las tablas 2.7 y 2.12 conforman unos catálogos que podrán ser consultados por técnicos o por cualquier persona interesada en conocer las secciones de firmes recomendadas por este trabajo para vías urbanas con baja intensidad de tráfico, T41 y T42, así como su precio aproximado.

Al analizar de forma global los costes de construcción de cada tipología de firme extraídos hasta este punto, se extraen los siguientes resultados generales:

- El coste de construcción de las secciones de asfalto es el más ventajoso económicamente. Este hecho se explica por el bajo espesor de mezcla bituminosa que forma la capa de rodadura, la más costosa de estas secciones. Sin embargo, hay que destacar que el precio de alquiler de la maquinaria necesaria para la implantación de las capas asfálticas es más rentable cuanto mayor es la superficie a pavimentar. La mayoría de vías de los municipios de pequeño y mediano formato no tienen grandes dimensiones, factor que deberá ser tenido en cuenta a la hora de la elección del firme.
- El caso contrario ocurre para el firme articulado. Sus costes de construcción son los más altos de las tres tipologías, debido a la necesidad de una capa base de hormigón que asegure la durabilidad de las redes subterráneas.
- Finalmente, el pavimento de hormigón queda en segunda posición, con unos precios medios por sección más cercanos a los firmes flexibles y siendo un serio competidor por:
 - Tener precios fijos, algo que no acontece con el asfalto, que depende del precio del petróleo.
 - Ser procedente de la zona, beneficiando la economía local.
 - Se pueden construir con medios muy sencillos, con equipos simples y con mano de obra de baja capacitación.
- Es conveniente señalar que los pavimentos con estructura rígida son menos sensibles a la calidad de la explanada, por lo que las dimensiones de las secciones varían menos en pavimentos de hormigón y de adoquines, estos últimos con base rígida.

Las gráficas realizadas con los datos de costes de secciones para cada tipo de tráfico han sido de gran ayuda para distinguir con mayor facilidad donde se produce una mayor diferencia de precios de construcción entre las distintas tipologías.

Para llegar a conocer el tipo de pavimento más económico al final de su vida útil, es necesario unir a estos datos, los correspondientes a un estudio de mantenimiento.

4. Estudio cualitativo del mantenimiento

La evolución natural de los pavimentos urbanos (calzadas, aceras y vías peatonales) es la degradación progresiva tanto de su superficie como de su estructura, causada por diversos factores. Según Jorge Alarcón Ibarra (2003), por una parte se tienen los factores relacionados directamente con las características del propio firme como pueden ser los espesores, los materiales utilizados en su fabricación y el proceso de ejecución, que se podrían considerar como factores pasivos del proceso, y por otra parte, los factores activos, verdaderos causantes del deterioro, que son el tráfico y los factores ambientales.

Un deterioro se puede originar por un hecho puntual o por un cúmulo de factores, debiéndose realizar un diagnóstico amplio, para determinar las posibles causas y poder aplicar la acción de contingencia necesaria para corregir la problemática.

La oportuna detección y reparación de los deterioros menores es sin duda el trabajo más importante que necesita un pavimento para mantener su nivel de servicio. Por ejemplo, las grietas y otros deterioros superficiales, que en un primer momento no resultan importantes, pueden ser la causa de serios defectos si no son reparados a tiempo. Es difícil saber el momento oportuno en que debe realizarse cada labor de conservación, sobre todo si se considera que están en juego recursos importantes para la economía. Por eso es tan importante que personal capacitado realice inspecciones del estado de los firmes de manera frecuente.

Sin embargo, como ya se ha comentado en la introducción de este bloque, la realidad del mantenimiento de las vías urbanas en municipios de pequeño y mediano formato difiere del ideal. Difícilmente se encuentran planes de conservación que estudien cuándo es el momento óptimo para la ejecución de las labores de reparación. Hay una ausencia de mantenimiento que se cubre con reparaciones y rehabilitaciones realizadas cuando se ve comprometida la seguridad de los usuarios, lo que deriva en un alto coste de reparación.

Esta realidad aunque muy extendida, no es aplicable a todos los municipios. Aun así, este mantenimiento podría mejorarse con la implantación de un sistema de gestión de la conservación adaptado a las necesidades de estos municipios de pequeño y mediano tamaño como el creado en el primer bloque, lo que permite llevar a cabo un mantenimiento más eficiente con los limitados recursos disponibles.

Por lo tanto, este estudio analiza la evolución del estado de cada tipología de firme y su mantenimiento en dos casos, con mantenimiento adecuado y sin él, con el objetivo de conocer:

- En el caso de recibir un mantenimiento adecuado, qué tipología de firme necesita de una menor inversión para conservar un buen nivel de servicio y alargar así su vida útil.
- En el caso de no recibir un mantenimiento adecuado, qué tipología de firme presentará deterioros a edad temprana y una evolución más rápida de los mismos, lo que supondrá un mayor gasto en reparaciones al final de su vida útil.

La evolución del estado del firme y su mantenimiento se conocerá mediante la confección y posterior análisis de unas tablas elaboradas por el autor, que por su extensión se adjuntan como *Anexo VI*, y muestran, de cada deterioro, su descripción, causas, grados de severidad, evolución probable, reparaciones y fotografías.

Para la realización de las tablas, se ha llevado a cabo un trabajo de campo y un proceso de documentación. El trabajo de campo realizado mediante la inspección visual de firmes urbanos en una docena de municipios de la Campiña cordobesa, permitió una recolección de datos y fotografías de multitud de deterioros. De forma paralela al trabajo de campo, se ha realizado una búsqueda de información a través de artículos de revistas, material de varias universidades y libros especializados en deterioros y reparaciones:

- Firmes asfálticos. Composición, deterioro y rehabilitación. Jorge Alarcón Ibarra.
- Rama Labrador, Francisco. Manual de conservación de los pavimentos en la red viaria urbana. Bellisco Ediciones. Madrid, 2013.
- Manual de carreteras. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana. Luis Bañón Blázquez, Bevia Garcia y Jose Francisco Bevia Garcia.
- Manual de mantenimiento y rehabilitaciones de pavimentos flexibles. Caracas 1993 (Acciones Básicas-Versión revisada 2005). Augusto Jugo B.

- Jornadas de actualización técnica. Proyecto y ejecución de reparaciones en pavimentos. Dirección Nacional de vialidad, Mayo 2013. Diego H. Calo y Edgardo Souza.
- Propuesta para la implementación de un Sistema de Administración de Pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán, Sin. Rafael Eduardo Osuna Ruiz. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., 2008.
- Catálogo deterioros de pavimentos rígidos. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. Volumen nº12. 2002.
- Catálogo deterioros de pavimentos flexibles. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. Volumen nº11. 2002.
- Tesis “Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos”, Universidad Austral de Chile, Ricardo Javier Miranda Rebolledo, Valdivia (Chile), 2010.
- Patología de Pavimentos Articulados. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 9, núm.17, julio-diciembre, 2010, pp. 5-94. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.

El estudio del mantenimiento que se ha desarrollado en este trabajo es de carácter cualitativo y no cuantitativo, ya que no se cuenta con herramientas precisas de predicción de deterioros para conocer con exactitud el tiempo correcto de aplicación de los tratamientos. Además, en firmes urbanos estos deterioros dependerán de muchas variables cuyo cálculo es más complejo.

Sin embargo, al estudiar los tipos de deterioros más importantes de cada tipología de firme, conoceremos también el tipo y la frecuencia de las reparaciones necesarias y la dificultad de su ejecución.

Además de para este estudio, estas tablas podrán ser empleadas en un futuro como base teórica para el estudio de problemas reales de deterioros y reparaciones.

A continuación, se presentan de forma esquemática los deterioros analizados en profundidad en las tablas del *Anexo VI*. Se incluyen también datos obtenidos del trabajo de campo (cuáles son los deterioros más comunes) y del proceso de documentación (cómo serán las reparaciones que necesitan).

4.1. Firme flexible

El modo de producirse el fallo en este tipo de firmes es por deformaciones excesivas, debido principalmente a las sobrecargas de uso, ya que la intensidad de tráfico será baja.

Los fallos superficiales son debidos principalmente a la acción abrasiva del tráfico y a la acción destructiva y de envejecimiento de los agentes atmosféricos, aunque a veces pueden también ser debidos al uso de materiales inadecuados o a una mala ejecución. (“Vademécum de Pavimentación”. 11ª Edición diciembre 2013. Productos Asfálticos, S.A. y Cátedra de Caminos UPC).

Es un pavimento económico y de rápida construcción, sensible a la presencia de agua, que requiere explanadas de cierta calidad para soportar las tensiones que llegan a ellas y que pueden tener problemas con las redes de servicios subterráneas tanto en la fase de construcción como para las reparaciones y reposiciones, porque las zanjas en este tipo de firmes son siempre puntos débiles del conjunto. Con cargas elevadas, es decir, con tráfico pesado, hay problemas de roderas y deformaciones importantes. (“Las vías urbanas”, Diciembre 2003. Monografía nº2/ELSAN-PACSA).

4.1.1. Tipos de deterioros estudiados en firme flexible

Los deterioros propios de los firmes asfálticos son clasificados en función de su origen en [ver Anexo VI, apartado 1 (Firme flexible)]:

- a. Defectos de superficie
 - Exposición de agregados
 - Áridos pulimentados
- b. Fisuras y grietas
 - Fisuras longitudinales y transversales
 - Agrietamientos en malla ancha tipo piel de cocodrilo
 - Agrietamientos en malla fina tipo piel de cocodrilo
- c. Deformaciones
 - Abultamiento
 - Hundimiento
- d. Desintegración
 - Peladura
 - Bache
- e. Otros deterioros

- Parchados y reparaciones de servicios públicos

En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.

4.1.2. Deterioros y reparaciones

- Deterioros más importantes

El grupo de deterioros que plantea las mayores dificultades, y quizás el de mayor transcendencia para la vida de este pavimento, son los agrietamientos, que separan en bloques unas superficies que antes gozaban de perfecta continuidad, destruyendo su integridad. Esto además provoca que debido a su bajo espesor, el agua llegue rápidamente a las capas inferiores deteriorándolas por lavado de finos, acumulación de agua, etc., lo que acelera su deterioro.

Otro hecho que plantea dificultades de un modo general en todas las tipologías de firmes, son las calas y canalizaciones realizadas para reparación y renovación de redes subterráneas. La reconstrucción del firme en estos casos provoca puntos de potencial deterioro si no se realiza con los procedimientos constructivos correctos.

- Reparaciones puntuales

Las reparaciones puntuales en pavimentos asfálticos son un gran problema, ya que es muy difícil realizar estas reparaciones con la misma calidad de procedimiento con la que se construyó el firme. Esto se debe a que para realizar este tipo de reparaciones puntuales no se utiliza la misma maquinaria con la que se realizó la obra (MBC, extendedora, apisonadora de rulo, etc.) sino que se dispone de maquinaria menor, como un pisón de rana. La mezcla que se utiliza, MBC, no se encuentra en su mejor estado ya que viene casi fría porque generalmente es una masa de pequeño volumen y se trae en un camión normal. En ocasiones, la alternativa a ésta es la MB en frío, que por la investigación realizada no da muy buenos resultados, levantando árido al poco tiempo.

- Rehabilitación

Las rehabilitaciones de estos pavimentos son las más tempranas de todas las tipologías estudiadas, esto se debe a la baja resistencia de los materiales que la conforman. Las rehabilitaciones pueden ser superficiales o estructurales, en función del grado de severidad y del tipo de deterioros que el pavimento lleve asociados.

Los principales deterioros que provocan la rehabilitación de este pavimento son la piel de cocodrilo o malla de grietas, debidas principalmente a un envejecimiento de la capa de rodadura cuando se extienden a lo largo y ancho del firme.

4.2. Firme rígido

El fallo estructural de este firme es fisuración por fatiga. Sin embargo, no es éste su fallo más frecuente, sino que éstos suelen ser superficiales, afectando fundamentalmente a la calidad de rodadura del firme. Estos defectos provienen del estado de las juntas, del estado de la superficie de la losa y de la situación relativa entre las losas (escalonamiento).

4.2.1. Tipos de deterioros estudiados en firme rígido

Los deterioros de los firmes de hormigón se estructuran de la siguiente manera [ver Anexo VI, apartado 2 (Firme rígido)]:

- a. Deterioro superficial
 - Descascaramiento y fisuras capilares
- b. Juntas
 - Juntas saltadas
 - Escalonamiento de juntas y grietas
- c. Roturas y grietas
 - Grietas longitudinales y transversales junto a juntas
 - Grietas o rotura en esquina
- d. Otros
 - Parches deteriorados
- e. Firme rígido con carpeta de mezcla bituminosa

Hay casos en los que para incrementar la vida útil de un firme rígido, cuya calidad de rodadura es mala, se ejecuta una carpeta de mezcla bituminosa que mejora la calidad de rodadura durante algún tiempo, generalmente pocos años. Previo a esto, deben repararse los otros desperfectos, realizarse barrido y riego de adherencia.

- Agrietamientos por reflexión
- Desprendimiento

4.2.2. *Deterioros y reparaciones*

- Deterioros más importantes

En esta tipología de firme las reparaciones serán mucho menos frecuentes que en firmes asfálticos, debido a la resistencia de los materiales. Los pavimentos de hormigón tienen fundamentalmente un comportamiento elástico, sin experimentar deformaciones permanentes, incluso en condiciones severas de tráfico pesado y elevadas temperaturas.

Este tipo de pavimento tiene como puntos más débiles las juntas de dilatación y límites de las losas, en las cuales se desarrollan la mayor parte de deterioros si no se mantienen correctamente. Por lo tanto, los deterioros más frecuentes en firmes de hormigón son: rotura en esquina y grietas en juntas.

En cuanto a la reparación de calas y canalizaciones abiertas para la reparación o renovación de redes subterráneas, sigue la regla general para firmes urbanos, al igual que para la anterior tipología de firme.

- Reparaciones puntuales

Las reparaciones en pavimentos de hormigón son algo más costosas que en pavimentos asfálticos, debido al precio de los materiales, pero en cambio son mucho menos frecuentes y más duraderas, resisten mucho mejor las cargas de tráfico y los agentes atmosféricos, por lo que tienen una vida útil más larga.

Estas reparaciones no necesitan de maquinaria especial para su correcta ejecución, ya que aquí el procedimiento y los materiales utilizados son los mismos que se utilizaron para la construcción del pavimento.

- Rehabilitación

Dentro de los 30 años de periodo de proyecto que se le puede asignar a un firme rígido de los tratados en este trabajo, no es normal que este requiera labores de rehabilitación, complejas y costosas, como una reposición parcial o completa.

La rehabilitación más frecuente en este tipo de pavimento es la extensión de una carpeta de mezcla bituminosa en caliente para regularizar su superficie, cuando este haya alcanzado una edad avanzada y la calidad de rodadura no sea la más satisfactoria. Con esto se extenderá la vida útil del pavimento aproximadamente entre 5 y 8 años más,

según la calidad de la mezcla y las reparaciones previas al extendido, con un precio relativamente bajo.

4.3. *Firme articulado*

Los pavimentos de adoquín no van a ser la solución más económica para vías urbanas, limitándose a centros históricos y lugares de alto interés.

4.3.1. *Tipos de deterioros estudiados en firme articulado*

Los deterioros más frecuentes para firmes de adoquines se estructuran de la siguiente manera [ver *Anexo VI*, apartado 3 (Firme articulado)]:

- a. Deformaciones
 - Depresiones
 - Ahuellamiento
- b. Desprendimiento
 - Desgaste superficial
 - Pérdida de arena
- c. Desplazamiento
 - Desplazamiento de juntas
- d. Fracturas
 - Fracturas
- e. Otros deterioros

En esta categoría se encuentran diversos deterioros que afectan al correcto funcionamiento estructural y funcional del pavimento.

- Escalonamiento entre adoquines
- Escalonamiento entre adoquines y confinamiento
- Juntas abiertas

Los pavimentos de adoquines son los menos frecuentes de los estudiados, por lo que ha sido más difícil conseguir fotografías de sus deterioros. Las fotografías han sido tomadas por el autor del trabajo, en municipios del sur de Córdoba.

4.3.2. *Deterioros y reparaciones*

- Deterioros más importantes

Al igual que el pavimento de hormigón, este necesita muy poco mantenimiento para poder sobrepasar la vida útil para la que fue diseñado. Sin embargo, al no realizarse conservaciones adecuadas en la mayoría de municipios, este pavimento al igual que los demás se deteriora antes del tiempo previsto, en este caso concreto, debido principalmente a la falta de arena entre juntas. Esta arena es fundamental para el correcto funcionamiento del pavimento, ya que sirve como agente amortiguador en la transferencia de esfuerzos procedentes de las cargas del tráfico.

En cuanto a la reparación de calas y canalizaciones abiertas para la reparación o renovación de redes subterráneas, sigue la regla general para firmes urbanos, al igual que para la anterior tipología de firme.

- Reparaciones puntuales

Las reparaciones puntuales en este tipo de pavimento resultan menos costosas, debido a que los adoquines pueden ser levantados y reutilizados en gran parte después de realizar la reparación en las capas, lo que abarata mucho el coste de la reparación.

- Rehabilitación

La rehabilitación de este tipo de firme suele realizarse cuando ya se ha sobrepasado la vida útil para la que fue diseñado y generalmente se debe al fallo de las capas inferiores, pudiéndose reutilizar la mayor parte de los adoquines de la capa de rodadura, que son la parte más cara del pavimento. Además, esto no sería rehabilitación sino más bien reconstrucción, por lo que este pavimento volvería a tener una vida útil de otros 30 años aproximadamente.

4.4. *Análisis de resultados del estudio de mantenimiento*

Según Francisco Rama (2013), las reducciones en los presupuestos de conservación, no significan un ahorro sino una pérdida progresiva año tras año del valor patrimonial de la red viaria así como de la seguridad vial.

Una política de no conservación provoca un sobre coste innecesario que puede evitarse, con la implantación de un sistema de gestión de la conservación como el creado en este trabajo y presentado en el bloque anterior.

Con el estudio de los deterioros más comunes, realizados para cada tipología de firme, se ha podido contemplar que las principales causas de los deterioros en los firmes urbanos con baja intensidad de tráfico son:

- Sobrecargas de uso.

La repetición de cargas no agota estos firmes urbanos, ya que soportan tráfico muy reducidos, sin embargo, una sobrecarga de uso puede producir notables deterioros.

- Reparaciones de calas y canalizaciones.

Por otra parte, dentro los firmes se producen reparaciones de calas y canalizaciones realizadas para la renovación o arreglo de servicios subterráneos. Estas reparaciones del firme generan puntos de potencial desarrollo de deterioros, que podrán minimizarse con un correcto procedimiento constructivo.

Por lo tanto, las sobrecargas de uso junto con las calas y canalizaciones serán las principales causas del agotamiento del firme de estas vías urbanas, no las únicas, también pueden ser muy influyentes las condiciones climáticas, según la zona.

En propósito de valorizar y facilitar las actividades de conservación de los firmes urbanos, a continuación se expone el análisis de resultados de este estudio.

Es común a todas las tipologías de firme que:

- Sin un mantenimiento adecuado, los deterioros aparecerán a una edad temprana y evolucionarán a mayor velocidad al no tener un mantenimiento que los repare a tiempo. La ausencia de mantenimiento apropiado deriva en múltiples reparaciones puntuales de mayor envergadura ejecutadas cuando el grado de deterioro supone un peligro para los usuarios. La realidad de estas reparaciones “de urgencia” conlleva dos situaciones indeseables. La primera es que, durante un periodo temporal variable dependiendo del caso, la vía no ha estado proporcionando a los usuarios un servicio de calidad (en contraposición con la situación de una vía que sí recibe un mantenimiento adecuado, la cual en ningún momento pierde la calidad del servicio). La segunda es que es probable que cuando haya pasado un determinado tiempo, estos deterioros sean tan numerosos que se haga necesaria una rehabilitación en lugar de reparaciones puntuales, que devuelva al pavimento un buen nivel de servicio. En ese caso, la rehabilitación supondrá un desembolso económico muy superior.

- Con un mantenimiento adecuado, será necesaria una inversión inicial que costee los trabajos de inspección, evaluación y control de los deterioros, con los que conocer qué reparaciones son necesarias y cuándo es el momento propicio para efectuarlas. Estas reparaciones serán más numerosas pero de menor envergadura y coste, y mantendrán un buen nivel de servicio durante la mayor parte de la vida útil del firme, además de retrasar la edad a la que será necesaria una rehabilitación. A estos beneficios cabe añadir, como puede apreciarse con claridad, que efectuando una conservación apropiada los costes finales de mantenimiento serán considerablemente inferiores. Sin embargo, será necesaria una inversión inicial para costear los trabajos de inspección, evaluación y control de los deterioros.

Observando específicamente cada tipología de firme se deduce lo siguiente:

- **Firme flexible**

Esta es la tipología de firme en la que antes aparecen los deterioros. Es un comportamiento previsible, debido a la baja resistencia de la capa de rodadura que lo conforma. Por este mismo motivo, los deterioros evolucionan a una velocidad alarmante cuando no se aplican acciones de mantenimiento que los reparen a tiempo.

Sin un mantenimiento adecuado, este tipo de pavimentos se consideran prácticamente inviables económicamente para mantenerlos con un adecuado nivel de servicio.

Por lo tanto, aunque con un mantenimiento adecuado el número de deterioros disminuye, las labores para su inspección y control serán más numerosas y al fin de su vida útil más costosas que para las otras tipologías.

Finalmente, para que un firme asfáltico pueda llegar con un buen nivel de servicio a la edad de 30 años, además del intenso mantenimiento rutinario y correctivo correspondiente, necesitará de una considerable rehabilitación entre los 15 y 20 años de vida del mismo.

- **Firme rígido**

Sin una conservación adecuada, en esta tipología de firme aparecen muchos menos deterioros y mucho más tarde que en la tipología flexible, debido a la mayor resistencia de los materiales que conforman la capa de rodadura. Por lo tanto, un pavimento de hormigón realizado con losa de unos 18 o 20 cm es más que suficiente para soportar la intensidad de vehículos pesados que trata este trabajo, sin apenas sufrir deterioros.

No obstante, con una conservación adecuada, la vida útil del firme se alargará un tiempo considerable, llegando sin problemas a los 40 años. Las labores de conservación necesarias para firmes rígidos son menos, más fáciles y económicas.

Con el paso del tiempo, las únicas medidas de conservación que deben aplicarse sobre un firme rígido son la limpieza y sellado de juntas, para evitar que se introduzcan objetos que impidan la contracción y expansión del hormigón provocando su rotura, así como impedir la filtración de agua que afecte a la explanada.

- **Firme articulado**

Al igual que el caso del firme rígido, el firme articulado sin un mantenimiento adecuado tendrá pocos deterioros por la resistencia de los materiales que lo conforman.

En general, necesita de muy poco mantenimiento para mantener un buen nivel de servicio y sobrepasar la vida útil para la que fue diseñado. Las labores mínimas de mantenimiento que requiere este firme son el simple relleno de las juntas entre adoquines. Esta arena fina que ocupa el espacio que queda entre los adoquines ayuda a confinar los bloques lateralmente y transmite las cargas verticales entre ellos. Su papel en la resistencia y comportamiento del conjunto, es, pues, fundamental. Aparte de estas funciones básicas, el relleno de las juntas proporciona cierta impermeabilidad al pavimento, disminuyendo la infiltración de agua.

Por otra parte, como los adoquines no van pegados sino unidos por compactación, cuando se realice una reparación pueden ser usados de nuevo aquellos que no se hayan fracturado, disminuyendo el coste de la misma. El resultado final de la reparación, además de ser económico es estético.

Sin tener en cuenta el coste de construcción, en aquellos casos que no aseguren una adecuada conservación, sin duda el pavimento de hormigón y el de adoquín serán los más recomendables económicamente debido a la elevada resistencia de sus materiales con respecto a los pavimentos asfálticos. Éstos últimos no se consideran viables en ausencia de acciones de conservación adecuadas, debido a la multitud de deterioros que sufrirán y no serán reparados a tiempo. Por lo tanto, un firme asfáltico sin mantenimiento adecuado no tendrá un buen nivel de servicio que proporcione la seguridad y comodidad de la circulación.

El adoquín es el tipo de pavimento que más vida útil podrá alcanzar en un mejor estado. Las reparaciones puntuales que le son realizadas no afectan a la superficie de rodadura por lo que disminuye la probabilidad de desarrollar deterioros en puntos donde se han realizado reparaciones puntuales.

En general, los firmes rígidos o con base rígida, sólo necesitarán pequeñas labores de mantenimiento, rutinarias y correctivas, que mantendrán la calidad de este hasta el final de su vida útil, pudiendo incluso ampliarla. Por el contrario, para que un firme asfáltico pueda llegar con un buen nivel de servicio a la misma edad de vida útil que los anteriores firmes, además del intenso mantenimiento rutinario y correctivo correspondiente, necesitará de una rehabilitación entre los 15 y 20 años de vida del mismo.

Otro punto importante en cuanto al mantenimiento son las calas y canalizaciones, realizadas en cualquier tipo de pavimento para la reparación o renovación de redes subterráneas, que son frecuentemente puntos de potencial deterioro. Para evitar sobrecostes para la administración derivados de reparaciones de servicios públicos, se podrá establecer por parte de cada municipio un protocolo de reparación, que reúna los procedimientos constructivos necesarios para asegurar una buena resistencia de las mismas, como por ejemplo, los enumerados en las fichas de deterioros causados por reparación de calas o canalizaciones. Además de esto sería necesario establecer otros criterios como:

- La administración del municipio es responsable de avisar con un tiempo de antelación establecido, la rehabilitación o reconstrucción de la vía, para que las empresas privadas de servicios públicos que tengan o quieran colocar redes subterráneas, tenga la posibilidad de renovarlas o instalarlas en el momento adecuado.
- Generalmente, si estas compañías proponen abrir calas o canalizaciones en un firme relativamente nuevo, éstos deberán asumir los costes de reparación del firme, siguiendo los procedimientos de reparación establecidos por el municipio.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre el mantenimiento complementan a los extraídos del estudio de costes de construcción. Con su análisis conjunto puede alcanzarse el objetivo principal de este trabajo de investigación: obtener el tipo de pavimento urbano más económico al final de su vida útil, para vías urbanas con baja intensidad de tráfico.

CONCLUSIONES

Recordemos que el principal objetivo de este trabajo es obtener la tipología de firme más rentable al final de su vida útil, es decir, aquella cuyo coste conjunto de construcción y mantenimiento sea el menor posible. Para lograr este objetivo es necesario analizar conjuntamente los resultados de los dos estudios realizados en este trabajo:

Por una parte, a partir de los resultados del estudio de costes de construcción se concluye que:

- ✓ La tipología de firme con el precio de construcción más bajo es el firme flexible, asfáltico, con un precio medio de 21 €/m².
- ✓ La segunda tipología con menor precio es la de firmes rígidos, de hormigón, con un precio medio de 26 €/m².
- ✓ Por último, los firmes articulados tienen un precio de construcción considerablemente mayor, una media de 36 €/m².

Como se puede apreciar, aunque el precio del firme asfáltico sea el más barato, el precio del firme de hormigón no dista de él, y por eso, el firme de hormigón es un fuerte competidor, además de las múltiples ventajas que posee:

- Tiene precios fijos, algo que no acontece con el asfalto, que depende del precio del petróleo.
- Es procedente de la zona, beneficiando la economía local.
- Se puede construir con medios muy sencillos, con equipos simples y con mano de obra de baja capacitación.

Por otra parte, de los resultados del estudio cualitativo del mantenimiento se concluye que:

- ✓ En aquellos casos que no aseguren una adecuada conservación, sin duda el pavimento de hormigón y el de adoquín son los más recomendables debido a la elevada resistencia de sus materiales con respecto a los pavimentos asfálticos, los cuales no se consideran viables en ausencia de acciones de conservación adecuadas.
- ✓ Con un mantenimiento adecuado, los firmes rígidos y los articulados con base rígida serán mucho más beneficiosos, ya que además de necesitar pocas y simples labores de mantenimiento, este mantenimiento adecuado aumentará su vida útil de forma muy considerable, pudiendo llegar hasta los 40 años con

un buen nivel de servicio. Un bajo número de reparaciones y la baja dificultad de las mismas conllevan un menor coste del mantenimiento. En este caso será necesaria una inversión inicial que costee los trabajos de inspección, evaluación y control de los deterioros, con los que conocer qué reparaciones son necesarias y cuándo es el momento propicio para efectuarlas. Estos trabajos son mucho más necesarios en firmes flexibles, en los que aparecen deterioros con más frecuencia.

Sabiendo que la elección de un tipo de firme u otro va a depender de múltiples factores variables, de modo general y observando los resultados expuestos hasta ahora, este trabajo apuesta por el firme rígido como el pavimento que mejor se adapta a las necesidades de municipios de pequeño y mediano formato, (principalmente en cuanto a ahorro económico al final de su vida útil), al estudiar su coste de construcción y su mantenimiento.

La determinación de este trabajo por el firme rígido se aplica tanto a los casos en los que se ejecute una conservación adecuada como a aquellos en los que no haya actividades de mantenimiento. Este trabajo en todo momento apuesta por llevar a cabo estudios y seguimiento de las actividades de mantenimiento de cualquier tipo de firme (como el Sistema Simplificado de Gestión de la Conservación propuesto). Sin embargo, en ausencia de mantenimiento, el firme rígido, que además tiene un precio de construcción asequible, sufre menos deterioros que los firmes flexibles debido a la mayor resistencia de sus materiales.

Por lo tanto, aunque el firme rígido presenta un coste de construcción levemente superior al firme asfáltico, pesan mucho más sus ventajas en cuanto a resistencia, lo que conllevan un menor gasto en el mantenimiento, tanto en control de deterioros como en reparaciones, y una mayor vida útil conservando la calidad. Esta tipología de firme beneficia tanto a ayuntamientos como a ciudadanos por suponer menores costes y menores molestias por interrupciones del tráfico para ejecutar reparaciones.

Carlos Kraemer y Raúl Albelda afirman en su estudio *Evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC*, que “las secciones de firme de las categorías de tráfico T41 y T42 no se agotan por fenómenos de fatiga por repetición de cargas (soportan tráficos muy reducidos), sino por la acción de sobrecargas”. Esa realidad es aplicable de igual manera a las vías urbanas aquí estudiadas. Por lo tanto, es mucho mejor para estos casos un pavimento rígido, que es capaz de aguantar las sobrecargas mucho mejor que un pavimento flexible. Además este asegurará una correcta resistencia en el caso de aumentar el tráfico en la vía.

No obstante, ningún firme es infalible. Si en todos los casos es importante el correcto diseño de la sección, para el caso del firme rígido lo es aún más. Un diseño incorrecto de la sección de un firme rígido derivará en un gasto de rehabilitación o reconstrucción muy superior al que generaría el firme flexible en su mismo caso.

Como se ha dicho con anterioridad, la determinación por un tipo de firme no es estricta, sino que dependerá de las necesidades que pretendan subsanarse dentro del municipio. Por ejemplo, durante el trabajo de campo ha quedado comprobado que el pavimento de adoquín, pese a su alto precio de implantación, es el más usado en cascos históricos, centros urbanos y otros lugares de interés del municipio, donde el factor estético se sobrepone al económico. Se considera como una inversión ya que el municipio se verá compensado en cuanto a atractivo turístico e imagen interna.

A modo de resumen final, en la siguiente tabla se presentan las principales ventajas y desventajas desde el punto de vista económico y medioambiental de cada tipología de firme aquí estudiada.

		FIRME FLEXIBLE	FIRME RÍGIDO	FIRME ARTICULADO ¹
ECONÓMICO	VENTAJAS	• Coste de construcción bajo.	• Coste de construcción medio. • Mayor vida útil. • Menor necesidad de mantenimiento. • Mejor comportamiento frente a sobrecargas de uso y situaciones climáticas adversas. • El precio de sus materiales es estable. • Utilización de materiales locales para su fabricación.	• Mayor vida útil. • Menor necesidad de mantenimiento. • Mejor comportamiento frente a sobrecargas de uso y situaciones climáticas adversas. • El precio de sus materiales es estable. • Utilización de materiales locales para su fabricación.
	DESVENTAJAS	• Requiere mantenimiento continuo. • Vida útil media. • El asfalto depende del precio del petróleo. • Necesidad de maquinaria específica. Su alquiler sólo es rentable para grandes superficies.	• Un incorrecto diseño provoca importantes costes de rehabilitación o reconstrucción.	• Alto coste de construcción • Un incorrecto diseño provoca importantes costes de rehabilitación o reconstrucción
MEDIOAMBIENTAL	VENTAJAS	• Posibilidad de reciclar sus materiales.	• Ausencia de lixiviados. • Mejor reflectancia de la luz y reducción del efecto de las islas de calor. • Posibilidad de reciclar sus materiales.	• Reutilización de un gran porcentaje de adoquines tras cualquier reparación o al final de su vida útil.
	DESVENTAJAS ²	• Al contacto con el agua produce lixiviados.		

(1) El firme articulado está formado por una capa de adoquines prefabricados de hormigón apoyados sobre una cama de arena y una base rígida de hormigón.

(2) Desventajas después de su implantación.

Una vez logrado el objetivo principal de este trabajo, se exponen a continuación las siguientes conclusiones específicas:

- Con el Sistema Simplificado de Gestión de la Conservación creado en este trabajo para firmes urbanos con baja intensidad de tráfico, se proporciona una

herramienta simple que facilita la implantación de un mantenimiento adecuado por parte de los técnicos responsables de los municipios de pequeño y mediano formato. Con él se facilita la implantación de estrategias de conservación, mediante la evaluación de los deterioros y el estudio de las reparaciones, que mejoren la eficiencia en el uso de los recursos, además de posibilitar la obtención de justificaciones fundamentadas con datos reales, para el financiamiento de las actividades de mantenimiento a realizar.

- El pequeño catálogo de secciones creado para firmes urbanos con baja intensidad de tráfico servirá como consulta para técnicos que quieran conocer las secciones y los precios aplicables a vías urbanas con una determinada calidad de la explanada.
- Las tablas de deterioros creadas para el estudio del mantenimiento, sirven como material de apoyo para la evaluación del estado de los firmes con las fichas de inspección visual.
- Con el estudio del mantenimiento se ha identificado uno de los principales problemas del deterioro en firmes urbanos, las calas y canalizaciones. Éstas se deben principalmente a la reparación o renovación de redes subterráneas, haciéndose aún más grave cuando se encuentran en la zona de rodadura de los vehículos. Para la reparación de los firmes en estos casos se ha realizado un protocolo de actuación que asegure una buena reparación de las mismas.

De este trabajo se extraen las siguientes conclusiones generales:

- Existe poco interés a nivel nacional por las redes locales a cargo de los ayuntamientos. Para el diseño de pavimentos en vías urbanas se utilizan generalmente la Norma para Carreteras 6.1-IC, ya que apenas se conocen catálogos específicos para el diseño de pavimentos en vías urbanas, las cuales tienen unas funciones y requisitos específicos, que sólo coinciden en algunos aspectos con los de carreteras.
- Además de no existir normativa nacional específica que regule el diseño y mantenimiento de estos firmes urbanos, no existen datos actualizados sobre su longitud, tipología y características desde el año 1998, a pesar del enorme peso que suponen en la red vial nacional, un 15%, sólo la red urbana de municipios de menos de 50.000 habitantes.
- Este trabajo aporta material de estudio específico sobre firmes urbanos para vías de baja intensidad de tráfico: diseño de secciones, estudio de deterioros y reparaciones.

Finalmente, este trabajo no quiere concluir sin resaltar la ventajas que producirá la implantación de un buen sistema de mantenimiento de los firmes urbanos, que supondrá una inversión inicial mayor pero a la larga se traducirá en un beneficio económico,

El implantar o no un sistema de gestión de la conservación es una decisión política, ya que el político es quien decide destinar o no los recursos económicos a esta labor. Por ello, este trabajo insta a los técnicos responsables a concienciar a la autoridad política correspondiente sobre la importancia de una gestión adecuada de las labores de conservación y de los beneficios que de ella derivarán a largo plazo.

Por lo tanto, Este Trabajo de Fin de Grado reconoce y defiende la importancia de un buen mantenimiento y concluye coincidiendo con la idea del escritor francés Édouard Herriot:

“El valor de una civilización se mide, no por lo que sabe crear, sino por lo que sabe conservar”.

BIBLIOGRAFÍA

NORMATIVA

- Consejería de Obras Públicas y Transporte (2006). *Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- Dirección General de Carreteras (1989). Orden FOM/3460/2003. *Instrucción 6.1-IC Secciones de firme*. Madrid: Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Dirección de Inversión Pública (2005). *Guía sectorial: Pavimentos*. Buenos Aires: Ministerio de Economía.
- Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (1976). Orden FOM/2523/2014. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*. Madrid: Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Secretaría General Técnica (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- Servicio de Coordinación de Obras e Infraestructuras (2007). *Catálogo de firmes y pavimentos de la Ciudad de Valencia*. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Servicio de Coordinación de Obras e Infraestructuras (2013). *Guía de pavimentos de hormigón*. Valencia: Generalitat Valenciana.

LIBROS

- Augusto Jugo, B. (1993). *Manual de mantenimiento y rehabilitaciones de pavimentos flexibles (versión revisada 2005)*. Caracas: Acciones Básicas.
- Bañón Blázquez, L. y Beviá García, J. F. (2000). *Manual de Carreteras. Volumen I: elementos y proyecto*. Alicante: Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana, Universidad de Alicante.
- Rama Labrador, F. (2013). *Manual de conservación de los pavimentos en la red viaria urbana*. Madrid: Bellisco Ediciones.
- ELSAN-PACSA (2003). Monografía nº2 “*Las vías urbanas*”.
- Euroadoquín (2004). *Manual Técnico para la correcta colocación de los Euroadoquines (MTCE-04)*. Madrid: Asociación Española para la Investigación y Desarrollo del Adoquín de Hormigón.

PONENCIAS

- Calo, D. y Souza, E. (mayo, 2013). *Proyecto y ejecución de reparaciones en pavimentos*. Ponencia presentada en las Jornadas de actualización técnica de la Dirección Nacional de vialidad.
- Costa Hernández, A. (2011). *Mezclas en caliente: capas finas y ultrafinas*. Ponencia presentada en la Jornada Técnica, Actuaciones en firmes en un entorno de crisis.
- Del Val, M. A. (2014). *La conservación como prioridad de las políticas viarias en redes locales*. Ponencia presentada en el 22º Symposium Nacional de Vías y Obras de la Administración Local, Zaragoza.

TESIS

- Alarcón Ibarra, J. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. (Tesis de Doctorado) Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Alberto Alonso, R., Flores López, J. y Sánchez Beltrán, J. (2012). *Manual de mantenimiento en vías urbanas, utilizando mezclas asfálticas en caliente, tibia y en frío*. (Tesis de Graduación). Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria.
- Miranda Rebolledo, R. J. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*. (Tesis de Maestría). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Osuna Ruiz, R. E. (2008). *Propuesta para la implementación de un Sistema de Administración de Pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán, Sin.* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

OTRAS PUBLICACIONES

- Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002). *Catálogo deterioros de pavimentos rígidos*. Montreal: Colección de Documentos.
- Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002). *Catálogo deterioros de pavimentos flexibles*. Montreal: Colección de Documentos.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2002). *Manual de Pavimentos de Hormigón para Vías de Baja Intensidad de Tráfico*. Madrid: IECA.

- González, R., Soengas, C. y Botasso, G. (2005). *Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos en Áreas Urbanizadas*. La Plata: Laboratorio de materiales de construcción, Facultad Regional La Plata.
- *Patología de Pavimentos Articulados*. (2010) Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 9, núm.17, julio-diciembre. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia.
- Conservación de Pavimentos: Metodología y Estrategias. Delmar Salomón, Presidente. Pavement Preservation System, L.L.C. Box, USA.

WEBS

- Base de Coste de la Construcción de Andalucía 2015, BCCA 2015.
(<http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/403b7931-0d21-11e6-a18a-052bf9b4a08b>)
- Base de precios de Construcción, PREOC 2015.
(www.preoc.es)
- Generador de precios de la construcción, CYPE Ingenieros.
(www.generadordeprecios.info)