



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Título de la Tesis

“Estudio de caso en la rehabilitación por emergencia de tramo carretero en operación en una autopista tipo A-3.”

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

Miguel Ángel Ramos Aguilera

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Héctor Sanginés García



Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Asunto: Propuesta de tema de tesis

OFICIO No.

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
DIRECTOR DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM.
PRESENTE

En atención a su oficio de fecha _____, en el que se solicita proponer la tesis para que sea desarrollada por el señor Miguel Ángel Ramos Aguilera, registrado con número de cuenta 8638343-3, y pueda presentar su Examen Profesional de la Carrera de Ingeniero Civil, me permito someter a su consideración el siguiente:

Tema: "Estudio de caso en la rehabilitación por emergencia de tramo carretero en operación en una autopista tipo A-3."

Introducción

Capítulo 1. Síntesis Bibliográfica.

Capítulo 2. Identificación del estado de degradación del pavimento.

Capítulo 3. Redimensionamiento de la estructura del pavimento.

Capítulo 4. Seguimiento y evolución de las estructuras de pavimento.

Capítulo 5. Conclusiones.

Bibliografía.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., a 13 de marzo de 2006.

M. I. RICARDO PADILLA VELASQUEZ

Teléfono del alumno: casa 56453887, oficina: 55543975

Dedicatoria u Hoja de Guarda

Contenido

Índice de Tablas.....	3
Índice de Figuras	4
Introducción	6
Capítulo 1. Generalidades sobre funcionamiento de pavimentos.....	9
1.1. Características de evaluación de pavimentos	11
1.2. Tipos y funcionamiento.....	12
1.2.1. Pavimentos flexibles.....	12
1.2.2. Pavimentos rígidos	16
1.3. Características y funciones de las capas del pavimento	19
1.3.1. Suelos de desplante	20
1.3.2. Cuerpos de terracerías	21
1.3.3. Cuerpos estructurales	23
1.3.4. Capas de rodamiento y superficiales	25
1.4. Seguimiento de la evolución de pavimentos	26
1.4.1. Criterios de intervención y mantenimiento	26
1.4.2. Identificación de fallas en pavimentos.....	29
1.4.3. Calidades mecánicas y rigidez	30
1.4.4. Método del valor soporte de California (CBR)	31
1.5. Control del estado hídrico.....	34
1.5.1. Tipos de denaje en carreteras.....	36
1.5.2. Subdrenaje	41
Capítulo 2. Identificación del estado de degradación del pavimento.....	43
2.1. Antecedentes y ubicación del pavimento a rehabilitar	43
2.2. Evaluación de degradaciones en la superficie de rodamiento	55
2.2.1. Estado del pavimento original.....	55
2.2.2. Estado del pavimento rehabilitado con bacheos.....	61
2.3. Exploración de las capas estructurales del pavimento	66
2.3.1. Carpeta asfáltica.....	70
2.3.2. Base y subbase granular hidráulica	70
2.3.3. Terracerías.....	73
2.3.4. Elementos de drenaje	74

2.4.	Diagnóstico de la problemática y características de las capas.....	76
2.4.1.	Necesidades de reforzamiento y reconstrucción.....	77
Capítulo 3. Redimensionamiento de la estructura del pavimento		79
3.1.	Reforzamiento de la estructura existente.....	79
3.2.	Diseño de estructura de pavimento nueva	82
3.3.	Adecuaciones al sistema de drenaje	92
3.4.	Procedimiento constructivo	95
3.5.	Especificaciones de control de calidad.....	98
Capítulo 4. Seguimiento y evolución de las estructuras de pavimento		106
4.1.	Estado del pavimento.....	106
4.1.1.	Pavimentos con bacheo profundo y sobrecarpeta asfáltica	106
4.1.2.	Pavimentos con una estructura nueva.....	117
4.2.	Estudio de deflexiones de las alternativas estructurales	124
4.3.	Estado actual de los pavimentos rehabilitados.....	129
Capítulo 5. Conclusiones		133
Bibliografía		136

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Especificación AASHTO M146 para clasificación de suelos</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2 - Características mecánicas de materiales para Terraplén.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3 - Características mecánicas de materiales para Subyacente.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4 - Características mecánicas de materiales para Subrasante.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5 - Características mecánicas de materiales para Bases Hidráulicas.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6 - Características mecánicas de materiales para Bases Estabilizadas con Cemento Portland.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7 - Características mecánicas de materiales para Subbases Hidráulicas.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 8 - Características mecánicas de mezclas asfálticas por el método Marshall para carpetas.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 9 - Propiedades promedio de la capa de base hidráulica en los sondeos de exploración.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 10 - Propiedades promedio de la capa de subbase hidráulica en los sondeos de exploración.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 11 - Propiedades promedio de las capas de subrasante y terraplén en los sondeos de exploración.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 12 – Deflexiones de diferentes secciones de pavimento obtenidas con la Viga Benkelman.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 13 – Número estructural SN y espesor total de terracerías por tipo de estructura de pavimento.....</i>	<i>128</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de distribución de esfuerzos en un pavimento de estructura flexible.	15
Figura 2 – Ejemplo de pavimento de estructura flexible con falla generalizada mecánica y funcional.	16
Figura 3 – Esquema de distribución de esfuerzos en un pavimento de estructura rígida.	18
Figura 4 – Ejemplo de pavimento de estructura rígida con falla generalizada mecánica y funcional.	19
Figura 5 – Esquema del concepto de índice de servicio.	27
Figura 6 – Esquema de la estrategia de mantenimiento del pavimento conforme al índice de servicio.	28
Figura 7 – Tabla de deflexión tolerable para espesores variables de concreto asfáltico.	31
Figura 8 – Guía de diseño de recubrimiento de concreto asfáltico.	32
Figura 9 – Reducción de la deflexión resultante de la reconstrucción del pavimento.	33
Figura 10 – Ubicación de distintos sistemas de cunetas.	37
Figura 11 – Ubicación de contracuneta en camino.	37
Figura 12 – Bombeo en tangente.	38
Figura 13 – Proyección de vado en un camino.	39
Figura 14 – Proyección de tubo en terraplén.	40
Figura 15 – Ubicación de los trabajos de rehabilitación por tramos.	43
Figura 16 – Vista aérea de la localización de los sitios de trabajos de rehabilitación.	44
Figura 17 – Información climática de los sitios de trabajos de rehabilitación.	46
Figura 18 – Información topográfica de los sitios de trabajos de rehabilitación.	48
Figura 19 – Información geológica de los sitios de trabajos de rehabilitación.	49
Figura 20 – Información edafológica de los sitios de trabajos de rehabilitación.	51
Figura 21 – Zonificación sísmica de los sitios de trabajos de rehabilitación.	53
Figura 22 – Esquema de las capas de carpeta y base hidráulicas tratadas con bacheos profundos.	54
Figura 23 – Carpeta asfáltica en el km 47+000 al km 53+000 del cuerpo único, abril de 2012.	55
Figura 24 – Carpeta asfáltica km 47+500 cuerpo único, abril de 2012.	56
Figura 25 – Carpeta asfáltica en el km 48+000 cuerpo único, abril de 2012.	57
Figura 26 – Carpeta asfáltica km 51+200, abril de 2012.	58
Figura 27 – Carpeta asfáltica km 51+250, abril de 2012.	59
Figura 28 – Carpeta asfáltica km 52+600, abril de 2012.	61
Figura 29 – Ejemplo de bacheo superficial (reposición de carpeta asfáltica), mayo de 2012.	62
Figura 30 – Ejemplo de bacheo profundo (reposición de subbase, base y carpeta asfáltica), mayo de 2012.	63
Figura 31 – Carpeta asfáltica con piel de cocodrilo apenas 3 meses después de rehabilitada, agosto de 2012.	63
Figura 32 – Carpeta asfáltica con grietas y atrición 3 meses después de rehabilitada, agosto de 2012.	64
Figura 33 – Borde de zona bacheada fracturada con escurrimientos y pérdida de finos, agosto de 2012.	65
Figura 34 – Extracción de muestra de carpeta asfáltica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.	66
Figura 35 – Extracción de muestra en capa de base hidráulica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.	67
Figura 36 – Extracción de muestra en capa de subbase hidráulica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.	68
Figura 37 – Extracción de muestras en capas de terracerías para análisis en laboratorio, agosto de 2012.	68
Figura 38 – Sección estructural del pavimento verificada después de sondeos a cielo abierto, agosto de 2012.	69
Figura 39 – Gravas mal graduadas y empacadas en finos plásticos, septiembre de 2012.	71
Figura 40 – Sondeo en capas de base y subbase con escurrimiento de agua, septiembre de 2012.	71
Figura 41 – Saturación y escurrimiento de agua a nivel de subbase y terracerías, septiembre de 2012.	73
Figura 42 – Sección tipo de la estructura del pavimento con sub-drenes laterales, septiembre de 2012.	75
Figura 43 – Saturación y escurrimiento en los sub-drenes laterales, septiembre de 2012.	75
Figura 44 – Guía de diseño de recubrimiento de concreto asfáltico.	80

Figura 45 – Tabla de deflexión tolerable para espesores variables de concreto asfáltico.	81
Figura 46 – Sección de pavimento existente, reforzada con una sobrecarpeta de concreto asfáltico.	82
Figura 47 - Sección estructural nueva sobre capas drenantes.	85
Figura 48 – Preparación de zanja para dren lateral en sitios de saturación de humedad, octubre de 2012.	94
Figura 49 – Dren lateral relleno con material de pedraplén y tezontle grueso, octubre de 2012.	94
Figura 50 – Ejemplo de zona de pavimento a rehabilitar con bacheo profundo y sobreespesor de carpeta.	107
Figura 51 – Retiro de la capa de rodamiento en concreto asfáltico.	108
Figura 52 – Retiro de la capa de base granular hidráulica.	108
Figura 53 – Retiro de la capa de subbase granular hidráulica y sub-rasante saturados.	109
Figura 54 – Tendido y compactación de la capa de base hidráulica repuesta.	109
Figura 55 – Pruebas de control de compactación a materiales granulares hidráulicos en base y subbase.	110
Figura 56 – Riego de liga con emulsión de asfalto sobre la capa de base granular hidráulica.	110
Figura 57 – Colocación de la capa de rodamiento en concreto asfáltico con AC-20 modificado con SBS.	111
Figura 58 – Control de temperatura de colocación del concreto asfáltico con AC-20 modificado con SBS.	111
Figura 59 – Ejemplo de superficie de rodamiento al final de los trabajos de bacheo profundo con sobrecarpeta.	112
Figura 60 – Ejemplo de bache de rápido desarrollo en zona previamente rehabilitada con sobre carpeta.	113
Figura 61 – Detalle de la zona con hundimiento, fisuración intensa, expulsión de finos y bache.	113
Figura 62 – Desintegración de la carpeta asfáltica en zona con bacheo profundo y sobre carpeta.	114
Figura 63 – Detalle del bache relleno con gravas.	114
Figura 64 – Zona de bacheo profundo limitando con zona de degradación acelerada.	115
Figura 65 – Zona de pavimento fallada (primer plano) seguida de zona rehabilitada (fondo).	116
Figura 66 – Zona de pavimento fallada (primer plano) seguida de zona rehabilitada (fondo).	117
Figura 67 – Remoción de las capas del pavimento degradado hasta la profundidad del nuevo proyecto.	118
Figura 68 – Retiro de los subdrenes laterales en los tramos donde se encontraron.	119
Figura 69 – Colocación de material de para la capa de pedraplén filtrante sobre terracerías compactadas.	119
Figura 70 – Colocación de capa de sub-yacente en materiales filtrantes gruesos y ligeros.	120
Figura 71 – Colocación de capa de subrasante en materiales filtrantes medios y ligeros.	120
Figura 72 – Control de calidad de los materiales de la capa subrasante.	121
Figura 73 – Colocación de la capa de subbase granular hidráulica.	121
Figura 74 – Colocación de la capa de base granular tratada con 2% de cemento Portland.	122
Figura 75 – Tendido y compactación de la capa de rodamiento en concreto asfáltico modificado con SBS.	122
Figura 76 – Zona de pavimento fallada (primer plano) adyacente a zona reconstruida (fondo).	123
Figura 77 – Esquema de la estructura “Opción 1” para la rehabilitación del pavimento.	124
Figura 78 – Esquema de la estructura “Opción 2” para la rehabilitación del pavimento.	124
Figura 79 – Esquema de la estructura “Opción 3” para la rehabilitación del pavimento.	125
Figura 80 – Esquema de la estructura “Estructura Nueva” para la rehabilitación del pavimento.	125
Figura 81 – Zona de pavimento fallada (primer plano) adyacente a zona reconstruida (fondo).	127
Figura 82 – Estado actual (mayo 2017) de sección de pavimento con estructura propuesta.	129
Figura 83 – Carril de alta velocidad (izquierdo) en estructura propuesta en servicio desde 2012.	130
Figura 84 – Sección propuesta sin problemas después de 5 años de servicio.	130
Figura 85 – Tramo reconstruido con la sección propuesta sin problemas superficiales ni estructurales.	131

INTRODUCCIÓN

Las necesidades de mantenimiento del pavimento de una autopista engloban diferentes actividades que tienen por objetivo el conservar de la mejor manera posible el conjunto de propiedades mecánicas y funcionales con las que fue diseñada dicha estructura. De manera sencilla se puede decir que las necesidades de mantenimiento derivan de las solicitaciones del tráfico circulante que, convertidas en esfuerzos mecánicos obtienen del pavimento una respuesta según la configuración de las capas estructurales y de terracerías.

Desde el punto de vista mecánico, el paso de vehículos produce invariablemente degradaciones tanto superficiales como de tipo estructural que, según del modo de funcionamiento de proyecto del pavimento, originarán un patrón de degradaciones que serán representativos de los diferentes factores que afectan la vida útil o de servicio del pavimento. En consecuencia, las necesidades de mantenimiento están en evolución constante y su determinación correcta y oportuna constituye una de las claves para establecer una estrategia de conservación eficaz.

Conjuntamente con el análisis del tráfico y su influencia en el patrón de degradación, es muy importante el llevar a cabo un diagnóstico de las características mecánicas y funcionales de cada una de las capas presentes en una configuración estructural determinada. La manera en que las capas se encuentren presentes, sus espesores y sus calidades tienen una influencia mayor en la determinación del modo de funcionamiento y de degradación del pavimento. La manera en que la estructura del pavimento difumina y transmite los esfuerzos al suelo determina fuertemente la respuesta del mismo. En el mismo sentido, la utilización o no de ligantes hidráulicos o asfálticos condiciona el modo de falla proyectada del pavimento, sea en fatiga para las capas ligadas o por punzonamiento en las capas no ligadas.

En consecuencia, la determinación de una estrategia de mantenimiento o de rehabilitación de un pavimento debe de considerar invariablemente una serie de estudios y análisis básicos que van desde el conocimiento de las características del tráfico vehicular hasta las propiedades mecánicas y geométricas de una determinada configuración estructural.

En el presente documento se presenta el caso de estudio de la Autopista Arco Norte, en su tramo del Km 39+000 al 53+500, que presenta una problemática recurrente de degradaciones prematuras de muy rápido desarrollo desde su apertura en 2009. El conjunto de trabajos que se realizan en el tramo citado va desde tratamientos superficiales hasta la reposición parcial de la estructura del pavimento mediante carpeta asfáltica y/o base granular hidráulica. Sin embargo, año tras año se presenta la misma problemática donde tramos completos de pavimento llegan a un estado de servicio nulo desarrollando baches profundos y zonas de falla por fatiga generalizada, lo que penaliza la calificación general de la vialidad y crea situaciones de riesgo para el usuario.

Desde el punto de vista del concesionario de la autopista, este problema le genera una condición de trabajos recurrentes con un gasto elevado y fuera de toda consideración o estrategia de mantenimiento inicial; además claro de afectar su imagen y el seguimiento que se hace de la autopista por parte de las instituciones gubernamentales competentes.

Como parte del quehacer profesional y la experiencia adquirida, el ingeniero responsable de la ejecución de los trabajos de rehabilitación bajo las consignas de la empresa concesionaria ha planteado la necesidad de llevar a cabo acciones correctivas diferentes de las encomendadas originalmente con el objetivo de aportar soluciones prácticas y efectivas a la problemática de mantenimiento recurrente. A través de las herramientas de análisis y diagnóstico apropiadas y de un marco normativo específico mexicano, se realizó un trabajo completo que permitió no solo validar las nociones básicas desde la etapa de diseño de pavimentos, sino también la formulación de los materiales a colocar y sus procedimientos constructivos. En los capítulos que constituyen el presente documento se presenta el desarrollo de los procesos individuales que permitieron el trabajo descrito.

En el Capítulo 1 se presenta un resumen o síntesis bibliográfica específica que constituye el andamiaje teórico y normativo que permite el análisis de la problemática general del pavimento. Le objetivo básico del capítulo es el proporcionar los elementos necesarios para poder llevar a cabo una interpretación de los modos de funcionamiento y de degradación de las diferentes estructuras de pavimento; haciendo hincapié en las características y funciones de cada capa, además de proveer los criterios para la identificación de los tipos de fallas en los pavimentos según su tipo estructural o superficial.

A partir de los elementos de análisis presentados, el Capítulo 1 lleva a cabo el análisis teórico y experimental del estado de degradación de los tramos de pavimento existente, a basado en un reconocimiento de las características de la superficie de rodamiento y a través de la exploración física de las capas del conjunto estructural. Ambos elementos combinados permiten llevar a cabo un diagnóstico más preciso de la problemática funcional y estructural del pavimento por cada una de sus capas. Resultado último del análisis, se obtienen las necesidades de reforzamiento o de reconstrucción de la vialidad.

En consecuencia, el Capítulo 1 presenta las posibilidades de redimensionamiento de la estructura del pavimento a través de un diseño que intenta dar solución a los problemas detectados en las capas individuales del pavimento, del suelo, en las condiciones de operación de la vialidad y para una vida útil indicada por el concesionario de la autopista. Las intervenciones de rehabilitación planteadas son dos: una en función de un reforzamiento estructural con un sobreespesor de carpeta asfáltica y la segunda a partir de una estructura completamente nueva que responda a los problemas reseñados. Se proponen adecuaciones adicionales como al sistema de drenaje y se proporcionan los elementos de procedimientos constructivos y especificaciones para el control de calidad.

El Capítulo 1 presenta el seguimiento y la evolución que se apreciaron en los pavimentos reconstruidos bajo las alternativas desarrolladas en el apartado de redimensionamiento. En este capítulo se puede apreciar como las soluciones específicas aportadas, a través del análisis detallado de los diferentes elementos que afectan el modo de degradación de un pavimento, presentan mejor comportamiento tanto mecánico y funcional para las condiciones de tráfico presentes. Del mismo modo se puede apreciar como otras alternativas cuyo desarrollo no corresponde a las necesidades determinadas no conllevan a resultados satisfactorios incluso a muy corto plazo. En consecuencia, se puede también deducir fácilmente cuales son las condiciones que hacían fallar el pavimento existente de manera prematura y el por qué los trabajos que se programaban carecían de eficacia.

Finalmente, el Capítulo 1 presenta las conclusiones obtenidas de la experiencias teóricas y prácticas de la intervención en el análisis de comportamientos de pavimentos, la correcta interpretación de sus modos de degradación para obtener sus necesidades de reforzamiento y/o adecuación.

Capítulo 1. GENERALIDADES SOBRE FUNCIONAMIENTO DE PAVIMENTOS

Una estructura de pavimento es el conjunto de capas de materiales cuidadosamente seleccionados para que reciban de manera directa las cargas del tránsito previsto para el camino ([Estructuración de vías terrestres, 1999](#)). El objetivo de dicha estructuración es que los esfuerzos inducidos por el tráfico se transmitan de manera uniforme a las capas inferiores y que estas trabajen en conjunto para darle buen funcionamiento al camino. Desde el punto de vista del usuario, la capa más importante es la carpeta rodamiento que, además de su aporte estructural, proporciona confort y seguridad a los automóviles.

A partir del concepto descrito, el funcionamiento de una estructura de pavimento debe de responder a los criterios mecánicos y empíricos empleados a lo largo de las diferentes etapas de su construcción, a saber:

- **Etapas de diseño o dimensionamiento.**

La etapa de diseño de un pavimento es de especial importancia, toda vez que es, desde el punto de vista estructural, el inicio del proceso general que determinará las características de la estructura del pavimento, su comportamiento y necesidades de mantenimiento previstas.

En esta etapa se presentan análisis muy específicos que portan sobre el conocimiento e interpretación de calidades mecánicas y comportamientos de los materiales que habrán de ser incluidos en el diseño de la configuración estructural del pavimento. De igual manera, es de suma importancia la correcta interpretación de las características y propiedades de suelo de desplante de la estructura proyectada a lo largo del trazado general de la misma. En consecuencia, deberán de estudiarse de manera detallada, aspectos geológicos e hidrológicos de la zona que ocupará la vialidad proyectada. Igualmente, importante es la modelización de los datos de tráfico que constituirán el conjunto de solicitaciones (mecánicas y funcionales) a las que deberá de responder el pavimento a lo largo de su vida útil o de servicio.

De manera general, los métodos de diseño o dimensionamiento de estructuras de pavimento sean de naturaleza semi-empírica o mecanicista, recopilan toda una serie de conceptos, hipótesis y modelos de cálculo que constituyen la estrategia de dimensionamiento general. Dicha estrategia presenta una secuencia lógica y un proceder metódico que determina cada uno de los componentes generales de una estructura de pavimento, a saber: cuerpo de terracerías, capas de desplantes, capas que constituyen el cuerpo estructural, capas de rodamiento (con o sin aporte estructural) y capas superficiales o de desgaste.

La estructura general del pavimento, resultante del proceso de diseño, presenta una configuración básica de capas, espesores y calidades mecánicas que deben ser respetadas en la etapa de diseño. Esta configuración conlleva de manera implícita un modo de comportamiento y, por tanto, de degradación previsto. El respeto de las consignas constructivas conforme a las calidades y especificaciones de diseño es la base del correcto funcionamiento del pavimento.

En México, si bien se tiene acceso a diversos métodos de diseño de pavimento, es de uso común que las entidades gubernamentales encargadas de la gestión y revisión de las infraestructuras viales utilicen dos métodos: AASHTO 1997 ([Guide specifications for Design of Pedestrian Bridges, 1997](#)) y DISPAV 5 ([Diseño Estructural de Pavimentos Asfáltico, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones, 1999](#)). Estos métodos,

no obstante, su naturaleza semi-empírica, son bien conocidos en el ámbito y por los responsables técnicos encargados de los pavimentos. Por consecuencia, para el caso que se presenta en este documento, se tomarán como la base de los elementos de análisis de pavimentos, sin dejar de reconocer la existencia y aplicabilidad de métodos más recientes. En especial se hará énfasis en el uso del método AASHTO 1993, toda vez que existe una base de conocimiento y aplicabilidad más desarrollada que en otros métodos, además de presentar un módulo específico para el reforzamiento y rehabilitación de pavimentos ([Aashto Guide for Design of Pavement Structures, 1993](#)).

- **Etapas de construcción.**

Producto directo de la etapa de diseño, la construcción de la estructura del pavimento debe de responder en toda coherencia a las especificaciones de calidades mecánicas y geométricas, de todas las capas proyectadas. Cada material a emplearse en alguna de las capas debe respetar un proceso constructivo específico que permite garantizar la obtención de las calidades mínimas utilizadas en el diseño. Los constituyentes de los materiales a emplear (agregados pétreos, ligantes, aditivos, adiciones minerales, modificadores, etc.) deben también ser especificados conforme a los criterios de diseño y sus calidades respectivas.

Adicionalmente a las calidades de diseño de cada capa de material, existe un marco normativo específico en México para algunos de los procesos constructivos de carreteras y autopistas en general. La Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT) ([Normativa para la infraestructura del transporte, s.f.](#)) presenta de manera detallada una base de documentación específica que constituye el andamiaje legal dentro del cual se deben circunscribir las actividades necesarias para la construcción y operación de las vialidades.

En la medida que la normatividad sea acorde a los métodos de diseño empleados, las calidades y procedimientos constructivos a emplear serán los adecuados. Sin embargo, en varios casos la normativa citada no es exhaustiva en la definición de los criterios, calidades ni procedimientos a utilizar. En dichos casos, la adecuación de los procedimientos constructivos debe de llevarse a cabo teniendo siempre en mente el cumplimiento de los estándares de desempeño de diseño.

Un aspecto sumamente importante a tener en cuenta es el empleo de diferentes métodos de formulación de materiales para las capas de materiales (en especial los concernientes a mezclas para capas de base estructural y de capas de rodadura, sean principalmente en materiales tratados con ligantes hidrocarbonados e hidráulicos, aditivados o no). En años recientes, estos métodos han rebasado a aquellos que propuestos en los métodos de diseño de estructuras de pavimentos (ej. la normativa SHRP ([Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, 1993](#)), que sustituyó al Marshall ([Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, 2005](#)) en pavimentos asfálticos). No obstante, es necesario siempre tener en cuenta que, independientemente del método de formulación utilizado, los materiales compuestos resultantes deben de presentar al menos las características mecánicas previstas en el diseño.

Del mismo modo, el avance tecnológico que se evidencia en los equipos de construcción que se presentan en la actualidad, hace necesario el revisar los procedimientos constructivos a emplear, según la capa de pavimento de la que se trate.

- **Etapas de mantenimiento.**

Durante la vida útil de la estructura del pavimento, en especial en los periodos de mantenimiento, es de especial importancia el poder llevar a cabo un diagnóstico correcto de la patología de degradación que presentan las capas del pavimento a evaluar. Dicha patología es consecuencia directa del conjunto de hipótesis que dieron origen a la estructuración desde la etapa de diseño, de las calidades mecánicas efectivas de las capas del pavimento logradas por los procedimientos constructivos específicos y del funcionamiento de las capas estructurales y de superficie según las exigencias del tráfico circulante.

Si el conjunto de las actividades de las etapas de diseño y de construcción fueron bien logradas (dentro de los márgenes de repetitividad de cada proceso), salvo las variaciones propias de cada etapa, la patología de degradación debe poder ser fácilmente identificable, pudiéndose apreciar el comportamiento individual de cada capa del pavimento y su influencia dentro del conjunto estructural.

Aunado a la patología de degradación, el conjunto de hipótesis de diseño de pavimentos prevé (según el método de diseño específico que se utilice) las condiciones generales del funcionamiento de la estructura: rigidez, fatiga, roderas, degradaciones estructurales y degradaciones superficiales, desviaciones en la calidad de materiales, etc. ([Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, 2005](#)) La importancia del conocimiento del modo de degradación previsto es clara si considera que cualquier maniobra o intervención con fines de mantenimiento debe de poder solucionar de manera puntual los problemas específicos que la estructura presente, es decir, el llevar a cabo la reposición exacta de las características de la estructura que se ha degradado, siguiendo el patrón previsto por el diseño.

Otro aspecto importante del conocimiento del modo de función y de degradación de una estructura de pavimento es, según su importancia dentro de la red carretera a la que pertenezca y de las políticas de gestión; el diseño de la estrategia general de exploración del pavimento, su periodicidad y trabajos a ejecutar, su calendarización y programación de erogaciones, la gestión de la infraestructura, adecuación de materiales estructurales y de superficie, innovaciones tecnológicas, etc.

Cuando no se tiene claro cuál es la patología de funcionamiento y de degradación del pavimento que se estudia, es fácil incurrir en defectos de redimensionamiento o reforzamiento de las estructuras de pavimentos. Intervenciones de que solo realizan aportes de superficie sin considerar el comportamiento de las capas estructurales ni de suelo, generalmente conllevan a patrones de degradación acelerado y que muy a menudo se desvían del comportamiento estructural previsto. En el caso del pavimento que es el objeto de estudio del presente documento es justamente el conjunto de errores a lo largo de las etapas de diseño, construcción y de mantenimiento, lo que está en el origen de las intervenciones ineficientes. Como se verá en los capítulos subsecuentes, las estructuras propuestas, sus materiales y las configuraciones de capas se diseñaron a partir de la correcta valoración de las etapas descritas en los párrafos anteriores.

1.1. CARACTERÍSTICAS DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

El modo de funcionamiento de una estructura de pavimento es, en términos generales, la manera en que las sollicitaciones mecánicas inducidas por el tráfico circulante son transferidas a las diferentes capas de la configuración estructural bajo análisis. Dicha configuración repartirá los diferentes esfuerzos a las capas

estructurales y sub-estructurales, permitiendo que no se superen los estados límite definidos en términos de deformaciones máximas o esfuerzos máximos.

El modo de funcionamiento de una estructura de pavimento es así, función del conjunto de características mecánicas, geométricas, calidad de unión entre capas, condiciones del suelo o sub-estructura de soporte y de la manera en que las cargas del tráfico son aplicadas.

Si la estructura del pavimento es construida siguiendo los lineamientos e hipótesis de diseño, la aparición de degradaciones, tanto superficiales como estructurales, corresponderá a un patrón preestablecido, suficientemente estudiado, conocido y repetible. Este patrón, incluido en los modelos de cálculo de la estructura, desarrollará el tipo de degradaciones estructurales en los términos de la vida útil o de diseño.

1.2. TIPOS Y FUNCIONAMIENTO

De manera general, pero no exhaustiva, en México se tienen dos tipos principales de estructuras de pavimentos, definidas por las características mecánicas que componen sus capas estructurales, en especial la rigidez medida a través del módulo elástico y su resiliencia. Dichas estructuras son referidas generalmente como: flexible y rígida.

Los límites de utilización de ambas configuraciones no están determinados claramente en el marco normativo correspondiente, pero algunos de los criterios básicos que influyen en la selección son: el volumen de tráfico circulante y su composición, la geología de la zona del trazo, el clima del lugar, la disponibilidad de recursos materiales a lo largo del trazo del camino, experiencias constructivas en la zona, etc.

1.2.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles son los más usados en la República Mexicana (**Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias, 1998**), compuestos en su mayoría por una capa de base granular (eventualmente tratada con asfalto y con cemento portland) y recubierta por una carpeta asfáltica. La función principal de esta última es como superficie de rodamiento, proporcionando confort y seguridad al tráfico circulante. Por lo que respecta a las capas de base e inferiores, la carpeta asfáltica les provee un medio de protección toda vez que es impermeable y debido a su rigidez, asegura una distribución de esfuerzos de menor intensidad (**Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967**).

Dentro del medio mexicano, se conocen como estructuras flexibles, aquellas que comportan una capa de rodamiento en materiales asfálticos que recubren una o más capas de base estructural, sean estas granulares tratados o no, con ligantes asfálticos o hidráulicos. En este sentido, la designación de estructura flexible considera: capas de base con granulares no tratados (“hidráulicas”), con granulares tratados con ligantes hidrocarbonados (“bases negras o asfálticas”) y con granulares tratados con ligantes hidráulicos (“bases cementadas”).

No obstante que los 3 sub-tipos de estructuras se consideran flexibles debido a la baja rigidez de las capas estructurales, existen diferencias marcadas en su comportamiento y modo de degradación, debido a la

manera específica que cada una transfiere los esfuerzos (punzonamiento o tensión) y al grado de resiliencia que cada una puede presentar. Los 3 tipos se describen en los párrafos subsecuentes.

Estructuras de pavimento con bases no tratadas

Estas estructuras comparten una cobertura asfáltica relativamente delgada (inferior a 15 cm), a veces reducida a capa de riegos de sello para carreteras de bajo tráfico, reposando sobre una o varias capas de materiales granulares no tratados. El espesor global del pavimento generalmente se encuentra entre 30 cm y 60 cm.

- **Solicitaciones debidas al tráfico:** Los materiales granulares no ligados (MNL), que constituyen el cuerpo estructural del pavimento, tienen una baja rigidez que depende de la del suelo y de su espesor. Ya que el recubrimiento asfáltico es relativamente delgado, los esfuerzos verticales debidos al tráfico se transmiten al suelo con una baja difusión lateral. Los esfuerzos verticales elevados conllevan por repetición a deformaciones plásticas del suelo o de la grava que repercuten en deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. La cobertura asfáltica sufre en su base esfuerzos repetidos de tracción – flexión.
- **Influencia de las condiciones ambientales:** La baja rigidez de la estructura vuelve estos pavimentos particularmente sensibles a las variaciones del estado hídrico del suelo de soporte. Esto se manifiesta principalmente en los “esfuerzos de borde”: reducción de la portancia en periodo húmedo pudiendo conducir a hundimientos de borde y fisuración por contracción hídrica en periodo seco. La reducción de la portancia asociada a las variaciones del estado hídrico de los suelos de soporte sensibles al agua es mayor cuando las condiciones de drenaje e impermeabilidad de la capa de superficie son malas.
- **Evolución del modo de degradación:** La evolución más frecuente de los pavimentos flexibles se manifiesta primero por la aparición de deformaciones permanentes o roderas de radio amplio y hundimientos de deterioran las calidades del perfil longitudinal y transversal. Estas deformaciones aumentan con el tráfico, según la calidad promedio de la estructura y la dispersión de las características mecánicas del cuerpo del pavimento y del suelo. Las solicitaciones repetidas por flexión alternadas en la capa asfáltica conllevan a una degradación por fatiga, bajo la forma de fisuras, primero aisladas y evolucionando poco a poco hacia una forma de malla de bajas dimensiones. El agua se infiltra así más fácilmente provocando una aceleración de los fenómenos hasta el desarrollo completo de baches. Si el pavimento se deja sin mantenimiento, éste evoluciona muy rápidamente hacia una destrucción completa.

Estructuras de pavimento con bases tratadas con ligantes hidrocarbonados

Estas estructuras se componen de una capa de rodamiento asfáltica sobre un cuerpo estructural en materiales tratados con ligantes hidrocarbonados, hecha de una o dos capas (base y fundación). El espesor de las capas estructurales (base) se encuentra generalmente entre 15 cm y 40 cm.

- **Solicitaciones debidas al tráfico:** Los materiales granulares no ligados (MNL), que constituyen el cuerpo estructural del pavimento, tienen una baja rigidez que depende de la del suelo y de su espesor. Ya que el recubrimiento asfáltico es relativamente delgado, los esfuerzos verticales debidos al tráfico se transmiten al suelo con una baja difusión lateral. Los esfuerzos verticales

elevados conllevan por repetición a deformaciones plásticas del suelo o de la grava que repercuten en deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. La cobertura asfáltica sufre en su base esfuerzos repetidos de tracción – flexión.

- **Influencia de las condiciones ambientales:** La baja rigidez de la estructura vuelve estos pavimentos particularmente sensibles a las variaciones del estado hídrico del suelo de soporte. Esto se manifiesta principalmente en los “esfuerzos de borde”: reducción de la portancia en periodo húmedo pudiendo conducir a hundimientos de borde y fisuración por contracción hídrica en periodo seco. La reducción de la portancia asociada a las variaciones del estado hídrico de los suelos de soporte sensibles al agua es tanto más marcada que las condiciones de drenaje e impermeabilidad de la capa de superficie son malas.
- **Evolución del modo de degradación:** La evolución más frecuente de los pavimentos flexibles se manifiesta primero por la aparición de deformaciones permanentes o roderas de radio amplio y hundimientos de deterioran las calidades del perfil longitudinal y transversal. Estas deformaciones aumentan con el tráfico, según la calidad promedio de la estructura y la dispersión de las características mecánicas del cuerpo del pavimento y del suelo. Las sollicitaciones repetidas por flexión alternadas en la capa asfáltica conllevan a una degradación por fatiga, bajo la forma de fisuras, primero aisladas y evolucionando poco a poco hacia una forma de malla de bajas dimensiones. El agua se infiltra así más fácilmente provocando una aceleración de los fenómenos hasta el desarrollo completo de baches. Si el pavimento se deja sin mantenimiento, éste evoluciona muy rápidamente hacia una destrucción completa.

Estructuras de pavimento con bases tratadas con ligantes hidráulicos

Estas estructuras con calificadas comúnmente como “semi-rígidas”. Se componen de una capa de superficie asfáltica sobre una capa de base tratada con ligantes hidráulicos dispuestos en una o dos capas (base y fundación) cuyo espesor total es del orden de 20 cm a 50 cm.

- **Sollicitaciones debidas al tráfico:** En virtud de la gran rigidez de los materiales tratados con ligantes hidráulicos, los esfuerzos verticales transmitidos al suelo de soporte del pavimento resultan bajos. Por otro parte, las bases tratadas sufren esfuerzos de tracción – flexión que son determinantes para el dimensionamiento de este tipo de pavimentos.

Estas estructuras de componen a menudo de una capa de base y una capa de fundación (subbase). Como la adherencia entre estas capas asegura la continuidad de desplazamientos, el esfuerzo máximo de tracción se observa en la fibra extrema inferior de la subbase. En caso contrario (donde se produce un desplazamiento relativo), las capas trabajan ambas en tracción en sus bases.

La interface entre la capa asfáltica y la de base también es una zona sensible ya que:

- Se encuentra sometida a esfuerzos normales y de corte horizontal,
- Los centímetros superiores de la capa tratada son a menudo de menor resistencia que el resto de la capa.

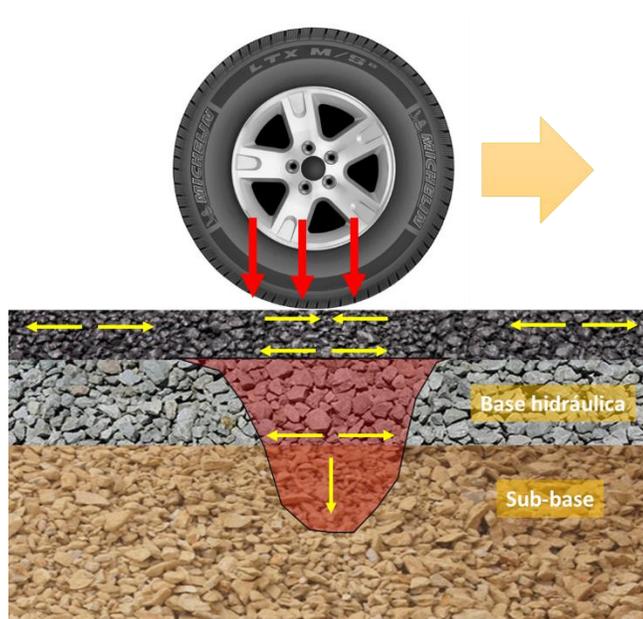


Figura 1 – Esquema de distribución de esfuerzos en un pavimento de estructura flexible.

- **Influencia de las condiciones ambientales:** Las capas tratadas con ligantes hidráulicos están sujetas a contracciones térmicas y por fraguado. La contracción, impedida por el frotamiento de la capa de base sobre su soporte, provoca una fisuración transversal. Sin disposición constructiva particular, estas fisuras remontan hasta la capa de rodamiento. Ellas aparecen en la superficie del pavimento con un espaciamiento bastante regular (entre 5 y 15 m longitudinalmente). Su apertura o espesor varía con la temperatura entre algunas décimas de milímetros y algunos milímetros. A menudo claras desde su aparición en superficie, estas fisuras por contracción tienden a crecer y ramificarse bajo el efecto del tráfico.

Desde el punto de vista mecánico, estas discontinuidades crean, a su proximidad al paso de vehículos, un aumento del esfuerzo transversal en relación al valor observado en medio continuo. Este crecimiento del esfuerzo es función inversa de la calidad de transferencia de carga entre los dos bordes de la fisura. Además, si la transferencia es baja, la presión sobre el soporte aumenta fuertemente bajo la carga.

La fisuración por contracción favorece la penetración del agua, lo que tiene consecuencias:

- En las interfaces, con una disminución de la calidad de unión y de la parte superior de la base, un aumento de la elongación en la base de la capa asfáltica, un aumento de los esfuerzos de tracción en la base de las capas tratadas, así como la modificación de las condiciones de apoyo sobre el suelo de soporte.
- Sobre la transferencia de carga entre los bordes de la fisura con una atrición favorecida, un aumento del esfuerzo transversal de tracción en la base de las capas tratadas y del esfuerzo vertical sobre el soporte del pavimento.

- **Evolución del modo de degradación:** Cuando la capa asfáltica es de bajo espesor (~5 cm) y presentan permeabilidad, la superficie de la capa tratada, (base) mal protegida y con defectos constructivos (baja compactación, escarapelado, desecación por ineficacia de la capa de cura, etc.), se degrada rápidamente por atrición¹ con la penetración de agua (a través de las fisuras de contracción térmica o en las zonas permeables de la capa asfáltica). Esto conlleva a la aparición en la superficie de remotes de lodos en los periodos húmedos. Estas degradaciones evolucionan rápidamente en hundimientos y después en baches.

En el caso de capas asfálticas donde se vigila severamente el control de calidad, de mayor espesor y con sellado de fisuras de contracción, los problemas de remonte de lodos hasta la superficie son muy poco frecuentes. Además, se han desarrollado a la fecha procedimientos constructivos para controlar la contracción (ej. pre-fisuración de la capa tratada) y limitar o retrasar el remonte de fisuras a través de la capa de rodamiento (compuestos “anti-fisuras”).



Figura 2 – Ejemplo de pavimento de estructura flexible con falla generalizada mecánica y funcional.

1.2.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos rígidos, son menos usados por su costo, pero están compuestos por una losa de concreto hidráulico que distribuyen las cargas del tránsito hacia las capas inferiores por medio de toda el área de la losa y de las adyacentes, ya que trabajan en conjunto con la losa que es la que recibe las cargas directamente. La característica de rígido es porque no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente una falla estructural. La capa inferior siguiente es la subbase, con el fin de impedir que las capas de terracería tengan el problema de que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al tener las cargas del tránsito activas, lo cual provocaría fallas de esquina u orilla en la losa. La capa inferior siguiente serían las terracerías: subrasante, subyacente y cuerpo de terraplén.

¹ Atrición: Acción por la cual los granos de arena se erosionan al chocar entre sí cuando son arrastrados por el viento.

Estructuras de pavimento en losas de concreto hidráulico con pasa-juntas

Estos pavimentos se componen de una capa de concreto hidráulico de 15 a 40 cm de espesor eventualmente recubierta de una capa de rodamiento delgada en materiales asfálticos. La capa de concreto hidráulico reposa sobre una capa de fundación (que puede ser también en materiales tratados con ligantes hidráulicos, en concreto hidráulico o bien en gravas drenantes no tratadas), sea directamente sobre el soporte del pavimento con, en este caso, interposición frecuente de una capa asfáltica. La losa de concreto puede ser continua con un reforzamiento longitudinal (“concreto armado continuo”), o discontinua con o sin elementos de unión en las juntas.

- **Solicitaciones debidas al tráfico:** Debido al elevado módulo de elasticidad del concreto hidráulico, los esfuerzos inducidos por el tráfico son esencialmente tomados en flexión por la losa de concreto. Los esfuerzos de compresión transmitidos al suelo son débiles. Como para las estructuras con bases tratadas con ligantes hidráulicos, la sollicitación determinante es el esfuerzo de tracción por flexión en la base.

Debido al fraguado y a los ciclos térmicos, el concreto sufre faces de contracción. La fisuración correspondiente es generalmente controlada, sea mediante la realización de juntas transversales, sea mediante la colocación de armaduras continuas longitudinales destinadas a repartir por adherencia las deformaciones por contracción creando numerosas fisuras finas.

El aumento de los esfuerzos transversales bajo tráfico en el borde de losas es tanto más importante cuando la transferencia de carga entre losas es baja. Para las estructuras de losas con pasajuntas, la transferencia de carga es asegurada por piezas de acero situadas a lo largo de los bordes.



Figura 3 – Esquema de distribución de esfuerzos en un pavimento de estructura rígida.

- **Influencia de las condiciones ambientales:** Para estas estructuras, las solicitaciones creadas por las variaciones de las condiciones ambientales pueden ser netamente superiores a las inducidas por el tráfico. Sin embargo, es la combinación de las solicitaciones debidas a las cargas y al gradiente térmico lo que provoca el daño por fatiga.

Las variaciones estacionales de temperatura provocan variaciones de longitud de las losas impedidas por el frotamiento con el soporte. Los esfuerzos de tracción (fase de contracción) que resultan son tanto más bajas que la desolidificación entre la losa y su soporte es eficaz, y que las losas son cortas.

Las variaciones diarias de la temperatura ambiente crean gradientes térmicos en las losas de concreto. Las losas tienen así tendencia a deformarse. Lo que conlleva a una modificación de las condiciones de apoyo sobre el soporte conduciendo a una aumentación del efecto del tráfico.

- **Evolución del modo de degradación:** Para las estructuras en concreto clásicas de losas discontinuas, la fisuración creada por los esfuerzos de tracción-flexión excesivos en la base de la losa es uno de los modos de degradación principal. Las disposiciones constructivas típicas como sobre-ancho de pavimento y unión de las bandas longitudinales permiten diferir y limitar la aparición de fisuras transversales y de fracturas en los bordes de losas.

El segundo modo de degradación principal se relaciona a la evolución de las condiciones de apoyo de en las proximidades de las juntas y fisuras, se trata de fenómenos de bombeo. Esta evolución es debida esencialmente a la presencia del agua en la interface losa-fundación cuyo efecto se conjuga:

- A la erodabilidad del suelo de soporte;
- A las cargas transitorias repetidas del tráfico;
- A las bajas transferencias de cargas entre las losas, traduciéndose en una disimetría de esfuerzos y de desplazamientos de ambas discontinuidades.

El empleo de materiales poco erodables en las capas de fundación y un drenaje adecuado en las interfaces (entre la losa y el soporte, entre la losa y el acotamiento), son disposiciones constructivas regularmente adoptadas que permiten evitar o limitar la degradación de los pavimentos en concreto por bombeo y desplazamiento de losas.

En cuando a la superficie de las losas de concreto, debe preverse desde la etapa de diseño la aplicación de una capa de rodamiento en materiales asfálticos que permita conservar un buen nivel de adherencia o frotamiento neumático-pavimento. La matriz de calcio que constituye el ligante hidráulico tiene poca resistencia a la atrición² y se puede pulir fácilmente ocasionando problemas de deslizamientos o derrapes vehiculares a mediano plazo.

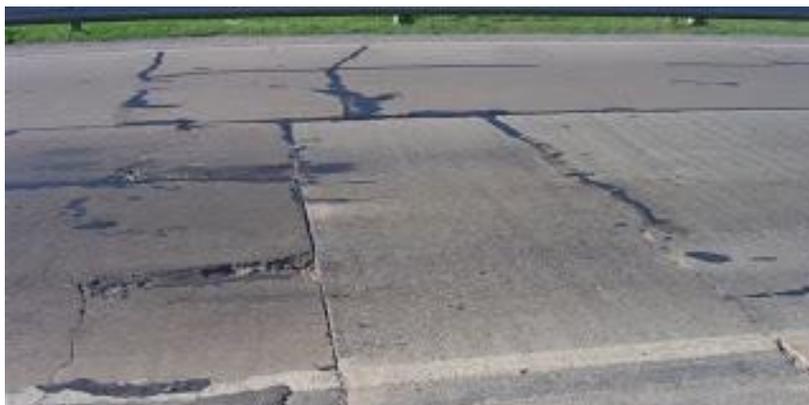


Figura 4 – Ejemplo de pavimento de estructura rígida con falla generalizada mecánica y funcional.

1.3. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO

La configuración de estructuras de pavimentos, en la gran mayoría se lleva a cabo a través del empleo de métodos de diseño que integran conocimientos específicos de todas las capas que integrarán dicha estructura. Cada de una de las capas presenta, invariablemente, propiedades físicas y mecánicas que definen su comportamiento dentro de la configuración propuesta.

² Atrición: Acción por la cual los granos de arena se erosionan al chocar entre sí cuando son arrastrados por el viento.

Además de comprender cómo será el aporte de cada una de las capas, según sus modos de funcionamiento y degradación previstos, es indispensable el conocer las especificidades de los materiales que los integrarán, desde su estado natural y después de las modificaciones eventuales que se les realizarán. La adecuación de los materiales naturales a las especificaciones de diseño debe así pasar por un proceso individual de análisis, a través de las etapas constructivas proyectadas.

Según su posición relativa en la estructura, cada capa de materiales estará sujeta a sollicitaciones mecánicas específicas. Desde las capas superficiales o de rodamiento, donde los esfuerzos mecánicos son aplicados directamente por el tráfico, hasta las capas de suelo de desplante donde la difusión de esfuerzos hace que estos sean de baja intensidad, pero especialmente sensible a las condiciones hídricas de la zona.

1.3.1. SUELOS DE DESPLANTE

Es importante estudiar el suelo del lugar para conocer las propiedades que tiene y saber en general si las resistencias que estos presentan son suficientes para cumplir directamente con el diseño. Es de especial importancia el poder identificar si el suelo en su estado natural es adecuado para soportar las cargas impuestas durante la etapa de construcción y las inducidas por el tráfico a lo largo de la vida útil o de diseño del pavimento. Si este no es el caso, entonces será necesario el determinar el mejor tratamiento a emplear en el suelo, sean de tipo mecánico o químico, a fin de mejorar las características físicas que presentan deficiencias.

Según la mecánica de suelos, los materiales que se eligen para la cimentación de pavimentos, son de dos tipos claramente diferenciados: los que se denominan suelos gruesos (fragmentos de roca, gravas, arenas, etc.) que constituyen el primer grupo; y los que se denominan suelos finos. Las diferencias de estos grupos son muy conocidas ya que se establecen con respecto a sus características de resistencia y deformación, por lo cual los suelos finos forman agrupaciones compactas y familiares, y los suelos gruesos crean formas vaporosas con grandes volúmenes de vacíos y ligas poco familiares.

La manera en que se clasifican los suelos son muy variadas, correspondiendo siempre a las necesidades específicas a las que deba responder, según el área de la mecánica de suelo de la que se trate. Del mismo modo, para fines de proyecto de infraestructuras, existen muchas clasificaciones propuestas por sociedades de especialistas y otras incluso normadas por países desarrollados, exclusivas para las áreas de trabajos referidos. Más allá de las sub-clasificaciones o denominaciones que cada metodología confiera a los tipos de suelo, es de suma importancia el realizar dicha clasificación con base a los parámetros mecánicos y químicos de los suelos. Estos parámetros deben poder ser representativos de los fenómenos o comportamientos que la estructura de pavimento deberá de soportar.

En general, se trate de suelos finos o gruesos, algunas de las características indispensables a considerar de los suelos son:

- **Parámetros de su naturaleza:** se relacionan a las características intrínsecas, es decir que no varían o lo hacen poco, a lo largo del tiempo o durante las manipulaciones que sufre el suelo durante la colocación en capas (ej. Granulometría, índice de plasticidad, valor de azul de metileno, equivalente de arena, etc.).

- **Parámetros de comportamiento mecánico:** Estos parámetros sólo se toman en cuenta para evaluar si los suelos gruesos son susceptibles de ser utilizados en capas superiores del pavimento o en terracerías (ej. Resistencia a la atrición por impactos, resistencia al desgaste por fricción, friabilidad de las arenas, etc.).
- **Parámetros de estado:** Se trata de parámetros que no son propios del suelo, sino del ambiente en el que se encuentran. Para los suelos blandos sensibles al agua, sólo se considera el estado hídrico de los mismos, que es de importancia capital en los problemas de terraplenes y terracerías en general (ej. Profundidad del nivel de aguas freáticas, índice de portancia inmediata, etc.).

El suelo es básicamente el producto de la desintegración de las rocas que forman dicha costra. La desintegración de las rocas se produce por acciones químicas y mecánicas que han actuado sobre las formaciones de roca madre durante innumerables periodos. Entre estas fuerzas se encuentran: el viento, agua, corriente, congelaciones y deshielos, descomposición química, acción glacial y muchas otras.

Desde este punto de vista, los suelos se clasifican acorde a los factores principales que les dieron origen: suelo residual, suelo eólico, suelo glacial, suelo sedimentario, suelo inorgánico y suelo orgánico.

Un punto muy importante a tener siempre en consideración es la heterogeneidad de los suelos en sus depósitos o yacimientos. Los suelos varían grandemente en su composición física y química en las diferentes localidades sobre la superficie de la tierra, así como también varían en forma característica con la profundidad.

En el ámbito de la ingeniería de vías terrestres, es de uso común que el suelo se clasifique por el tamaño de sus granos. Los principales tipos según el tamaño del grano son:

Coloides	Arcilla	Limo	Arena fina	Arena gruesa	Grava forma	Grava media	Grava gruesa	Cantos rodados
Medidas de las mallas			200-40	40-10	10-½"	½"-3/4"	3/4"-3"	3"
<0.001 mm	0.001 mm	0.002-0.08 mm	0.08-0.4 mm	0.4-2.0 mm	2.0-8.0 mm	2.08-20 mm	20-80 mm	>80 mm

Tabla 1 - Especificación AASHTO M146 para clasificación de suelos

En términos generales, la roca empleada como capa o zona de desplante, es un material de mejores aptitudes y calidades para la construcción de una obra vial. Los esfuerzos inducidos por el tráfico y la estructura del pavimento son de muy baja importancia en relación a la resistencia mecánica de la roca. Los modelos de cálculo para el dimensionamiento de estructuras de pavimento no toman en cuenta, al menos no como aporte mecánico, la resistencia del manto de roca. Para el caso de algunos modelos donde se calcula por separado una superficie o plataforma de desplante, las rocas sanas sobrepasan ampliamente los requerimientos mínimos.

1.3.2. CUERPOS DE TERRACERÍAS

Los cuerpos de material, dispuestos y construidos por capas compactadas mecánicamente sean tratadas o no con algún ligante, son las encargadas de transmitir al suelo de desplante el conjunto de esfuerzos provocados por el tránsito vehicular. En función del modelo de distribución de esfuerzos usado en el diseño, esos esfuerzos producen deformaciones mayoritariamente verticales o de tipo punzonamiento en

las terracerías y en el propio suelo. En tales circunstancias, el suelo o terracerías sub-dimensionadas originarían primero la falla funcional del pavimento, conllevando esto a esfuerzos adicionales que acelerarían la degradación estructural del pavimento. La importancia del correcto estudio de los cuerpos de terracería radica justamente en proveer la capa o medio de transición mecánica que asegure el sustento de las capas estructurales del pavimento (bases) manteniendo niveles de resistencia y baja deformabilidad a lo largo de la vida del proyecto.

Existen factores independientes o externos al modelo de cálculo de la estructura del pavimento que pueden afectar directamente la calidad y estabilidad de las terracerías y el suelo, con el consecuente efecto negativo en el conjunto del pavimento. En especial, los factores implican las condiciones geológicas y climáticas de la zona del trazado, principalmente si el suelo y material de terracerías es sensible a las variaciones del estado hídrico.

Terraplén.

Cuando la sección estructural del pavimento se encuentra elevada del terreno natural, las terracerías conforman la sub-estructura denominada terraplén. Para este tipo de capas se utilizan materiales provenientes de cortes o préstamos, conforme el tipo de terreno que se encuentra en el sitio. Cuando los bancos de materiales se encuentran a distancias menores de 100 desde el centro de línea de la carretera, se les denomina bancos de préstamo laterales.

Por lo que respecta a las calidades mínimas de los materiales a ser utilizados en terraplenes, la norma N-CMT-1.01/02 (**Características de los materiales, Materiales para Terracerías, Materiales para terraplén., 2002**) especifica las siguientes características mínimas aceptables:

Límite Líquido, LL [%]	50 máximo
Valor Relativo de Soporte, CBR³ [%]	5 mínimo
Expansión, EXP [%]	5 máximo
Grado de Compactación, GC⁴ [%]	90 (+- 2)

Tabla 2 - Características mecánicas de materiales para Terraplén.

Capa subyacente.

Esta capa de pavimento funciona como una transición entre el límite superior de las terracerías y la capa sub-rasante. La utilización o no de dicha capa depende del número de ejes equivalentes que se prevé circularán por la vialidad a lo largo de la vida de proyecto. En específico dentro del marco normativo mexicano:

- Si la intensidad del tránsito es menor a 10,000 ejes equivalentes de 8.2 toneladas durante la vida útil del proyecto, no es necesario construir la capa.
- Si la intensidad del tránsito es de 10,000 a 1,000,000 de ejes equivalentes, esta capa deberá contar con espesor mínimo de 30 cm.

³ En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1.5 m de profundidad.

⁴ Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

- La intensidad del tránsito es de 1,000,000 a 10,000,000 de ejes equivalentes, esta capa deberá ser construida con espesor mínimo de 70 cm.
- La intensidad del tránsito es de mayor a 10,000,000 de ejes equivalentes, esta capa requerirá de un diseño especial.

Según la norma N-CMT-1-02-02 (**Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para Subyacente, 2002**) las características para el material que conforme esta capa debe de cumplir con los siguientes parámetros:

Tamaño Máximo	Que sea compactable ⁵
Límite Líquido LL, [%]	50 máximo
Valor Relativo de Soporte, CBR* [%]	10 mínimo
Expansión, EXP [%]	3 máximo
Grado de Compactación, GC* [%]	95 (+- 2)

Tabla 3 - Características mecánicas de materiales para Subyacente.

Capa sub-rasante.

La función principal de esta capa es soportar las cargas del tránsito y darle sustentación, además de considerarse propiamente como la cimentación de las capas estructurales del pavimento. Entre mejor calidad tengan los materiales que componen esta capa, los espesores de las capas del pavimento serán más reducidos, implicando así un ahorro por costo

Al igual que para las capas de pavimento enunciadas anteriormente, el material que se utilizará para la capa sub-rasante deberá cumplir con ciertas características mínimas de calidad. En el caso de querer utilizar materiales producto de cortes en el trazo, esto será posible a condición que estos cumplan con las características mínimas específicas que proporciona la normatividad.

En México, las características según la norma N-MCT-1-03/02 (**Características de los Materiales, Materiales para terracerías, Materiales para Subrasante, 2002**) deben ser:

Tamaño Máximo, [mm]	76 mm
Límite Líquido LL, [%]	40 máximo
Índice Plástico, IP [%]	12 máximo
Valor Relativo de Soporte, CBR* [%]	20 mínimo
Expansión, EXP [%]	2 máximo
Grado de Compactación, GC* [%]	100 (+- 2)

Tabla 4 - Características mecánicas de materiales para Subrasante.

1.3.3. CUERPOS ESTRUCTURALES

Las capas que constituyen los cuerpos estructurales son conocidos generalmente como capas de base y/o subbases, mismas que son utilizadas en función de los criterios técnicos y económicos que determine la

⁵ De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos.

*Son las mismas especificaciones que en la tabla de terraplén.

estrategia de diseño del pavimento. Los materiales para bases presentan mejores características mecánicas y de fabricación que los utilizados para las subbases, tanto en los materiales constituyentes como en los materiales compuestos (en el caso que sea empleado algún tratamiento o ligante).

Mayoritariamente, los métodos de diseño hacen uso en prioridad de las capas de base como elemento de aporte estructural. La capa de base más sencilla se encuentra constituida por material pétreo de calidades mecánicas y granulometría controladas, que confieren un desempeño mecánico satisfactorio según el método de dimensionamiento de la estructura. A partir de esta condición, los materiales pétreos pueden ser adicionados con algún ligante de naturaleza asfáltica o hidráulica, mismos que contribuirán mejorar alguna de las características mecánicas. La selección del tipo de ligante a utilizar dependerá de criterios tanto mecánicos como económicos.

Cuando la configuración de las capas de terracerías o sub-estructurales presenta una diferencia de rigidez notable respecto a la rigidez de la capa de base, es aconsejable la inclusión de una capa de transición entre ellos, es decir una capa de subbase. Esta capa permitirá igualmente aumentar la resistencia del conjunto estructural, influenciando al igual que la capa de base, el modo de funcionamiento del pavimento.

De manera general, la finalidad de la capa de base es absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de la carpeta de rodamiento y repartir uniformemente los esfuerzos a la subbase y terreno de fundación. La presencia de algún tipo de ligante en la masa de agregados que componen la capa de base y/o de subbase provoca que los esfuerzos internos sean absorbidos como tensión horizontal; cuando la base es granular los esfuerzos se traducen en la forma de punzonamiento.

La norma N·CMT·4·02·002/16 (**Características de los materiales, Materiales para Pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Bases Hidráulicas, 2016**) define las características mecánicas mínimas que deberá cumplir el material para ser utilizado en capa de base hidráulica.

Característica	Ejes Equivalentes de 8.2 T	
	$\Sigma L < 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Límite Líquido LL, [%]	25 máximo	25 máximo
Índice Plástico, IP [%]	6 máximo	6 máximo
Equivalente de Arena [%]	40 mínimo	50 mínimo
Valor Relativo de Soporte, CBR [%]	80 mínimo	100 mínimo
Desgaste Los Ángeles [%]	35 máximo	30 máximo
Partículas Alargadas y Lajeadas [%]	40 máximo	35 máximo
Grado de compactación, Gc* [%]	100	100

Tabla 5 - Características mecánicas de materiales para Bases Hidráulicas.

La norma N·CMT·4·02·003/16 (**Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Bases Tratadas, 2016**) define igualmente las características mecánicas de las bases tratadas, que para el presente caso de estudio solo se consideran las que incluyen Cemento Portland.

Característica	Ejes Equivalentes de 8.2 T	
	$\Sigma L < 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Límite Líquido LL, [%]	25 máximo	25 máximo
Índice Plástico, IP [%]	6 máximo	6 máximo
Equivalente de Arena [%]	40 mínimo	50 mínimo
Valor Relativo de Soporte, CBR [%]	80 mínimo	100 mínimo
Desgaste Los Ángeles [%]	35 máximo	30 máximo
Partículas Alargadas y Lajeadas [%]	40 máximo	35 máximo
Grado de compactación, Gc* [%]	Por proyecto	Por proyecto
Contenido de Cemento Portland, [%]	6 a 8	6 a 8
Resistencia a la Compresión Simple a 28 días, f'c [MPa]	> 2.5	> 2.5

Tabla 6 - Características mecánicas de materiales para Bases Estabilizadas con Cemento Portland.

Para el caso de las subbases, la norma N-CMT-4-02-001/16 (Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Subbases, 2016) establece las características principales.

Característica	Ejes Equivalentes de 8.2 T	
	$\Sigma L < 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Límite Líquido LL, [%]	30 máximo	25 máximo
Índice Plástico, IP [%]	10 máximo	6 máximo
Equivalente de Arena [%]	30 mínimo	40 mínimo
Valor Relativo de Soporte, CBR [%]	50 mínimo	60 mínimo
Desgaste Los Ángeles [%]	50 máximo	40 máximo
Grado de compactación, Gc* [%]	100	100

Tabla 7 - Características mecánicas de materiales para Subbases Hidráulicas.

1.3.4. CAPAS DE RODAMIENTO Y SUPERFICIALES

Su función primordial será la de proteger la base impermeabilizando la superficie para evitar así posibles infiltraciones de agua de lluvia que podrían saturar parcial o totalmente las capas inferiores y provocar su pérdida de portancia o inestabilidad por migración de finos. Además, evita que se desgaste o desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

La capa de rodamiento puede contribuir también a aumentar la capacidad o resistencia del pavimento, a condición de tener un espesor nominal superior a 3 cm y ser formulado específicamente para tales objetivos. En tales circunstancias, la capa de rodamiento en materiales asfálticos puede ser la que contribuya mayoritariamente en el aporte estructural del conjunto, pero esta misma necesidad condiciona así su proceso de fabricación, de construcción y de control de calidad.

Las exigencias de tales materiales para capa de rodamiento en concretos asfálticos se define en la norma N-CMT-4-05-001/06 (Características de los Materiales, Materiales para pavimentos, Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas, Calidad de Materiales Asfálticos, 2006).

Característica	Ejes Equivalentes de 8.2 T	
	$\Sigma L < 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Compactación, Número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad, [N]	5340	8000
Flujo, [mm]	2-4	2-3.5
Vacíos en la mezcla asfáltica, VCM [%]	3-5	3-5
Vacíos ocupados por el asfalto, VFA [%]	65-78	65-75

Tabla 8 - Características mecánicas de mezclas asfálticas por el método Marshall para carpetas.

1.4. SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE PAVIMENTOS

1.4.1. CRITERIOS DE INTERVENCIÓN Y MANTENIMIENTO

Desde el momento en que se pone en servicio una estructura de pavimento, esta debe presentar las condiciones óptimas para su operación, seguridad y confort. Al transcurrir el tiempo, con la circulación del tráfico vehicular y las variables ligadas a las condiciones ambientales, la estructura comienza a deteriorarse y a hacer más difícil el tránsito vehicular según los criterios preestablecidos del diseño. Es en dicho momento o punto de la vida útil del pavimento que se inicia la etapa de mantenimiento y que tiene por objetivo el poder realizar las acciones correctivas de manera oportuna y adecuada para evitar que se presentes fallas prematuras y generalizadas.

De manera general, las fallas en estructuras de pavimentos pueden agruparse en dos grupos o tipos, denominados generalmente “estructurales” y “superficiales o funcionales”, según los parámetros y tipos de exploraciones que se utilicen para cuantificarlos. En todo caso, los modelos de cálculo tienen considerados en la mayoría de los casos una serie de fallas de tipo superficial, mismos que se consideran dentro de los trabajos de conservación rutinaria. Más allá de los defectos y degradaciones superficiales, los mismos métodos de diseño consideran la falla estructural como el límite de servicio que se alcanza, de acuerdo a la configuración estructural y al modo de funcionamiento asociado que se previó.

Conceptualmente, la falla estructural corresponde al estado de degradación último en el cual se ha alcanzado el total del tráfico acumulado circulante a lo largo del periodo de diseño. Sin embargo, es posible que este tipo de falla se presente de manera prematura, es decir, antes del momento previsto por diseño; lo que puede deberse a múltiples factores ligados tanto a factores constructivos como de calidad de los materiales utilizados o bien de condiciones deficientes de drenaje del trazado.

La falla funcional o superficial es aquella que presentan los pavimentos cuando las deformaciones superficiales con mayores que las tolerables, lo que provoca ciertas incomodidades al tránsito y eventuales pérdidas de seguridad al circular. Dependiendo del tipo de estructura del pavimento que se trate, los tipos de falla que se presenten pueden ser de muy diferente naturaleza, mismas que pueden o no implicar defectos desde el diseño del pavimento, de la formulación de materiales y tratamientos y por supuesto los defectos constructivos. La importancia general de este tipo de fallas es reducida en comparación de las de tipo estructural, pero debe de tenerse muy presente que éstas últimas pueden acelerarse y crecer en importancia si los defectos superficiales no se atienden de manera pronta y correcta.

Teniendo en mente la multiplicidad de tipos de fallas, condiciones, grados de severidad y combinación de factores y agravantes, algunos métodos de diseño de pavimentos como el AASHTO 1993 proponen la noción de Índice Presente de Servicio (PSI, Present Service Index) para calificar el estado general de servicio del pavimento, más allá del conjunto específico de fallas que presentan (AAHSTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, 1993, págs. II-10, 2.2). El índice de servicio está ligado a este concepto de falla funcional. Este índice se estima en función del estado físico de la superficie de rodadura, que los técnicos califican con base en la cantidad de baches, deformaciones y grietas que presenta el camino o bien de acuerdo con la opinión de los usuarios.

El índice de servicio y deterioros se califican de manera subjetiva y se le asignan valores del 1 al 5 para definir en malas o buenas condiciones. El esquema siguiente ilustra de manera sencilla el concepto del nivel de deterioro en obras viales a través del tiempo y los efectos de una conservación buena y otra deficiente.

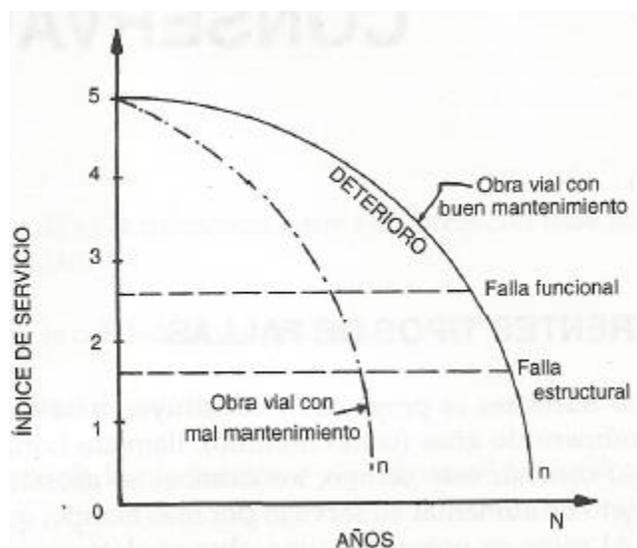


Figura 5 – Esquema del concepto de índice de servicio.

(Estructuración de vías terrestres, 1999, págs. 386, Fig. 18-1)

En condiciones de funcionamiento promedio, un pavimento desarrollará primeramente deterioros de poca importancia y principalmente de tipo superficial o funcional. Más adelante estos crecerán en severidad y número, lo que implicará también el desarrollo de fallas de tipo estructural esencialmente en las zonas del pavimento que las fallas funcionales sean más importantes. Es por esto que una obra vial requiere de criterios y medios de mantenimiento y conservación, que sean a la vez sencillos de aplicar y que respondan de manera eficiente a las diferentes patologías que presente el pavimento.

En el criterio del método AASHTO 1993 (AAHSTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, 1993, págs. II-10, 2.2.1) cuando un camino de primer orden cuyo índice de servicio inicial es de 4.5 llega a un valor de 2.5 a 2.0, el tránsito vehicular puede experimentar dificultades severas de circulación y la “comodidad” del viaje llega al punto mínimo. En este momento, la obra alcanza su falla funcional. Si el camino sigue en servicio, logra la falla estructural y prácticamente ya no se puede realizar el tránsito.

Para que una obra en servicio no llegue a la falla estructural, es necesario rehabilitar la vía cuando alcance la falla funcional y el valor del índice de servicio llegue a su calificación mínima aceptable. Este valor convencionalmente corresponde a 2.0 para los caminos secundarios y a 2.5 para los de primero orden y especiales.

El esquema siguiente muestra el efecto de las rehabilitaciones en la vida de una obra vial, basándose en la intervenciones o reparaciones bajo el concepto del valor del índice de servicio:

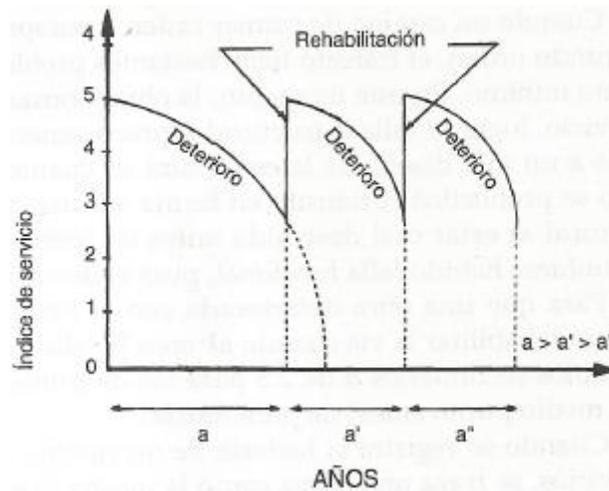


Figura 6 – Esquema de la estrategia de mantenimiento del pavimento conforme al índice de servicio.
(Estructuración de vías terrestres, 1999, págs. 386, Fig. 18-2)

Para aumentar su vida útil de la estructura del pavimento se pueden hacer diferentes rehabilitaciones, generalmente a través de la superficie del pavimento, agregando en muchas de ellas un sobre espesor de la carpeta asfáltica, lo que permite aumentar o subsanar la falta de resistencia del pavimento, contribuyendo y sumando al aporte estructural de la capa de base. Sin embargo, llegará un estado límite de intervenciones para las cuales, la degradación de la capa o cuerpo estructural indique igualmente la necesidad de una reposición en acorde a las nuevas solicitudes del tráfico vehicular. Este estado límite de intervenciones o rehabilitaciones está determinado por la periodicidad de los trabajos de conservación, su durabilidad y por supuesto los costos asociados a tales trabajos.

A grandes rasgos, el esquema ejemplifica como desde la puesta en servicio del pavimento, este entra en un proceso de deterioro hasta llegar en “n” años a su falla estructural; sin embargo, si cuando se tiene una calificación de 2.5 este se rehabilita entonces se aumenta su vida útil en “n” años más. Este ciclo se puede repetir en varias ocasiones; sin embargo, después de cuatro o cinco rehabilitaciones, el daño causado a la obra es tal que lo más conveniente es una reconstrucción, pues la eficacia de la rehabilitación es cada vez menor, como se ve en la gráfica.

1.4.2. IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS

Como se ha dicho en párrafos anteriores, los tipos de fallas que puede presentar un pavimento son muy diversos, acorde con el tipo de estructura de proyecto, la capa en específico que se analice, el tiempo y tráfico acumulado, factores climáticos, defectos constructivos, etc. No obstante, tal diversidad, métodos de diseño como el AASHTO 1993 ([Chapter 3. Highway Pavement Structural Design, 1993](#)) incluyen en sus apartados algunos conceptos básicos de identificación y de calificación del estado del pavimento, acorde con las hipótesis de dimensionamiento. La identificación de las fallas se realiza a través de observaciones y de mediciones de capacidad de carga que permiten en su conjunto conocer el estado estructural y superficial del pavimento. Esta calificación, que diferencia esencialmente entre pavimentos flexibles y losas de concreto, se correlaciona al PSI y puede ser utilizada directamente para fines de rehabilitación del pavimento.

De manera sintética, en los párrafos siguientes se presentan algunas de las fallas y defectos que presentan los pavimentos flexibles. La lista no tiene por intención ser exhaustiva ni abarcar los pavimentos de concreto (fuera del caso de estudio que se presenta), sino el aportar de manera sencilla a la identificación de las fallas más comunes a las que se pueden presentar durante la inspección.

La calificación visual se lleva a cabo mediante la identificación de ([Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas, 1991](#)):

- **Roderas:** Son deformaciones longitudinales que se presentan en la superficie de rodamiento, en la zona de mayor incidencia de las ruedas de los vehículos: si son menores a 1 cm, se deben a una insuficiencia en la base o a que ésta no es de la calidad adecuada.
- **Superficie de rodamiento lisa:** Este defecto se debe a un exceso de asfalto en el riego de liga, en la mezcla asfáltica o en el riego de sello. El exceso de asfalto por acción del tránsito se bombea hacia la superficie de rodamiento, provocando así su alisamiento, pero aun de esta manera se puede tener una capa de asfalto de 1 o 2 mm en forma de nata; esto es muy peligroso, pues los vehículos derrapan con facilidad.
- **Pequeñas deformaciones transversales rítmicas:** Esta falla, que es muy molesta al tránsito, se presenta cuando la base no está bien cementada o cuando se construyó en definitiva con materiales inertes. Se debe a las deformaciones de esta capa, producidas por la vibración y los esfuerzos tangenciales que provocan los vehículos y que se reflejan hacia la superficie de rodamiento; en caso de que ésta sea de concreto asfáltico, se agrieta en forma rápida.
- **Desintegración de la carpeta:** Se presenta en carpetas asfálticas antiguas por oxidación del asfalto, o en carpetas relativamente recientes con escaso contenido de asfalto; se da también en carpetas elaboradas con material pétreo deleznable.
- **Grietas longitudinales a la orilla de la carpeta:** Este problema se presenta en las terracerías, ya sea por contracciones que ocurran en ellas o por estar construidas sobre terrenos blandos; también puede deberse a que el tránsito se acerca mucho a las orillas cuando la carpeta cubre toda la corona de la vía, en cuyo caso no hay suficiente confinamiento lateral.
- **Presencia de calaveras:** Las calaveras son huecos que se forman en la superficie de rodamiento e incluso llegan a ser muy numerosos; su tamaño no es mayor que 15 cm. Se deben a una calidad

insuficiente en la base, a carpetas con contenido de asfalto menor que el óptimo o por colocar una carpeta sobre otra agrietada y calaverada, que se refleja en la nueva.

- **Baches:** Se deben a la desintegración de la carpeta y de la base por la mala calidad de los materiales inferiores, incluidas las terracerías con alto contenido de agua. Ocurren también por la presencia de grietas y calaveras que no se trataron en forma adecuada y oportuna.
- **Agrietamiento en forma de piel de cocodrilo o mapeo:** Se debe a una carpeta de mala calidad o colocada sobre una base con rebote; en caso de que la carpeta se haya elaborado con concreto asfáltico, esta falla resulta de que la base no se rigidizó bien. Asimismo, aparece en carpetas con asfalto oxidado.
- **Corrimiento de la carpeta asfáltica:** Ocurre cuando la mezcla es de baja estabilidad, ya sea por exceso de asfalto blando en zonas de alta temperatura; se presenta también en el carril de subida en tramos de pendiente marcada y en curvas, donde los esfuerzos de tracción de los vehículos son muy grandes.
- **Descarnado de la carpeta:** Resulta de usar aditivos inadecuados en las mezclas y se presenta en zonas de grandes esfuerzos horizontales provocados por el tránsito, como en la zona de arranque y frenado, en avenidas o calles de ciudades.
- **Deformaciones de la superficie de rodamientos del orden de 5 cm:** Son ocasionadas por la mala calidad de la base o por la insuficiencia en el espesor del pavimento.
- **Deformaciones fuertes de la superficie de pavimento.** Se deben a un espesor insuficiente o a la mala calidad de los materiales del pavimento y de las terracerías, a menudo con una notable falta de compactación desde la construcción.
- **Deformaciones de la corona junto a las cunetas:** Las provoca un exceso de humedad en el terreno natural cuando no existen cunetas revestidas y a falta o al mal funcionamiento del subdrenaje.

También se pueden realizar perfilómetros ([Método de Muestreo y Prueba de Materiales, Materiales para Pavimentos, Superficie de Rodadura, Índice de Perfil, 2006](#)) y rugómetros para cuantificar la uniformidad y adherencia del pavimento respectivamente.

1.4.3. CALIDADES MECÁNICAS Y RIGIDEZ

Desde el punto de vista mecánico, la calificación del estado de la estructura de pavimento se lleva a cabo principalmente con pruebas in situ a fin de determinar la deformabilidad del conjunto de la estructura. Son de uso común las mediciones del módulo de rigidez mediante el empleo de la viga Benkelman ([Conservación, Carreteras, Trabajos de Conservación Periódica, Pavimentos, Estabilización de Losas de Concreto Hidráulico, 2001](#)) o del deflectómetro Dynaflect ([Sistema de Evaluación de Pavimentos Versión 2.0, 2004](#))

La determinación del módulo de rigidez, conjuntamente con los espesores de cada capa y las condiciones de interfaces, permite determinar el punto de la vida útil en que se encuentra el pavimento.

- **Viga Benkelman.**

Es un medidor portátil desarrollado en el tramo de prueba AASHO, que determina deflexiones de milésimas de pulgada.

Los resultados de un estudio efectuado en California indican que cuando las deflexiones de la superficie de un pavimento flexible exceden de un cierto valor, ese pavimento generalmente muestra signos de deterioro. La viga es un instrumento sencillo de operar, pero existen variables como la temperatura del pavimento y el radio de curvatura de la deflexión producida, que requieren ser tomadas muy en cuenta en la interpretación de los resultados.

- **Deflectómetro.**

Es un sistema electromecánico que mide la deflexión dinámica de la superficie cuando se le aplica una carga oscilatoria (senoidal). El aparato medidor, cuyas complicaciones de detalle exceden el dominio de esta obra, viaja en un remolque arrastrado por un vehículo en el que se disponen los controles de la medición.

El medidor trabaja a base de un generador de fuerzas dinámicas sobre el pavimento (impactos), cuyos efectos se recogen en un sistema de sismógrafos alineados (geófonos). Una ventaja importante del aparato es no requerir ningún punto de referencia fijo en la superficie en que se realizan las mediciones y otra es la operación automática, libre de errores de operación y susceptibles de ser realizada a una velocidad relativamente alta.

1.4.4. MÉTODO DEL VALOR SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)

La división de Carreteras de California ha desarrollado un método de diseño de superposición para pavimentos flexibles basado en medidas de deflexión.

Las curvas que forman la base para el método de California se muestran en las siguientes figuras.

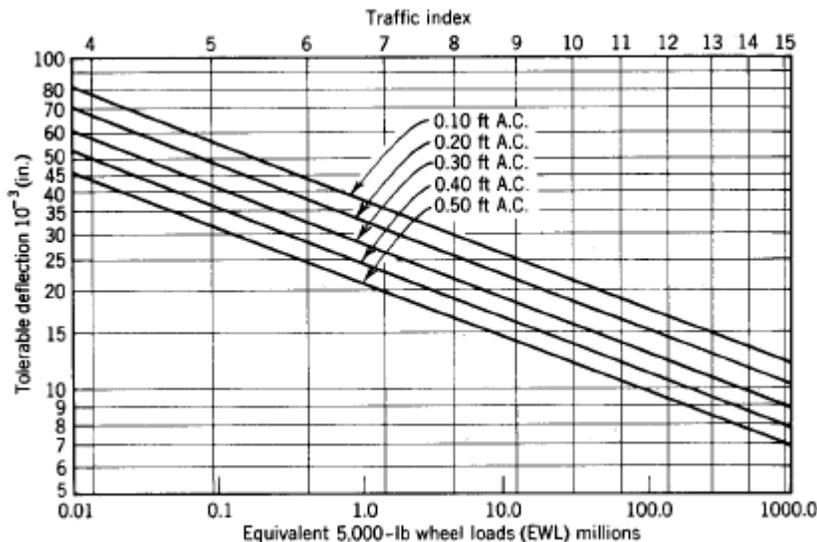


Figura 7 – Tabla de deflexión tolerable para espesores variables de concreto asfáltico. (Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 683, Fig 20.8)

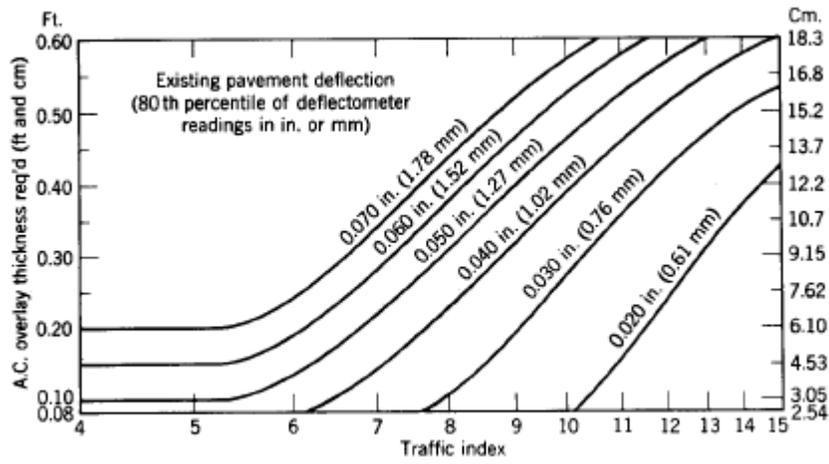


Figura 8 – Guía de diseño de recubrimiento de concreto asfáltico.
(Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 683, Fig 20.9)

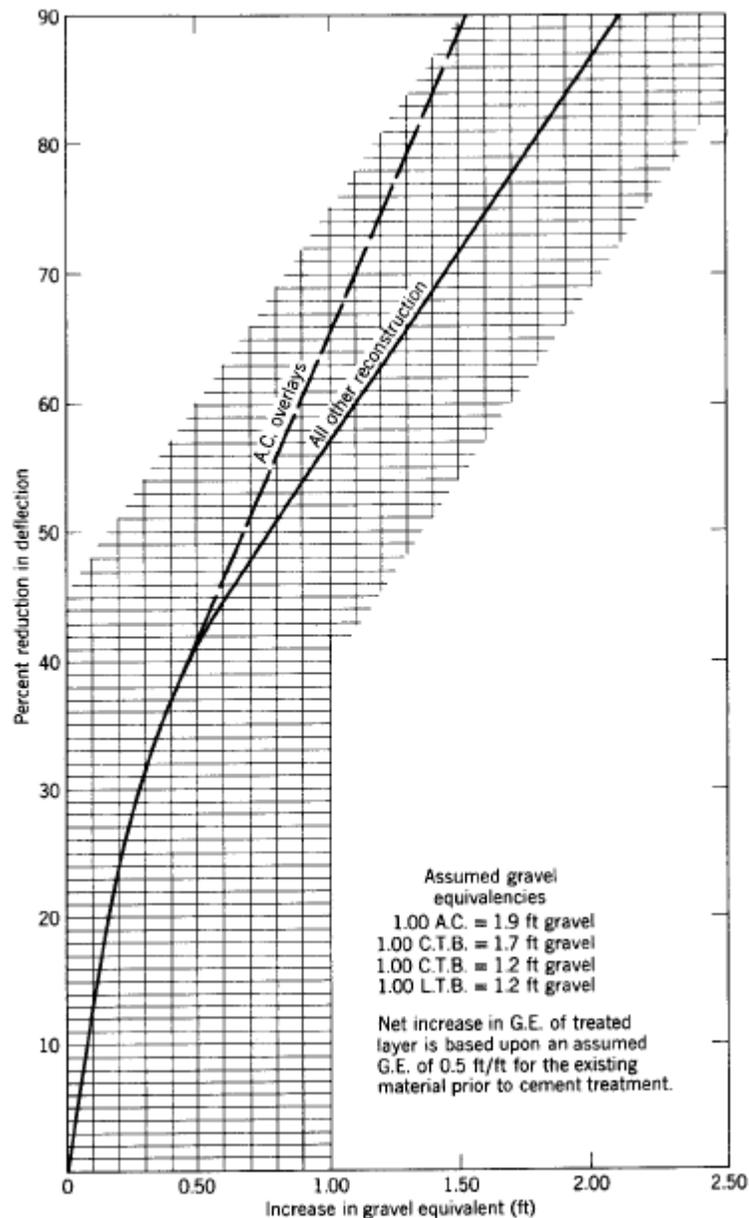


Figura 9 – Reducción de la deflexión resultante de la reconstrucción del pavimento.
 (Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 683, Fig 20.10)

En este método, las mediciones de deflexión se realizan en secciones de pavimento que se seleccionan sobre la base del tipo de subbase, el espesor de pavimento, etc. El valor de deflexión más alto del 80 percentil se usa en la evaluación. Este concepto es compatible con la selección de los valores de resistencia del suelo.

La ilustración 1, muestra la relación entre la deflexión permitida y la repetición de carga en función del espesor superficial. El tráfico es medido por medio del índice de tráfico, basado en un eje equivalente de 5,000 lb ó 2,270 Kg carga de las llantas.

1.5. CONTROL DEL ESTADO HÍDRICO

De manera general, los métodos de dimensionamiento de pavimentos hacen todos énfasis en la adecuación de las condiciones del suelo de soporte y las terracerías a ciertas condiciones básicas para su funcionamiento y estabilidad, sobre las cuales se desarrolla la configuración de las capas y calidades del pavimento para cumplir con la vida útil de proyecto. Además de las condiciones de mejoramiento y adecuación del suelo, descritas en apartados anteriores, es necesario tener un correcto control de las condiciones del estado hídrico del suelo, sea a través de medio que reduzcan las infiltraciones o bien el remonte de humedad desde el suelo natural.

Un sistema de drenaje adecuado es uno de los aspectos más importantes para proporcionar estabilidad a largo plazo a una estructura de pavimento. El drenaje debe de ser conveniente y económico para proteger la inversión en el pavimento y contribuir a reducir los costos de mantenimiento en la vida útil del mismo.

El agua puede tener tres formas en la estructura del pavimento (**Proyecto de Drenaje y Subdrenaje, Poryectos de obras menores y obras complementarias de drenaje, 2016**):

- **Drenaje artificial**, que está ligado al agua que se genera por actividades humanas en las proximidades del pavimento (ej. Riego, limpieza de calles u operaciones similares).
- **Agua superficial**, que es de lluvia, nieve o deshielo.
- **Agua subterránea**, también llamada agua freática que se presenta con flujos subterráneos.

De lo expuesto anteriormente, se desprende la conveniencia de proteger la sección estructural de pavimentos de los efectos del agua exterior que pudiera penetrar en ella. Por su elevado costo es imposible eliminar completamente la presencia indeseable de los finos arcillosos, por ese motivo, resulta más conveniente efectuar adicionalmente obras de protección contra el agua exterior, para garantizar que la práctica de eliminación de finos funcione adecuadamente en lo general, y añadir obras especiales de protección en aquellos lugares en los cuales las condiciones del flujo interno de agua hagan que el criterio general establecido resulte insuficiente.

Situaciones de este tipo suelen presentarse en laderas inclinadas donde se ejecutan cortes, especialmente en cajón; en estos casos convendrá analizar la posibilidad de incorporar la construcción de subdrenes, para proteger adecuadamente a la sección estructural.

La presencia de agua en exceso dentro del pavimento puede provocar: (**Conservación, Carreteras, Trabajos de conservación periódica, Obras de drenaje y subdrenaje, 2002**)

- Ablandamiento de la capa sub-rasante cuando está saturada y permanece así durante un periodo largo.
- Degradación de la calidad del material de la carpeta asfáltica por acción de la humedad.
- Problemas de erosión por migración de partículas de suelo.

- Fallas producidas por un escurrimiento incontrolado que conlleva a la saturación del material y, por lo tanto, un exceso de supresión o exceso de fuerzas de filtración.

En el diseño de los sistemas de drenaje se debe considerar los siguientes conceptos (Proyecto, Carreteras, Proyecto de drenaje y subdrenaje, Proyectos de obras complementarias de drenaje, Diseño hidráulico de obras complementarias de drenaje, 2016):

- **Filtración:** Movimiento o flujo de agua a través de un medio poroso permeable.
- **Porosidad:** Relación entre el volumen de vacíos y volumen total.
- **Permeabilidad:** Propiedad que tiene un medio para permitir el pasaje del agua que depende del tamaño, forma y extensión de los poros o vacíos interconectados.
- **Coefficiente de permeabilidad k:** Indica el volumen de agua que atraviesa una unidad de área en un medio poroso en una unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico unitario con la ley de Darcy.
- El **movimiento de agua dentro de la estructura** de pavimento depende de la permeabilidad de los materiales usados en el mismo y de las pendientes longitudinal y transversal.

Los objetivos que debe cumplir un buen diseño de la red de drenaje son:

- Evacuar de manera eficaz y lo más rápidamente posible el agua caída sobre la superficie de rodadura y los taludes de la explanación contiguos a ella. Por supuesto, deberán evitar la inundación de los tramos más deprimidos de la vía.
- Alejar del firme el agua freática, así como los posibles acuíferos existentes, empleando para ello, sistemas de drenaje profundo.
- Prestar especial atención a los cauces naturales, tales como barrancos o ramblas, disponiendo obras de fábrica que no disminuyan su sección crítica para periodo de retornos razonables. Debe recordarse que las avenidas son la principal causa mundial de destrucción de puentes.
- No suponer un peligro añadido para la seguridad del conductor, empleando para ello taludes suaves y redondeando las aristas mediante acuerdos curvos, evitando así posibles accidentes adicionales.
- También debe cuidarse el aspecto ambiental, procurando que produzca el menor daño posible al entorno.

Todos los anteriores puntos están como siempre supeditados a la economía de la obra, por lo que la solución adoptada debe tener en cuenta dos condicionantes adicionales: El coste inicial de construcción e implantación del sistema de drenaje y los costes de reparación y mantenimiento de la infraestructura de drenaje o a lo largo de la vida útil de la carretera.

Al momento de proyectar, el drenaje de una carretera debe de tenerse presente una serie de factores que influyen directamente en el tipo de sistema más adecuado, así, como en su posterior funcionalidad. Lo más destacables son:

- **Topográficos:** Dentro de este grupo se engloban circunstancias de tipo físico, tales como la ubicación de la carretera respecto del terreno natural contiguo – en desmonte, terraplén o a media ladera-, la tipología del relieve existente -llano, ondulado, accidentado- o la disposición de sus pendientes en referencia a la vía.

- **Hidrológicos:** Hacen referencia al área de la cuenca de recepción y aporte de aguas superficiales que afecta directamente a la carretera, así como a la presencia, nivel y caudal del agua subterráneas que puedan infiltrarse en las capas inferiores del firme.
- **Geotécnicos:** La naturaleza y características de los suelos existentes en la zona condiciona la facilidad con la que el agua puede llegar a la vía desde su punto de origen, así como, la posibilidad de que ocasione corrimientos o una erosión excesiva del terreno. Las propiedades a considerar son aquellas que afectan a su permeabilidad, homogeneidad, estratificación o compacidad, influyendo también la existencia de vegetación.

1.5.1. TIPOS DE DENAJE EN CARRETERAS

El sistema de drenaje de una vía es el dispositivo diseñado específicamente para la recepción, canalización y evacuación de las aguas que puedan afectar directamente a las características funcionales de cualquier elemento integrante de la carretera.

Dentro de esta amplia definición se distinguen los tipos de drenaje encaminadas a cumplir las funciones ya mencionadas, agrupadas en función del tipo de agua que pretenden alejar o evacuar, o de la disposición geométrica con respecto al eje de vía, son las siguientes:

Drenaje superficial

Conjunto de obras destinadas a la recolección de las aguas pluviales o de deshielo, su canalización y evacuación a los cauces naturales, sistemas de alcantarillado o a la capa freática del terreno. Se divide en dos grupos.

- **Drenaje longitudinal:** Canaliza las aguas caídas sobre la plataforma y taludes de la explanación de forma paralela a la calzada, restituyéndolas a sus cauces naturales. Para ello, se emplean elementos como las cunetas, caces, colectores, sumideros, arquetas y bajantes.

Las cunetas son zanjas longitudinales revestidas o sin revestir abiertas en el terreno, ubicadas a ambos lados o a un solo lado de la carretera, con el objeto de captar, conducir y evacuar adecuadamente los flujos del agua superficial. Las cunetas pueden construirse de diferentes materiales en función de la velocidad de circulación del agua en su seno, magnitud que depende directamente de la inclinación longitudinal de la cuneta, que suele coincidir con la adoptada por la vía. Existen cunetas tipo coronación de desmonte, coronación del terraplén y de pie del terraplén.

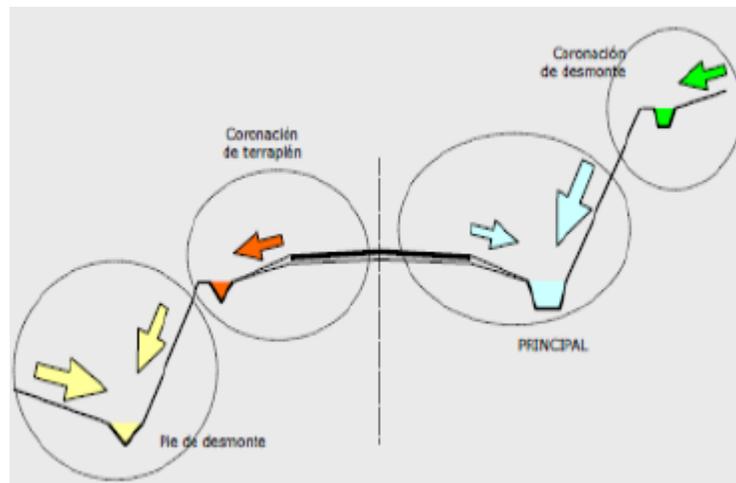


Figura 10 – Ubicación de distintos sistemas de cunetas.

(Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento, 2000)

Las contracunetas son zanjitas de los cerros de los cortes y su finalidad es interceptar el agua que se escurre por las laderas y conducirla hacia alguna cañada inmediata o a una parte baja del terreno (thalweg); así se evita que al escurrir el agua por los taludes los erosione y aumente el caudal de las cunetas.

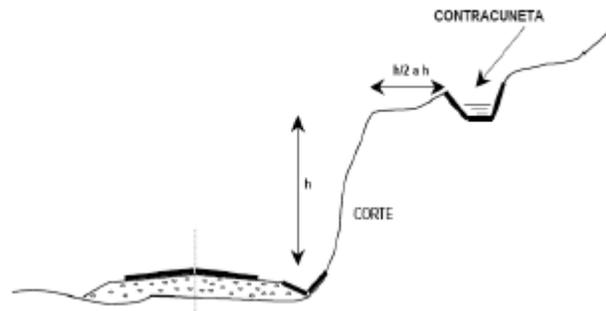


Figura 11 – Ubicación de contracuneta en camino.

(Obras de drenaje en caminos y el impacto que éstas causan en el entorno, 2010, págs. 28, Fig.5)

Se construye a una distancia variable de coronamiento del corte y depende de la altura de éste; su función es que entre la contracuneta y el propio corte no quede un área susceptible de generar escurrimientos de importancia no controlados, asimismo no debe ser colocada demasiado cerca del corte, a fin de facilitar su trazo y permitir que se desarrolle sobre terreno que no se vea afectado por derrumbes leves, pequeños abatimientos o trabajos de amachine que eventualmente se realicen.

Los canales de encauzamiento se colocan en terrenos sensiblemente planos, en los cuales el escurrimiento es de tipo torrencial y no existen cauces definidos, para que intercepten el agua antes de que ésta llegue

al camino y la conduzcan a sitios elegidos con anticipación, en los que se pueda construir una obra transversal y efectuar el cruzamiento.

El bombeo consiste en proporcionar a la corona del camino, ubicada en las tangentes del trazo horizontal, una pendiente transversal desde el centro del camino hasta los hombros.

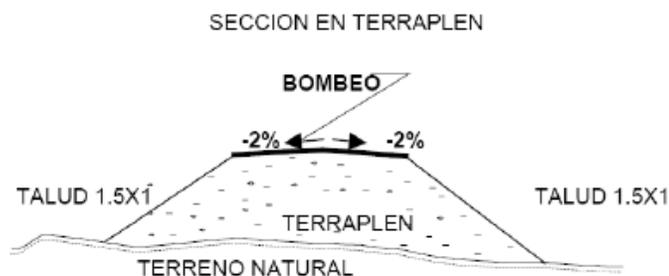


Figura 12 – Bombeo en tangente.

(Obras de drenaje en caminos y el impacto que éstas causan en el entorno, 2010, págs. 30, Fig.7)

Su función es dar salida expedita al agua que caiga sobre el pavimento y evitar en lo posible que el líquido penetre en las terracerías.

En las curvas horizontales, el camino se sobreelevación en el hombro exterior con respecto al interior para contrarrestar la fuerza centrífuga. Dicha sobreelevación sirve también para dar salida al agua que cae en estas partes del camino, hacia el hombro interior.

En los caminos normales de dos franjas de circulación (A2, B, C) y en secciones en tangente es común que el bombeo se disponga con un 2.0% de pendiente desde el eje del camino hasta el hombro correspondiente; en las secciones en curva, el bombeo se superpone con la sobreelevación necesaria, de manera que, al ingresar a la curva, esta última domina rápidamente y la pendiente transversal ocurre sin discontinuidades. En las carreteras con pavimento rígido el bombeo puede ser un poco menor, del orden de 1.5%.

Los vados son estructuras superficiales del camino, ubicadas en el cruce con un escurrimiento de agua efímero o permanente de tirante pequeño. Se proyecta para cruces que normalmente requieren obras mayores de 6 m, pero cuyos cauces son muy extendidos, porque los espesores del terraplén deban ser bajos y no es conveniente elevar la rasante por economía de las terracerías, como en el caso de un puente, además de que el escurrimiento en estos cauces es muy esporádico.

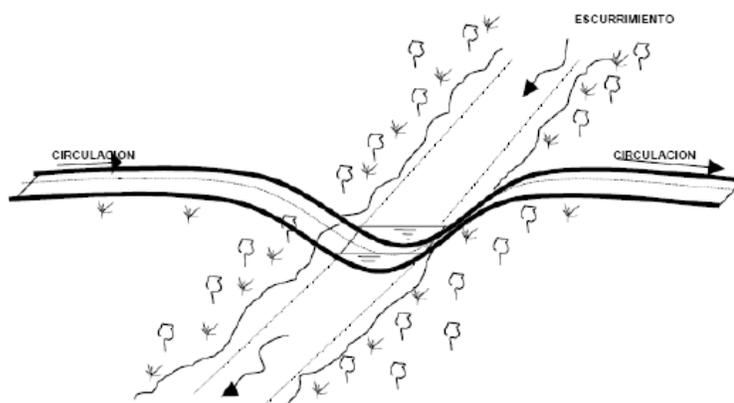


Figura 13 – Proyección de vado en un camino.

(Obras de drenaje en caminos y el impacto que éstas causan en el entorno, 2010, págs. 32, Fig.11)

- **Drenaje transversal:** Permite el paso del agua a través de los cauces naturales bloqueados por la infraestructura vial, de forma que no se produzcan destrozos en esta última. Comprende pequeñas y grandes obras de paso, como puentes, alcantarillas o viaductos.

Un puente se puede definir como una estructura de drenaje que tiene un claro mayor a 20 pies. Como una característica de mayor distinción, es común, aunque no siempre, que los tramos del puente se sostengan en estribos separados, en tanto que las alcantarillas se consideran como estructuras integrales. Aun cuando el término “puente” se asocia usualmente con estructuras que requieran llevar el firme de la carretera sobre un lecho de agua establecido, puede ser también que se aplique, por extensión, a estructuras de pasos a desnivel y a carreteras elevadas en áreas urbanas (viaductos).

Las alcantarillas son estructuras transversales de forma diversa cuya función es conducir y desalojar, con la mayor rapidez posible, el agua de las hondonadas y las partes bajas del terreno (thalwegs) que atraviesan el camino. Por la forma de su sección y el material de que están construidas, estas estructuras de drenaje menor se clasifican en tubos, bóvedas, losas sobre estribos y cajones. Las alcantarillas están siempre alojadas en el cuerpo de la terracería. Existen diferentes tipos de éstas, que se describen a continuación:

- ❖ Tubos: de sección interior usualmente circular y que requieren un espesor de terraplén o un colchón mínimo de 0.60 m para un mejor funcionamiento estructural.
- ❖ Bóvedas: son estructuras cuya sección transversal interior está formada por tres principales: piso, dos paredes verticales que son las caras interiores de los estribos y sobre éstas, un arco circular de medio punto o rebajado, que es el intradós de un arco estructural de sección variable con un mínimo espesor en la clave.
- ❖ Losas sobre estribos: son estructuras formadas por dos muros de mampostería de tercera con mortero de cemento 1:5, sobre los que se apoya una losa de concreto reforzado. Cuando la resistencia del terreno es baja se usan estribos mixtos con el muro de mampostería y el cimientado de concreto.

- ❖ Cajones: son estructuras de sección rectangular con paredes, techos y piso de concreto reforzado cuya construcción requiere cuidados especiales. Trabajan en conjunto como un marco rígido que absorbe el peso y el empuje del terraplén, la carga viva y la reacción del terreno.

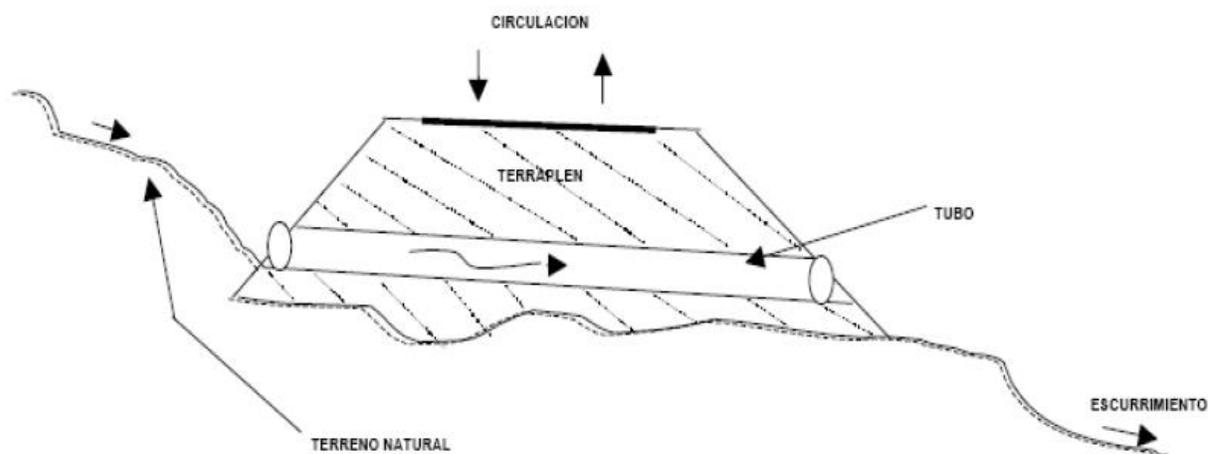


Figura 14 – Proyección de tubo en terraplén.

(Obras de drenaje en caminos y el impacto que éstas causan en el entorno, 2010, págs. 33, Fig.12)

Drenaje profundo

Su misión es impedir el acceso del agua a capas superiores de la carretera-especialmente al firme-, por lo que debe controlar el nivel freático del terreno y los posibles acuíferos y corrientes subterráneas existentes. Emplea diversos tipos de drenes subterráneos, arquetas y tuberías de desagüe.

El drenaje subterráneo es una parte necesaria del sistema total de drenaje para muchas carreteras en las áreas rurales, y funciona conjuntamente con las instalaciones del drenaje superficial para evitar los daños causados por el agua en sus diferentes formas.

Este drenaje consiste por lo regular de un tubo circular colocado en una zanja a una profundidad adecuada, la cual se rellena con material poroso o granular. Los materiales usados de manera primordial para drenes subterráneos incluyen tubos de barro vitrificado, concreto poroso y perforados de metal corrugado (tanto de acero galvanizado como de aluminio). Usualmente el tubo de barro se coloca con las uniones abiertas, en tanto que los tubos de concreto y de metal corrugado perforado se colocan por lo general con las juntas selladas. Los tubos de concreto se pueden colocar también con las juntas abiertas. Es usual que el tamaño de los tubos de drenaje se base en experiencias previas. Sus objetivos principales son el control de la filtración en cortes o sobre laderas, generalmente, estas instalaciones se conocen como “drenes interceptores”, el abatimiento del nivel del agua freática, como en las áreas pantanosas y el drenaje poco profundo de la base y la subrasante. (Ingeniería de Carreteras, 1993).

1.5.2. SUBDRENAJE

Una parte del agua de lluvia que cae sobre la corteza terrestre se evapora, otra escurre sobre ella y el resto se infiltra a las capas interiores. Sin embargo, no toda el agua subterránea procede de la lluvia, sino también de la condensación de vapores arrojados por actividad volcánica, o puede tratarse de agua entrampado como residuo de antiguos lagos u océanos. El agua subterránea se encuentra entre las partículas del suelo o en cavidades, fracturas y fallas de las rocas; en ocasiones forma lagos o corrientes subterráneos. (Ingeniería de Carreteras, 1993).

En los taludes, se pueden presentar fallas conchoidales o tipo creep y en la cama de la obra que desestabiliza la superficie de rodamiento, ya sea que tenga un revestimiento provisional como en los caminos rurales o uno definitivo como los pavimentos.

Existen dos tipos de drenes en carreteras:

- Drenes longitudinales de zanja

Consiste en abrir una zanja al pie de los taludes de corte a una profundidad mínima de 1.5 m e incluso de 4 m. En el fondo, sobre una plantilla de concreto pobre, se coloca un tubo de concreto perforado en la parte inferior y relleno con material filtrante.

La finalidad de este subdrén es bajar el nivel freático de la cama del camino y, en menor escala, disminuir la zona saturada del talud de corte. El material filtrante más adecuado es la grava-arena en greña con tamaño máximo de 2 pulgadas y 5% como máximo de finos pasando la malla 200. Si no se tienen todos los elementos, se puede prescindir del tubo perforado y rellenar la zanja con fragmentos de roca de 15 cm como tamaño máximo o por medio de un dren francés, que actualmente, se están usando con más frecuencia para este fin geotextiles y mallas de plástico. Con eso, se omite el uso de filtros grava-arena.

- Drenes transversales de talud

Cuando existen fuertes filtraciones a través de los taludes de corte, además de los drenes longitudinales de zanja conviene casi siempre utilizar otro tipo de subdrenaje que impida ese flujo y evite daños mayores, que en ocasiones obstaculizan el buen funcionamiento de los caminos.

Para este fin, es usual emplear drenes transversales, que son tubos de acero de 5 cm de diámetro perforados lateralmente, los cuales se introducen por los taludes con pendiente hacia el camino de 5 a 20°. Antes de introducirlos, se hace una perforación de 10 cm con equipo especial. La longitud de estos tubos debe ser tal que crucen las probables superficies de falla. La velocidad de captación de agua depende de la permeabilidad de la masa de suelo.

Cuando hay escurrimiento por los tubos, éstos pueden descargar en la cuneta o aun es factible proveer un sistema que lo capte quizá con tubo vitrificado, de concreto o de plástico. Dependiendo de la intensidad del problema, se colocan 1, 2 o 3 hileras de tubos cuya distancia con los adyacentes varíe de 2 a 5 cm.

- Drenes de la base

El agua que cae sobre la superficie de pavimentos flexibles o rígidos puede penetrar a la base y a la subrasante a través de roturas en la superficie, juntas y acotamientos. Si la base es relativamente impermeable o si se encuentra sobre una subrasante cuyo suelo es impermeable, el agua puede recogerse en la base y en la parte superior de la subrasante. Este defecto puede notarse aun cuando el agua no ha sido llevada hasta la base o subrasante desde abajo por la acción capilar. Por otra parte, el agua así atrapada puede provocar el debilitamiento del material de la base y, en particular, es grave en las áreas sujetas a la acción de temperaturas bajo cero. Los tipos de drenes subterráneos descritos pueden utilizarse para eliminar el agua de la base, aun cuando la experiencia no siempre ha mostrado que este tipo de instalaciones tenga éxito.

- Drenes interceptores

En terrenos ondulados o montañosos, es frecuente que los cortes realizados durante la construcción de la carretera estén expuestos al flujo de las aguas freáticas o la “filtración”. La filtración que se presenta a lo largo de los taludes de corte puede ser un foco de daños para el talud y para la carretera en sí misma. En forma similar, aun cuando la construcción no invada la zona misma de filtración de una sección en la carretera ésta y la estructura del pavimento pueden localizarse ligeramente arriba de la zona de flujo de las aguas freáticas o subterráneas y, por lo tanto, estar sujetas a los efectos nocivos de la acción capilar.

Capítulo 2. IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN DEL PAVIMENTO

La determinación de la patología de degradación que presenta el tramo carretero a estudiar es función de un amplio conjunto de variables de diferente naturaleza que tienen influencia, tanto en el tipo de degradaciones que se desarrollan como en la velocidad y evolución de las mismas. En términos generales, la identificación del patrón de degradaciones, conjuntamente con la evaluación mecánica de las calidades de las capas del pavimento, puede brindar una correcta aproximación del modo en que la estructura del pavimento está trabajando y del estado de servicio o vida útil remanente.

Independientemente del conocimiento específico de los materiales que constituyen las capas del pavimento, es necesario también conocer los suelos de la zona de desplante así como su estado hídrico general, preferentemente a lo largo de al menos un año para poder apreciar mejor las variaciones en resistencia y estabildades volumétricas. En el mismo sentido, la identificación precisa de zonas de degradaciones requiere del reconocimiento de las instalaciones de drenaje puntuales, a fin de determinar si no existen concentraciones de agua debidas a insuficiencias o errores de proyecto.

Las correcciones o adecuaciones estructurales y funcionales que requiere el pavimento en estudio es resultado directo de la correcta evaluación de los patrones de degradación, de las calidades estructurales y de las condiciones locales del subsuelo. En consecuencia, la rehabilitación de los pavimentos a partir de la modelización de estructuras alternativas debe responder en todo momento a las problemáticas identificadas a través de las etapas de inspección y de evaluación que se desarrollan en los párrafos subsucesentes.

2.1. ANTECEDENTES Y UBICACIÓN DEL PAVIMENTO A REHABILITAR

La estructura de pavimento a estudiar forma parte de la autopista Arco Norte y se encuentra específicamente en los tramos del Km 1+200 al Km 2+400, del Km 15+000 al Km 27+000, del Km 36+800 al Km 52+400 del cuerpo único y del Km 52+500 al Km 79+320 en ambos cuerpos. Las figuras siguientes muestran la ubicación de los tramos considerados.

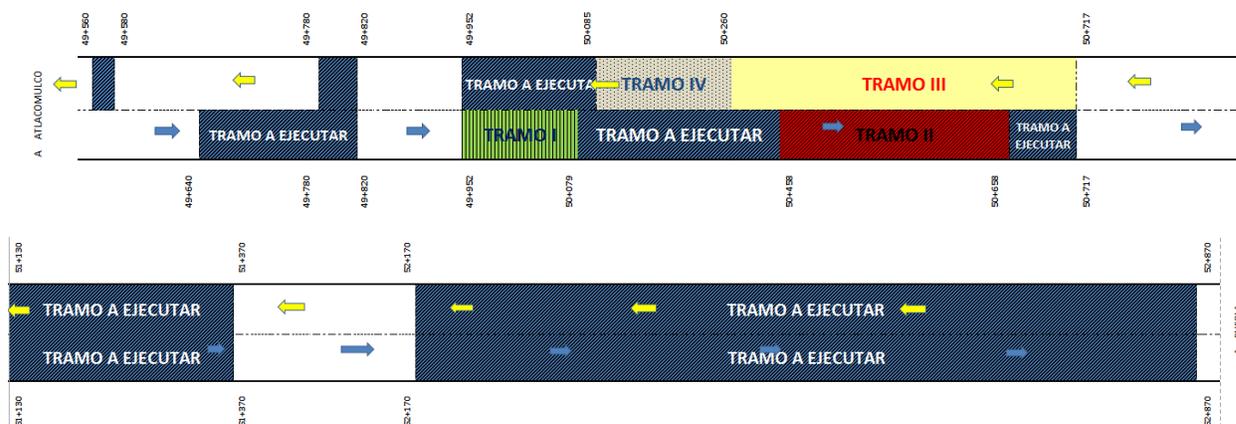


Figura 15 – Ubicación de los trabajos de rehabilitación por tramos.

Este tramo se encuentra ubicado en el municipio de Jilotepec, Estado de México, el proyecto contempla modernizar el camino tipo "C" existente que tiene un ancho de 6.70 m, a un camino tipo "A-2" con una sección de 12.0 m de ancho con dos carriles de circulación de 3.50 m, cada uno y acotamientos para una velocidad de proyecto de 110 Km/h.

La sección típica que se encuentra a lo largo del camino en su gran mayoría y de forma general es la conocida como en terraplén. En general es una zona sensiblemente plana y solamente en pequeños tramos se tiene lomerío. En cuanto al tipo de terreno que se encuentra a lo largo de la línea de trazo y de forma muy general, se encuentran estratos sedimentarios en su mayoría arenas y gravas arcillosas y arenas limosas.

Ubicación geográfica

La cabecera municipal se ubica en las coordenadas 99°31'58" de longitud oeste y 19°57'07" de latitud norte, con una altura 2440 msnm. Se encuentra a 100km de la Ciudad de México, a 96 km de la Ciudad de Toluca y a 139 km de la Ciudad de Querétaro. Sus coordenadas geográficas extremas son las siguientes:

Longitud mínima: 99°26'37" Latitud mínima: 19°52'02". Longitud máxima: 99°44'02" Latitud máxima: 20°12'43"

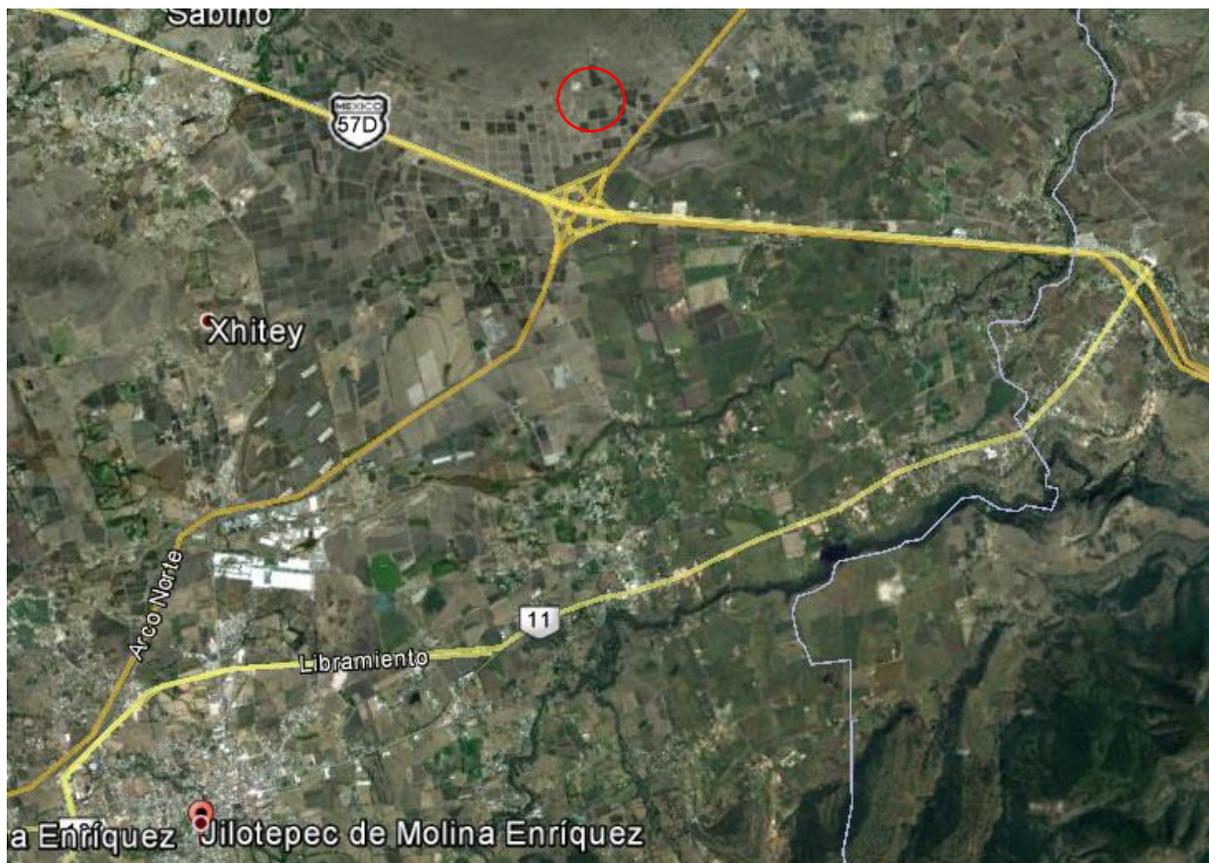


Figura 16 – Vista aérea de la localización de los sitios de trabajos de rehabilitación.

Extensión territorial

El municipio de Jilotepec se localiza al noroeste del Estado de México; tiene una superficie de 586.53 kilómetros cuadrados ocupando el quinto lugar como municipio más extenso del Estado con el 2.62 % de la superficie total del este. Colinda al Norte con el Estado de Hidalgo, al Este que es donde se encuentra el proyecto colinda con el municipio de Soyaniquilpan de Juárez y el Estado de Hidalgo.

Vías de acceso

Con tal ubicación el municipio se ve favorecido por su cercanía al centro del país, al norte de la Cabecera Municipal convergen dos de las principales vía de comunicación terrestre del país, la Autopista México – Querétaro, vialidad conectada con carreteras que conducen al norte, hacia los Estados Unidos de Norte América y al sur con Guatemala y Belice; así como por la autopista “Arco Norte Puebla - Atlacomulco”, acortando el tiempo de traslado entre el Golfo de México y el Océano Pacífico; tal ubicación otorga a Jilotepec una posición privilegiada para el acceso a los grandes mercados y a los servicios médicos, culturales y financieros más conspicuos del centro del país, permitiéndole también servir como puente económico hacia el norte, oriente y poniente de México. El Municipio se constituye así en un centro comercial, cultural, productivo y de servicios de la primera región en que se divide el Estado de México.

Climatología

En la zona predominan los climas templados subhúmedos, con poca variación térmica; la temperatura máxima se presenta antes del solsticio de verano y alcanza los 23°C., no obstante, en años recientes se ha resentido un incremento gradual de la temperatura, en los meses de junio, julio y agosto, rodando los 30°C. Al territorio municipal lo cruzan dos isoterma que delimitan zonas con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 14 y 16°C, al norte y este, y entre 12 y 14°C al oeste y sur. Otros periodos climáticos de relevancia son la sequía intraestival o canícula, que se presentan en el mes de agosto; así como las heladas después del equinoccio de otoño y cuyos efectos se resienten en la gran parte del municipio, su frecuencia es mayor durante los meses de diciembre, enero y febrero; no obstante, al sur del territorio las heladas pueden presentarse desde principios de septiembre hasta marzo.

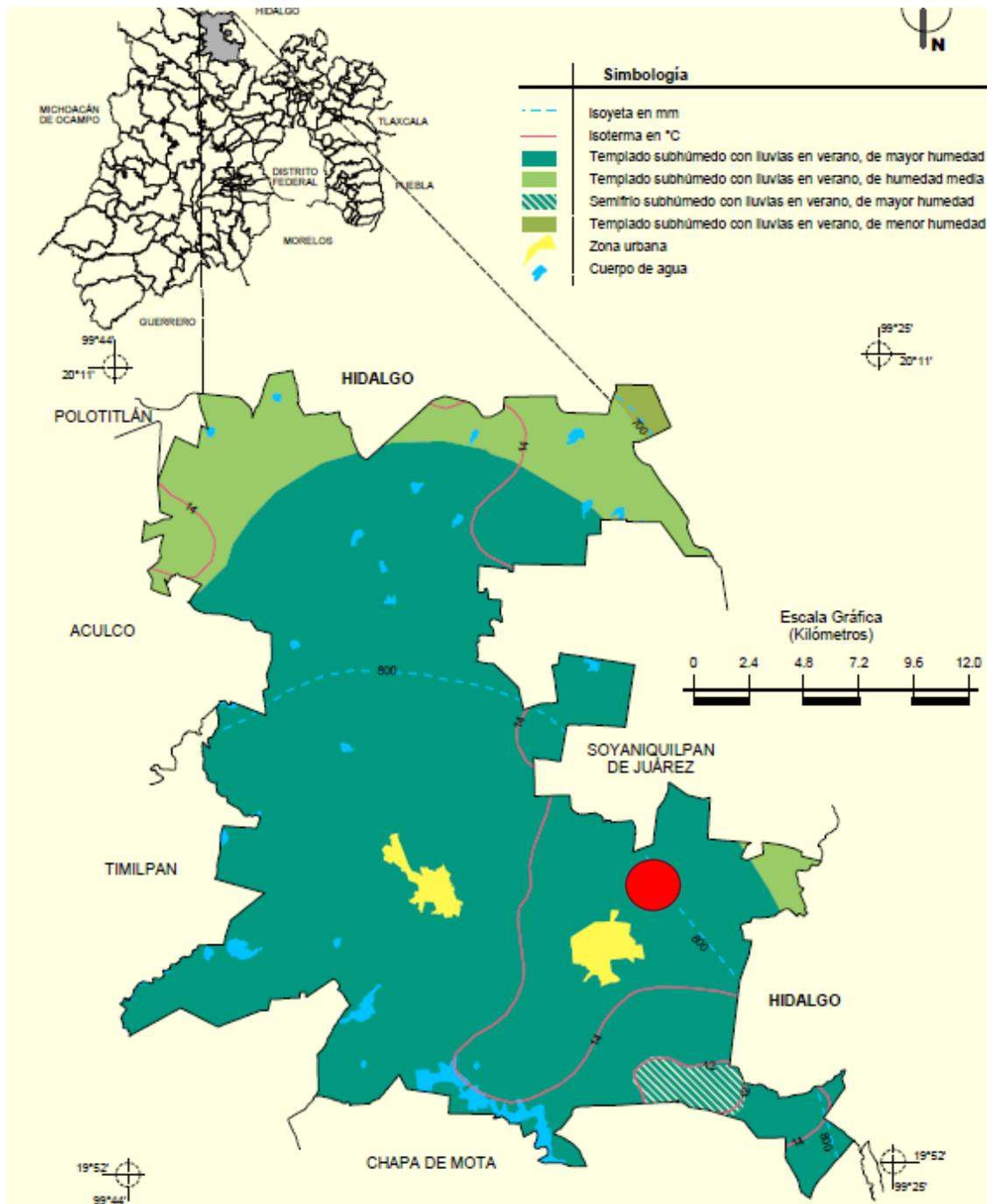


Figura 17 – Información climática de los sitios de trabajos de rehabilitación.

Topografía

Se encuentra conformada por la provincia del eje neovolcánico, y con subprovincias de los lagos y volcanes de Anáhuac y llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo, con el sistema de topoformas de la sierra compleja con el 49.34%, el lomerío de tobas 27.23%, el lomerío de basalto 23.35% y el vaso lacustre con lomerío con el 0.08%.

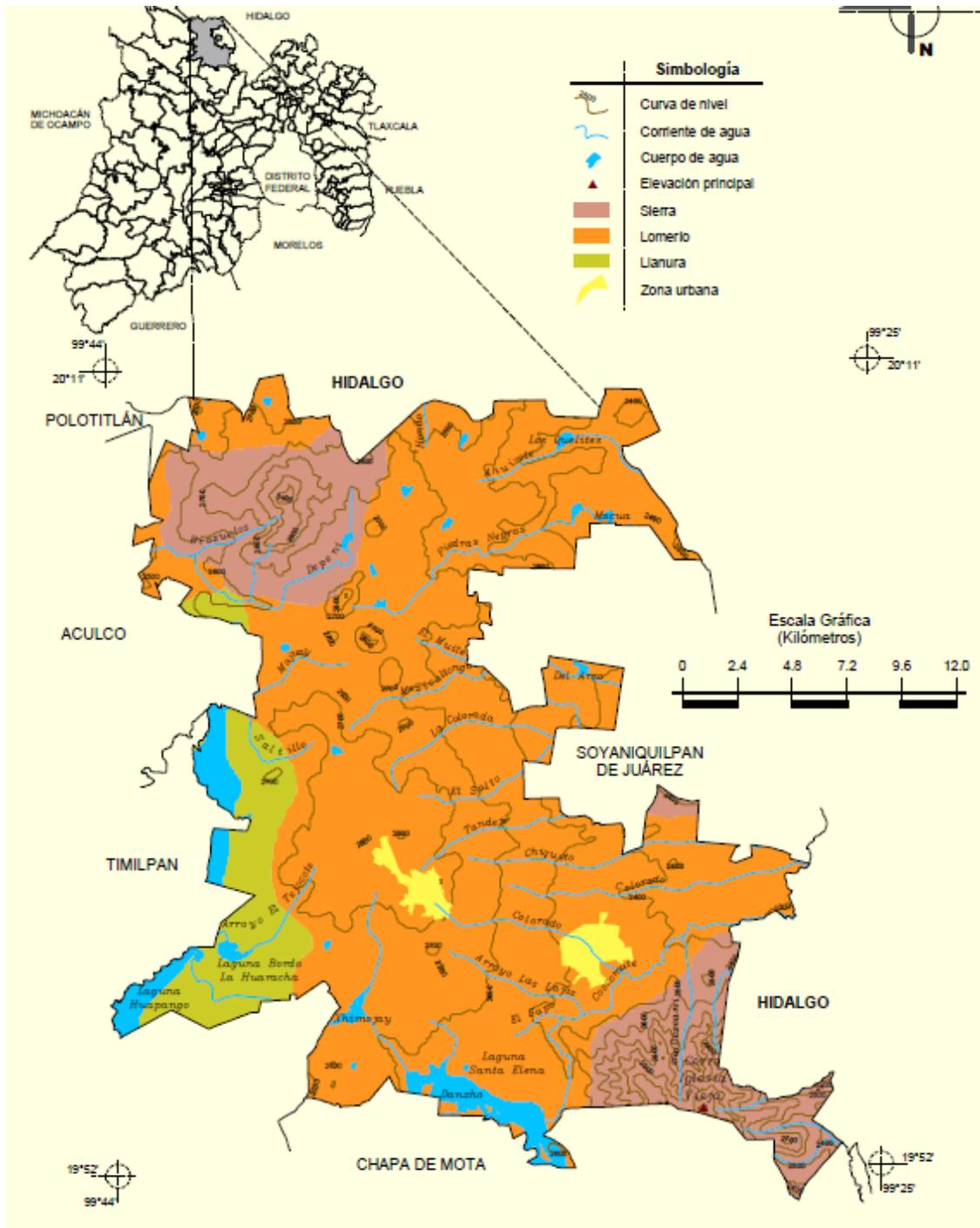


Figura 18 – Información topográfica de los sitios de trabajos de rehabilitación.

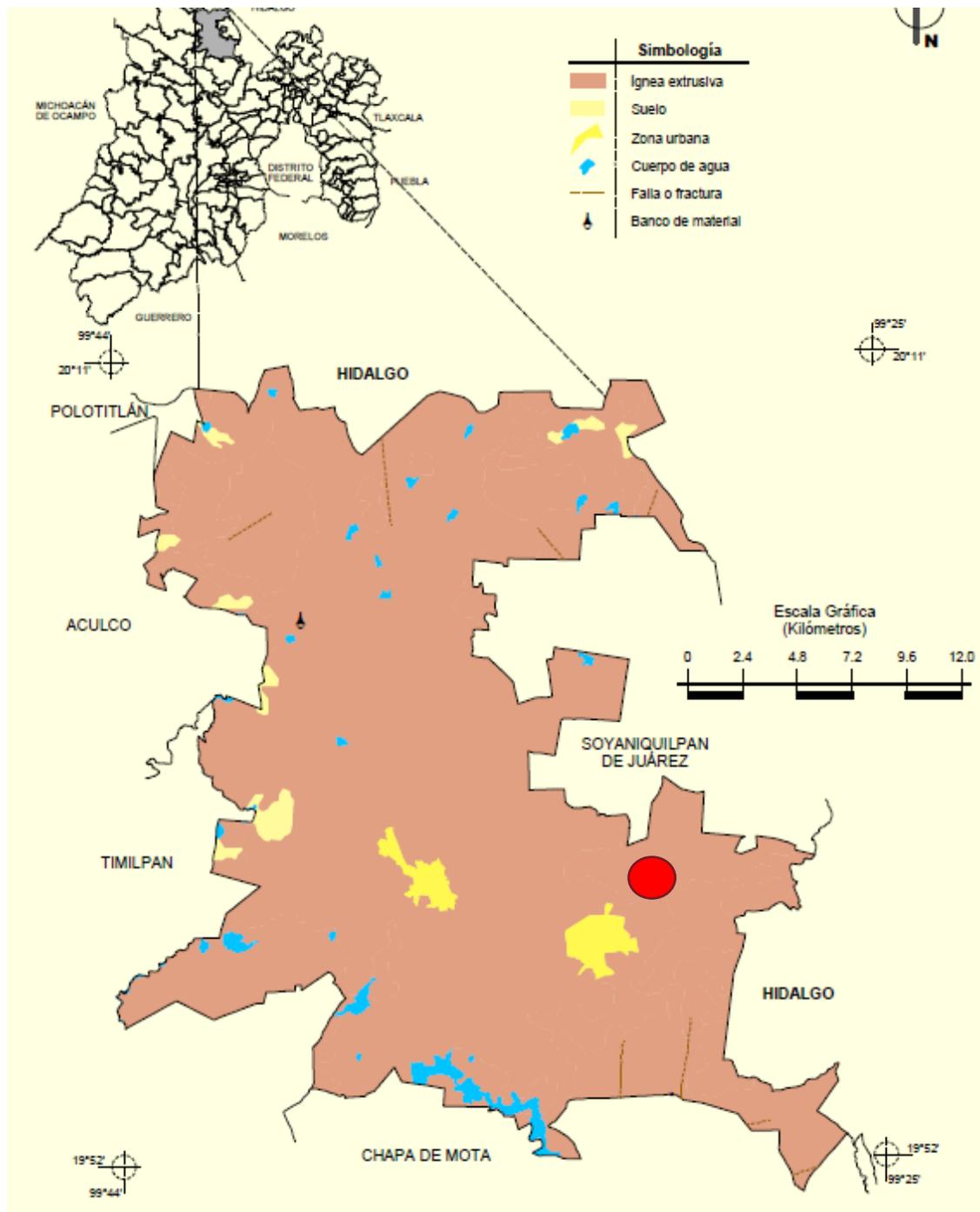


Figura 19 – Información geológica de los sitios de trabajos de rehabilitación.

Geología

El relieve del municipio forma parte del sistema montañoso de la Sierra Nevada del Eje Volcánico y corresponde a la subprovincia fisiográfica de las llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, con frecuente

presencia de lomeríos, con colinas redondeadas en la mayor parte del territorio y una zona muy abrupta en la porción sur. Una pequeña porción al sur del Municipio pertenece a la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, con un sistema de sierra. El Municipio se caracteriza por el predominio de rocas volcánicas recientes (hasta de diez millones de años de antigüedad) que cubren 85% de la superficie, y terciarias (de más de veinte millones de años) en el 15% restante. Las formaciones recientes son calcialcalinas y las terciarias van de ácidas a intermedias; ambas presentan depósitos piroclásticos (fragmentos rocosos arrojados durante las erupciones volcánicas explosivas), aunque las terciarias, además, cuentan con depósitos volcanoclásticos producidos por rocas volcánicas fragmentadas por intemperismo y erosión.

Edafología

En la carta edafológica se puede apreciar que, los suelos del municipio son predominantemente luvisoles, cubriendo aproximadamente 75% de la superficie municipal; los vertisoles representan alrededor de 15%, los feozem 7% y 3% planosoles. Por sus propiedades físicas y químicas, estos suelos volcánicos permiten un aprovechamiento óptimo de los nutrientes, característica que vuelve altamente redituable la aplicación de mezclas fertilizantes de uso comercial al momento de dedicarlos al cultivo agrícola. Los vertisoles se localizan en la parte noreste y sureste del Municipio, entre Acazuchitlán, la Cabecera Municipal y San Pablo Huantepec; para la agricultura son suelos fértiles, pero presentan problemas para su manejo, su dureza dificulta la labranza y requieren de riego. Los luvisoles se encuentran principalmente en la franja del centro del Municipio, así como en las localidades de Agua Escondida y Las Huertas, al norte de la Cabecera Municipal. Estos se determinan por ser fértiles, pero crecidamente susceptibles a la erosión. Por su parte, Los feozem se sitúan en el extremo noroeste y al sur, en las comunidades de Xhixhata y San Pablo Huantepec; estos se utilizan con éxito en la agricultura de temporal o riego. Los planosoles se ciñen en la parte este del Municipio, al noreste de las presas Xhimojay, Santa Elena y Danxho; frecuentemente presentan textura y composición delgada y susceptibles a la erosión, provocando rendimientos agrícolas generalmente bajos.

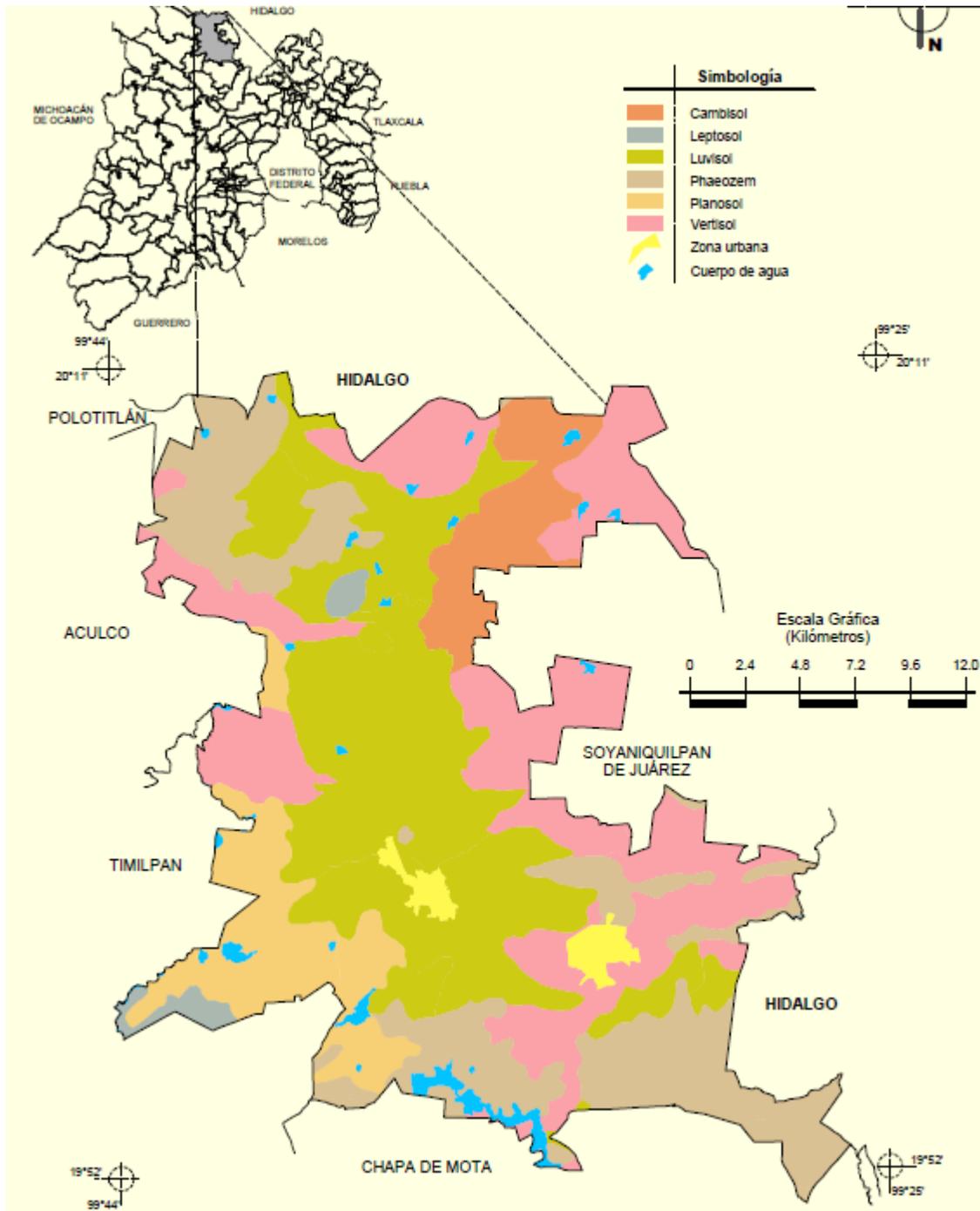


Figura 20 – Información edafológica de los sitios de trabajos de rehabilitación.

Hidrología

La carta hidrológica del Estado de México muestra que Jilotepec pertenece a la región hidrológica del Alto Pánuco, dentro de la cuenca del "Río San Juan", y contiene parcialmente las subcuencas de los ríos "Arroyo Zarco", "Tecozutla", "Alfajayuca", "Tula", "Rosas", "Tlautla" y "El Salto". Las corrientes superficiales más notables son el "Río Coscomate", cuyas aguas se almacenan en la "Presa Danxho", y los arroyos de "Los Charcos", "Las Canoas", "El Colorado", "El Salto", "Grande", "Dedeni", "El Majuay", "Las Cruces", "Los Álvarez", "El Tejocote", "El Verde", "El Jilguero", "Los Fresnos", "La Mina", "Denjhi" y "Los Capulines". En total se contabilizan 44 de estas corrientes intermitentes.

Las principales presas existentes en el municipio son "Huapango", con 120 millones de metros cúbicos de capacidad de almacenamiento y "Danxho", con 31 millones; "Santa Elena", con 5.0 millones y "Los Quelites" y "Xhimojay", con 1.1 millones de metros cúbicos cada una; otras presas de menor capacidad son "La Avellana", "La Joya", "La Huaracha", "La Concepción", "La Tinaja" y "La Palma". También se cuenta con un importante número de bordos para almacenamiento de agua en diferentes localidades. El manantial de San Pablo Huantepec, el más importante de Jilotepec, vierte diez litros de agua por segundo, además están localizados otros 55 manantiales, normalmente sobre explotados en época de estiaje. Cabe hacer notar que el Municipio cuenta con 1,340 cuerpos de agua, ocupando en el año 1989 una superficie de 1,134.1 hectáreas; sin embargo, la zona norte de la municipalidad carece de mantos acuíferos suficientes para solventar los requerimientos de suministro de agua.

Sismicidad

La zona de estudio se encuentra en la zonificación B, que es una zona intermedia, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.



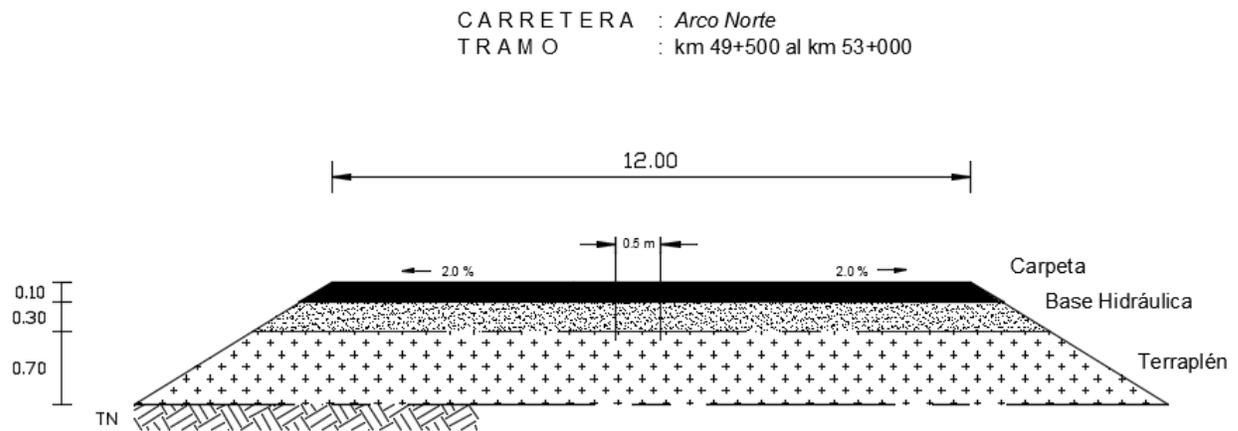
Figura 21 – Zonificación sísmica de los sitios de trabajos de rehabilitación.

Trabajos de rehabilitación recurrentes

La estructura de pavimento presente a lo largo de todos los tramos de estudio es la original o de proyecto y es la misma que ha estado en funcionamiento desde la apertura de la autopista en enero de 2010. A lo largo de los escasos años de circulación, la vialidad ha presentado problemas recurrentes en la calidad de su estructura, siendo necesario la intervención recurrente con trabajos de rehabilitación tanto de tipo estructural como de tipo superficial.

Las degradaciones en la superficie de pavimento han sido de rápida aparición y evolución, constantemente presentando problemas de confort, seguridad y que invariablemente terminan afectando las capas de estructurales de base y subbase. La concesionaria ha determinado (por medios y procedimientos que escapan al alcance del presente trabajo) la ejecución de trabajos denominados internamente como “bacheo superficial” cuando se interviene solo la capa de rodamiento asfáltico y “bacheo profundo” cuando se requiere la reconstrucción adicional de la capa de base. En dicho escenario, las rehabilitaciones no incluyen una readecuación del pavimento para los tráficos de años suplementarios a los diseños, sino solo la reposición de la estructura original.

Para fines de identificación, en la **Figura 22** esquematiza las únicas dos capas tratadas con los bacheos profundos: carpeta y base hidráulica.



ESTRUCTURA EXISTENTE

Figura 22 – Esquema de las capas de carpeta y base hidráulicas tratadas con bacheos profundos.

En principio, las calidades individuales de los materiales que constituyen cada una de las capas del pavimento deberían corresponder a los mínimos respectivos señalados en la normativa para la infraestructura del transporte. En los apartados subsecuentes se presentan los resultados de las verificaciones de dichas calidades mediante sondeos y análisis de laboratorio.

Independientemente del número de intervenciones para rehabilitar y de la calidad supuesta de los materiales utilizados, cada reparación presentaba una durabilidad no mayor a 6 meses o incluso menor, antes de que la superficie de rodadura presentara un estado de degradación importante con baches y hundimientos puntuales. Ante tales condiciones, la empresa concesionaria vio rebasada la efectividad de su estrategia de conservación y solicitó se llevaran a cabo acciones correctivas o que al menos mitigaran las degradaciones que se presentaban tan prematuras.

Para responder a la problemática de establecer una estrategia de conservación adaptada, fue necesario el llevar a cabo el análisis de los causales y comportamientos, tanto de la estructura como de los materiales del pavimento, conjuntamente con el entorno hídrico del suelo de soporte.

En los apartados siguientes se presentará el reconocimiento del estado del pavimento para la estructura del pavimento original, así como para las zonas donde se han llevado a cabo los trabajos de bacheo establecidos y contratados por la empresa concesionaria. El objetivo de tales valoraciones es conocer la efectividad o no de tales trabajos para comprender el porqué de las degradaciones tan prematuras.

2.2. EVALUACIÓN DE DEGRADACIONES EN LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO

2.2.1. ESTADO DEL PAVIMENTO ORIGINAL

La evaluación del tipo y severidad de las degradaciones que se presentan en la superficie del pavimento inicia con el reconocimiento en campo, específicamente en las zonas de los tramos señalados. Para la gran mayoría de los puntos inspeccionados, los problemas que se observan tienen una severidad elevada, toda vez que además de la rapidez con que se desarrollaron, la carpeta asfáltica presenta discontinuidades estructurales que van desde las fisuras con expulsión de finos hasta baches completos.

De manera sintética pero representativa de los tramos, a continuación se presentan imágenes de la superficie del pavimento donde se pueden apreciar los problemas más comunes.



Figura 23 – Carpeta asfáltica en el km 47+000 al km 53+000 del cuerpo único, abril de 2012.

La **Figura 23** ilustra de manera representativa para el tramo del Km 47+000 al Km 53+000, un estado de degradación superficial de la estructura de pavimento en la que:

- Se ha desarrollado en su superficie un estado generalizado de fisuración y de grietas bajo un patrón reconocible como “piel de cocodrilo” y donde el espaciamiento no es mayor a una malla de 30x30 cm. La carpeta asfáltica tiene zonas amplias donde la falla por fatiga se presentó y evolucionó rápidamente.

- Se puede observar claramente que en los bordes de las fisuras el proceso de atrición se encuentra igualmente avanzado, originando las grietas de espesor superior a 2 mm por donde ya se presenta expulsión de material fino, proveniente en su mayoría de la capa de base granular.
- Para ambos sentidos de circulación se han desarrollado roderas de una profundidad mayor a 2 cm y de amplitud mayor a 1 m. En todo caso, la rodera se presenta prácticamente como continua a lo largo de ambos carriles.
- La capa de base granular ha fallado por punzonamiento, debido a la acción combinada de la pérdida de material fino, la inestabilidad granulométrica y la acción del tráfico vehicular.
- La aplicación de material en capa de riego de sello presenta deficiencias en zonas donde ya se ha perdido material granular, así como pequeñas bandas con pérdida de pétreos incluso fuera de las bandas de rodamiento.
- La estructura del pavimento ha llegado al final de su vida útil de manera muy prematura (menos de 3 años de servicio).

El patrón de degradaciones enunciado es básicamente el mismo a lo largo del tramo citado, presentándose ligeras variaciones en la intensidad de los daños, pero no en su composición.



Figura 24 – Carpetas asfálticas km 47+500 cuerpo único, abril de 2012.

La **Figura 24** y la **Figura 25**, muestran ambas los detalles de las degradaciones más importantes que se presentan en la zona de estudio del pavimento. En variaciones de alrededor de un kilómetro, sin cambio

de sección estructural ni de las condiciones de suelo ni del tráfico circulante; el modo en que se presentan y desarrollan las fallas es exactamente el mismo.

Para ambas zonas del pavimento, la cobertura del riego de sello se mantiene en términos generales, aunque se presentan zonas de desprendimientos tanto en las bandas de rodamiento como entre ellas. Dichos defectos del riego de sello se deben en general a una incorrecta aplicación, posiblemente debido a variaciones de la calidad del ligante asfáltico emulsificado. Igualmente se puede deducir la falta de adherencia con la superficie de la carpeta asfáltica, toda vez que en las bandas de rodamiento los esfuerzos tangenciales se maximizan, requiriéndose así una dosificación mayor de un ligante asfáltico de mayor calidad.

Igualmente, importante a destacar es la zona de hundimiento que se presenta en las bandas de rodamiento colindantes de los sentidos de circulación, pero no en las correspondientes a los lindes con el acotamiento. Este tipo de hundimiento puede tener su origen en defectos de calidades mecánicas de las capas de base como inestabilidades por humedad, alto contenido de finos plásticos y granulometrías deficientes.



Figura 25 – Carpeta asfáltica en el km 48+000 cuerpo único, abril de 2012.

Por otra parte, la función de impermeabilización del riego de sello no ve mayor importancia como elemento detonador principal de las degradaciones, ya que se puede apreciar que en las zonas de mayor agrietamiento existen tramos completos donde el agregado se mantuvo unido. En consecuencia, se puede

deducir que la carpeta asfáltica desarrollo rápidamente el estado general de falla a partir de factores propios de sus constituyentes o bien de las capas estructurales.

Un punto importante a señalar son las condiciones de drenaje que presenta el tramo (**Figura 24**) donde la presencia del bordillo no está acompañada de desagües suficientes, más allá de la pendiente ligera del tramo. En tales condiciones las aguas de lluvia no tienen una evacuación adecuada y es esencialmente una zona de encharcamientos, lo que es de resaltar ya que se trata de una zona de terraplén y no una sección en corte.

La **Figura 26** y la **Figura 27** muestran dos puntos representativos de zonas donde la degradación del pavimento ha llegado al punto último de su vida útil. En las dos ilustraciones se observa la generación de baches en donde la profundidad de los mismos alcanzó la totalidad del espesor de la capa de rodamiento.

Ambas zonas presentan el mismo patrón de degradación que las figuras precedentes, pero en el estado donde la atrición de las fisuras han producido grietas, infiltración completa de agua, pérdida de material asfáltico, de finos de la capa de base y finalmente hundimientos y baches.



Figura 26 – Carpeta asfáltica km 51+200, abril de 2012.



Figura 27 – Carpeta asfáltica km 51+250, abril de 2012.

En las dos ilustraciones se puede observar también la poca eficiencia de los bacheos superficiales realizados en los tramos desde prácticamente la apertura de la vialidad, donde las deficiencias en los procesos constructivos hacen que los bacheos tengan un efecto solo paliativo, en el mejor de los casos.

En ambos casos se observa que los bacheos se hacen sin llevar a cabo un “cuadreo” de la zona afectada, es decir, solo se aplica mezcla asfáltica de tipo densa en la zona del hueco, sin trabajar ni rehabilitar las colindancias del mismo donde se encuentran fisuras incipientes, pero que tienen el mismo principio que dio origen al bache. La calidad del terminado de los bacheos también es cuestionable, ya que no se aprecia uniformidad en la superficie sino por el contrario, esta es muy irregular. Esto se debe generalmente a prácticas constructivas deficientes donde la mezcla asfáltica en caliente solo se deja caer en la zona del bache y no recibe compactación por parte de la cuadrilla, argumentándose que será el tráfico vehicular quien lo compactará.

En tales condiciones, el bache queda “reparado” con mezclas asfálticas en caliente que no son aptas para los trabajos ya que se enfría rápidamente en los traslados y que además que no recibe la correcta compactación. Si se agrega que la zona del bache no es limpiada hasta las zonas sanas, es claro que la técnica de bacheo superficial descrita no tiene mayor efecto en la solución de los problemas que presenta la vialidad, por lo que se considera inadaptada.

La **Figura 28** muestra claramente una zona donde los bacheos sucesivos no han contribuido mayormente a solucionar los problemas de confort y seguridad de circulación, además de no aportar en absoluto a solucionar los problemas de degradaciones prematuras.

En específico en dicha figura se puede apreciar que en la parte del trazo los baches se desarrollaron prácticamente en el borde del carril, pero no en la banda de rodamiento interna del mismo carril. Así mismo en el sentido contrario no se observan aun signos de la degradación en baches, no obstante, se trata de la misma estructura de pavimento y tráfico.

Otro punto interesante es la gran humedad que se aprecia entre las grietas del pavimento remanente y los baches, no obstante que se trata del mes de abril, es decir, aun fuera del periodo de lluvias de la zona. Al respecto es interesante remarcar nuevamente los defectos en los sistemas de drenaje superficial que no tienen puntos de desagüe adecuados.

De igual interés es a resaltar la zona del trazo donde se puede apreciar que es de cultivos, con pendientes suaves y con suelos finos propios para tal actividad, pero nocivos en términos de la ingeniería de vías terrestres.



Figura 28 – Carpeta asfáltica km 52+600, abril de 2012.

2.2.2. ESTADO DEL PAVIMENTO REHABILITADO CON BACHEOS

Como se dijo en el apartado anterior, la estrategia de conservación de la empresa concesionaria de la autopista ha sido recurrentemente a base de trabajos de bacheos superficiales y, eventualmente, profundos, cuando el estado de degradación del pavimento es severo o de falla (ver **Figura 28**).

No obstante que dichos trabajos son llevados con cierta periodicidad, es común ver que los problemas que se pretenden solucionar vuelven a aparecer al cabo de solo unos meses de circulación, en ocasiones solo 4 meses después. Tratándose de trabajos de rehabilitación de tan reciente aplicación, las variables de

deterioro (tráfico, envejecimiento y oxidación de la carpeta asfáltica, etc.) pueden ser excluidos de las causales más importantes de degradación del pavimento.

Es importante remarcar que los bacheos, si bien se lleva a cabo siguiendo las mejores prácticas constructivas y en apego a la normatividad vigente en México, no pueden sino reponer la estructura de pavimento a su estado de diseño original, es decir, que más allá de mejorar zonas donde los materiales no hayan alcanzado su calidad o desempeño mecánico óptimo, los bacheos no resolverán problemas externos o que provengan de deficiencias de diseño y dimensionamiento.

La **Figura 29** muestra la terminación de un bacheo superficial que es representativo de los ejecutados a lo largo de los tramos a reparar. Después de la remoción de la carpeta asfáltica degradada, se procede a una recompactación de la capa de base hidráulica, la aplicación de un riego de liga y posteriormente la carpeta en mezcla asfáltica de tipo densa. Los materiales utilizados tanto constituyentes (agregados, asfalto, emulsión de asfalto, etc.) y los fabricados (concreto asfáltico) (*Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de Materiales asfálticos, 2006*) y los fabricados (concreto asfáltico) (*Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2008*) son conforme a las normativas mexicanas correspondientes.

La determinación de dónde se llevan a cabo este tipo de trabajos es, en principio y por las características del contrato, responsabilidad de la empresa concesionaria.



Figura 29 – Ejemplo de bacheo superficial (reposición de carpeta asfáltica), mayo de 2012.

Del mismo modo, la **Figura 30** ejemplifica de manera sucinta los trabajos que corresponden al bacheo profundo, donde además de la carpeta asfáltica son reconstruidas las capas de subbase y bases hidráulicas, aplicando un riego de liga en la parte superior de esta última. Al igual de para el caso anterior, las calidades individuales de materiales constituyentes y fabricados cumplen con los mínimos requeridos por las normas mexicanas.

También en este caso, la determinación de los puntos o zonas específicas del tramo carretero donde serán llevados a cabo este tipo de trabajos es responsabilidad de la empresa concesionaria.



Figura 30 – Ejemplo de bacheo profundo (reposición de subbase, base y carpeta asfáltica), mayo de 2012.

Las zonas del pavimento que fueron rehabilitadas con los procedimientos ejemplificados desarrollaron nuevamente problemas de degradaciones en apenas 3 meses. Para agosto de 2012, varios puntos volvían a mostrar ya agrietamientos generalizados de tipo piel de cocodrilo y con hundimientos puntuales.

La **Figura 31** muestra una parte del pavimento ubicado sobre el Km 47+000 donde se pueden apreciar claramente los problemas de fisuración y de deformaciones producto de la acelerada atrición de las fisuras que, evolucionadas en grietas, permiten la expulsión de finos de la base granular hidráulica. También en este punto se puede resaltar la ausencia de medio de drenaje adecuados y que la sección también se encuentra en terraplén.



Figura 31 – Carpeta asfáltica con piel de cocodrilo apenas 3 meses después de rehabilitada, agosto de 2012.

La **Figura 32** muestra también una zona de pavimento bacheada alrededor del Km 53+000 donde la patología de degradación sigue exactamente los mismos pasos que los ejemplos anteriores, no obstante que la calidad de las capas de base y de carpeta son las requeridas por las normas vigentes.



Figura 32 – Carpeta asfáltica con grietas y atrición 3 meses después de rehabilitada, agosto de 2012.

La auscultación de los tramos del pavimento citados se realizó desde el mes de agosto y también durante el mes de septiembre de 2012, es decir, poco después de la temporada típica de lluvias en la región. Durante tales fechas fue posible apreciar un problema crucial en el pavimento que dada su intensidad es manifiesto a simple vista y que se evidencia como uno de los causales principales de los patrones de degradación, de su severidad y de la velocidad con que se desarrollan.

La figura siguiente muestra como en las zonas falladas existe una gran presencia de agua que se filtra desde las capas sub-estructurales y traspasa la capa de base granular hidráulica. En algunos casos, la cantidad de agua es tal que llega a brotar por los bordes de las zonas bacheadas. Esta circulación de agua es el origen de la migración de finos de la capa de base granular, con su consecuencia de desajustes o inestabilidades granulométricas. Esta inestabilidad provoca la pérdida de sustento de la carpeta asfáltica y favorece su fracturación prematura.



Figura 33 – Borde de zona bacheada fracturada con escurrimientos y pérdida de finos, agosto de 2012.

2.3. EXPLORACIÓN DE LAS CAPAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO

Las capas de pavimento y sus propiedades individuales fueron verificadas una por una en cuanto a sus calidades mecánicas y de sus materiales constituyentes, acorde a los métodos de muestreo y de prueba de materiales de la normativa para la infraestructura del transporte (**Método de muestreo y prueba de materiales, Materiales para pavimentos, Superficie de rodadura, Índice de perfil, 2006**).

La intención de tal verificación es tener una medida cuantificable tanto de las calidades mecánicas de los materiales como de su formulación y colocación en obra, para poder estimar cual o cuales de sus comportamientos ha llevado al estado de degradación observado recurrentemente. Más allá de los flujos de agua que ya se presentaron en el apartado anterior, es importante conocer la sensibilidad de los materiales en las capas ante las condiciones de saturación y de flujo que se presentan.

Del mismo modo, las exploraciones en las capas del pavimento permitirán verificar la configuración de proyecto de la estructura y las condiciones de servicio reales. En específico se busca conocer la calidad y comportamiento de las capas de terracerías y el suelo de desplante.

La verificación se llevó a cabo mediante la toma directa de muestras de cada capa, a través de sondeos con recuperación de muestras inalteradas y extracción de corazones para la carpeta asfáltica.



Figura 34 – Extracción de muestra de carpeta asfáltica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.

La **Figura 34** muestra una prueba de extracción de corazones de la carpeta asfáltica, en muestras de 4 pulgadas de diámetro interior para ser verificadas a través de los parámetros mecánicos del método de diseño Marshall. En específico se trata de verificar si el material colocado cumple con los parámetros mínimos de calidad, según el apartado D.1.1.1 “Mezcla asfáltica de granulometría densa diseñada por el

método Marshall” de la norma N-CMT-4-05-003/16 (Caracticas de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para Carreteras, 2016).

Se busca determinar:

- Granulometría.
- Estabilidad (N) y Flujo (mm).
- Grado de compactación (%).

Para el análisis del resto de las capas del pavimento, se procedió a la extracción de muestras alteradas como se muestra en la **Figura 35** para capa de base y la **Figura 36** para la capa de subbase y la **Figura 37** para las terracerías.



Figura 35 – Extracción de muestra en capa de base hidráulica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.



Figura 36 – Extracción de muestra en capa de subbase hidráulica para análisis en laboratorio, agosto de 2012.



Figura 37 – Extracción de muestras en capas de terracerías para análisis en laboratorio, agosto de 2012.

Al igual que en el caso anterior, la extracción de muestras deberá aportar la información referente a las calidades mecánicas de las capas, acorde con las normas:

- N-CMT-4-02-002/16 - Materiales para capas de base hidráulica (*Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y bases, Materiales para bases hidráulicas, 2016*).
- N-CMT-4-02-001/16 - Materiales para capas de sub-base (*Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales para subbases, 2016*).
- N-CMT-1-03/02 - Materiales para capas de subrasante (*Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subrasante, 2002*).

Acorde con tales normas, la verificación de la calidad de los materiales se hará, respetando los umbrales propios de cada tipo de capa, mediante los siguientes ensayos de laboratorio:

- Grados de compactación.
- Granulometrías.
- Contenidos de humedad.
- Pruebas de Valor Relativo de Soporte.
- Desgaste de Los Ángeles.
- Análisis de base y subbase hidráulica.

Todos los ensayos se ejecutan de acuerdo con los procedimientos establecidos en el apartado “Métodos de muestreo de y prueba de materiales MMP” de la normativa para la infraestructura del transporte NIT (*1. Suelos y Materiales para terracerías, 4. Materiales para Pavimentos*).

La realización de las exploraciones también arrojó la verificación de la configuración estructural original o de proyecto inicial, además claro de los espesores de cada capa. Para el conjunto de sondeos realizados a lo largo del tramo carretero en estudio, la estructura encontrada es en general satisfactoria en cuanto a los espesores, tal como lo muestra la **Figura 38**.

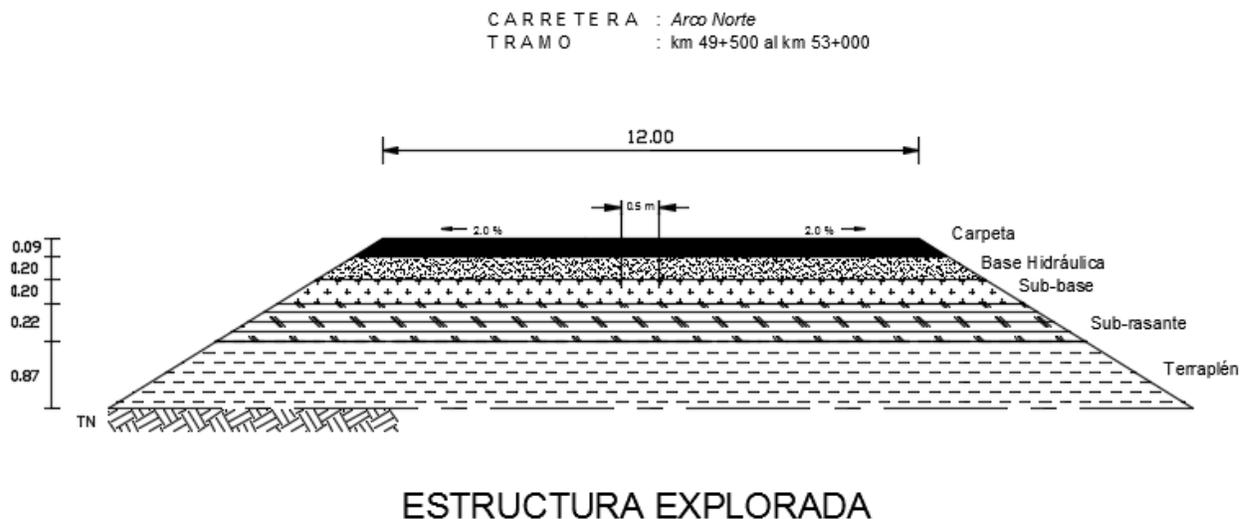


Figura 38 – Sección estructural del pavimento verificada después de sondeos a cielo abierto, agosto de 2012.

En cuanto a la verificación de las calidades de las capas constituyentes del pavimento, los ensayos de laboratorio permiten verificar:

2.3.1. CARPETA ASFÁLTICA

La formulación de carpeta asfáltica corresponde bien en términos generales a los requisitos de calidad de la norma N-CMT-4-05-003/16 (*Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras, 2016*), por lo que respecta a la composición granulométrica y al tipo de agregado propuesto.

Sin embargo, existen algunas dispersiones en cuanto a las características mecánicas mínimas a obtener, tanto para los valores de estabilidad como para los de flujo. En términos generales, dichas deficiencias en cuanto a la resistencia corresponden bien con valores de compactación insuficientes de acuerdo a las necesidades del diseño Marshall. El cemento asfáltico utilizado en la carpeta es un AC-20 que corresponde en general al grado PG 64.

Adicionalmente, es necesario remarcar que la norma N-CMT-4-05-004-08 “Calidad de materiales asfálticos grado PG” recomienda, en sus requisitos de calidad del cemento asfáltico, la utilización de un grado PG equivalente a 72, dado que el tráfico esperado es superior a los 10 millones de ejes equivalentes durante su vida de proyecto.

En dicho sentido, es necesario replantearse la formulación del concreto asfáltico a utilizarse en la carpeta de rodadura, sea a través de un mejoramiento del esqueleto granular o bien la utilización de un ligante asfáltico de grado PG 72 o superior. El criterio de selección es claro, las características supuestas desde la etapa de diseño del reforzamiento o de la nueva estructura.

2.3.2. BASE Y SUBBASE GRANULAR HIDRÁULICA

Estas capas presentan condiciones de resistencia (CBR) adecuadas en estado seco, la presencia de material fino plástico hace que las capas sean inestables en condiciones de saturación, como se presentaron en los apartados anteriores.

La presencia de materiales plásticos en las capas hidráulicas obedece a una costumbre o hábito nocivo, y por desgracia bastante común entre los constructores de caminos, de agregar arcillas plásticas al esqueleto granular para aumentar su peso volumétrico y disminuir sus vacíos. Esta práctica se conoce comúnmente con el nombre de “agregar un cementante” y es una prueba indirecta de deficiencia constructiva y de supervisión desde la etapa de construcción del pavimento original.

Otro aspecto importante a remarcar es la presencia de partículas de agregado cuya forma no es adecuada, por sobrepasar ampliamente (a simple vista) el coeficiente de partículas lajeadas. Esta deficiencia en forma y proporción de agregados también contribuye a inestabilidad del esqueleto granular y baja resistencia. Esto también es prueba indirecta de las deficiencias constructivas.

La **Figura 39** y la **Figura 40** ejemplifican claramente el estado de saturación y escurrimiento de agua que desarrollaron las capas de base y de subbase construidas de la manera y en las condiciones descritas.



Figura 39 – Gravas mal graduadas y empackadas en finos plásticos, septiembre de 2012.

Las condiciones de humedad observadas, conjuntamente con las deficiencias de proporcionamiento en los materiales de base, son uno de los factores principales de las condiciones de degradación prematura de la estructura del pavimento.



Figura 40 – Sondeo en capas de base y subbase con escurrimiento de agua, septiembre de 2012.

Las características mecánicas más importantes y representativas de la base hidráulica, encontradas durante las exploraciones, se muestran a continuación:

Tamaño máximo, mm	2"
% Retenido en malla de 50 mm	0.00
% Retenido en malla de 4.75 mm	70.00
% Retenido en malla de 0.425 mm	28.00
% Pasante malla de 0.075 mm	2.00
Equivalente de arena, %	22.00
Límite líquido, %	29.00
Límite plástico, %	21.00
Índice plástico, %	8.00
M.V.S. Suelta, kg/m ³	1622
M.V.S. Máxima, kg/m ³	2067
Humedad óptima, %	7.5
Absorción, %	1.80
Densidad	2.60
Valor Soporte de California (CBR) %	78
Expansión, %	1.00
Desgaste de Los Ángeles, %	25.00
Partículas lajeadas y alargadas, %	20.00
Clasificación SUCS-SCT	GC

Tabla 9 - Propiedades promedio de la capa de base hidráulica en los sondeos de exploración.

Las características mecánicas más importantes y representativas de la subbase encontradas en la exploración del suelo, se muestran a continuación:

Tamaño máximo, mm	2"
% Retenido en malla de 50 mm	0.00
% Retenido en malla de 4.75 mm	65.00
% Retenido en malla de 0.425 mm	33.00
% Pasante malla de 0.075 mm	2.00
Equivalente de arena, %	19.00
Límite líquido, %	33.00
Límite plástico, %	24.00
Índice plástico, %	9.00
M.V.S. Suelta, kg/m ³	1522
M.V.S. Máxima, kg/m ³	2228
Humedad óptima, %	7.7
Absorción, %	1.52
Densidad	2.71
Valor Soporte de California (CBR) %	83
Expansión, %	1.20
Desgaste de Los Ángeles, %	26.00
Partículas lajeadas y alargadas, %	21.00
Clasificación SUCS-SCT	GM

Tabla 10 - Propiedades promedio de la capa de subbase hidráulica en los sondeos de exploración.

Como lo demuestra la información, las características de los materiales ya no cumplen con las especificaciones mínimas de la normativa SCT.

2.3.3. TERRACERÍAS

Los cuerpos de terracerías encontrados en los sondeos, llámense subrasante y eventuales capas inferiores, no se distinguen mayormente en cuanto a su granulometría ni calidad, ya que son básicamente construidos a partir de los mismos bancos de materiales. Por tanto, presentan las mismas características en todas sus capas y espesores.

Los elementos finos plásticos que se encuentran presentes son de la misma naturaleza que los que se encontraron en las capas estructurales de base, pero en contenidos sumamente elevados (> 20%) y de gran variabilidad a lo largo de los sondeos.

La **Figura 41** muestra cómo, al igual que para las capas superiores, las terracerías se encuentran saturadas de agua y con escurrimientos siempre presentes a lo largo de anteriores trabajos de rehabilitación. Las terracerías presentan así, problemas de resistencia e inestabilidad de volumétrica.



Figura 41 – Saturación y escurrimiento de agua a nivel de subbase y terracerías, septiembre de 2012.

La adecuación de la estructura de pavimento y el consecuente redimensionamiento debe de partir forzosamente de la corrección de las condiciones de humedad y baja resistencia de las capas de terracerías.

A continuación, se muestra las calidades obtenidas de los sondeos de exploración de la capa subrasante y terraplén existente.

Capa	Subrasante	Terraplén
Tamaño máximo, mm	2"	3"
% Retenido en malla de 50 mm	0.00	9.00
% Retenido en malla de 4.75 mm	12.00	37.00
% Retenido en malla de 0.425 mm	35.00	36.00
% Pasante malla de 0.075 mm	53.00	27.00
Límite líquido, %	51.00	73.00
Límite plástico, %	44.00	57.00
Índice plástico, %	7.00	16.00
Contracción lineal, %	8.0	9.0
M.V.S. Suelta, kg/m ³	1025	1288
M.V.S. Máxima, kg/m ³	1472	1736
Humedad óptima, %	32.8	22.2
Humedad del lugar, %	31.00	21.00
Compactación del lugar, %	95	90
Valor Soporte de California (CBR) %	11	9.7
Expansión, %	1.57	3.30
Clasificación SUCS-SCT	MH	OH

Tabla 11 - Propiedades promedio de las capas de subrasante y terraplén en los sondeos de exploración.

2.3.4. ELEMENTOS DE DRENAJE

A lo largo de los tramos inspeccionados, en especial entre el Km 47+000 y el 53+500 se encontraron algunos elementos para la contención de la humedad del suelo, conocidos generalmente como sub-drenes. Dichos elementos en materiales de plástico, fueron colocados como pantallas impermeables a ambos lados de los hombros de la estructura del pavimento, desde la superficie hasta una profundidad de alrededor de 50 cm.

Los sub-drenes fueron emplazados en tramos continuos, tanto en las zonas donde la sección del pavimento se encuentra en corte como en las que corresponden a terraplén.

CORTE TRANSVERSAL TIPO DE ESTRUCTURA DEL KM 39+000 AL KM 53+650 CUERPO ÚNICO

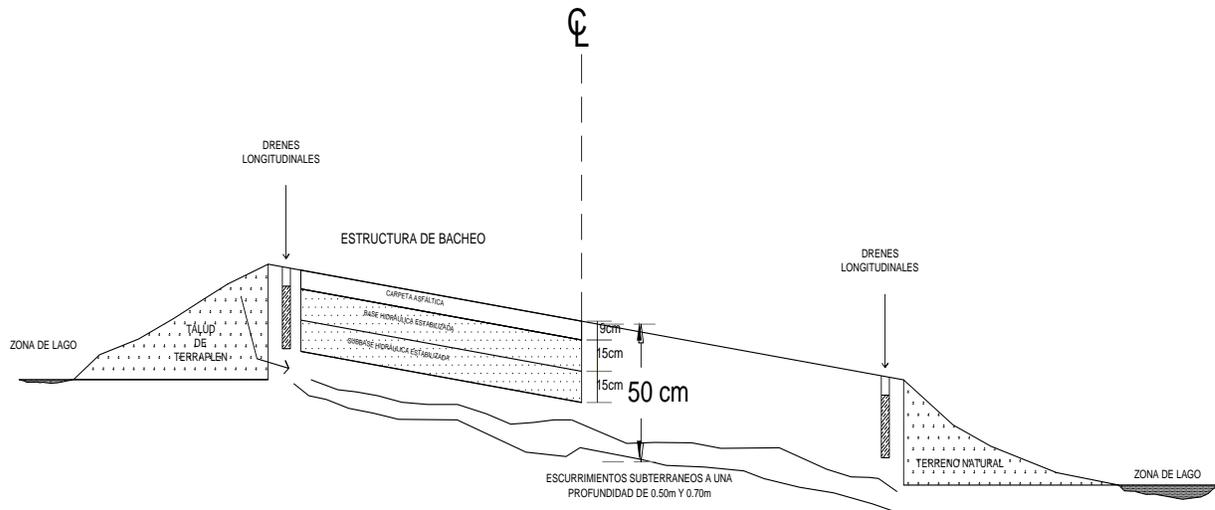


Figura 42 – Sección tipo de la estructura del pavimento con sub-drenes laterales, septiembre de 2012.

La **Figura 42** muestra la disposición de los sub-drenes de la manera descrita tuvo un efecto nulo, sino es que negativo en la evacuación las aguas de la estructura del pavimento. En las condiciones observadas, los sub-drenes fueron ineficaces en su misión de retener el agua en las pendientes descendientes (costado izquierdo del esquema), toda vez que su profundidad es insuficiente para actuar como pantalla impermeable. Agua abajo (parte derecha del esquema) el sub-dren actúa como un impedimento para la evacuación del agua, favoreciendo por el contrario su permanencia.



Figura 43 – Saturación y escurrimiento en los sub-drenes laterales, septiembre de 2012.

Si se considera además que las capas del pavimento desde las terracerías hasta la base se encuentran con altos contenidos de material plástico, es claro comprender el problema de ascensión capilar y saturación que presenta el pavimento. La **Figura 43** ejemplifica las condiciones negativas que se enunciaron en el párrafo anterior y que se constataron a lo largo del tramo carretero.

2.4. DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS

El diagnóstico de la situación del pavimento se presenta a través de las inspecciones visuales de la superficie y de las mecánicas de las capas estructurales y de terracerías. En general y como se puede ver en los apartados precedentes, la patología de las degradaciones obedece a la combinación de varios factores a considerar:

- La estructura original del pavimento presenta un comportamiento de tipo “flexible”, compuesta por una capa de rodamiento en concreto asfáltico de tipo denso, de espesor promedio de 10 cm. La capa de base de alrededor de 30 cm de espesor está constituida a su vez por gravas de 5 cm de tamaño máximo mezcladas con materiales finos de naturaleza limosa o incluso arcillosa. Un cuerpo de terracerías de alrededor de 70 cm compuesto por una subrasante mezclada con finos limosos y terreno natural fino y de plasticidad considerable.
- Durante los primeros trabajos para la rehabilitación, se encontró que en algunos puntos el nivel de aguas freáticas se presentaba a profundidades cercanas a los 110 cm. Dicha condición es importante para conocer el estado hídrico y el comportamiento general de la estructura.
- La zona considerada presenta en su conjunto una problemática ligada a la ascensión capilar de agua y la presencia frecuente de humedad del suelo desde el nivel de desplante hasta las capas estructurales a saber en este caso, la capa de base granular hidráulica.
- La presencia de humedad en todas las capas es el origen de dos problemas mayores: la disminución de la capacidad portante de cada una de las capas afectadas y de cambios volumétricos en dichas capas cada vez que la humedad desciende o asciende, con los consiguientes efectos en el conjunto del pavimento. Aunque por separado y en condiciones idealmente secas, cada material de las capas de base y subrasante puedan presentar resistencias y comportamientos adecuados, la variabilidad de las condiciones hídricas no permite un funcionamiento correcto.
- Las degradaciones presentes en la superficie se dan como consecuencia de las variaciones volumétricas de las capas subyacentes y la afectación de la resistencia prevista de cada capa. Esta primera problemática explica parcialmente las zonas de hundimientos que se presentan en tramos completos del cuerpo de la carretera.
- En este mismo sentido, la capa de rodadura presenta roderas debido a la pérdida de sustento de su capa de base, con la consecuente deformación que conlleva a un desprendimiento de la zona de transición (vinculada posiblemente a un deficiente riego de liga). El resultado es una fatiga prematura que la capa de rodamiento manifestada a través de fisuras que van en todo el sentido

de la rodadura y que en varios puntos evoluciona en “pieles de cocodrilo”. Finalmente, los baches así generados son profundos y de amplitudes mayores a 2 m.

- La humedad de las capas, por ascensión capilar, se ve agravada por la ausencia de elementos de captación y desalojo de agua, ya sean superficiales y sobre todo en los costados de la estructura del pavimento (filtros o drenes).
- La estructura existente no presenta una capa de subbase que permite la transmisión de esfuerzos hacia las capas de terracerías de manera que las sollicitaciones sean disminuidas, más aún considerando la baja capacidad portante de las mismas.
- Tanto la capa de base como la de subrasante presentan mezclas de materiales granulares gruesos (gravas) con materiales muy finos de mediana plasticidad. No obstante que estas capas presentan granulometrías y resistencias aceptables en condiciones secas, la presencia de estos elementos finos facilita la ascensión capilar de la humedad de subsuelo y su presencia.
- Finalmente, la presencia de pantallas impermeables llamadas “sub-drenes” en los costados de la estructura del pavimento, toda vez que estando mal instalados, funcionan más como un impedimento al desalojo de humedad que como un elemento aislante. La presencia de los mismos es en consecuencia un factor agravante en el comportamiento general de la estructura.

2.4.1. NECESIDADES DE REFORZAMIENTO Y RECONSTRUCCIÓN

Después de la revisión de las patologías de degradación presentadas y desarrolladas en los apartados precedentes, las necesidades de reforzamiento y de reconstrucción del pavimento deben responder a dos aspectos básicos que mostraron deficiencias recurrentes, a saber:

- Corrección de defectos de formulación de materiales para capa de rodamiento y de bases granulares hidráulicas.
- Mejoramiento de las condiciones de sub-drenaje y control de humedad del terreno natural.

El primer problema deberá ser abordado llevando a cabo una reformulación completa del concreto asfáltico que será utilizado para la construcción de la carpeta. Se propondrá igualmente la utilización de un ligante asfáltico modificado con polímeros SBS, conforme a las recomendaciones de grados PG aplicables según la normatividad mexicana.

Por lo que respecta a las gravas hidráulicas para capas de base, estas deberán igualmente reformularse teniendo en cuenta los criterios mínimos de resistencia de las normas mexicanas y del método de diseño, haciendo hincapié los desempeños mecánicos. En este caso, también será abordada una posibilidad a partir de la inclusión de una pequeña cantidad de cemento portland como agente modificador, para aumentar la resistencia de la capa de base y reducir la sensibilidad a la humedad de ésta en eventuales condiciones de saturación por ascensión capilar.

Por otro lado, en lo referente al mejoramiento de las condiciones de sub-drenaje y control de humedad del terreno natural; será necesario tener en cuenta la modificación de las características de la capa subrasante en incluir una capa de filtro para limitar la ascensión de humedad por capilaridad. Para ambos casos se requiere un rediseño de los esqueletos granulares de los pétreos a usar.

El cálculo estructural del pavimento se hará de conformidad a los procedimientos y recomendaciones del método AASHTO de 1993.

Capítulo 3. REDIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

La atención a los problemas del pavimento, que se identificaron y describieron en párrafos anteriores, se aborda en el presente capítulo a través del análisis de dos posibilidades de solución estructural, a saber:

- Reforzamiento de la estructura actual, mediante el empleo de sobrecapas de concreto asfáltico en la carpeta de rodamiento. Donde eventualmente se pueda considerar la inclusión de gravas mejoradas y/o estabilizadas que contribuyan al aumento de la capacidad estructural combinada.
- Reconfiguración de la estructura del pavimento actual, considerando mejoras en los materiales de cada capa, así como la inclusión de capas granulares gruesas como elementos de control de la humedad por ascensión capilar.

Las dos posibilidades, si bien tienen el objetivo en común de rehabilitar el pavimento, difieren en sus procedimientos y en los requerimientos o datos de entrada.

Existen diferentes métodos para llevar a cabo el dimensionamiento de las estructuras, tanto para fines de reforzamiento como para estructuras nuevas. En los apartados siguientes se presentarán los cálculos de las modelizaciones para las dos posibilidades, basados en los procedimientos descritos en AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures de 1993 ([AASHTO Guide for Design of Pavement Structures , 1993, págs. II-31](#)).

Sin menos cabo de la pertinencia o aplicabilidad de otros métodos de diseño, la decisión de utilizar la guía AASHTO de 1993 obedece a que dicho documento, además de ser uno de los más utilizados en el mundo y de amplia experiencia, presenta dos apartados específicos para el problema general planteado este capítulo, es decir un módulo de cálculo para estructuras nuevas (Part II – Pavement Design Procedures For New Construction Or Reconstruction) y una para reforzamiento de pavimentos (Pavement Design Procedures For Rehabilitation Of Existing Pavements).

3.1. REFORZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA EXISTENTE

La intención de evaluar la posibilidad de determinar un reforzamiento de pavimentos sea a través de una sobre-carpeta de concreto asfáltico con o sin inclusión de capa de base, es proveer una solución relativamente sencilla y rápida que permita reponer las condiciones ideales de circulación de la vialidad sin afectar mayormente el tráfico vehicular. Del mismo modo, la solución sería también la más barata, toda vez que se puede ejecutar sin afectar mayormente las capas del pavimento y sin realizar trabajos profundos.

Desde el punto de vista de la configuración estructural, la alternativa de reforzamiento no puede proveer una corrección directa de las deficiencias de resistencia, constituyentes y comportamiento observadas en las capas de base y de terracerías. El concepto básico, sin embargo, es compensar esa falta de resistencia evidente mediante el sobreespesor de la carpeta asfáltica de mayor resistencia. Los resultados de estas hipótesis se verán en el capítulo correspondiente al seguimiento y evaluación de resultados en campo.

Para el diseño del reforzamiento de la estructura de pavimento se procede a analizar conforme a los pasos que dicta el método AASHTO 1993, mismos que se resumen a continuación.

El análisis se realiza con el método de California que utiliza dos curvas que se muestran a continuación.

La **Figura 44**, muestra la relación entre la deflexión admisible y la repetición de carga en función del espesor de la superficie, así que sirve como guía de diseño que se puede usar como una primera estimación para el grosor de la superposición requerida.

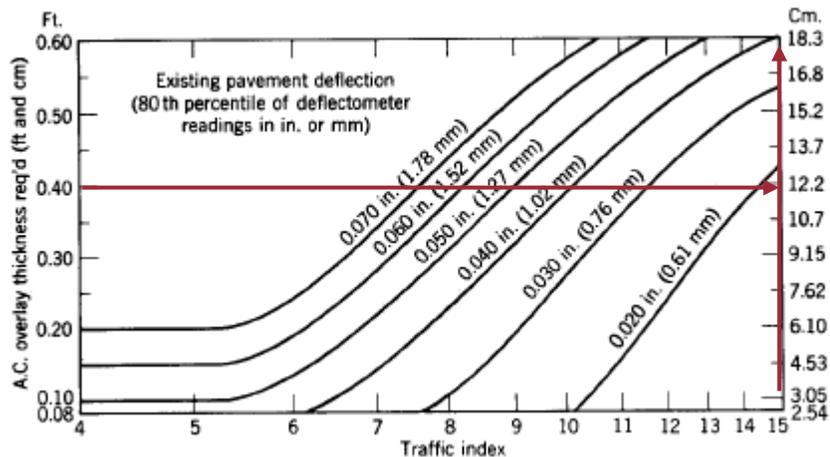


Figura 44 – Guía de diseño de recubrimiento de concreto asfáltico.
(Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 683, Fig 20.9)

Así que, se puede apreciar que, ingresando con un tráfico alto, según la conversión mostrada más adelante, tenemos un índice de tráfico de 15, y considerando un espesor de concreto asfáltico de sobrecarpeta requerido propuesto de 12 cm, apenas se acerca a la curva de deflexiones de 0.61 mm, por lo tanto el diseño sería adecuado.

El tráfico se mide en este método mediante el índice de tráfico basado en cargas equivalentes de 5,000 libras, por lo tanto, en este proyecto contamos con un valor de ejes equivalentes igual a 62,892,941 ton, pero como el método utiliza el sistema inglés, se hace la conversión correspondiente, así que, como conocemos los ejes equivalentes, utilizamos la fórmula de estimación de índice de tráfico (f_j), obteniendo el siguiente valor:

$$f_j = \left(\frac{125,785,882,000}{10,000} \right)^4 = 2.50E + 28$$

(Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 685, equation 4.32)

Por lo tanto, la carga equivalente de 500 libras por rueda (eje de 10,000 libras) queda definido por el valor de 2.5×10^{12} , conociendo la equivalencia, se encuentra el índice de tráfico, el cual el método lo maneja de 12 a partir de un valor de TDPA mayor a 40,000 libras.

En la **Figura 45**, se muestra la relación entre la deflexión admisible y la repetición de carga en función del espesor ya definido en la tabla anterior. Y confirmamos el índice de tráfico con valor de 15 (mayor a 12) y la deflexión tolerable promedio que es de 8×10^{-3} in (estadísticamente hablando en el método), por lo tanto, introduciendo los dos valores a la tabla, tocamos la recta de espesor correspondiente a 0.40 ft de espesor mínimo requerido de concreto asfáltico, quedando confirmado el valor ya propuesto al inicio con la Figura 44, que inicialmente eran los 12.2 cm.

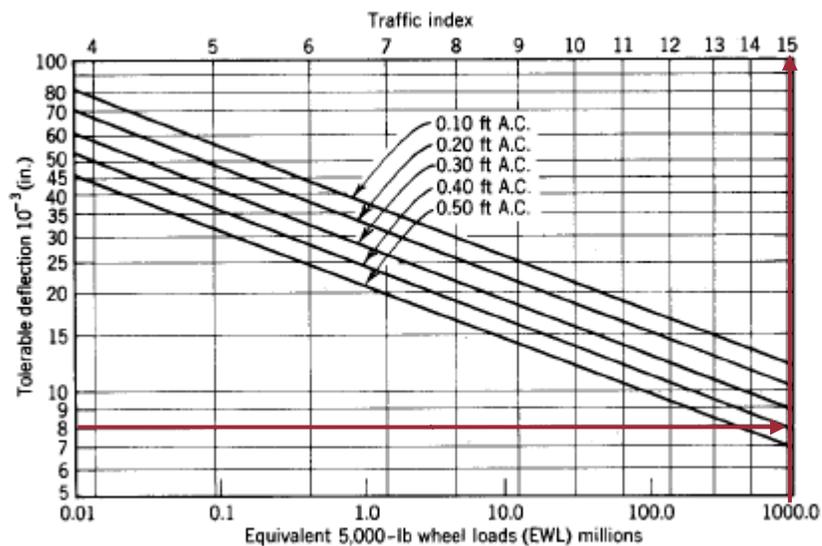


Figura 45 – Tabla de deflexión tolerable para espesores variables de concreto asfáltico. (Principles of Pavement Design, Capítulo 18, 1967, págs. 683, Fig 20.8)

Con éste análisis, se concluye que la sección se propone con una sobrecarpeta de asfalto modificado de 12 cm de espesor sobre el pavimento existente, a continuación, se muestra la estructura propuesta.

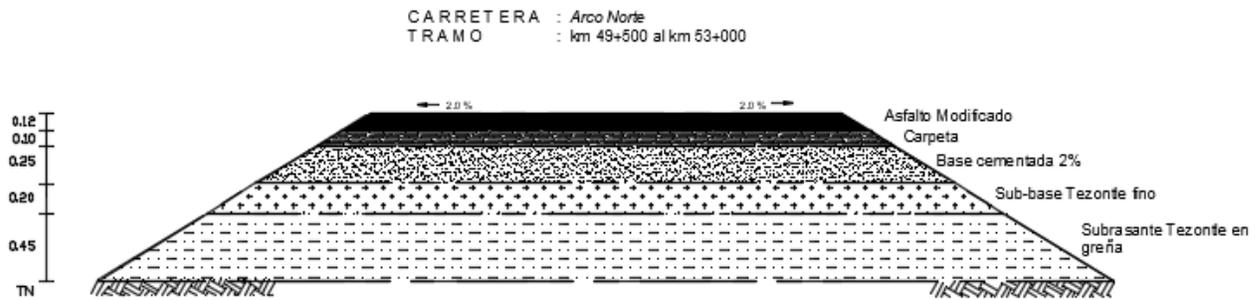


Figura 46 – Sección de pavimento existente, reforzada con una sobrecarpeta de concreto asfáltico.

3.2. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO NUEVA

Para esta posibilidad, el concepto es muy sencillo y porta sobre el rediseño total del pavimento, capa por capa del pavimento de tipo flexible, es decir, considerando únicamente la alternativa de una capa de rodamiento en materiales ligados con asfalto.

La diferencia en la configuración a proponer será que cada material a utilizar deberá ser formulado específicamente para las funciones y calidades que se le asignan en el diseño. Adicionalmente a las consideraciones mecánicas de las capas estructurales y del cuerpo de terracerías, se incluirá la colocación de una capa rompedora de capilaridad en materiales ligeros y gruesos.

Acorde con los lineamientos del método AASHTO 1993, el procedimiento de diseño se presenta a continuación.

La primera consideración para el redimensionamiento es estimar la capacidad estructural teórica del pavimento acorde con los espesores determinados durante el estudio exploratorio.

Capa	Espesor [Cm]	CBR Teórico [%]	Coficiente Estructural a_i Estimado	Coficiente de Drenaje m_i Estimado	SN_i
Carpeta de Rodamiento	9.00	-	0.40	1.00	1.44
Base Granular	20.00	100	0.14	0.80	0.90
Subbase Granular	20.00	60	0.13	0.60	0.62
SN Total					2.96

El segundo paso consiste en estimar el número estructural requerido, en función del tráfico previsto y de su evolución. Los datos básicos presentados a continuación provinieron en su momento directamente de los datos viales anuales publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La variabilidad de las tasas de crecimiento en los años iniciales a la puesta en servicio es muy alta, por lo tanto se toma el valor de 3.5% anual, valor típico utilizado en autopistas.

Tráfico Vehicular	
TDPA (ambos sentidos)	5,848
Año inicial	2,012
Tasa de crecimiento anual	3.5 %
Periodo de diseño (años)	10

Tipo vehículo	Composición Vehicular (%)	Total Vehículos
A	54.4	3181
B	4.8	281
C2	4.7	275
C3	6.0	351
T3S2	17.4	1018
T3S3	3.7	216
T3S2R4	9.0	526
Total	100.0	5848

Con los datos anteriores, la proyección de la evolución del tráfico y los respectivos ejes equivalentes de 8.2 toneladas (ESALS) es la siguiente:

Periodo de Diseño: 10 años		Factor de Crecimiento: 11.73			
Tasa de Crecimiento Anual: 3.5 %		TDPA: 5,848			
Factor de Distribución Direccional: 1.00		Factor de Distribución Carril: 1.00			
Tipo de Vehículo	Composición Vehicular	Tránsito Inicial	Tránsito de Diseño	Coefficiente de Daño	ESALS
A2	54.40%	3181	13,622,245.97	0.0008	10,898
B2	4.80%	281	1,201,962.88	3.5033	4,210,837
C2	4.70%	275	1,176,921.99	5.3805	6,332,429
C3	6.00%	351	1,502,453.60	3.6712	5,515,808
T3-S2	17.40%	1018	4,357,115.44	5.9355	25,861,659
T3-S3	3.70%	216	926,513.05	5.9386	5,502,190
T3-S2-R3	0.00%	0	-	-	-
T3-S2-R4	9.00%	526	2,253,680.40	6.8595	15,459,121
	100.00%	5848		ESALS	62,892,941
				W₁₈	62,892,941

La estimación de la capacidad estructural requerida o SN de la estructura propuesta se obtiene de la resolución numérica de la ecuación:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r S_0 + 9.36 \text{Log}_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10}M_r - 8.07$$

Para la cual se tiene:

Parámetros de Diseño	
Confiabilidad (R)	90%
Z_r	-1.282
S_o	0.45
PSI Inicial	4.5
PSI Final	2.0
Subrasante M_r	13,000 psi

El número estructural correspondiente a las necesidades proyectadas del tráfico es:

SN Requerido	4.82
--------------	------

De acuerdo con el SN requerido, la configuración inicial es insuficiente ($2.96 \ll 4.82$).

La configuración estructural por proponer debe de satisfacer el SN Requerido:

$$SN = \sum_{i=1}^n e_i a_i m_i$$

Capa Estructural	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesor Requerido (Pulgadas)	SN _i
Carpeta asfáltica	0.44	1	4	1.76
Base Cementada	0.24	1.15	6	1.66
Sub-base granular	0.14	1.00	10	1.40
SN Total				4.82

La configuración propuesta es adecuada con un periodo de diseño de 10 años, a condición de mantenerse las tasas de evolución del tráfico previstas.

La sección estructural propuesta es la siguiente:

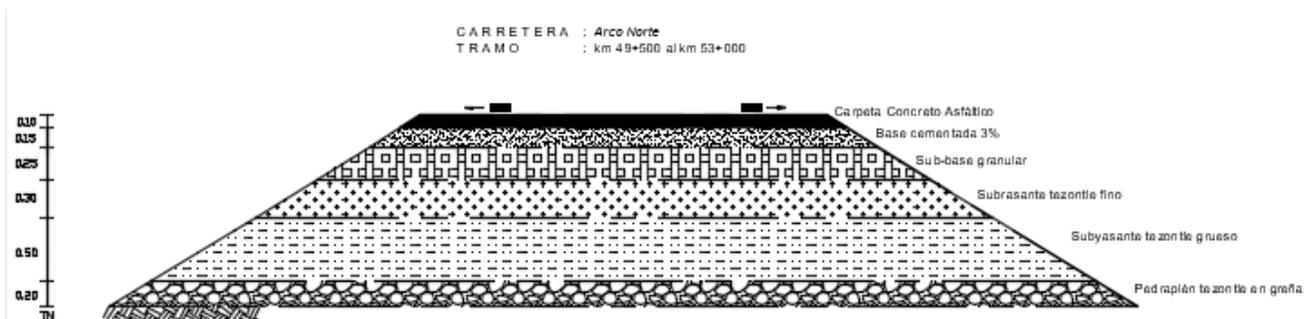


Figura 47 - Sección estructural nueva sobre capas drenantes.

Capa de rodamiento en concreto asfáltico

La carpeta de rodamiento en concreto asfáltico deberá de proveer calidad mecánica y confort a la circulación de un tráfico vehicular que cada vez se muestra más elevado y con un porcentaje importante de camiones de carga pesados y lentos.

Los requerimientos del concreto asfáltico a utilizar son los correspondientes a un concreto asfáltico de tipo denso, conforme a la norma N-CMT-4-05-003-16 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras (Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras, 2016). En el mismo sentido, el ligante asfáltico a utilizar será de grado PG, conforme a las recomendaciones de la norma N-CMT-4-05-004-08 Calidad de materiales asfálticos grado PG (Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de materiales asfálticos grado PG, 2008).

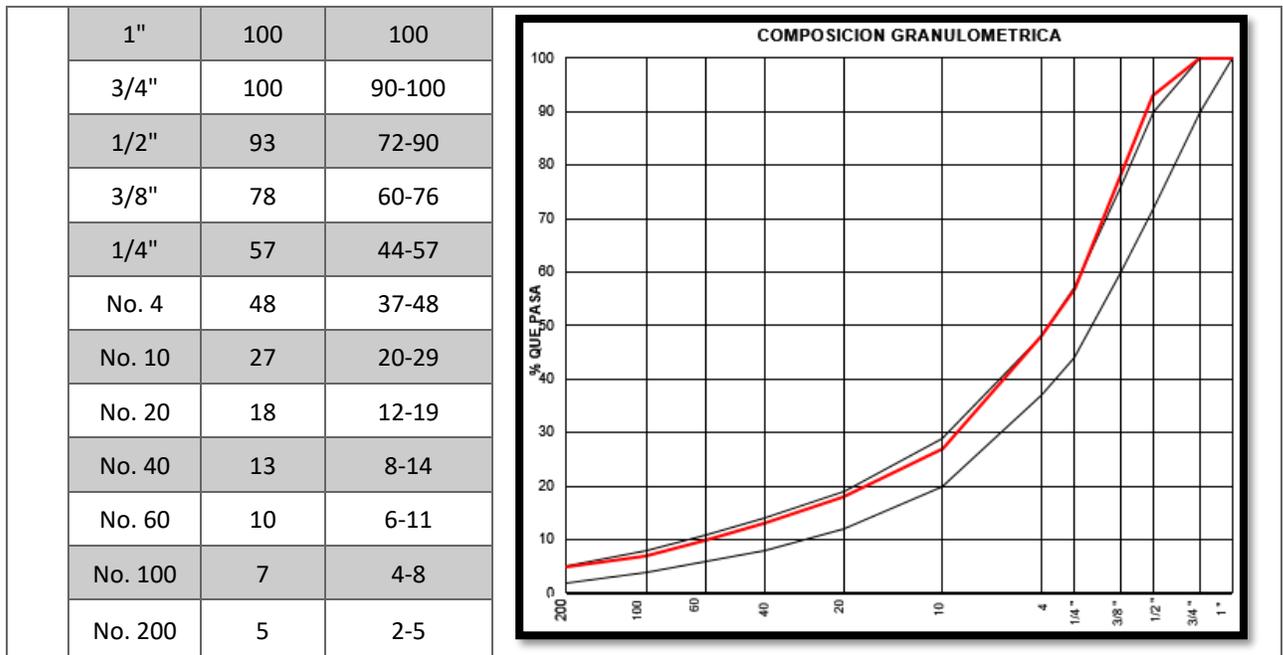
A continuación, se presentan los resultados del proceso de formulación de la mezcla asfáltica densa en laboratorio:

Ligante asfáltico a utilizar	
Tipo de Asfalto	AC-20 Modificado con SBS

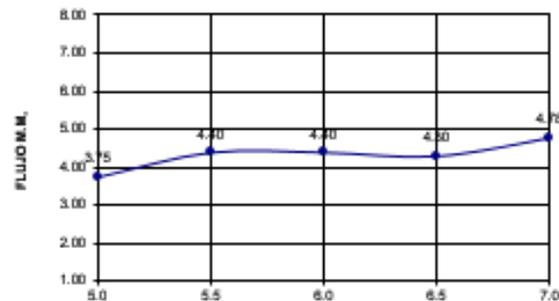
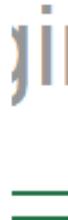
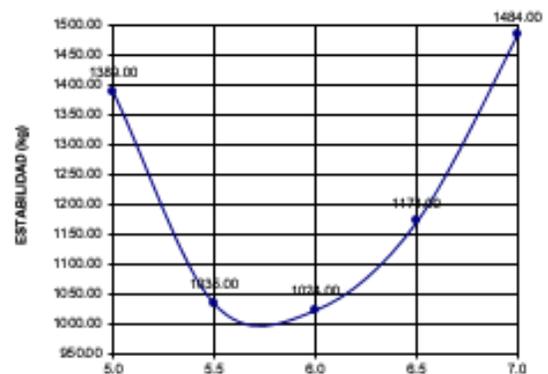
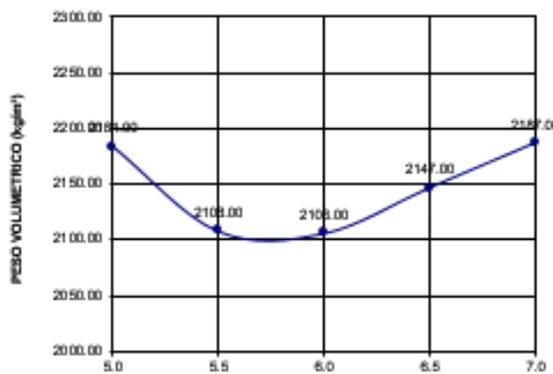
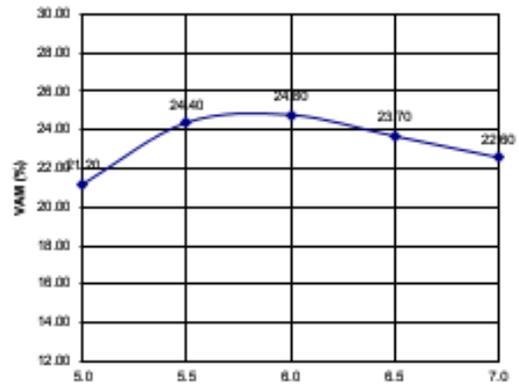
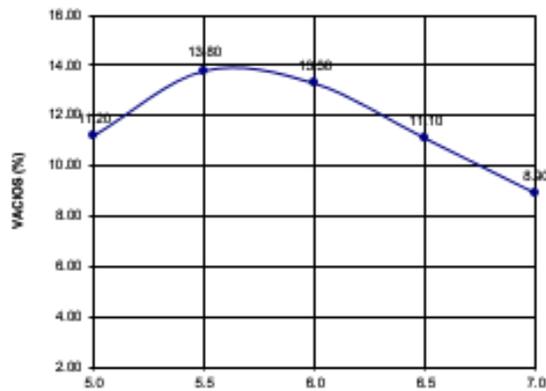
Características del Espécimen Marshall		
P.V.S.S. [Kg/m ³]	1725	
Equivalente de Arena, [%]	59.7	50 Mínimo
Partículas Alargadas, [%]	22.0	35 Máximo
Partículas Lajeadas, [%]	17.0	35 Máximo
Material Deleznable, [%]	0.0	2,0 % Máximo
Absorción, [%]	2.05	3.0 % Máximo
Densidad, [g/cm ³]	2.62	2.40 Mínimo
Desgaste, [%]	20.2	30% Máximo
Peso Volumétrico, [Kg/m ³]	2290	-
Estabilidad, [Kg]	1165	817 Mínimo
V.A.M., [%]	17.7	14 Mínimo
Contenido de asfalto, [%]	6.20	6.2% Proyecto
Temperatura de elaboración, [°C]	150	150
Flujo, [mm]	3.10	2 - 3.5
Vacíos, [%]	4.8	3 - 5

PESO ESPECÍFICO	
Cemento asfáltico (g/cm ³)	1.03
Material pétreo (g/cm ³)	2.54

Com	Mallas	% Pasa	Proyecto



Se puede observar que la curva granulométrica sale un poco del rango que la normatividad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes te solicita que tenga como mínimos requisitos de calidad, pero el material fue el encontrado en la zona cercana a la obra y fue el que se utilizó.



CARACTERISTICAS	DATOS	SPECIFICACION
CONTENIDO OPT. DE C.A. %	6.2	
VACIOS %	4.8	3 - 5
VAM %	17.7	14 MIN
PESO VOLUMETRICO (Kg/m³)	2290	
ESTABILIDAD (k.g)	1165	≥ 17 MIN
FLUJO (mm)	3.1	2 - 4
ESPECIMEN COMPACTADO CON CON UNA TEMPERATURA DE 150°		75 GOLPES DE PISON

Propiedades Volumétricas y Mecánicas del Concreto Asfáltico		
Característica	Valor	Especificación
Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico, [%]	6.2	-
Vacios, [%]	4.8	3 - 5
VAM, [%]	17.7	14 min
Peso Volumétrico, [kg/m³]	2290	-

Estabilidad, [Kg]	1165	817 min
Flujo, [mm]	3.1	2 - 4
Especimen compactado a temperatura de 150°C	75 golpes de pisón	

% De C.A. en peso respecto		Peso específico [kg/Cm ³]	% volumen total			V.A.M. [%]	V.A.F. [%]	Estabilidad [Kg]	Flujo [mm]
Al agregado [%]	A la mezcla [%]		AC-20 [%]	Pétreo [%]	Vacíos [%]				
5.0	4.76	2183	10.0	78.8	11.25	21.2	47.0	1359	3.70
5.0	4.76	2184	10.0	78.8	11.2	21.2	47.2	1419	3.80
		2184			11.2	21.2	47.1	1389	3.75
5.5	5.21	2115	10.6	75.9	13.5	24.1	44.1	1117	4.50
5.5	5.21	2100	10.5	75.4	14.1	24.6	42.8	952	4.30
		2108			13.8	24.4	43.5	1035	4.40
6.0	5.66	2064	11.2	73.8	15	26.2	42.8	893	4.40
6.0	5.66	2148	11.7	76.7	11.6	23.3	50.3	1155	4.40
		2106			13.3	24.8	46.6	1024	4.40
6.5	6.10	2071	12.2	73.6	14.2	26.4	46.1	842	4.40
6.5	6.10	2223	13.0	79.1	7.9	20.9	62.4	1500	4.20
		2147			11.1	23.7	54.3	1171	4.30
7.0	6.54	2195	13.8	77.7	8.5	22.3	62.0	1437	5.00
7.0	6.54	2179	13.7	77.1	9.2	22.9	60.0	1531	4.55
		2187			8.9	22.6	61.0	1484	4.78

Capa de base estabilizada con cemento Portland

La adición de cemento Portland a la capa de base granular responde a la necesidad de corregir defectos funcionales y de calidad mecánica respecto al diseño original.

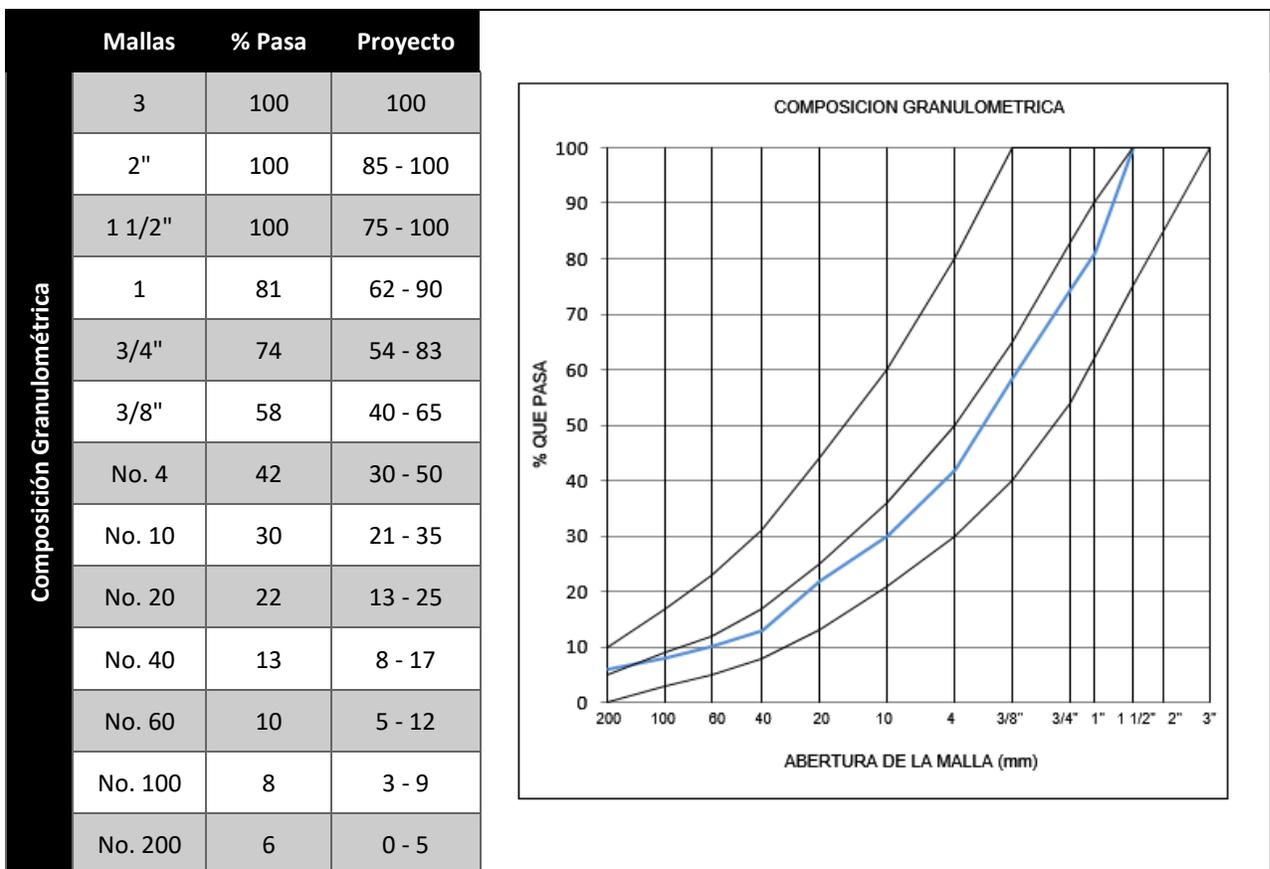
En primer lugar, la capa de base estabilizada conlleva un cambio en el modo de funcionamiento de la estructura del pavimento, ya que el cemento Portland permite aumentar la rigidez de la capa gracias a la acción ligante. Esta rigidez hace trabajar a la capa de base como una viga que desarrolla esfuerzos de tensión en su fibra extrema inferior, lo cual se convierte en el factor de diseño crítico. Este modo de funcionamiento donde los esfuerzos de tensión por flexión se absorben en la capa de base, origina que la capa de subbase e inferiores que no contienen ligantes reciban esfuerzos de tipo vertical que a la larga originen punzonamientos.

Adicionalmente, la acción ligante del cemento Portland conlleva a una base que es menos susceptible a la humedad proveniente tanto de la superficie (filtrada eventualmente a través de las fisuras de la capa de rodamiento) como del sub-suelo (eventual ascenso por capilaridad). La base en tales condiciones es más duradera toda vez que la adherencia provocada por la hidratación del cemento impide la migración o pérdida de materiales finos por expulsión de finos o bien por pérdida hacia las capas inferiores. Esta

condición es muy importante dadas las experiencias negativas mostradas en la estructura del pavimento original.

La formulación de la base granular estabilizada con cemento estableció las características que se resumen a continuación y que satisfacen los desempeños señalados por la norma N-CMT-4-02-003-16 Materiales para bases tratadas (Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales para bases tratadas, 2016).

Las características de la base tratada con cemento, se realizó con el banco Conejos, ubicado en la autopista Tula – Jorobas. Las muestras analizadas de base hidráulica mejorada con el 2% de cemento cumple con especificaciones de la norma ya citada anteriormente, excepto el equivalente de arena, aunque esta no afecta la calidad de la base ya que sus límites están por debajo del máximo.



Descripción	Real	Especificación
V.R.S (CBR), [%]	151.2	100 mínimo
Expansión, [%]	0.00	
Equivalente de arena, [%]	34.0	50 mínimo
Peso suelto, [Kg/m ³]	1668	
Peso máximo, [Kg/m ³]	2246	

Humedad óptima, [%]	6.3	
Límite Líquido, [%]	15.7	25 máximo
Límite Plástico, [%]	14.1	
Índice Plástico, [%]	1.6	6 máximo
Pruebas en material mayor que la malla No. 3/8"		
Descripción	Real	Especificada
Absorción, [%]	0.74	
Densidad, [g/cm³]	2.64	
Desgaste de Los Ángeles, [%]	29.0	30 máximo
Partículas Lajeadas y Alargadas, [%]	28.0	35 máximo
Clasificación SUCS	GW-GM	

Capa de subbase granular hidráulica

A diferencia de la estructura de pavimento original, la capa de subbase a utilizar no deberá presentar material fino plástico en su esqueleto granular. Como se observó en las exploraciones de los materiales mediante sondeos, en la subbase existente se encuentra presente una cantidad muy elevada de material fino plástico, que muy probablemente se le agregó como parte de la práctica de campo llamada “agregar cementante” con arcillas provenientes de las tierras de cultivo adyacente de la zona y que se convirtió parte medular del problema de inestabilidad observada.

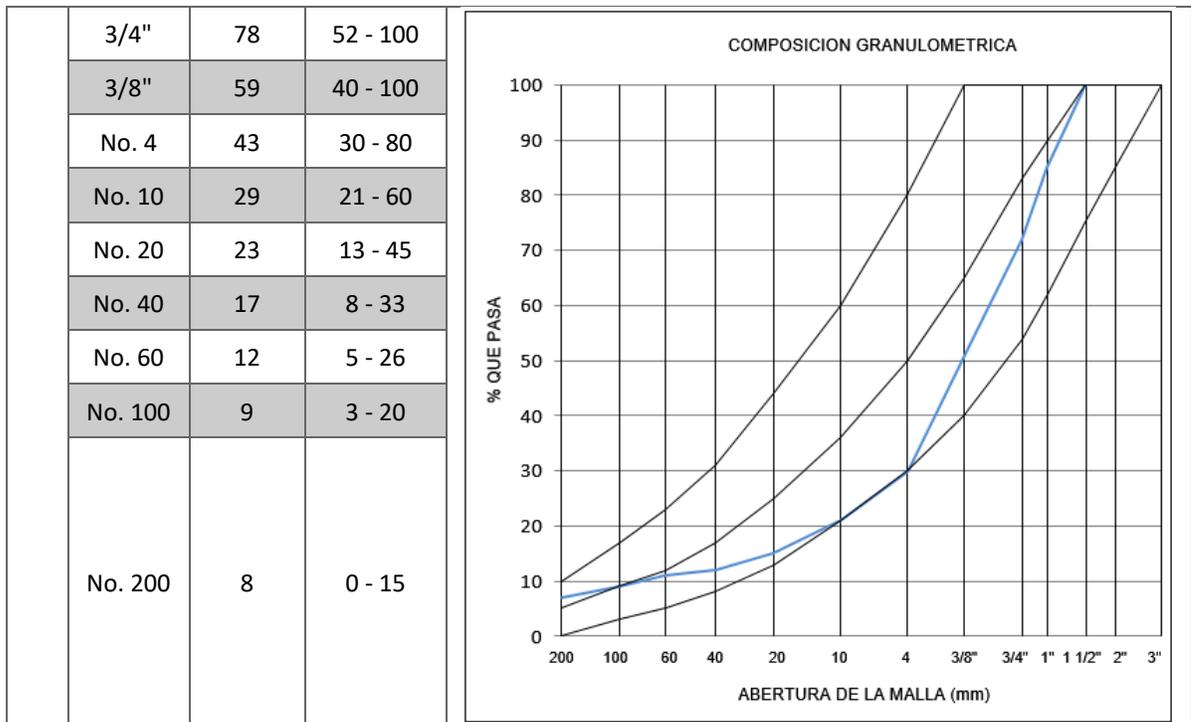
Las finalidades y características de esta capa son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica).
- Transmitir estas cargas, adecuadamente distribuidas a las terracerías.
- Impedir que la humedad de las terracerías ascienda por capilaridad.
- En caso de introducirse agua por la parte superior, permitir que el líquido descienda hasta la capa subrasante, donde se desaloja al exterior por el efecto del bombeo o la sobreelevación.

Acorde con la norma N-CMT-4-02-001-16 Materiales para sub-bases (**Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales parsubbases, 2016**), las características de los materiales a usar en la capa de sub-base son los siguientes:

La sub-base se realizó con el banco Conejos ubicado en la autopista Tula-Jorobas, con las siguientes características del material:

Composición	Mallas	% Pasa	Proyecto
	2"	100	100
	1 1/2"	100	72 - 100
	1	83	58 - 100



Descripción	Real	Especificación
V.R.S (CBR), [%]	86.0	60 mínimo
Expansión, [%]	0.10	
Equivalente de arena, [%]	37.0	40 mínimo
Peso suelto, [Kg/m ³]	1688	
Peso máximo, [Kg/m ³]	2230	
Humedad óptima, [%]	6.0	
Límite Líquido, [%]	16.1	25 máximo
Límite Plástico, [%]	13.7	
Índice Plástico, [%]	2.4	6 máximo

Pruebas en material mayor que la malla No. 3/8"		
Descripción	Real	Especificación
Absorción, [%]	0.74	
Densidad, [g/cm ³]	2.65	
Desgaste de Los Ángeles, [%]	30.0	40 máximo

La muestra analizada cumple con la norma ya mencionada, excepto el equivalente de arena.

3.3. ADECUACIONES AL SISTEMA DE DRENAJE

El mejoramiento de las condiciones del drenaje en las capas sub-estructurales se propone en la utilización de 3 capas de materiales pétreos de baja densidad, con granulometrías abiertas de tamaños progresivos para evitar la pérdida de las partículas más pequeñas en la capa inmediata inferior.

De esta manera, la sección de las capas de terracerías o sub-estructurales es la que se muestra a continuación.

Capa subrasante

Esta capa deberá de cumplir con las calidades mecánicas respectivas, mismas que se especifican en la norma N-CMT-1-03-02 Materiales para subrasante (**Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subrasante., 2002**), especialmente en su resistencia caracterizada a través de un CBR > 20% y en un espesor de 30 cm acorde a una carretera de tráfico acumulado superior a 10 millones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

Para coadyuvar con las capas inferiores en materiales drenantes, la capa subrasante también será construida con materiales ligeros de tipo tezontle de bancos cercanos. En ningún caso se permite la presencia de materiales finos plásticos, no obstante, existan partículas limosas o producto de la degradación de las gravas durante el proceso de construcción de la capa subrasante.

A partir del estudio de formulación en laboratorio, las características de estos materiales son las siguientes:

Capa Subrasante		
Características del material	% Retenido en malla 4.75 mm	26.00
	% Retenido en malla 0.425 mm	58.00
	% Pasante en malla 0.075 mm	16.00
	Límite Líquido, [%]	33.10
	Contracción Lineal, [%]	1.0
	M.V.S. Suelta, [Kg/m ³]	1135
	M.V.S. Máxima, [Kg/m ³]	1490
	Humedad óptima, [%]	22.4
	Humedad del lugar, [%]	10.00
	Compactación del lugar, [%]	100
	Valor soporte de california (CBR), [%]	61
	Expansión, [%]	0.70
	Clasificación SUCS-SCT	GM-ML

Capa sub-yacente en materiales filtrantes

La sub-yacente proyectada debe de contribuir al igual que la capa de pedraplén a controlar el ascenso de humedad proveniente del suelo. Para ello se utilizará una grava gruesa de hasta 3 pulgadas de tamaño máximo que cumpla con los requerimientos mecánicos de la norma N-CMT-1-02-02 Materiales para sub-yacente (**Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subyacente, 2002**) y con la norma N-CMT-3-04-001-05 Materiales para sub-drenes (**Características de los materiales,**

Materiales para obras de drenaje y subdrenaje, Materiales para subdrenes, Filtros, 2005), especialmente por lo que respecta a los procedimientos constructivos.

Para garantizar los desempeños mecánicos requeridos se propone el empleo del mismo agregado pétreo que la capa de subrasante, que es de calidad promedio superior a los materiales denominados tezontles, conservando un peso volumétrico que lo hace más ligero que materiales tradicionales. La presencia de materiales finos en el esqueleto granular se limita a los pocos limos presentes en el banco seleccionado y a la atrición propia de las gravas ligeras durante el proceso de compactación.

Las características de las gravas para esta capa son las siguientes:

Características del material	Capa:	Subyacente
	% Retenido en malla 4.75 mm	26.00
	% Retenido en malla 0.425 mm	58.00
	% Pasante en malla 0.075 mm	16.00
	Límite Líquido, [%]	33.10
	Contracción Lineal, [%]	1.0
	M.V.S. Suelta, [Kg/m ³]	1135
	M.V.S. Máxima, [Kg/m ³]	1490
	Humedad óptima, [%]	22.4
	Humedad del lugar, [%]	10.00
	Compactación del lugar, [%]	95.00
	Valor soporte de california (CBR), [%]	45
	Expansión, [%]	0.34
Clasificación SUCS-SCT	GM-ML	

Capa de pedraplén

Su empleo se concibe como una capa de filtro o drenaje, compuesta por materiales granulares gruesos de 3 a 8 pulgadas y sin finos plásticos. Esta capa deberá trabajar como un drenaje de la humedad proveniente del subsuelo por ascensión capilar, la cual llega a formar una lámina de agua en tiempos de lluvia en algunos puntos del trazo de la carretera y en los que incluso llega a recorrer transversalmente a la estructura.

Del mismo modo, esta capa deberá de proveer un soporte con resistencia y estabilidad adecuadas para permitir todas las maniobras de construcción de las capas superiores. Por tal motivo, la compactación y espesores de dicha capa debe ser suficiente para garantizar dichas condiciones. Para el sitio de los trabajos que se describen, el espesor ha sido ajustado en pruebas de campo a escala real y fijado en 20 cm.

Drenaje lateral

En los puntos específicos del camino en que exista excedente de humedad, se mitigó mediante drenes laterales que se conecten con la capa de pedraplén y la sub-yacente. Esto limitará al máximo la presencia constante de humedad en las capas sub-estructurales del pavimento y que es en gran medida el origen del problema de falta de sustento. Esta capa será también un medio de soporte y transición entre las capas del pavimento y el terreno natural.

Las calidades de los materiales granulares que rellenarán las zanjas del drenaje lateral son las mismas que las utilizadas en las capas del pedraplén y de la sub-yacente (ver apartados anteriores).



Figura 48 – Preparación de zanja para dren lateral en sitios de saturación de humedad, octubre de 2012.



Figura 49 – Dren lateral relleno con material de pedraplén y tezontle grueso, octubre de 2012.

3.4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

A continuación, se presenta un pequeño resumen con las características básicas de cada capa de material que, conjuntamente con los procedimientos constructivos del apartado anterior, constituyen los elementos básicos de control de calidad, mismos que previamente fueron verificados en el laboratorio durante las pruebas índice de materiales y de formulación.

Capa de pedraplén

El material se debe colocar limpio y libre de cualquier material ajeno, esto claro tiene que ser aprobado por el residente general de obra que deberá anexarse como concepto extraordinario, en este caso en particular fue anexado debido a que no se conocía la presencia de agua en el lugar, se colocó en algunas estaciones antes descritas, en una capa y con un tamaño mal graduado en un espesor máximo de 100 cm, para su colocación tuvo que ser acarreada al lugar con camiones volteo de 14 m³ y colocada convenientemente en algunos tramos para que posteriormente fuera distribuida sobre los tramos a proteger. La maquinaria utilizada fue por su alta eficiencia y equipo adecuado tractor compactador “pata de cabra”, con su cuchilla arrastró el material dentro del lugar para posteriormente apisonarlo, se le dieron tantas pasadas como fue necesario hasta donde la roca ya no continuo hundiéndose en el fango, con sus rodillos característicos y cuidando en todo momento que el proceso de tendido e hincado no lastimen o fracturen la capa de pedraplén para evitar posibles daños estructural en diferentes capas del cuerpo de terraplén a lo largo del proceso o vida útil del proyecto.

Capa sub-yacente en materiales filtrantes.

Una vez terminada la construcción del cuerpo del pedraplén, se construirá la capa subyacente, con el espesor que se indica en el perfil de construcción; el material que forme la capa subyacente será traído del banco indicado en el cuadro de bancos para terracerías y será compactada al noventa y cinco por ciento (95%) de su P.V.S.M. mediante la prueba AASHTO estándar.

El material se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal propósito, cuando en dicho sitio se cuente con un firme, previamente se debe de remover la materia vegetal y limpiar la superficie, además de conformar, nivelar y compactar la superficie, dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje.

Ya tendidas y compactadas las capas subyacentes, se realizan pruebas que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido por la norma ya mencionada anteriormente.

Capa subrasante

Sobre la superficie de la capa subyacente debidamente afinada y tratada, se construirá la capa subrasante con material de préstamo de banco, de acuerdo con lo señalado en los diagramas de curvamasa y compactada al cien por ciento (100%) de su peso volumétrico seco máximo determinado en el laboratorio mediante la prueba AASHTO Estándar, para dar un espesor de 30 cm.

Esta capa cumplirá con la norma de calidad N.CMT.1.03/02. Y norma de construcción N—CTR-CAR-1-01-009/00. La capa subrasante se construye sobre el terreno natural, debidamente cortado en los sitios que así lo indica el proyecto geométrico y/o se construye una vez terminado y aceptada la excavación de estructura existente, el material para la formación de esta capa se descarga sobre la superficie antes citada, se extenderá, se preparará hasta alcanzar el contenido de agua de compactación y obtener la homogeneidad en granulometría y humedad, se extenderá y compactará hasta alcanzar el cien por ciento de su peso volumétrico seco máximo.

Capa de sub-base granular hidráulica

Sobre la capa subrasante en la zona de modificación de trazo se construirá una capa de sub-base hidráulica 25 cm de espesor, utilizando material procedente del banco de préstamo indicado para este fin en el cuadro de bancos de este proyecto.

El material que conforme esta capa se deberá compactar al cien por ciento (100%) de su peso volumétrico seco máximo (PVSM) de la prueba AASHTO modificada (cinco capas) citada en el Capítulo 6.01.03.009-M-04 correspondiente al método de prueba 6.01.01.002.K.05 del Libro 6.01.03 de las Normas para Muestreo y Pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas; Carreteras y Aeropistas; Pavimentos.

Los materiales utilizados deberán ser del tipo indicado en la cláusula 073-D del Libro 3, Parte 01, Título 03; además éstos tendrán que cumplir con las Normas de Calidad especificadas en el inciso 009-C.06 del Libro 4, Parte 01, Título 03 y para su ejecución se deberán seguir todos los lineamientos indicados en la cláusula 074-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

Se coloca en capas no mayores de 20 cm. de espesor, medido antes de la compactación, y mantendrá un contenido de humedad cercano al óptimo para compactarse a un mínimo del 95% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. En ningún caso se permitirá colocar la capa superior de sub-base sin que la capa inferior cumpla las condiciones de nivelación, espesor y densidad exigidas. Simultáneamente con estas operaciones, se procederá a conformar las bermas permanentes las cuales se compactarán en todo su ancho y en el espesor total de la capa para que sirva de contención lateral a la zona central. Cuando se trate de sub-base sobre afirmado existente, se seguirá el siguiente procedimiento: Si el afirmado existente en la vía formare parte de la sub-base del proyecto, este se escarificará en una profundidad de 10 cm. o la que se indique en las especificaciones particulares. Se conformará y compactará al 95% de la densidad máxima del Proctor Modificado. Si el espesor de la sub-base por colocar sobre el afirmado existente, está proyectado para corregir irregularidades menores de la calzada, el Interventor podrá autorizar la colocación y mezcla del material de sub-base con el afirmado existente ya escarificado. El Contratista colocará el material de sub-base de tal manera que no produzca segregación y no cause daño a la superficie de asiento. Las ruedas de las volquetas se mantendrán limpias para evitar la contaminación de la superficie de subrasante o sub-base terminadas del material de sub-base por colocar. Cualquier contaminación de una capa debe corregirse, antes de proseguir el trabajo. El Contratista está obligado a conservar y restaurar todo camino utilizado para acarreo de los materiales, dejándolo en condiciones similares a como las que presentaba antes de iniciar los transportes.

Capa de base estabilizada con cemento Portland

Una vez que se tenga la sección a nivel de subrasante y que ésta se encuentre, debidamente terminada y limpia, se construirá una capa de base hidráulica modificada con cemento Portland en todo lo ancho de la sección, de 15 cm de espesor, compactada al cien por ciento (100 %) de su masa volumétrica seca máxima (MVSM) obtenida en la prueba AASHTO Modificada de cinco capas, citada en el Manual M. MMP.4.01.010, *Compactación AASHTO*.

La construcción de la base modificada se ejecutará con las características indicadas en la E.P. “Construcción de Base Modificada con Cemento Portland” anexa a este procedimiento constructivo. La proporción de cemento Portland a utilizar, deberá determinarse mediante pruebas de laboratorio con el fin de obtener una resistencia a la compresión axial simple de veinticinco kilogramos por centímetro cuadrado (25 kg/cm²), como mínimo a los 28 días de edad. El porcentaje aproximado de cemento Portland será del tres por ciento con respecto al peso volumétrico seco máximo (PVSM) del agregado pétreo.

El procedimiento para el mezclado de los materiales se podrá realizar en planta estacionaria del tipo mezclado continuo, o mediante el procedimiento de mezclado en el lugar con algún equipo que garantice un mezclado homogéneo de los materiales y un contenido de cemento uniforme, como la máquina mezcladora de suspensión y dosificador móvil de cemento-agua, tipo Wirtgen WR 2500 y Wirtgen WM 1000 o similares, respectivamente.

Capa de rodamiento en concreto asfáltico

Sobre la capa de base asfáltica debidamente terminada y después de la aplicación del riego de liga, se construirá una carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor, utilizando material procedente del banco de préstamo indicado para este fin en el cuadro de bancos de éste proyecto y cemento asfáltico AC-20 con una dosificación aproximadamente de ciento veinticinco (125) litros por metro cúbico (lt/m³) de material pétreo seco y suelto, la mezcla será elaborada en planta y en caliente, el tendido se efectuará compactándola al noventa y cinco por ciento (95%) de su peso volumétrico determinado en la Prueba Marshall.

Los materiales pétreos y el cemento asfáltico que conformen la carpeta deberán cumplir con las Normas Especificadas en los incisos 010-C.01 y 011-B.01b respectivamente del Libro 4, Parte 01, Título 03.

La mezcla se proyectará por el procedimiento Marshall para que cumpla con los requisitos de diseño que se indican en la columna de intensidad de tránsito de más de 2000 vehículos pesados diarios del cuadro del inciso 011-D.03 del Libro 4, Parte 01, Título 03.

La construcción de la carpeta se deberá apegar a los lineamientos indicados en la cláusula 081-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

Dado que se utiliza cemento asfáltico AC-20, la mezcla deberá realizarse a una temperatura de entre ciento cuarenta grados centígrados (140°C) y ciento sesenta y cinco grados centígrados (165°C). La mezcla al momento de colocarla en la pavimentadora deberá tener una temperatura no menor a ciento treinta y cinco grados centígrados (135°C). La temperatura se medirá en el camión antes de descargar en la pavimentadora.

La compactación se efectuará inmediatamente después de tendida la mezcla y antes de que su temperatura baje a menos de ciento treinta grados centígrados (130°C).

Sobre la capa de base Asfáltica debidamente terminada y después de la aplicación del riego de liga, se construirá una carpeta de concreto asfáltico de diez (10) centímetros de espesor compactada al 95% del peso volumétrico máximo Marshall, utilizando material procedente del banco de préstamo el cual deberá ser propuesto por “EL CONTRATISTA” y cumplir con todos los requisitos de calidad. La construcción de la carpeta asfáltica se deberá apegar a los lineamientos indicados en la Norma N.CTR.CAR.1.04.006/01, Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente. La mezcla se diseñará por el procedimiento Marshall para que cumpla con los requisitos de proyecto para cualquier cantidad de ejes.

Los materiales pétreos y el cemento asfáltico que conformen la carpeta asfáltica deberán cumplir con las Normas N.CMT.4.04/01, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas; y N.CMT.4.05.002/06, Calidad de Materiales Asfálticos; y N.CMT.4.05.003/02. Calidad de Mezcla Asfáltica en Caliente.

El tamaño máximo del material pétreo triturado para la carpeta asfáltica será de 37.5 mm. (1 ½”).

Debido a que se utilizará cemento asfáltico AC-20, la mezcla deberá elaborarse a una temperatura de entre 140°C y 160°C. Las temperaturas mínimas convenientes para el tendido y compactación de la mezcla asfáltica, serán determinadas por el laboratorio de control de calidad de la empresa adjudicada mediante la curva viscosidad-temperatura del cemento asfáltico AC-20, de acuerdo a lo establecido en el Libro 6, Capítulo 6.01.03.012, inciso D.05, subinciso b2.c.

3.5. ESPECIFICACIONES DE CONTROL DE CALIDAD

A continuación se presenta un pequeño resumen con las características básicas de cada capa de material que, conjuntamente con los procedimientos constructivos del apartado anterior, constituyen los elementos básicos de control de calidad, mismos que previamente fueron verificados en el laboratorio durante las pruebas índice de materiales y de formulación.

Capa de pedraplén

La capa drenante deberá construirse utilizando material de filtro de acuerdo a la gráfica, con un espesor de 30.0 cm. la cual deberá ser compactada al 95 % de su PVSM de la prueba AASTHO Estándar, Los materiales utilizados deberán cumplir con los requisitos de calidad establecidos en el Libro N-CMT-4-02-002/04.

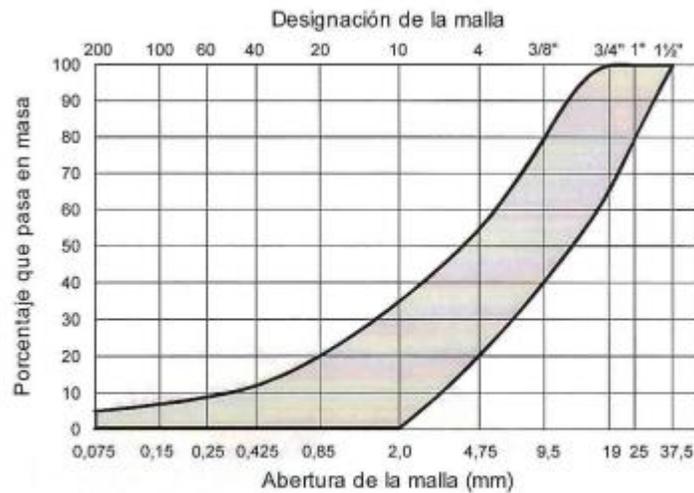


FIGURA 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para filtros

La medición se hará tomando como unidad el metro cúbico compacto al grado fijado, medido en las capas construidas y redondeando el resultado a la unidad. Para la medición también deberá atenderse lo que corresponda del inciso I de la Norma N.CTR.CAR.1.04.002 de esta Secretaría.

Capa sub-yacente en materiales filtrantes.

La medición se hará tomando como unidad el metro cúbico compacto al grado fijado, medido en las capas construidas y redondeando el resultado a la unidad. Para la medición también deberá atenderse lo que corresponda del inciso I de la Norma N.CTR.CAR.1.04.002 de esta Secretaría.

Característica	Valor
Tamaño máximo y granulometría	Que sea compactable [1]
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) [2]; %, mínimo	10
Expansión; %, máxima	3
Grado de compactación [3]; %	95 ± 2

[1] De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

[2] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Capa subrasante

Los materiales para la capa de subrasante deben de cumplir con los siguientes requisitos:

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Capa de subbase granular hidráulica

El material natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

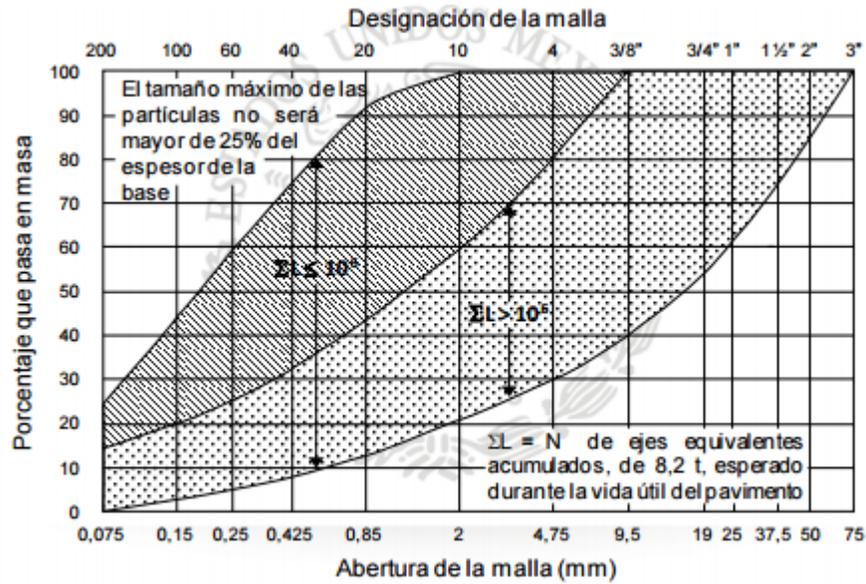
El material tendrá las características granulométricas de la siguiente tabla, considerando que el tamaño máximo sus partículas no será mayor de veinticinco (25) por ciento del espesor de la sub-base.

Malla		Porcentaje que pasa ^[1]	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ ^[2]	$\Sigma L > 10^6$ ^[2]
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37,5	1½"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 100
19	¾"	54 - 100	54 - 100
9,5	¾"	40 - 100	40 - 100
4,75	Nº4	30 - 100	30 - 80
2	Nº10	21 - 100	21 - 60
0,85	Nº20	13 - 92	13 - 45
0,425	Nº40	8 - 75	8 - 33
0,25	Nº60	5 - 60	5 - 26
0,15	Nº100	3 - 45	3 - 20
0,075	Nº200	0 - 25	0 - 15

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la subbase.

[2] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

Las zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos son los siguientes:



Los requisitos de calidad que se indican en la siguiente tabla, están en función de la intensidad del tránsito en términos de número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 toneladas, esperando durante la vida útil del pavimento.

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	10	6
Valor Soporte de California (CBR) ^[2, 3] , mínimo	50	60
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	30	40
Desgaste Los Angeles ^[2] , máximo	50	40
Grado de compactación ^[2, 4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

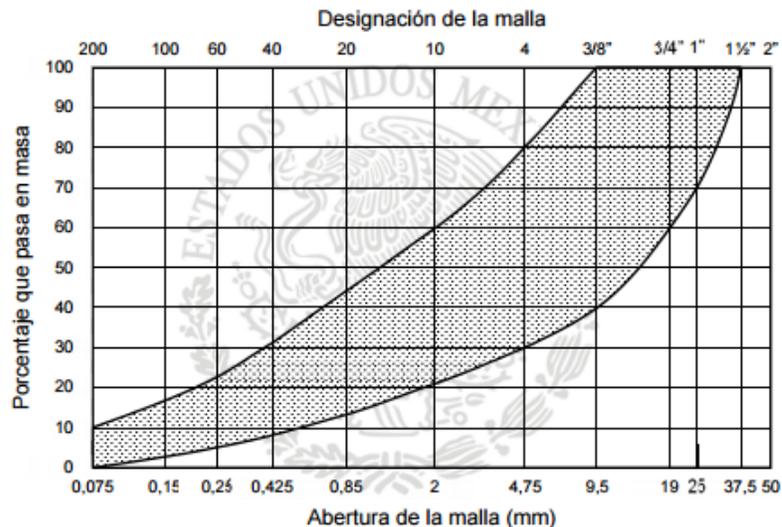
[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Capa de base estabilizada con cemento Portland

Los requisitos de calidad para materiales estabilizados con cemento deben de tener el cemento Portland de acuerdo a la norma N.CMT..2..0.2..0.01 Calidad del Cemento Pórtland, tipo CPO. El material a estabilizar debe de cumplir con la siguiente granulometría

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
37,5	1½"	100
25	1"	70 - 100
19	¾"	60 - 100
9,5	¾"	40 - 100
4,75	Nº4	30 - 80
2	Nº10	21 - 60
0,85	Nº20	13 - 44
0,425	Nº40	8 - 31
0,25	Nº60	5 - 23
0,15	Nº100	3 - 17
0,075	Nº200	0 - 10

Respetando la zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico:



El material una vez modificado debe cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

Característica	Valor %
Límite líquido ^[1] , máximo	25
Índice plástico ^[1] , máximo	6
Equivalente de arena, mínimo ^[1]	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo ^[1, 2]	80
Desgaste Los Ángeles, máximo ^[1]	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación ^[1, 3] , mínimo	100

[1] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[2] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

La resistencia a la compresión simple del material una vez estabilizado con cemento Pórtland, a los 28 días de edad, determinada en especímenes cilíndricos con una relación altura/diámetro no menor que uno.

Capa de rodamiento en concreto asfáltico

Los materiales pétreos utilizados deben ser naturales seleccionados o sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, que aglutinados con material asfáltico se emplea en la elaboración de las mezclas asfálticas.

El tamaño del agregado pétreo va en función de su tamaño nominal y del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento, cumplirá con lo que se indica a continuación:

Únicamente para ejes equivalentes menor a 10,000,000.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (%)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1½"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	76 - 90
19	¾"	---	100	90 - 100	79 - 92	66 - 83
12,5	½"	100	90 - 100	76 - 89	64 - 81	53 - 74
9,5	¾"	90 - 100	79 - 92	67 - 82	56 - 75	47 - 68
6,3	¼"	76 - 89	66 - 81	56 - 71	47 - 65	39 - 59
4,75	N°4	68 - 82	59 - 74	50 - 64	42 - 58	35 - 53
2	N°10	48 - 64	41 - 55	36 - 46	30 - 42	26 - 38
0,85	N°20	33 - 49	28 - 42	25 - 35	21 - 31	19 - 28
0,425	N°40	23 - 37	20 - 32	18 - 27	15 - 24	13 - 21
0,25	N°60	17 - 29	15 - 25	13 - 21	11 - 19	9 - 16
0,15	N°100	12 - 21	11 - 18	9 - 16	8 - 14	6 - 12
0,075	N°200	7 - 10	6 - 9	5 - 8	4 - 7	3 - 6

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Para cualquier valor de ejes equivalentes

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (¾)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1½"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾"	---	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	½"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	¾"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6,3	¼"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4,75	N°4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	N°10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0,85	N°20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0,425	N°40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	N°60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	N°100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	N°200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Requisitos de calidad del material pétreo para mezcla asfálticas, con cualquier valor de ejes equivalentes:

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Según el método utilizado en el diseño, la mezcla asfáltica, debe de ser diseñada por el método Marshall, con los siguientes requisitos de calidad:

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL [1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ [2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas diseñadas con el método marshall, deben cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño		
		%		
mm	Designación	3	4	5
		Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9,5	¾"	14	15	16
12,5	½"	13	14	15
19	¾"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	1½"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Las cantidades de materiales pétreos y asfálticos en mezclas asfálticas por el sistema de riegos, es:

Materiales ^[1] L/m ²	Tipo de mezcla							
	Tres riegos				Dos riegos		Un riego	
Cemento asfáltico	0							
Material pétreo tipo 1	20 -25							
Cemento asfáltico	0,7 -0,8							
Material pétreo tipo 2	8 - 12							
Cemento asfáltico	0,7 - 0,8	---	---	0,7 - 0,8	---	---	0,7 - 0,8	---
Material pétreo tipo 3-A	8 - 10	---	---	8 - 10	---	---	8 - 10	---
Cemento asfáltico	---	0,7 - 0,8	---	---	0,7 - 0,8	---	---	---
Material pétreo tipo 3-B	---	6 - 8	---	---	6 - 8	---	---	---
Cemento asfáltico	---	---	0,7 - 0,8	---	---	0,7 - 0,8	---	0,7 - 0,8
Material pétreo tipo 3-E	---	---	9 - 11	---	---	9 - 11	---	9 - 11

[1] El cemento asfáltico considerado en esta Tabla se refiere al que contiene la emulsión que se utilice. Para calcular la cantidad de emulsión en litros por aplicar, se multiplicará por 100 el valor mostrado y se dividirá entre el porcentaje del contenido de cemento asfáltico que tenga la emulsión.

Temperaturas de mezclado para mezclas en caliente.

Clasificación del cemento asfáltico	Temperatura de mezclado °C
AC- 5	120 - 145
AC-10	120 - 155
AC-20	130 - 160
AC-30	130 - 165

Capítulo 4. SEGUIMIENTO Y EVOLUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

El seguimiento de la calidad de las acciones enunciadas y descritas en el capítulo anterior se llevó a cabo a lo largo de los 6 meses inmediatos a la conclusión de los trabajos de reconstrucción y/o de rehabilitación del pavimento. Más allá del evidente interés técnico por conocer la respuesta y evolución de las propuestas presentadas, es necesario recordar que dentro de los trabajos de repavimentación se encuentra la necesidad de satisfacer las exigencias de la empresa concesionaria, para obtener la liberación de las fianzas de cumplimiento y de vicios ocultos.

La evolución del pavimento se observó igualmente para las dos opciones que se consideraron en la etapa de diseño, es decir el reforzamiento de la estructura existente y el diseño de una nueva estructura de pavimento. Para ambas opciones la evolución de las zonas del pavimento que se rehabilitaron mostraron condiciones de servicio muy diferente, incluso a la edad tan temprana como los 6 meses.

El seguimiento se realizó, al igual que para los primeros bacheos, mediante una inspección visual de la superficie del pavimento y verificación de las calidades individuales de los materiales aplicados según la opción de reforzamiento o estructura nueva.

Aunado a las evaluaciones o calificaciones del estado del pavimento tradicionales, se realizó una pequeña campaña de mediciones de deflexión en diferentes zonas del trazo donde se llevaron a cabo rehabilitaciones con diferentes opciones o configuraciones estructurales.

El seguimiento de los pavimentos se realizó a través de una inspección visual de la superficie que demuestra que a la fecha de redacción del presente documento, la pertinencia de las acciones y consideraciones que se tomaron en cuenta, así como de las adecuaciones a las condiciones de diseño estructural, formulación de materiales y cambios en el procedimiento constructivo.

4.1. ESTADO DEL PAVIMENTO

4.1.1. PAVIMENTOS CON BACHEO PROFUNDO Y SOBRECARPETA ASFÁLTICA

La alternativa de rehabilitar el pavimento dañado mediante la adición de un sobreespesor de carpeta de rodamiento en concreto asfáltico, según los cálculos mostrados en el capítulo anterior, se evidenció rápidamente como una opción no viable.

A lo largo de los meses de trabajos de rehabilitación, desde que se detectaban los problemas descritos en el pavimento original, los diversos puntos donde se llevaba a cabo esta opción de rehabilitación mostraban degradaciones a muy temprana edad, tanto como semanas hasta un par de meses antes de desarrollar problemas de hundimientos y de baches.

En los puntos de la carretera donde las consignas de la empresa concesionaria eran las de bacheo profundo, es decir la reposición de la base hidráulica y de la capa de rodamiento, se adicionaba un sobreespesor de concreto asfáltico, con cemento asfáltico AC-20 modificado con polímero SBS, acorde al diseño o formulación en laboratorio.

A continuación se describe de manera sucinta el proceso de rehabilitación citado.



Figura 50 – Ejemplo de zona de pavimento a rehabilitar con bacheo profundo y sobreespesor de carpeta.

Acorde con las condiciones del contrato de trabajos con la empresa concesionaria, ésta determinaba y señalaba puntualmente las zonas del pavimento donde requerían realizar el bacheo profundo con la colocación de un sobreespesor de carpeta asfáltica. La **Figura 50** muestra un ejemplo donde se realizó este tipo de trabajos.

En la siguiente sección fotográfica se muestra parte del procedimiento constructivo donde se aprecian los trabajos del retiro de la capa existente de rodamiento de concreto asfáltico, de la capa de base granular hidráulica, de la capa de sub-base granular hidráulica y sub-rasante saturada, dando a su paso a la nueva capa de base hidráulica y con un control especial en su tendido y compactación con las pruebas de compactación durante la construcción de ésta. También se aprecia la colocación del riego de liga con emulsión de asfalto sobre la capa de base granular hidráulica nueva, después la colocación de la capa de rodamiento en concreto asfáltico AC-20 modificado con SBS y su respectivo control de calidad, para concluir con el acabado terminal de la superficie de rodamiento al final de los trabajos.



Figura 51 – Retiro de la capa de rodamiento en concreto asfáltico.



Figura 52 – Retiro de la capa de base granular hidráulica.



Figura 53 – Retiro de la capa de subbase granular hidráulica y sub-rasante saturados.



Figura 54 – Tendido y compactación de la capa de base hidráulica repuesta.



Figura 55 – Pruebas de control de compactación a materiales granulares hidráulicos en base y subbase.



Figura 56 – Riego de liga con emulsión de asfalto sobre la capa de base granular hidráulica.



Figura 57 – Colocación de la capa de rodamiento en concreto asfáltico con AC-20 modificado con SBS.



Figura 58 – Control de temperatura de colocación del concreto asfáltico con AC-20 modificado con SBS.



Figura 59 – Ejemplo de superficie de rodamiento al final de los trabajos de bacheo profundo con sobrecarpeta.

Al final del proceso de rehabilitación del pavimento mediante bacheo profundo y con un sobreespesor de carpeta asfáltica, la calidad inicial de cada capa del pavimento fue conforme a lo estipulado tanto en espesores como en calidades mecánicas de constituyentes y materiales elaborados.

Al cabo de cortos periodos de tiempo de no más de 2 meses después de terminados los trabajos, en muchas de las zonas rehabilitadas volvieron a aparecer degradaciones importantes en la carpeta de rodamiento.

Las degradaciones que se pudieron apreciar correspondían nuevamente a las identificadas en la primera etapa de los trabajos de rehabilitación, cuando la estructura deteriorada era la que se construyó originalmente como el proyecto.

Una vez más, la superficie del pavimento presentaba zonas de agrietamiento severo tanto en las zonas centrales del bacheo como en los bordes. También se llegaron a presentar zonas del pavimento con ligeros hundimientos e incluso expulsión de finos en zonas fisuradas.

En la siguiente sección fotográfica se puede apreciar los baches que se desarrollaron en la zona previamente rehabilitada, donde presentaban hundimiento, fisuración intensa, expulsión de finos y baches. Por lo cual, se empezaron a rellenar baches con gravas por su degradación.



Figura 60 – Ejemplo de bache de rápido desarrollo en zona previamente rehabilitada con sobre carpeta.



Figura 61 – Detalle de la zona con hundimiento, fisuración intensa, expulsión de finos y bache.

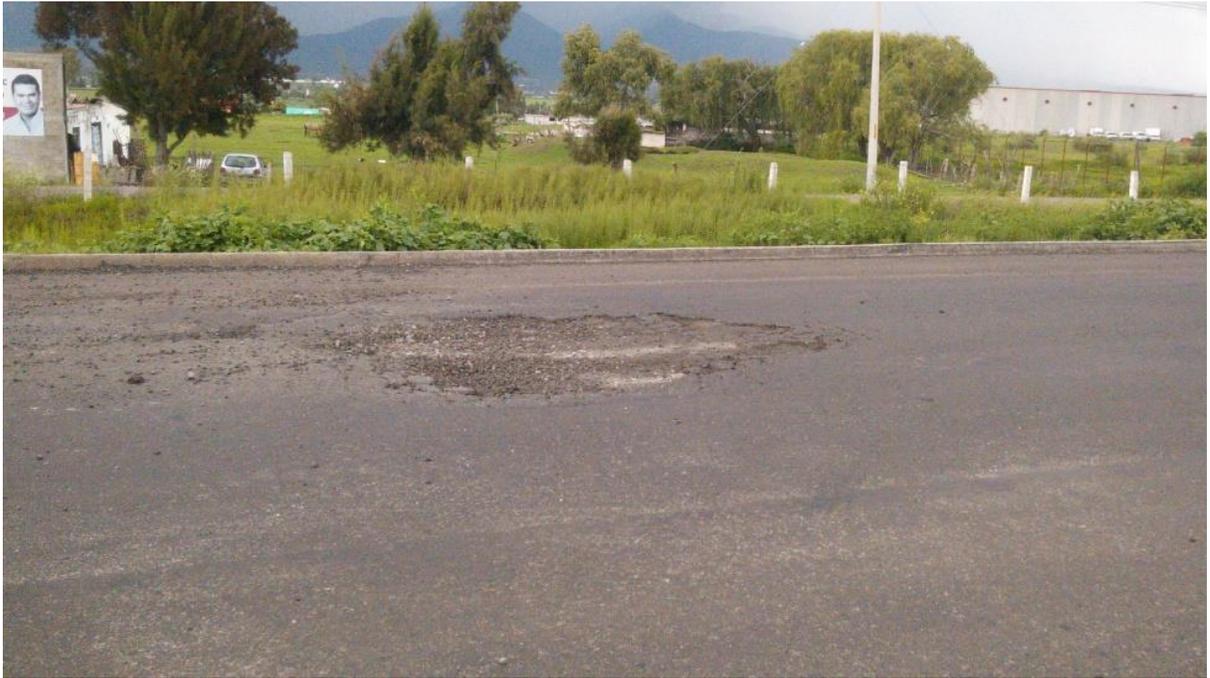


Figura 62 – Desintegración de la carpeta asfáltica en zona con bacheo profundo y sobre carpeta.



Figura 63 – Detalle del bache rellenado con gravas.

Tal como es evidente en las figuras anteriores, el proceso de degradación acelerado de la carpeta asfáltica y las capas de base es básicamente el mismo que para los casos del pavimento original y en las zonas donde se hacía bacheo profundo.

Dentro de los trabajos de rehabilitación mediante bacheos profundos, la concesionaria determinaba cuales eran los tramos específicos a tratar, sin embargo, los límites de intervención no siempre correspondían a las zonas más deterioradas siendo regularmente de alcance corto a las necesidades reales.

La **Figura 64** muestra cómo la delimitación de las zonas de bacheos no lograba abarcar por completo las zonas dañadas. La colocación de pavimento en bacheos quedaba prácticamente embebida dentro de zonas de degradaciones mayores y con las condiciones de inestabilidad ya señaladas.



Figura 64 – Zona de bacheo profundo limitando con zona de degradación acelerada.

Se puede apreciar como la zona que recibió el bacheo profundo logra cumplir, al menos a la inspección de la superficie, con las calidades de uniformidad y textura que se requiere en el tipo de carpeta asfáltica densa. No obstante, la presencia en dos de sus bordes de zonas de pavimento que tienen grietas que muestran ya atrición entre ellas, expulsión de material fino de la base e incluso baches incipientes es un factor que condiciona de manera negativa la durabilidad de la zona repuesta.

Las zonas a rehabilitarse con el procedimiento de bacheo profundo, amén de no ser suficientes, ejemplifica otro problema que es en sí mismo la programación de inspecciones y la calificación de las mismas. No obstante ser evidente lo incorrecto de la delimitación, procesos de supervisión y la gerencia del proyecto establecían la zonificación.



Figura 65 – Zona de pavimento fallada (primer plano) seguida de zona rehabilitada (fondo).

La **Figura 65** muestra otro ejemplo de una zona del pavimento que ha sido rehabilitada con bacheo profundo y que en esta ocasión queda situada adyacente a otra zona fuertemente degradada que muestra la patología descrita de una falla funcional y estructural de al menos la capa de rodamiento y de base granular. En el carril de sentido contrario, la presencia de un tratamiento superficial a base de riego de sello no permite apreciar claramente la patología de degradación presente.

Una vez más, las deficiencias en la determinación de las zonas a rehabilitar es un factor importante que, aunado a las ya de por sí difíciles condiciones de la estructuración del pavimento original, contribuye a la degradación acelerada que muestran los pavimentos en sus tramos bacheados.

La **Figura 66** muestra un caso aún más caricaturesco donde los baches se desarrollan incluso en el interior de zonas bacheadas de pequeña superficie. El bache que se aprecia se encuentra en un punto del trazo que ni siquiera corresponde a alguna de las bandas de rodamiento del carril. Una vez más, el modo de degradación es exactamente el mismo.



Figura 66 – Zona de pavimento fallada (primer plano) seguida de zona rehabilitada (fondo).

4.1.2. PAVIMENTOS CON UNA ESTRUCTURA NUEVA

Al igual que para el caso de la rehabilitación del pavimento mediante bacheo profundo y colocación de una sobrecarpeta asfáltica, la determinación y delimitación de las zonas donde se realizó la reconstrucción con una estructura de pavimento mejorada fue responsabilidad de la empresa concesionaria en base a sus políticas y estrategias de gestión de la vialidad.

En términos generales, estas zonas son de longitud entre 50 y 200 metros y son básicamente zonas donde el conjunto de degradaciones superficiales llegaba a ser continuo en estado y severidad de los deterioros.

El proceso general de la rehabilitación que se siguió se presenta de manera sucinta en las siguientes figuras.



Figura 67 – Remoción de las capas del pavimento degradado hasta la profundidad del nuevo proyecto.



Figura 68 – Retiro de los subdrenes laterales en los tramos donde se encontraron.



Figura 69 – Colocación de material de para la capa de pedraplén filtrante sobre terracerías compactadas.



Figura 70 – Colocación de capa de sub-yacente en materiales filtrantes gruesos y ligeros.



Figura 71 – Colocación de capa de subrasante en materiales filtrantes medios y ligeros.



Figura 72 – Control de calidad de los materiales de la capa subrasante.



Figura 73 – Colocación de la capa de subbase granular hidráulica.



Figura 74 – Colocación de la capa de base granular tratada con 2% de cemento Portland.



Figura 75 – Tendido y compactación de la capa de rodamiento en concreto asfáltico modificado con SBS.

A lo largo de todas las etapas del proceso de construcción el control de calidad fue adecuado, proporcionando el respaldo para la verificación de las especificaciones constructivas y de calidad de materiales para cada capa del pavimento.

A lo largo de los meses que duraron los diferentes trabajos de rehabilitación en todo el tramo, mismos que se extendieron hasta los primeros meses del 2013, se observó que los tramos que habían sido reconstruidos con la estructura propuesta se comportaban de manera adecuada. Para las fechas de terminación de los trabajos ya se había presentado el periodo de lluvias en la zona, mismo que no afectó a la estructura reconstruida, muy por el contrario de las zonas con bacheo profundo o con sobrecarpeta.

La estructura construida se comportó correctamente sin importar si se trataba de tramos que comprendían ambos carriles o sólo uno de los sentidos de circulación.

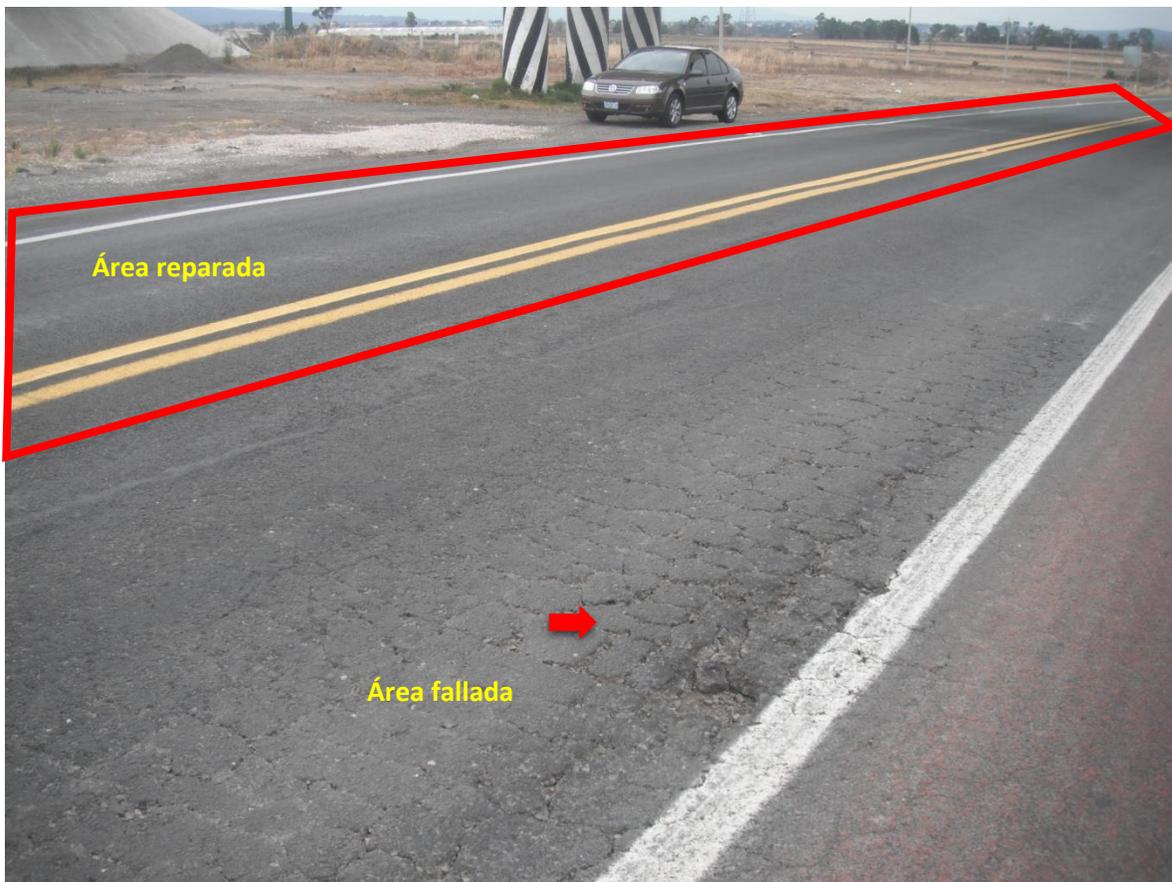


Figura 76 – Zona de pavimento fallada (primer plano) adyacente a zona reconstruida (fondo).

4.2. ESTUDIO DE DEFLEXIONES DE LAS ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

Durante el mes de diciembre de 2013, hacia el final de los trabajos de rehabilitación en todos los tramos señalados, se realizó una pequeña campaña de mediciones de deflexiones mediante el empleo de la viga Benkelman con un eje cargado de 8.2 toneladas.

Las mediciones obtenidas no tenían por objeto más que obtener una estimación de las deflexiones individuales de ciertos tramos seleccionados donde, debido a recomendaciones de la empresa concesionaria, se hicieron modificaciones a las estrategias de mantenimiento con alternativas a las descritas en los párrafos anteriores como: “bacheo profundo”, “sobreespesor de carpeta asfáltica” y la “estructura nueva”.

Las modificaciones a las estructuras obedecían en principio, a la necesidad de llevar a cabo reparaciones rápidas y sencillas, a un costo no mayor a la opción de reconstrucción o estructura nueva. En este sentido, las opciones de reparación se presentan a continuación en los esquemas respectivos.

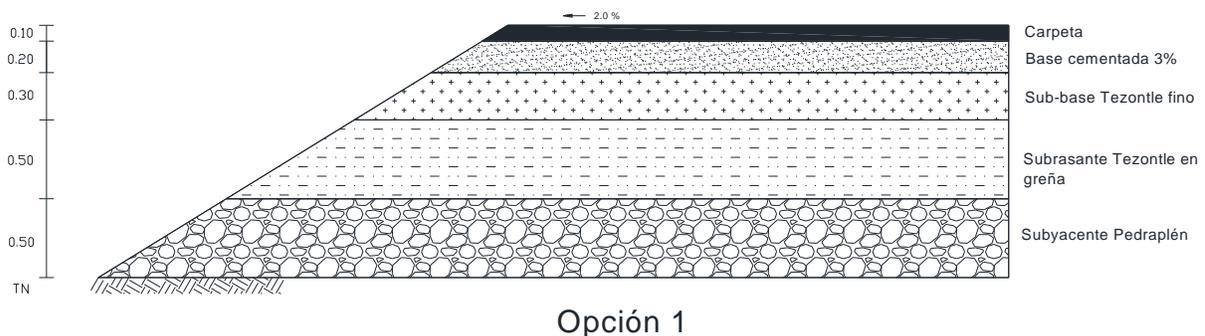


Figura 77 – Esquema de la estructura “Opción 1” para la rehabilitación del pavimento.

La estructura denominada Opción 1, era una variante propuesta con el objetivo de reparar zonas donde previamente se habían llevado trabajos de “bacheo profundo”, es decir, la reposición de la carpeta asfáltica y de la base granular. La intención simple de la propuesta era suponer que la capa estabilizada con cemento Portland, debido a su mayor rigidez respecto a la base granular hidráulica, sería suficiente para proveer una estructura de mejor resistencia al tráfico vehicular. Para reducir el costo del cemento Portland, la subbase sería en materiales granulares ligeros.

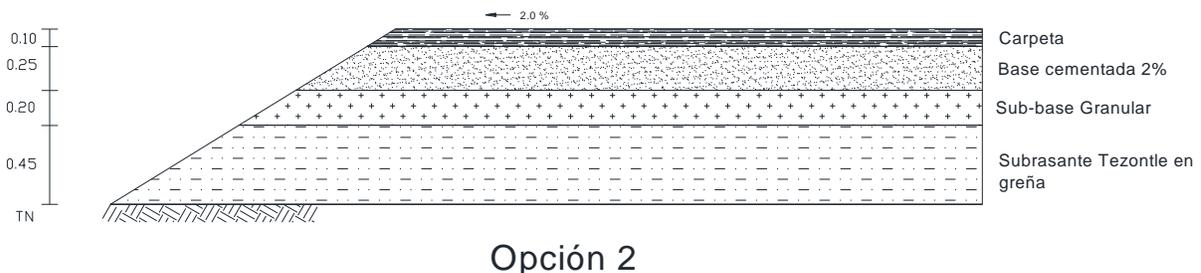


Figura 78 – Esquema de la estructura “Opción 2” para la rehabilitación del pavimento.

Por lo que respecta a la estructura “Opción 2”, la intención era mejorar la rigidez general de la estructura al aumentar el espesor de la base tratada con cemento Portland (5 cm más que en la opción 1) al tiempo de proponer una subbase granular de características mecánicas superiores a los materiales ligeros. La suposición de tal estructura hacía pensar que se podría desplantar directamente sobre una subrasante en materiales ligeros y ésta a su vez sobre el terreno natural compactado.

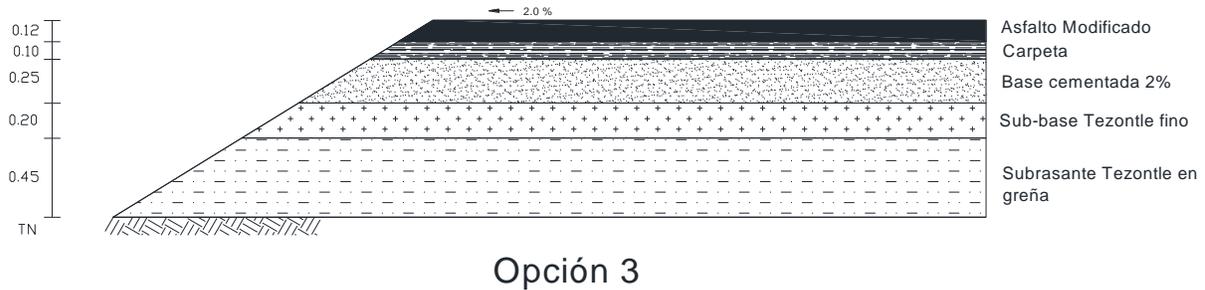


Figura 79 – Esquema de la estructura “Opción 3” para la rehabilitación del pavimento.

La “Opción 3” deriva directamente de la opción 1 en lugares dónde, no obstante haberse reconstruido el pavimento conforme a dicha configuración, se presentaban degradaciones prematuras como las correspondientes a la estructura original. En consecuencia, la idea básica de la propuesta era suponer que un sobreespesor de 12 cm de carpeta asfáltica sería suficiente para subsanar las fallas de la estructura de la opción 1.

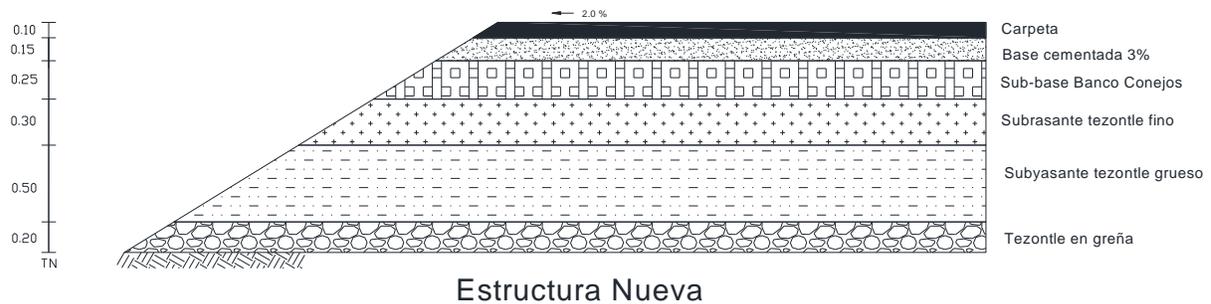


Figura 80 – Esquema de la estructura “Estructura Nueva” para la rehabilitación del pavimento.

La estructura “nueva” es la misma que se describió en los párrafos anteriores y cuyo proceso de dimensionamiento fue detallado en párrafos anteriores. Cabe resaltar que esta “estructura nueva” fue la única que se propuso directamente a partir del análisis de factores de mecánicos y funcionales y no fue modificada por la empresa concesionaria.

Las medidas de deflexión con la viga Benkelman que se llevaron a cabo sobre 4 secciones estructurales se presentan a continuación:

Pavimento Existente Cuerpo A		Opción 1		Opción 2		Opción 3		Sección Nueva	
Tramo 50+470 - 50+590		Tramo 50+280 - 50+440		Tramo 50+490 - 50+590		Tramo 50+080 - 50+260		Tramo 51+140 - 51+280	
Cuerpo A		Cuerpo B		Cuerpo B		Cuerpo B		Cuerpo B	
Estación	Deflexión Corregida	Estación	Deflexión Corregida	Estación	Deflexión Corregida	Estación	Deflexión Corregida	Estación	Deflexión Corregida
Km	0.001 Inch	Km	0.001 Inch	Km	0.001 Inch	Km	0.001 Inch	Km	0.001 Inch
50+470	131	50+280	32	50+470	41	50+080	64	51+140	57
50+490	64	50+300	39	50+490	34	50+100	44	51+160	38
50+510	92	50+320	65	50+510	101	50+120	30	51+180	16
50+530	70	50+340	52	50+530	112	50+140	37	51+200	26
50+550	61	50+360	58	50+550	86	50+160	34	51+220	35
50+570	38	50+380	77	50+570	71	50+180	34	51+240	29
50+590	57	50+400	68	50+590	67	50+200	47	51+260	19
		50+420	48			50+220	41	51+280	16
		50+440	58			50+240	54		
						50+260	44		
Datos Estadísticos									
S	73.35	S	55.24	S	73.20	S	43.00	S	29.50
s	30.03	s	14.21	s	29.12	s	10.35	s	14.03
Cv	40.94	Cv	25.72	Cv	39.78	Cv	24.07	Cv	47.56
S80	88.02	S80	65.86	S80	97.99	S80	48.76	S80	36.99
RRD	133.40	RRD	83.65	RRD	131.44	RRD	63.70	RRD	57.56
Nomenclaturas									
S	Deflexión Media								
s	Desviación Estándar								
Cv	Coeficiente de Variación								
S80	Percentil 80								
RRD	Recuperación Representativa de la Deflexión								

Tabla 12 – Deflexiones de diferentes secciones de pavimento obtenidas con la Viga Benkelman.

Como puede apreciarse fácilmente de las diferentes configuraciones estructurales, existen variaciones sumamente importantes en términos de las deflexiones. De manera general se puede considerar que:

- La estructura que presentó el mejor comportamiento fue la correspondiente a la “estructura nueva” que se evidencia muy por debajo de los niveles de deflexión del resto de las opciones descritas. La deflexión media de 29.50 milésimas de pulgada es entre 2 y 3 veces menor que las correspondientes a las opciones 1 a 3.
- La estructura “opción 2” fue la que presentó el comportamiento más deficiente en los términos de deflexiones, con una deflexión media de 73.20 milésimas de pulgada, que de hecho es muy cercana a la deflexión de la estructura de pavimento original existente en las condiciones previas a los trabajos de rehabilitación. No obstante la presencia de capas estructurales que en su conjunto superan a las del pavimento existente en espesor y calidad mecánica, el cuerpo de

terracerías de subrasante en tezontle en greña no es suficiente para mitigar la influencia negativa del suelo de soporte, su baja resistencia y condiciones de saturación.

- En términos de deflexión, la mejora aportada por la estructura “opción 2” es prácticamente despreciable por su baja magnitud, además que dicha estructura en otros tramos presentó indicios de degradaciones prematuras mismas que se intentaban remediar mediante la colocación de un sobreespesor de carpeta de rodamiento de 12 cm; lo que dio origen a la estructura “opción 3”. La estructura resultante presentaba así una deflexión media de 43.00 milésimas de pulgada. Una mejora considerable a su opción precedente que sin embargo tampoco logro modificar el modo de funcionamiento del pavimento por sus terracerías de muy baja calidad y que terminó solo retardando un poco la aparición de nuevas degradaciones.
- La estructura “opción 1” es comparativamente de comportamiento intermedio en términos de deflexiones a las opciones 2 y 3, sin embargo no logra mejorar de manera sustancial la deflexión media que es de 55.24 milésimas de pulgada. No obstante tener un cuerpo estructural mucho menor a las opciones 2 y 3, la presencia de capas de subrasante y subyacente en materiales ligeros y drenantes además de una capa de pedraplén demuestran mejorar el comportamiento general de la estructura. Los espesores de las capas drenantes aligeradas se muestran como un medio más efectivo para cumplir con la función de difuminar los esfuerzos inducidos al suelo de desplante, al tiempo de limitar también los efectos nocivos de la ascensión capilar del agua del suelo.

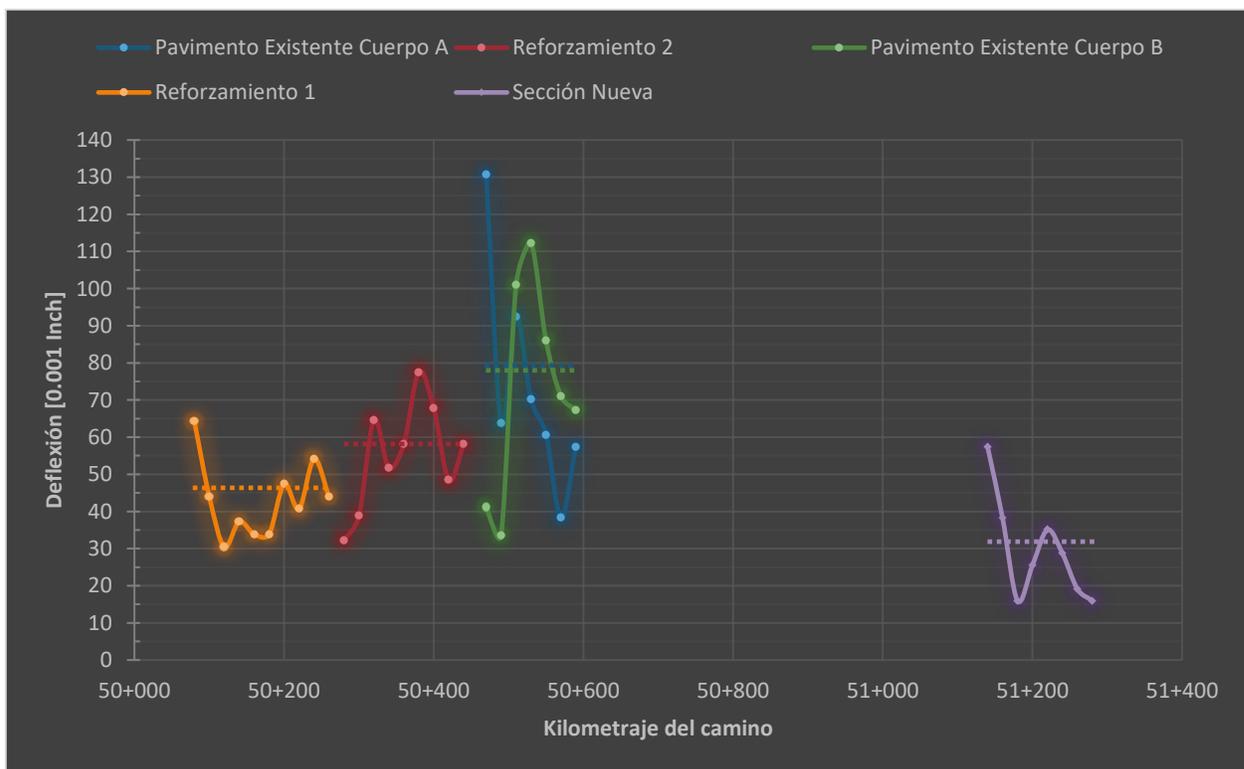


Figura 81 – Zona de pavimento fallada (primer plano) adyacente a zona reconstruida (fondo).

La revisión sencilla de las deflexiones graficadas puso en evidencia que la utilización de espesores de terracerías en capas ligeras y drenantes tiene un mejor efecto para mitigar el efecto negativo del suelo, reduciendo así la deflexión media del pavimento.

Cuando el espesor de las capas de terracerías es alrededor de 1 m, la diferencia en términos de deflexión se encuentra en la presencia de una base granular de mejor calidad mecánica que cuando se intentó ésta en materiales ligeros.

Si se observa la capacidad estructural de las opciones, se puede apreciar claramente que el incremento sólo del número estructural SN no garantiza una menor deflexión. Las capas estructurales de Capa de Rodamiento y Bases Granulares Tratadas o No con cemento Portland, se comportan mejor cuando el conjunto de Capas de Terracerías ET (Subrasante, Subyacente y Pedraplén) está presente y tiene un espesor total de al menos 1 m.

Pavimento Existente		Opción 1		Opción 2		Opción 3		Sección Nueva	
SN	ET	SN	ET	SN	ET	SN	ET	SN	ET
	Cm		Cm		Cm		Cm		Cm
3.82	109	5.65	100	5.64	45	7.84	65	4.82	100

Tabla 13 – Número estructural SN y espesor total de terracerías por tipo de estructura de pavimento.

No obstante que los números estructurales de las opciones 1, 2 y 3 son superiores a la de la estructura nueva, es decir que en principio son más robustas y resistentes, la falta de un espesor mínimo adecuado de las capas de terracerías hacía que dichas estructuras fallarán prematuramente. Esta constatación pone en evidencia la necesidad práctica de “alejar” las capas estructurales del pavimento lo suficiente del suelo de soporte para garantizar la difusión de los esfuerzos y la minimización de los efectos de la humedad.

La estructura nueva se muestra la más eficiente en términos de comportamiento medido a través de las deflexiones del pavimento, incluso sin ser la de mayor número estructural SN.

4.3. ESTADO ACTUAL DE LOS PAVIMENTOS REHABILITADOS

Durante el mes de abril de 2017, se realizó una inspección visual de algunos tramos de la autopista dónde se llevaron a cabo los trabajos de rehabilitación con la estructura de pavimento nueva, producto del proceso de análisis, diagnóstico de necesidades y redimensionamiento, que se describió en los párrafos anteriores.

El reconocimiento visual de los tramos seleccionados se llevó a cabo de la misma manera que para el reconocimiento del estado de degradaciones de la estructura de pavimento original, conforme a los lineamientos descritos en capítulo respectivo.

A continuación se presentan algunas imágenes representativas del estado actual (mayo de 2017) de secciones de pavimento reparados durante el 2012, a lo largo de diferentes tramos de la autopista.



Figura 82 – Estado actual (mayo 2017) de sección de pavimento con estructura propuesta.



Figura 83 – Carril de alta velocidad (izquierdo) en estructura propuesta en servicio desde 2012.



Figura 84 – Sección propuesta sin problemas después de 5 años de servicio.



Figura 85 – Tramo reconstruido con la sección propuesta sin problemas superficiales ni estructurales.

Como se puede apreciar a partir de las imágenes, en la generalidad de los casos la estructura de pavimento propuesta se ha comportado de manera favorable después de casi 5 años desde su puesta en servicio. Salvo algunos defectos locales y puntuales, asociados a pequeños defectos de colocación, el tipo de degradaciones que se detectaron corresponden bien al modelo de comportamiento que se utilizó para el redimensionamiento.

Acorde a los supuestos de dimensionamiento, las degradaciones presentes permiten establecer:

- El modelo de funcionamiento del pavimento construido refleja bien el patrón de degradaciones supuesto, mismo que al momento sólo manifiesta defectos superficiales ligeros sin injerencia en las capas estructurales.
- La capa de rodamiento en concreto asfáltico sólo ha sido recubierta por la aplicación de un riego de sello, mismo que se aplicó en 2016, como parte del programa de mantenimiento rutinario propio de la empresa concesionaria.
- No se aprecian desarrollo de roderas, ni de baja ni de gran amplitud en ninguno de los tramos, lo que implica un buen comportamiento tanto de las capas superficiales (carpeta de rodamiento) como de las capas estructurales (base tratada con cemento Portland).
- En términos de deformaciones superficiales también es importante señalar que la base granular, que soporta la base cementada, no ha desarrollado fallas por punzonamiento, ya que no existen fisuras ni grietas en la superficie, ni tampoco zonas de hundimientos de baja o gran amplitud que afecten el confort de circulación.
- El buen comportamiento de la base granular confirma del mismo modo la efectividad de la solución de las capas de terracerías en materiales ligeros y drenantes.

- Las variaciones anuales de humedad en el suelo de la zona han sido bien absorbidas por las capas de terracerías, impidiendo que las distorsiones afecten mayormente a la estructura del pavimento reconstruido.
- La alternativa de la estructura de pavimento nueva sigue mostrándose efectiva, ya que desde el principio resolvió los problemas de degradaciones prematuras de las otras alternativas de pavimentación y a los casi 5 años que lleva en servicio aún conserva un comportamiento adecuado.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

El establecimiento de una estrategia de conservación y mantenimiento de una estructura de pavimento dada es un trabajo complejo que implica diferentes acciones y dinámicas en continuo que, mediante la exploración superficial y mecánica de las capas constituyentes, intenta responder a las necesidades reales del conjunto estructural. El objetivo principal es la preservación de diferentes estándares de desempeño, tanto superficiales como mecánicos, que la vialidad pretendía desde su etapa de diseño.

Por su parte, el dimensionamiento original de la estructura de pavimento prevé un conjunto de hipótesis que portan sobre las características mecánicas de los materiales, sus disposiciones geométricas y constructivas, el comportamiento hídrico y mecánico de los suelos y claro está, la composición y evolución del tráfico vehicular al que deberá de dar servicio. Este conjunto de hipótesis que determinan el comportamiento del pavimento es en sí mismo de naturaleza variable y sumamente susceptibles a desviaciones propias de los procesos constructivos y de errores humanos. Por tanto, la programación de trabajos de rehabilitación es un proceso dinámico que se ajusta en continuo ya que evoluciona desde la puesta en servicio de la carretera.

En el estudio de caso que se presentó en este documento, se puede apreciar claramente una problemática muy específica que parte del establecimiento de estrategias y trabajos de rehabilitación inadecuados, que no corresponden a las necesidades reales del pavimento, pero que tienen su origen en deficiencias de dimensionamiento y constructivas incluso desde la etapa original de diseño. La aplicación de trabajos recurrentes y caros no fue capaz de proveer a la vialidad un estado de servicio adecuado, sino por el contrario, solo fue de tintes paliativos de muy corta duración.

Por otro lado, el análisis funcional y mecánico que se desarrolló a lo largo de los capítulos presentados fue capaz de proveer los elementos necesarios para entender el modo de funcionamiento del pavimento existente, sus carencias y causales del comportamiento deficiente. A partir de esto, fue posible proceder al redimensionamiento de una estructura capaz de soportar de manera adecuada los esfuerzos inducidos por el tráfico y de mantener un comportamiento adecuado para el plazo de tiempo considerado.

Al término de la experiencia de trabajo se puede decir que el origen de las deficiencias de la estructura de pavimento originalmente construida se encuentra en errores de diseño del pavimento y también constructivos.

El suelo de soporte de la vialidad es de características mecánicas insuficientes para resistir por sí mismo la estructura del pavimento, además de tener problemas debido a su naturaleza fina y plástica que se maximizan debido a la presencia de agua y ascensión capilar. En tales condiciones el suelo propicia una serie de deformaciones debido a su baja resistencia y variabilidad volumétrica debido a cambios de humedad, lo que aunado a cargas vehiculares pesadas y próximas creaban las condiciones para un soporte altamente deformable. En tales condiciones y sin tratamiento, capas estructurales y sobreespesores de carpetas asfálticas se encontraban siempre en condiciones donde no podían desarrollar el modo de funcionamiento previsto y fallaban prematuramente.

En lo referente al control de calidad, la exploración de las capas de base y terracerías detectó errores graves de formulación, ya que materiales granulares para base y subbase se habían adicionado con materiales finos y plásticos. Las terracerías de muy baja calidad también presentaban un alto contenido de partículas finas y plásticas, sumamente susceptibles a la ascensión capilar de la humedad del suelo. Esto afectaba en sobremanera las capas de base granulares que veían así una baja drástica de su resistencia. Al tiempo, también fue posible apreciar errores de formulación por granulometrías deficientes y de contenidos de partículas alargadas y lajeadas muy elevados.

La reconfiguración de la estructura propuesta intentó resolver o mitigar los efectos negativos descritos en el párrafo anterior con resultados satisfactorios a la vista de los resultados mecánicos, de funcionamiento y de durabilidad que fueron presentados en los apartados correspondientes.

Desde el punto de vista de la problemática de suelos, la adecuación de las capas de subrasante en tezontle fino y de la subyacente en tezontle grueso demostró que fue efectiva para limitar la ascensión de humedad por capilaridad hasta la capa de base granular. Aunado a estas capas, la colocación de una capa de pedraplén confirió un medio de soporte mejorado que permitió al suelo soportar mejor los esfuerzos al tiempo de reducir igualmente la ascensión capilar. Las secciones estructurales que se desplantaron sobre este tipo de adecuaciones de las terracerías no presentaron ninguna clase de degradación superficial ni estructural al cabo de los primeros 6 meses de funcionamiento. Las mismas secciones revisadas casi 5 años después siguen sin mostrar signos de degradación estructural y algunas solo han sido recubiertas por un riego de sello que forma parte de los trabajos de conservación rutinaria.

Por lo que respecta a la capacidad estructural, la sección propuesta demostró que incluso teniendo un número estructural menor al resto de opciones de rehabilitación, ésta fue capaz de resistir correctamente los esfuerzos del tráfico. En el caso de las capas de base granular la corrección de los defectos de formulación ha contribuido a aumentar la resistencia nominal de la capa y minimizar las deformaciones por punzonamiento. En el mismo sentido, la capa de base tratada con cemento Portland contribuyó de manera eficaz a aumentar la rigidez del conjunto, proporcionando un correcto soporte a la capa de rodamiento y contribuyendo a disminuir los esfuerzos en la capa de base granular que pasan de tipo tensión por flexión en la fibra extrema inferior de la base cementada a punzonamiento vertical en la fibra superior de la base granular.

Por su parte, la utilización de asfalto modificado con SBS y una reformulación de la granulometría de la mezcla en caliente permitió mejorar sensiblemente la calidad mecánica de la capa al tiempo de aumentar su densidad y disminuir así la permeabilidad de la misma. Esta reducción de la permeabilidad, prácticamente nula, también contribuye a la preservación de la totalidad de la estructura del pavimento ya que reduce la oxidación de la capa asfáltica y la pérdida de resistencia de las capas granulares por infiltración de agua desde la superficie.

El proceso de trabajo presentado en los capítulos que integran este documento demostró que la correcta exploración de las estructuras de pavimentos, el análisis funcional y mecánico de la configuración estructural, la formulación de materiales específicos para cada tipo de capa, el análisis de las características del suelo de soporte y estado hídrico, aunados a una estricta implementación de controles de calidad adecuados; pudo proveer una alternativa de solución para todos los problemas identificados y dentro de las especificidades que la empresa concesionaria estipuló.

Queda sin embargo mucho trabajo por hacer desde la perspectiva de una mejora de cada material a utilizar, optimizar los espesores y composiciones granulométricas de las capas filtrantes, lo mismo que las capas estructurales.

Es de suma importancia considerar alternativas que hoy día se encuentran disponible en el mercado mexicano para agentes estabilizadores, dispositivos para el control de humedades, nuevos procedimientos de formulación de materiales, etc., a partir de procesos claros de inspección y control de calidad de procesos de diseño, así como de construcción.

Como se mostró en el presente trabajo, la correcta identificación e interpretación de los procedimientos constructivos y de los modos de funcionamiento de las estructuras en su interacción con el suelo de soporte y las cargas vehiculares es indispensable para la gestión eficiente de la conservación de los pavimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials 1914.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AAHSTO Guide for Design of Pavement Structures 1993*. In *2.2 Performance criteria, 2.2.1. Serviceability* (pp. II-10). Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Aashto Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Chapter 3. Highway Pavement Structural Design. Ciudad de México: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1997). *Guide specifications for Design of Pedestrian Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Garnica, A. P., Alamilla, H. D., & Sandoval, C. S. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Sanfandila, Qro: Publicación Técnica No 271.
- Blázquez, L. B. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A.
- Bustamante, F. O. (1999). *Estructuración de vías terrestres*. México: Compañía Editorial Continental, S.A de C.V.
- C., S. C., & O., G. P. (1999). *Diseño Estructural de Pavimentos Asfáltico, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones*. México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Sanfandila, Qro, 2005: Publicación Técnico No 271.
- Rodríguez, A. R., Gutiérrez, R. T., & Garnica, A. P. (1998). *Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano de Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2001). *Conservación, Carreteras, Trabajos de Conservación Periódica, Pavimentos, Estabilización de Losas de Concreto Hidráulico*. Ciudad de México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (n.d.). *1. Suelos y Materiales para terracerías, 4. Materiales para Pavimentos*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1991). *Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas*. Querétaro, Qro: Instituto Mexicano del Transporte.

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subrasante*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los Materiales, Materiales para terracerías, Materiales para Subrasante*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subrasante*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para subyacente*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los materiales, Materiales para terracerías, Materiales para Subyacente*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Características de los materiales, Materiales para Terracerías, Materiales para terraplén*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *Conservación, Carreteras, Trabajos de conservación periódica, Obras de drenaje y subdrenaje*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2004). *Sistema de Evaluación de Pavimentos Versión 2.0*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2005). *Características de los materiales, Materiales para obras de drenaje y subdrenaje, Materiales para subdrenes, Filtros*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de Materiales asfálticos*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *Características de los Materiales, Materiales para pavimentos, Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas, Calidad de Materiales Asfálticos*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *Método de muestreo y prueba de materiales, Materiales para pavimentos, Superficie de rodadura, Índice de perfil*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *Método de Muestreo y Prueba de Materiales, Materiales para Pavimentos, Superficie de Rodadura, Índice de Perfil*. Ciudad de México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2008). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de materiales asfálticos grado PG*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2008). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales pétreos para mezclas asfálticas*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Bases Tratadas*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y bases, Materiales para bases hidráulicas*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para Pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Bases Hidráulicas*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales para bases tratadas*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales para subbases*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para Subbases y Bases, Materiales para Subbases*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales para subbases y bases, Materiales para subbases*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, Calidad de mezclas asfálticas para Carreteras*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Proyecto de Drenaje y Subdrenaje, Proyectos de obras menores y obras complementarias de drenaje*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). *Proyecto, Carreteras, Proyecto de drenaje y subdrenaje, Proyctos de obras compementarias de drenaje, Diseño hidráulico de obras complementarias de drenaje*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Superpave Series Number 1. (1993). *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*. USA.

Transporte, S. d. (n.d.). *Normativa para la infraestructura del transporte*. Retrieved from <http://normas.imt.mx/>

Wright. (1993). *Ingeniería de Carreteras*. Ciudad de México: Noriega editores.

Yoder, E. J. (1967). *Principles of Pavement Design, Capítulo 18*. John Wiley and Sons, Inc.