



**BUAP**

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**Facultad de Ingeniería**

**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN TRÁNSITO Y TRANSPORTE**

## **CÁLCULO DE LA VIDA REMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON UN ENFOQUE MECANICISTA**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN  
INGENIERÍA EN TRÁNSITO Y TRANSPORTE**

Presenta:

**GERARDO ANGEL CERECEDA MALDONADO**

Director de tesis:

**MTRO. EN ING. CARLOS ADOLFO CORIA GUTIERREZ**

**DR. PAUL GARNICA ANGUAS**

Puebla, Pue.

Junio 2020



Oficio No. 2119/2019

**C. Gerardo Ángel Cereceda Maldonado**  
Pasante de la Maestría en Ingeniería  
con opción terminal en Tránsito y Transporte  
Facultad de Ingeniería, BUAP.  
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Cálculo de la vida remanente en pavimentos asfálticos con un enfoque mecanicista**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Tránsito y Transporte. Asignándose como Director al M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez y Co-director al Dr. Paúl Garnica Anguas.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Zaragoza, agosto 24 de 2019

**M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández**  
Director

C.c.p. M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez y Dr. Paúl Garnica Anguas, Director y Co-director del Tema de Tesis  
C.c.p. Archivo

ABH/JLSM/sco\*

C13

Facultad  
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610



# BUAP

**M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández**  
**Director de la Facultad de Ingeniería BUAP**

Presente

Los que suscriben, Mtro. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez y Dr. Paul Garnica Anguas, en calidad de Director y Co-Director de la presente tesis titulada “Cálculo de la vida remanente de pavimentos asfálticos con un enfoque mecanicista” para obtener el grado de Maestría en Ingeniería con opción terminal en Tránsito y Transporte, que presenta el Ing. Gerardo Ángel Cereceda Maldonado no vemos inconveniente en autorizar la impresión de la tesis citada, al cumplir con las revisiones necesarias para su terminación.

Lo que hacemos de su conocimiento para los efectos académicos a que haya lugar y sin más por el momento, nos despedimos de usted.

Atentamente

H. Puebla de Zaragoza, a 21 de junio 2020

**M. I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez**  
Director de Tesis

**Dr. Paul Garnica Anguas**  
Co-Director de Tesis

C. c. p. Interesado

## ***Dedicatoria***

*Con amor dedico esta investigación a Lorena Astrid Salazar H., quien me ha acompañado desde el principio de este proyecto y con quien quisiera realizar muchos más.*

*Te amo*

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, gracias a Dios.*

*En adelante,*

*Gracias a mi madre, Angélica María Maldonado P. quien siempre me ha enseñado a ser un hombre independiente, apoyándome en todas las decisiones que he tomado.*

*A mi padre, Gerardo A. Cereceda R. quien me inculcó desde pequeño el gusto por la ingeniería.*

*Al Mtro. Carlos Coria por su amistad, cátedra y guía en el diseño de pavimentos.*

*Al Dr. Paul Garnica, con quien ha sido una gran experiencia trabajar.*

*Al Mtro. Raúl López Bretón y la empresa ROCCA Consultores.*

*Gracias a mi familia y amigos pues son mi fundamento.*

# Índice

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Capítulo 1. Fundamentos Teóricos del Comportamiento Estructural del Pavimento .....	8
1.1 Esfuerzos en una Sección de Pavimento Flexible.....	8
1.1.1. Elasticidad .....	9
1.1.2. Plasticidad .....	11
1.1.3. Viscosidad .....	12
1.1.4. Respuestas Mecánicas no derivadas de la aplicación de cargas .....	14
1.1.5. Respuestas mecánicas derivadas de la aplicación de cargas.....	15
1.2 Propiedades de los Materiales de las Capas .....	18
1.2.1 Control de Calidad.....	19
1.2.2 Normatividad.....	20
1.3 Espectros de Carga.....	22
1.4 Evaluación Estructural de los Pavimentos .....	28
1.4.1 Pruebas Destructivas.....	29
1.4.2 Pruebas no Destructivas.....	29
1.4.2.1 Equipo de Impacto.....	31
1.4.2.2 Equipo de Medición Estática .....	32
1.4.2.3 Equipos de medición dinámica.....	32
1.5 Modelos de Deterioro .....	34
1.5.1 Espectros de Daño .....	34
1.6 Software IMT – PAVE .....	37
1.7 Conclusiones del Capítulo 1.....	41
Capítulo 2. Análisis Estadístico de la Capacidad Estructural en la Red Mexicana de Corredores .....	43
2.1 Corredores Carreteros Mexicanos .....	46
2.2 Análisis Nacional.....	49

2.2.1	<i>Análisis Estructural del análisis nacional</i> .....	49
2.2.2	<i>Análisis de Tránsito del análisis nacional</i> .....	52
2.2.3	<i>Deflexión del análisis nacional</i> .....	54
2.3	<i>Análisis del Corredor México Nogales</i> .....	55
2.3.1	<i>Análisis Estructural del corredor México Nogales</i> .....	55
2.3.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor México Nogales</i> .....	58
2.3.3	<i>Deflexión del corredor México Nogales</i> .....	60
2.4	<i>Análisis del Corredor México Nuevo Laredo</i> .....	61
2.4.1	<i>Análisis Estructural del corredor México Nuevo Laredo</i> .....	61
2.4.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor México Nuevo Laredo</i> .....	64
2.4.3	<i>Deflexión del corredor México Nuevo Laredo</i> .....	66
2.5	<i>Análisis del Corredor Querétaro Cd. Juárez</i> .....	67
2.5.1	<i>Análisis Estructural del corredor Querétaro Cd. Juárez</i> .....	67
2.5.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Querétaro Cd. Juárez</i> .....	70
2.5.3	<i>Deflexión del corredor Querétaro Cd. Juárez</i> .....	72
2.6	<i>Análisis del Corredor Veracruz Monterrey</i> .....	73
2.6.1	<i>Análisis Estructural del Corredor Veracruz Monterrey</i> .....	73
2.6.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Veracruz Monterrey</i> .....	76
2.6.3	<i>Deflexión del corredor Veracruz Monterrey</i> .....	78
2.7	<i>Análisis del Corredor México Puebla Progreso</i> .....	79
2.7.1	<i>Análisis Estructural del corredor México Puebla Progreso</i> .....	79
2.7.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor México Puebla Progreso</i> .....	82
2.7.3	<i>Deflexión del corredor México Puebla Progreso</i> .....	84
2.8	<i>Análisis del Corredor Mazatlán Matamoros</i> .....	85
2.8.1	<i>Análisis Estructural del corredor Mazatlán Matamoros</i> .....	85
2.8.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Mazatlán Matamoros</i> .....	88
2.8.3	<i>Deflexión del corredor Mazatlán Matamoros</i> .....	90
2.9	<i>Análisis del Corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo</i> .....	91
2.9.1	<i>Análisis Estructural del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo</i> .....	91
2.9.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo</i> .....	95
2.9.3	<i>Deflexión del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo</i> .....	97
2.10	<i>Análisis del Corredor Manzanillo Tampico</i> .....	98

2.10.1	<i>Análisis Estructural del corredor Manzanillo Tampico</i>	98
2.10.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Manzanillo Tampico</i>	101
2.10.3	<i>Deflexión del corredor Manzanillo Tampico</i>	103
2.11	<i>Análisis del Corredor Circuito Transístmico</i>	104
2.11.1	<i>Análisis Estructural del corredor Circuito Transístmico</i>	104
2.11.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Circuito Transístmico</i>	108
2.11.3	<i>Deflexión del corredor Circuito Transístmico</i>	110
2.12	<i>Análisis del Corredor Acapulco Tuxpan</i>	111
2.12.1	<i>Análisis Estructural del corredor Acapulco Tuxpan</i>	111
2.12.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Acapulco Tuxpan</i>	114
2.12.3	<i>Deflexión del corredor Acapulco Tuxpan</i>	116
2.13	<i>Análisis del Corredor Acapulco Veracruz</i>	117
2.13.1	<i>Análisis Estructural del corredor Acapulco Veracruz</i>	117
2.13.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Acapulco Veracruz</i>	120
2.13.3	<i>Deflexión del corredor Acapulco Veracruz</i>	122
2.14	<i>Análisis del Corredor del Altiplano</i>	123
2.14.1	<i>Análisis Estructural del corredor del Altiplano</i>	123
2.14.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor del Altiplano</i>	126
2.14.3	<i>Deflexión del corredor del Altiplano</i>	128
2.15	<i>Análisis del Corredor Transpeninsular de Baja California</i>	129
2.15.1	<i>Análisis Estructural del corredor Transpeninsular de B.C.</i>	129
2.15.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Transpeninsular de B.C.</i>	132
2.15.3	<i>Deflexión del corredor Transpeninsular de B.C.</i>	134
2.16	<i>Análisis del Corredor Peninsular de Yucatán</i>	135
2.16.1	<i>Análisis Estructural del corredor Peninsular de Yucatán</i>	135
2.16.2	<i>Análisis de Tránsito del corredor Peninsular de Yucatán</i>	138
2.16.3	<i>Deflexión del corredor Peninsular de Yucatán</i>	140
2.17	<i>Análisis del Corredor del Pacífico</i>	141
2.17.1	<i>Análisis Estructural del corredor del Pacífico</i>	141
2.17.2	<i>Análisis de Tránsito corredor del Pacífico</i>	145
2.17.3	<i>Deflexión del corredor del Pacífico</i>	147
2.18	<i>Dispersión de los módulos de elasticidad de las capas del pavimento</i>	148

2.19 Conclusiones del Capítulo 2.....	151
Capítulo 3 Valoración de la Vida Remanente en la Red Mexicana de Corredores .....	154
3.1 Análisis Espectral Nacional.....	159
3.2 Análisis Espectral del corredor México Nogales.....	160
3.3 Análisis Espectral del corredor México Nuevo Laredo .....	161
3.4 Análisis Espectral del corredor Querétaro Cd. Juárez.....	162
3.5 Análisis Espectral del corredor Veracruz Monterrey.....	163
3.6 Análisis Espectral del corredor México Puebla Progreso .....	164
3.7 Análisis Espectral del corredor Mazatlán Matamoros.....	165
3.8 Análisis Espectral del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo .....	166
3.9 Análisis Espectral del corredor Manzanillo Tampico .....	167
3.10 Análisis Espectral del corredor Circuito Transístmico .....	168
3.11 Análisis Espectral del corredor Acapulco Tuxpan .....	169
3.12 Análisis Espectral del corredor Acapulco Veracruz.....	170
3.13 Análisis Espectral del corredor del Altiplano.....	171
3.14 Análisis Espectral del corredor Transpeninsular de Baja California .....	172
3.15 Análisis Espectral del corredor Peninsular de Yucatán .....	173
3.16 Análisis Espectral del corredor del Pacífico .....	174
3.17 Análisis Estadístico de los resultados .....	175
3.18 Conclusiones del Capítulo 3.....	179
Capítulo 4. Conclusiones.....	182
Anexo 1. Modelos de Deterioro empírico-mecanicistas .....	189
Anexo 2. Resumen de Secciones Propuestas .....	192
Anexo 3. Resumen de Tránsito.....	194
Anexo 4. Resumen del Análisis Espectral.....	197
Anexo 5. Resumen de Deflexiones .....	200
Anexo 6. Condición Estructural de Pavimentos en la Red Federal Libre .....	202
Anexo 7. Condición Estructural de Pavimentos en la Red Federal Libre .....	217
Bibliografía .....	226

## ***Resumen***

La presente investigación determina la vida remanente con un enfoque mecanicista de los corredores carreteros de México. Para ello, fue recopilada y analizada información del año 2018, de la cual fue posible proponer una estructura de pavimento promedio con espesores, módulos de elasticidad y una condición de tránsito representativa para cada corredor y así, realizar en análisis espectral por fatiga y deformación con el software IMT – PAVE. Los valores obtenidos son comparados con un análisis nacional de referencia.

## Introducción

De acuerdo con el anuario estadístico del sector de comunicaciones y transportes del año 2018, en México, la extensión actual de toda la red carretera es superior a 407,959 km, de los cuales 44% son pavimentadas, 37% son revestidas, 2% de terracerías y 17% son brechas mejoradas. De la red pavimentada el 91% corresponde con caminos de dos carriles y el 9% tiene 4 o más, así mismo, de toda esta red carretera, el 79.3% son carreteras libres y el 20.7% son carreteras de cuota, se cuenta con 1192 plazas de cobro. El sector del transporte es la cuarta actividad generadora de valor agregado bruto, el transporte de carga y pasajeros participa con el 80% del total. Nuestra red carretera mueve aproximadamente 540.15 millones de toneladas al año de manera legal, siendo el 51.5% del total, seguido del transporte marítimo con el 29.3%, transporte ferroviario con el 11.9% y transporte aéreo con solo el 7.3%. Por lo que se puede afirmar que el autotransporte por carretera predomina en nuestro país. La figura I1 muestra de manera gráfica los tipos de caminos en la red carretera mexicana, en porcentaje:

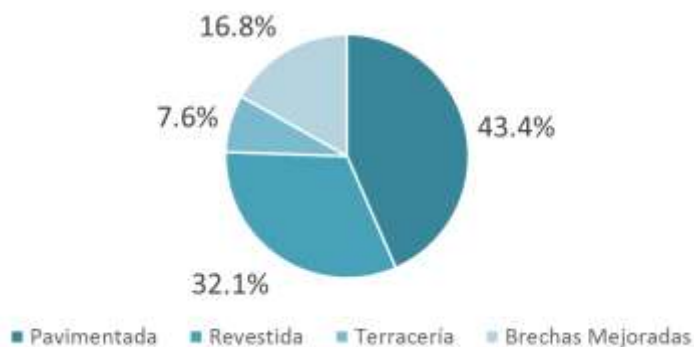


Figura I1. Tipos de Caminos en la Red Carretera Mexicana, en porcentaje

Fuente: (S.C.T., 2018)

La figura I2 muestra la distribución porcentual de la cantidad de carriles en la red pavimentada de carreteras en México, mismas que se dividen en caminos de dos carriles y cuatro o más carriles.

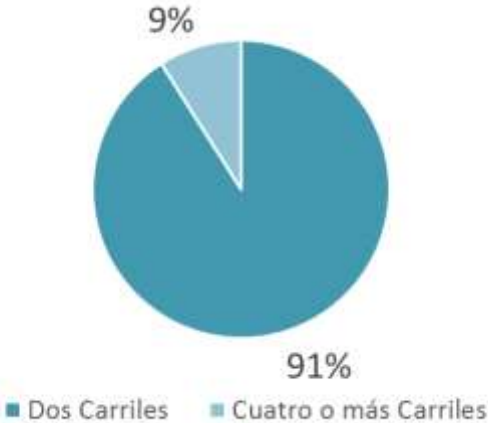


Figura I2. Distribución porcentual de cantidad de carriles en la red pavimentada de México. Fuente: (S.C.T., 2018)

La figura I3 muestra la distribución porcentual de la red federal libre y la red de cuota en las carreteras de México.

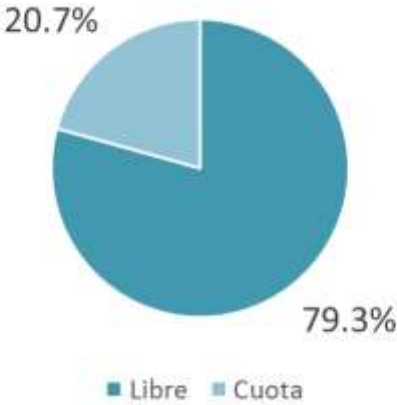


Figura I3. Distribución porcentual de la Red Libre y Red de Cuota Fuente: (S.C.T., 2018)

Año con año se suman kilómetros pavimentados de nuevos proyectos como libramientos y ampliaciones a nuestra red carretera. Estos proyectos consideran en el diseño de pavimento, de manera general, una vida útil o de servicio de 15 años en promedio. Nuestra infraestructura carretera es uno de los mayores activos con los que cuenta la nación y requiere de programas de conservación que garanticen un nivel de servicio adecuado, costos de operación moderados y seguridad para el usuario. Tomar decisiones asertivas sobre la destinación de recursos para la preservación está en función del soporte técnico, mismo que deberá ser lo más preciso posible.

Una vez que se pone en operación un nuevo camino es necesario que el administrador de ella, ya sea la S.C.T., CAPUFE o algún concesionario programe las acciones pertinentes para preservar la infraestructura. Los programas de conservación consideran todas aquellas acciones que se requieren para conservar en buen estado cualquier elemento del camino evitando su deterioro con el fin de proveer un nivel de servicio óptimo a lo largo de su vida útil. Ya que la red carretera ha sido construida en el paso del tiempo considerando variados climas y distintas condiciones de tránsito; se observa en la auscultación diversas estructuras que pavimento, construidas con los diferentes materiales que cada región provee, por lo que el diagnóstico de vida remanente mostrará significativa variación para cada tramo, además, la mayoría de estos caminos pavimentados fueron diseñados con métodos empíricos – mecanicistas y ya han superado la vida útil o de servicio. Esto significa que actualmente, los expertos técnicos tienen el reto de rediseñar las estructuras existentes con metodologías que superen técnicamente a las utilizadas en el diseño original, tanto en proyecto geométrico como los espesores de las capas del pavimento, analizando las condiciones actuales del camino y buscando alternativas de solución que provean nuevamente 15 años de vida promedio antes de llegar a pronosticar la demolición y reconstrucción de un tramo, todo esto, dentro de las posibles actualizaciones que los marcos normativos exijan.

En la red carretera pavimentada y libre de cuota antes descrita se ha identificado que contamos con 15 corredores troncales que conectan de manera longitudinal y transversal capitales, ciudades y centros generadores estratégicos de nuestro país como puertos, aeropuertos y zonas industriales, entre otros. La Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T. realiza campañas anuales de auscultación para determinar el estado actual de estos corredores, La figura I4 ilustra los corredores troncales de México.



Figura I4. Corredores troncales de México

Fuente: (S.C.T., 2018)

La presente investigación se realizó con la información del 2018, en la cual, serán descritas las teorías sobre las que se basan los procedimientos con enfoque mecanicista para caracterizar el tránsito, generar los espectros de carga, espectros de daño y los equipos utilizados para medir deflexiones, de las cuales es posible obtener módulos de elasticidad, así como, la metodología para determinar la vida remanente de una estructura de pavimento. Se analiza estadísticamente la información de la S.C.T. para proponer secciones de pavimento y tránsito promedio para poder realizar un análisis espectral de vida por fatiga en el software IMT PAVE. El objetivo principal es determinar la vida remanente de los corredores carreteros utilizando una metodología mecanicista para pavimentos asfálticos desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte, que provea, entre otras cosas, una propuesta de estructura de pavimento con espesores, módulos de elasticidad para cada una de las capas y TDPA promedio por corredor, así mismo, se presenta un análisis con toda la información recabada que se considera como un análisis nacional que sirva de referencia para cada uno de los corredores. Este análisis proveerá información valiosa a los profesionales involucrados en la toma de decisiones a nivel técnico y económico, pues será una referencia para la asignación de recursos en las posibles acciones de conservación, mantenimiento, rehabilitación o ampliación de cada uno de los corredores la red mexicana, contando con un sustento metodológico y de investigación actual.

El capítulo 1 describe los fundamentos teóricos del comportamiento estructural del pavimento, comenzando por las propiedades fundamentales del comportamiento mecánico de cada capa, se mencionan las distintas respuestas mecánicas tanto derivadas como no derivadas de la aplicación de cargas, la normativa vigente aplicable a la calidad de materiales y procedimientos constructivos para carreteras, se describe la caracterización del tránsito a través de estaciones de pesaje dinámico para generar los espectros de carga y de daño, se mencionan los distintos métodos para medir deflexiones en la capa de rodadura y generar una cuenca de deflexión, se expresa el modelo de deterioro definido por Miner (1945)

para determinar el deterioro por fatiga y por deformación de las capas del pavimento, por último, se muestra el procedimiento para ingresar datos en el software IMT – PAVE para diseño de pavimentos con enfoque mecanicista.

El capítulo 2 consta del análisis estadístico de la capacidad estructural en la red mexicana de corredores. De toda la información descrita se obtuvo una sección de pavimento propuesta para cada corredor que incluye tipos de capas, espesores y módulos de elasticidad, así como, el TDPA promedio, con el cual, se identificó un aforo real que fuera representativo incluyendo los factores de distribución, la tasa de crecimiento y la distribución vehicular, del mismo modo, se seleccionó una deflexión característica para cada corredor en función del módulo de elasticidad promedio.

El capítulo 3 consta del análisis espectral de vida remanente por fatiga que fue posible realizar con toda la información obtenida del capítulo II y con el procesamiento de datos con el software IMT – PAVE, análisis elaborado para todos los corredores y de manera nacional con distintos tipos de espectros de carga donde se observa la variación de la vida en función del nivel de carga con el que se modele, por último, se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

El capítulo 4 menciona las conclusiones de este trabajo de investigación, así mismo, se incluyen anexos. El anexo 1 menciona otros modelos utilizados para determinar la vida remanente de tipo empírico – mecanicista, los anexos 2, 3, 4 y 5 son resúmenes de las estructuras de pavimento propuestas, el tránsito, el análisis espectral y de deflexiones respectivamente. Los anexos 6 y 7 mencionan la condición estructural observada en visitas de reconocimiento a dos tramos identificados en la cercanía para validar que la información utilizada corresponde con lo observado en campo.

# Capítulo 1. Fundamentos Teóricos del Comportamiento Estructural del Pavimento

## 1.1 Esfuerzos en una Sección de Pavimento Flexible

El pavimento es una estructura multicapa formada por capas horizontales de diferentes espesores y materiales pétreos compactados con propiedades físicas y mecánicas definidas dentro de un marco de referencia o normativa. Cada capa tiene una función específica y se apoya una sobre otra para trabajar en conjunto con el fin de resistir los efectos atmosféricos de la región donde se encuentra, así como, para recibir de manera directa las cargas vehiculares que transitan por ella. La geometría del camino, el espesor de cada capa del pavimento, las características de los materiales a emplear y el procedimiento constructivo tendrán como objetivo principal proveer al usuario un tránsito seguro, cómodo y eficiente a lo largo de la vida útil o de proyecto.

Existen dos tipos principales de pavimentos: Los flexibles y los rígidos. Siendo los flexibles los que están conformados por una carpeta asfáltica y los rígidos por una carpeta de concreto hidráulico. La figura 1.1 muestra las principales capas utilizadas en la estructuración de pavimento flexible.

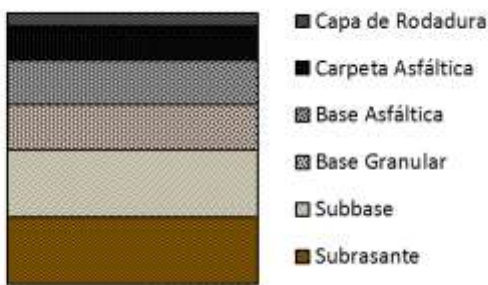


Figura 1.1 Capas del Pavimento Flexible. Elaboración propia.

Las tres propiedades fundamentales a analizar para comprender el comportamiento mecánico de cada capa son:

- Elasticidad
- Plasticidad
- Viscosidad

La combinación de estas propiedades fundamentales determina el comportamiento a analizar de cada capa del pavimento, de las que se destacan:

- Comportamiento visco-elasto-plástico del asfalto
- Comportamiento viscoelástico de materiales asfálticos
- Comportamiento elasto-plástico de materiales granulares

#### *1.1.1. Elasticidad*

Es la propiedad de un cuerpo sólido para recuperar su forma después de ser sometido a una fuerza que lo altera. Cuando un material es elásticamente lineal, la relación entre esfuerzo vertical ( $\sigma_z$ ) y deformación vertical ( $\epsilon_z$ ) es constante. Esta relación se conoce como Ley de Hooke.

El límite elástico es el esfuerzo máximo que puede experimentar un material antes de sufrir deformaciones permanentes, mientras que el límite máximo es la carga máxima que resiste el material antes de la deformación permanente o ruptura según la plasticidad de cada material.

El módulo de Young, conocido también como módulo de elasticidad (E) es el parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico. Se define por la tangente a la curva entre el esfuerzo ( $\sigma$ ) y la deformación ( $\epsilon$ ), tal como lo muestra la figura 1.2:

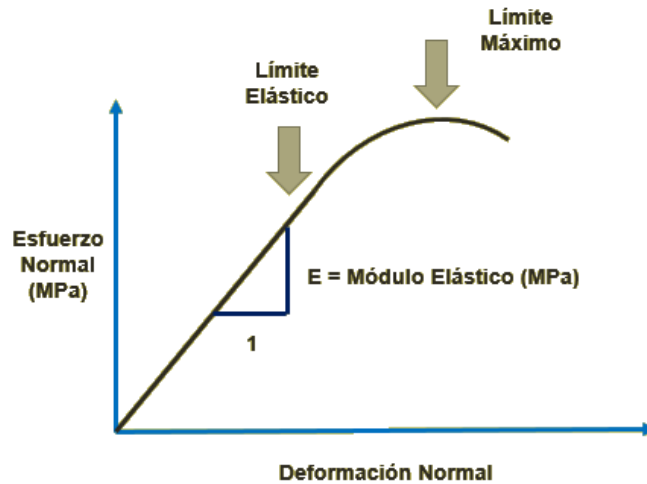


Figura 1.2 Concepto de Módulo Elástico. Fuente: (Coria Gutiérrez, Hernández Dominguez, & Garnica Anguas, 2018)

Se considera que los materiales son isótropos cuando los parámetros que los definen son los mismos en todas las direcciones. De este modo, los parámetros elásticos de la teoría de suelos se reducen al módulo de elasticidad “E” y el coeficiente de Poisson “u”. Además de ello, cuando los parámetros elásticos son los mismos en todos los puntos dentro de la capa de un pavimento, este puede considerarse como homogéneo.

La figura 1.3 ilustra los esfuerzos producidos en las direcciones x, y y z en cualquier punto en un medio homogéneo, elástico e isótropico producidos por una carga puntual sobre la superficie de un medio espacial infinitamente grande, desarrollado por Boussinesq (1883). Aplicable al análisis elástico de las diferentes capas de pavimento.

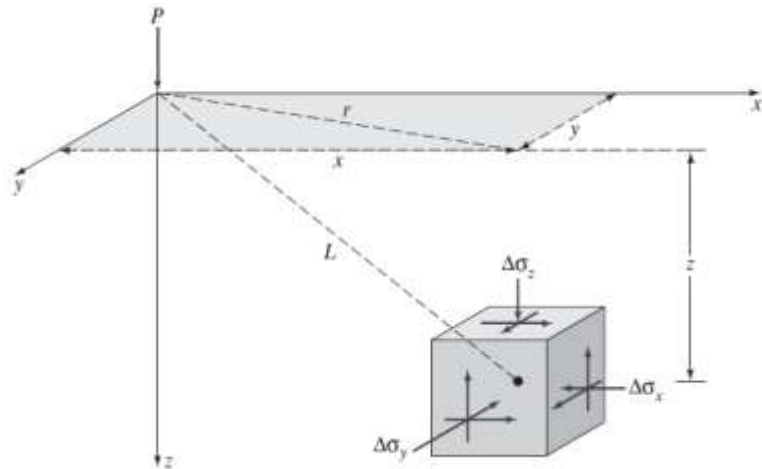


Figura 1.3 Esfuerzos en un medio elástico causados por una carga puntual.

Fuente: (Das, 2013)

### 1.1.2. Plasticidad

Es la propiedad que tiene un material de ser moldeado o cambiado de forma. Cuando se aplica una carga más allá del límite elástico se extiende al comportamiento plástico, acumulando deformaciones plásticas no recuperables que cambian la forma original de un elemento sólido. El módulo resiliente ( $M_r$ ) caracteriza el comportamiento elastoplástico de los materiales a través de ciclos de carga que acumulan deformaciones plásticas. La figura 1.4 muestra el comportamiento elasto-plástico de los materiales.

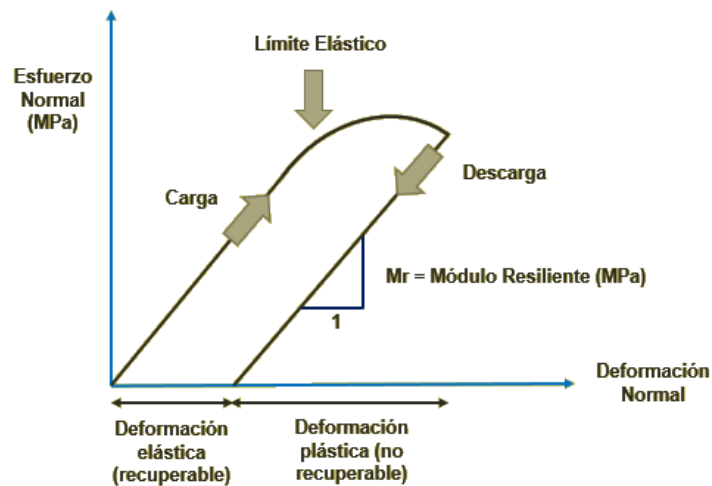


Figura 1.4 Comportamiento elasto-plástico de los materiales. Fuente: (Coria Gutiérrez, Hernández Dominguez, & Garnica Anguas, 2018).

### 1.1.3. Viscosidad

Es la medida de resistencia que tiene un fluido a las deformaciones graduales por esfuerzos cortantes. Es necesario caracterizar los materiales asfálticos a través de su comportamiento viscoelástico ya que el asfalto se vuelve líquido a temperaturas altas y se rigidiza a temperaturas bajas. La viscosidad está dada por la relación entre el esfuerzo cortante y la relación de deformación cortante. Tal como lo muestran las figuras 1.5 y 1.6:

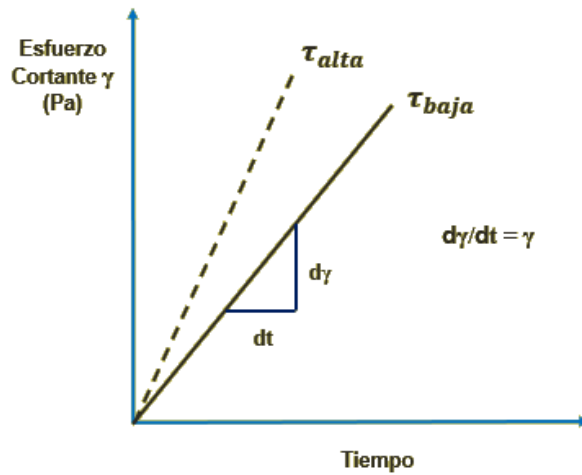


Figura 1.5 Tasa de deformación por cortante  $d\gamma/dt$ . Fuente: (Coria Gutiérrez, Hernández Domínguez, & Garnica Anguas, 2018)



Figura 1.6 Determinación de la viscosidad. Fuente: (Coria Gutiérrez, Hernández Domínguez, & Garnica Anguas, 2018)

Determinar las respuestas mecánicas que se producirán en las diferentes capas de pavimento permitirá predecir el deterioro que tendrá la estructura. Estas respuestas se clasifican de manera general en dos tipos:

- Respuestas mecánicas no derivadas de la aplicación de cargas
- Respuestas mecánicas derivadas de la aplicación de cargas

#### *1.1.4. Respuestas Mecánicas no derivadas de la aplicación de cargas*

Las respuestas mecánicas no derivadas de la aplicación de cargas en la estructura del pavimento son producidas por agentes atmosféricos, propiedades del suelo de sustento de la estructura, el propio diseño y espesores de cada capa, además de, la calidad tanto de los materiales como del procedimiento constructivo. Un ejemplo de esto se presenta en la variación del volumen de mezclas asfálticas en caliente por la diferencia de temperatura, produciendo esfuerzos cortantes, que a lo largo de varios ciclos de repetición se conocen como “fatiga térmica”, otro ejemplo es el fenómeno conocido como “bufamiento” producido principalmente por la hidratación y deshidratación arcillas de alta plasticidad (CH) produciendo expansión y contracción respectivamente, generando esfuerzos verticales y horizontales capaces de modificar la geometría del pavimento, observándose como abultamientos o agrietamientos en la capa de rodadura.

El agua es uno de los factores que más deteriora a los pavimentos y es por ello que el diseño deberá proyectar el adecuado desvío de ella, tanto de manera superficial en posibles agrietamientos, baches y juntas, o de manera interna como podría ser por posibles fugas en sistemas de drenaje y agua potable, ascensión capilar o posición del nivel freático, entre otras. Por tal motivo, se deberán tomar las medidas adecuadas para proponer sistemas de drenaje y sub drenaje que

trabajen hidráulicamente de manera efectiva, así mismo, estudios especializados de mecánica de suelos, topográficos e hidrológicos proveerán la información adecuada sobre las características y propiedades del sitio en el que se proyecte un camino.

#### *1.1.5. Respuestas mecánicas derivadas de la aplicación de cargas*

Las respuestas mecánicas derivadas de la aplicación de cargas serán las producidas por el tránsito vehicular que pueden ser de varios tipos, como: Verticales o a compresión, cortantes, tangenciales, radiales y de deflexión.

Se asume que la presión de contacto entre el pavimento y el neumático es igual a la presión de inflado del neumático y que esta presión es de forma circular por simplicidad.

Los esfuerzos y deformaciones verticales o a compresión son producidos por la aplicación de carga de un neumático, tales deformaciones podrán quedar de manera permanente y podrán ser observados como surcos o rederas plásticas en la superficie.

Las cargas de los neumáticos producen, así mismo, esfuerzos de corte en el interior de la estructura del pavimento. La magnitud de deformación en la estructura dependerá de la configuración de la carga del neumático y de las propiedades de cada capa del pavimento.

El pavimento presentará deformaciones a flexión produciendo esfuerzos tangenciales y radiales en la parte inferior de las capas del pavimento conduciendo a daños por fatiga y agrietamiento.

De acuerdo con la normativa de la S.C.T. para la evaluación de Pavimentos en el libro N-CSV-CAR-1-03-010/17 “La deflexión es la medida de deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga”

De manera superficial se producirán deformaciones verticales, conocidas como deflexiones. “La magnitud de esta deflexión es proporcional a la rigidez total del pavimento (espesor y módulos elásticos), la rigidez del suelo de desplante o apoyo. Cuanto mayor sea esta deflexión más susceptible es el pavimento de presentar fallas de tipo estructural” (Coria Gutiérrez, Hernández Dominguez, & Garnica Anguas, 2018).

Se propone que el punto más crítico de análisis de respuestas mecánicas derivadas de la aplicación de cargas en una estructura de pavimento se localiza en el centro del eje del neumático que transita sobre ella. Sobre este punto se localizarán a diferentes profundidades los diferentes tipos de esfuerzos y deformaciones para cada capa, los cuales son:

- En la superficie del pavimento directamente debajo de la carga aplicada por el neumático se localizará deflexión ( $\delta$ ).
- En el espesor total de la carpeta asfáltica se tendrán esfuerzos y deformaciones verticales ( $\sigma_z$  y  $\epsilon_t$ ).
- En la parte inferior de la carpeta asfáltica esfuerzos y deformaciones radiales y tangenciales ( $\sigma_r$  y  $\epsilon_t$ ).
- En las capas granulares, como son base hidráulica y subbase, se observarán en su espesor total esfuerzos horizontales y verticales ( $\sigma_z$  y  $\sigma_r$ ).

- En la parte superior y varios puntos dentro de la capa subrasante se tendrán esfuerzos horizontales y verticales, así mismo, en la parte superior deformación vertical ( $\epsilon_z$ ,  $\sigma_z$ , y  $\sigma_r$ ).

En el diseño de pavimento se propone que la capa subrasante es una capa semi-infinita sobre la que se apoyan las demás capas, ya que los esfuerzos y deformaciones por la aplicación de cargas en ella deberán ser menores y a mayor profundidad inapreciables hasta disiparse por completo, resultando que, en un diseño estructural adecuado, no se deberá presentar ningún tipo de respuesta mecánica en la capa de terreno natural.

La figura 1.7 muestra las respuestas críticas de un pavimento flexible convencional a la aplicación de carga de un neumático.

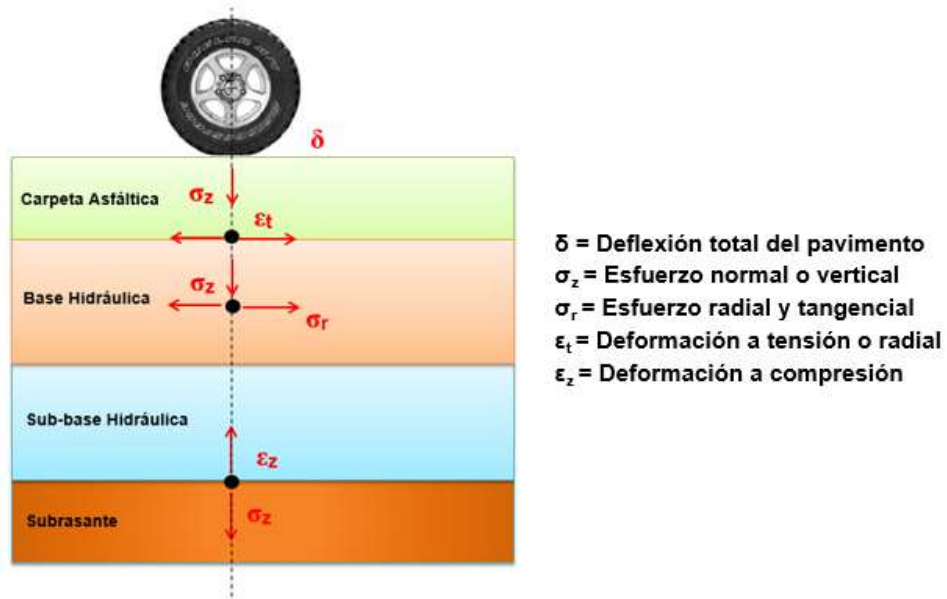


Figura 1.7 Respuestas críticas en un pavimento flexible convencional. Fuente: (Coria Gutiérrez, Hernández Dominguez, & Garnica Anguas, 2018).

La combinación de estas respuestas mecánicas determinará la vida útil de una estructura.

## **1.2 Propiedades de los Materiales de las Capas**

Los materiales pétreos son aquellos que provienen de la roca; habitualmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños, principalmente en la naturaleza, aunque de igual modo existen otros que son procesados e industrializados por el ser humano. Los pétreos son los materiales más empleados en la construcción. Los más simples se obtienen en las canteras y la mayoría suele triturarse o pulimentarse antes de su empleo. Los pétreos más conocidos son áridos como arenas y gravas, el mármol y el granito; pero también suelen formar parte de este grupo compuestos como el mortero y el concreto, además de aglutinantes como el yeso.

El pavimento flexible incluye generalmente las siguientes capas de materiales pétreos:

- Subbase: Son materiales granulares que se colocan normalmente sobre la subrasante para formar una capa de apoyo para la base de pavimentos asfálticos. (S.C.T., N-CMT.4.02.003/04, 2004).
- Base Hidráulica: Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subbase o la subrasante, para formar una capa de apoyo para carpeta asfáltica, para una capa de rodadura asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico. (S.C.T., N-CMT-4-02-002/16, 2016).
- Bases Tratadas: Son materiales granulares que no cumplen con alguno de los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-02-002, Materiales para Bases Hidráulicas o que, por razones estructurales, requieren la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e

hidráulico, para ser colocados sobre la subbase o la subrasante y formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico. (S.C.T., N-CMT.4.02.003/04, 2004).

- **Carpeta Asfáltica:** Pueden ser de dos tipos: con mezcla en caliente y mezcla en frío. Son aquellas capas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos de granulometría densa y cemento asfáltico, para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Por su espesor, tienen la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. (S.C.T., N-CTR-CAR-1-04-006/09, 2009).
- **Tratamientos Superficiales:** Los tratamientos superficiales pueden ser de varios tipos, dependiendo de lo que se pretenda lograr con ellos y buscan mejorar el nivel de servicio de la carpeta asfáltica.

### *1.2.1 Control de Calidad*

El control de calidad en proyectos de construcción se puede definir como la verificación técnica de que una obra cuente con las características específicas de calidad tanto en materiales como ejecución para evitar fallas, malos métodos y deficientes procedimientos constructivos.

La correcta supervisión de un proyecto es el método más eficaz para prevenir, detectar y, en último caso, corregir posibles errores que pongan en riesgo la seguridad, durabilidad y usabilidad de cualquier obra que se proyecta. Ésta deberá ser realizada por un tercero para mantener la objetividad en la toma de decisiones.

El control de calidad de los materiales es uno de los aspectos más importantes dentro de la industria de la construcción. Deberá asegurarse que los materiales a

emplear cumplen con todas las especificaciones técnicas a las que está sometido un proyecto. Del mismo modo, se debe disponer de personal técnico capacitado y del equipo e instrumentos necesarios, debidamente calibrados, para que los ensayos y pruebas de laboratorio que se realicen garanticen un alto nivel de confianza respecto a las características físicas y mecánicas de los materiales a emplear durante la construcción.

### *1.2.2 Normatividad*

Los catálogos de conceptos y términos de referencia de cualquier proyecto en México deben mencionar la norma de referencia a utilizar antes y durante la ejecución de la obra para asegurar que las partes involucradas utilicen los mismos criterios a la hora de tomar decisiones.

Los materiales pétreos son de gran importancia en la construcción de obras carreteras y a pesar de que son muy variados según la región en que se esté trabajando, contamos actualmente con normatividad que permite a los inversionistas, proyectistas, constructores y supervisores tener un marco de referencia para trabajar de manera adecuada bajo estándares y lineamientos con un mismo criterio de referencia.

De manera general, en el ramo del transporte de nuestro país, es posible utilizar tres normativas: La de la S.C.T., las NOM y las NMX.

La S.C.T. en conjunto con el Instituto Mexicano del Transporte proporcionan la normativa para la infraestructura del transporte tanto para carreteras como para puertos, abarcando aspectos técnicos de construcción y supervisión. Esta biblioteca se encuentra de manera gratuita en la página <https://normas.imt.mx>

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) se encuentran enfocadas a normalizar los bienes y servicios que se ofrecen a la sociedad, son las regulaciones técnicas que

se deberán seguir pues contienen información, especificaciones, procedimientos, instrumentos de medición y metodologías. Se encuentran reguladas por la Secretaría de Economía. Es posible consultarlas en <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/inicio.do>, con principal interés para el diseño de pavimento se deberá revisar el apartado de Transporte Terrestre donde se encuentra la NOM-012-SCT-2-2017, sobre peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación y jurisdicción federal.

Las normas NMX fueron durante muchos años publicadas dentro del diario oficial de la federación y por entidades públicas de gobierno. Sin embargo, recientemente se cambió su forma de difusión y actualmente se encargan de darlas a conocer organismos privados como el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) que se encuentran relacionados con la materia en cuestión. El catálogo de normas se encuentra disponible en: <https://onncce.org.mx> y el costo de cada norma es variable de acuerdo con su alcance. Estos documentos son personalizados para cada persona física o moral que lo adquiere y no tendrá permitido reproducirlo ni distribuirlo.

En cualquier caso, pese a las diferencias que puedan existir entre ambas, el objetivo último de la normatividad es el mismo: Elevar la calidad en procedimientos para reducir costos y mejorar la eficiencia.

### 1.3 Espectros de Carga

Cada vez que un vehículo transita sobre un pavimento transmite su carga a través de los neumáticos, generando esfuerzos y deformaciones en la estructura, por ello, para diseñar de manera óptima un pavimento es fundamental conocer el tránsito que deberá soportar, la distribución porcentual de vehículos pesados, la frecuencia con la que lo realiza y la tasa de crecimiento vehicular a lo largo de su vida útil.




“Para fines de diseño, rehabilitación, modernización reconstrucción, preservación y operación de carreteras, se propone que la mejor caracterización del tránsito vehicular es en términos de lo que se denomina espectros de carga de cada uno de los diferentes tipos de ejes... Un espectro de carga se puede definir como la distribución de la carga de un grupo de ejes durante un periodo de tiempo” (Garnica Anguas & Hernández Domínguez, 2013).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de pesos y dimensiones máximas con las que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal del 2017 los vehículos se pueden clasificar de acuerdo con su clase. La figura 1.8 muestra esta clasificación:

CLASE: VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN NOMENCLATURA	
CLASE: VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	NOMENCLATURA
AUTOBÚS	B
CAMIÓN UNITARIO	C
TRACTOCAMIÓN	T
CONVERTIDOR	D
CAMIÓN REMOLQUE	C-R
TRACTOCAMIÓN ARTICULADO	T-S
TRACTOCAMIÓN DOBLEMENTE ARTICULADO	T-S-R Y T-S-S







Figura 1.8 Clase vehicular. Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

Esta norma clasifica a los vehículos también por su número de ejes y llantas para cada tipo de vehículo tal como lo muestran las figuras 1.9, 1.10, 1.11 y 1.12:

AUTOBUS ( B )			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	

Nota: Los autobuses deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

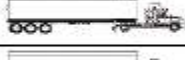
Figura 1.9 Autobús (B). Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

CAMIÓN UNITARIO ( C )			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	
CAMIÓN-REMOLQUE ( C-R )			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Nota: Los camiones unitarios y camión remolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

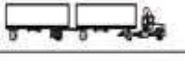
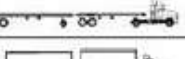
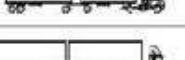
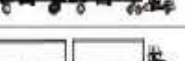
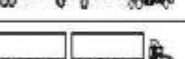
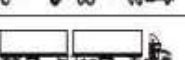
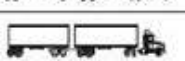
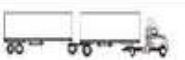
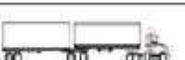
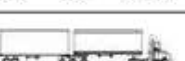
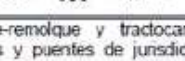
Figura 1.10 Camión Unitario (C) y Camión Remolque (C-R).

Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

TRACTOCAMIÓN ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Nota: Las configuraciones de tractocamión articulado deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Figura 1.11 Tractocamión Articulado (T-S)  
Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Nota: Las configuraciones de tractocamión semirremolque-remolque y tractocamión semirremolque-semirremolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Figura 1.12 Tractocamión Semirremolque - Remolque (T-S-R)  
Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

Cada tipo de vehículo cuenta también con un tipo de eje que tendrá permitido soportar un peso máximo y que varía según el tipo de camino por el que se transita, las figuras 1.13 y 1.14 muestran los pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino:

CONFIGURACIÓN DE EJES		VEHÍCULO	TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	B	6,50	6,00	5,50	5,00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	B	12,50	10,50	9,00	8,00
	MOTRIZ DOBLE TANDEM SEIS LLANTAS	B	17,50	13,00	11,50	11,00
	MOTRIZ DOBLE TANDEM OCHO LLANTAS	B	21,00	17,00	14,50	13,50

Figura 1.13 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.

Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

CONFIGURACIÓN DE EJES		VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN	TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	C-R y T-S-R	6,50	6,00	5,50	5,00
		C y T-S	6,50	6,00	5,50	5,00
	SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	10,00	9,50	8,00	7,00
		C y T-S	11,00	9,50	8,00	7,00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	C-R y T-S-R	11,00	10,50	9,00	8,00
		C y T-S	12,50	10,50	9,00	8,00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	C-R y T-S-R	15,00	13,00	11,50	11,00
		C y T-S	17,50	13,00	11,50	11,00
	DOBLE TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	17,00	15,00	13,50	12,00
		C y T-S	19,00	15,00	13,50	12,00
	MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	C-R y T-S-R	18,00	17,00	14,50	13,50
		C y T-S	21,00	17,00	14,50	13,50
	TRIPLE TRIDEM DOCE LLANTAS	C-R y T-S-R	23,50	22,50	20,00	NA
		C y T-S	26,50	22,50	20,00	NA

NA = No Autorizado

Figura 1.14 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.

Fuente: (Diario Oficial de la Federación, 2017)

La autoridad correspondiente es la responsable de hacer cumplir la normatividad vigente. Sin embargo, en ningún caso se recomienda considerar dichos valores, conocidos como “carga legal” para diseñar una estructura de pavimento, por el contrario, se propone la utilización de estaciones de pesaje dinámico, de las cuales es posible obtener la información necesaria y precisa para determinar la “carga real” por eje y vehículo.

Para ello se utilizan estaciones móviles de pesaje dinámico WIM (Weight in Motion por sus siglas en inglés), mismas que constan de sensores piezoeléctricos de alta precisión que están conectados a una caja de registro. Como cualquier equipo de medición, deberá estar debidamente calibrado, respecto a una carga conocida, misma que será útil para definir factores de ajuste. Las estaciones de pesaje WIM permiten caracterizar de manera continua y en tiempo real el tipo de vehículo, su peso por cada eje y la velocidad de circulación a costos relativamente bajos.

Los espectros de carga se calculan para cada tipo de eje y están definidos como la relación entre el número de ejes con un rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje.

Las figuras 1.15, 1.16 y 1.17 ilustran la forma típica de un espectro de carga para los diferentes tipos de ejes, se observa la relación entre la carga en toneladas y su porcentaje de repetición, la línea roja muestra el límite legal de carga por lo que el trazo azul que se encuentre de lado derecho mostrará la carga legal permitida y la porción de línea azul que se encuentre del lado izquierdo de la línea roja muestra la sobrecarga registrada en dicho eje.

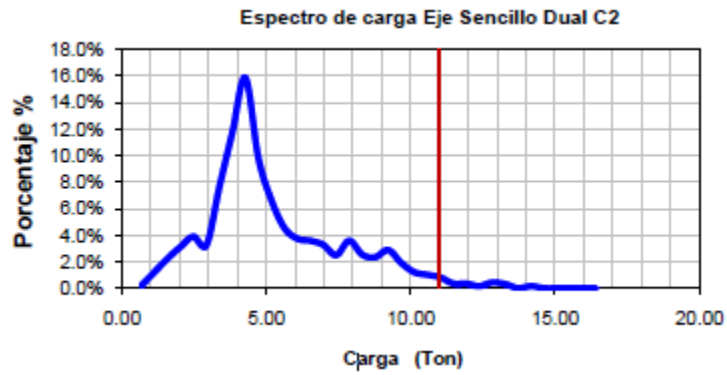


Figura 1.15 Espectro de carga de un eje sencillo dual. Fuente: (Garnica Anguas, Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos, 2013)

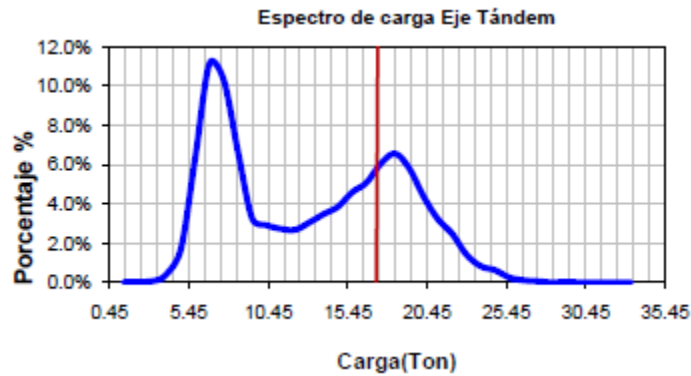


Figura 1.16 Espectro de carga de un eje Tándem. Fuente: (Garnica Anguas, Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos, 2013)

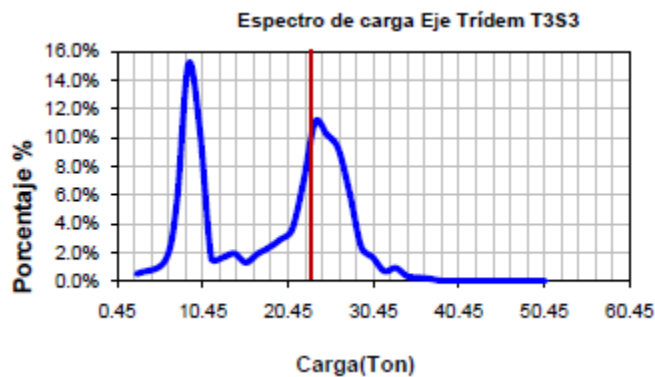


Figura 1.17 Espectro de carga de un eje Trídem. Fuente: (Garnica Anguas, Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos, 2013)

## 1.4 Evaluación Estructural de los Pavimentos

El objetivo de la evaluación estructural y funcional de los pavimentos es revisar o auscultar la estructura del pavimento una vez que se ha puesto en servicio. La guía AASHTO 1993 propone un índice de serviciabilidad para calificar el nivel de servicio del camino a analizar, tal como lo muestra la figura siguiente:

Índice de Serviciabilidad	Calificación
5 - 4	Muy buena
4 - 3	Buena
3 - 2	Regular
2 - 1	Mala
1 - 0	Muy mala

Figura 1.18. Índice de Serviciabilidad Fuente: AASHTO, Guía para diseño de estructuras de pavimento 1993

El índice de serviciabilidad puede ser determinado con la siguiente expresión:

$$p = 5.03 - 1.9 * \log(1 + S_V) - 0.01(C_f + P)^{0.5} - 1.38 * RD^2$$

Donde:

- $S_V$ : Variación de las cotas de la rasante en sentido longitudinal en relación la rasante inicial.
- $C_f$ : Suma de las áreas fisuradas en pies<sup>2</sup> y de las grietas longitudinales transversales en pies lineales, por cada 1000 pies<sup>2</sup> de pavimento.
- $P$ : Área bacheada en pies<sup>2</sup> por cada 1000 pies<sup>2</sup> de pavimento.
- $RD$ : Profundidad media de ahuellamiento en pulgadas.

La auscultación provee información más detallada sobre la capacidad estructural del pavimento y puede realizarse de manera destructiva mediante la excavación

de Pozos a Cielo Abierto o mediante pruebas no destructivas con equipo de impacto.

#### *1.4.1 Pruebas Destructivas*

La excavación de pozos a cielo abierto es la manera más simple de revisar el estado en que se encuentra un pavimento. Se deberá excavar en una profundidad aproximada de 1.00 m o hasta encontrar el estrato de capa natural en el área mínima necesaria para poder obtener material representativo y el grado de compactación de cada capa, también se deberá realizar la extracción de corazones o núcleos de la carpeta asfáltica. El muestreo mediante pozos a cielo abierto se realiza según catálogos de conceptos de cada proyecto y puede ser que se realicen a cada 50.00 m o 500 m, según los alcances técnicos del mismo. Este método se considera como destructivo pues altera la forma original de la estructura. Su realización requiere de bastante tiempo en ejecución y laboratorio, además de que no es posible determinar todas las características del asfalto utilizado.

#### *1.4.2 Pruebas no Destructivas*

Con este tipo de pruebas se determinan las propiedades de los materiales sin causar daños a la estructura, la más común consiste en medir las deflexiones superficiales, de las cuales, según la norma N-CSV-CAR-1-03-010/17 de la S.C.T. es posible obtener:

- Módulos de elasticidad de cada capa
- Rigidez de todo el sistema del pavimento
- Eficiencia de la transferencia de carga y detección de oquedades bajo los pavimentos rígidos
- Módulo de reacción de la subrasante
- Capacidad estructural del pavimento

- Análisis y diseño de rehabilitación estructural de pavimentos
- Vida remanente
- Espesores de refuerzo
- Módulos de elasticidad estacionales
- Niveles de esfuerzo

Es posible utilizar equipos de bajo y alto rendimiento para medir deflexiones. Los equipos de bajo rendimiento o estáticos producen un valor puntual de la deflexión, para ello, se utiliza la regla graduada y se coloca sobre roderas. Su utilización se ilustra en la figura siguiente:

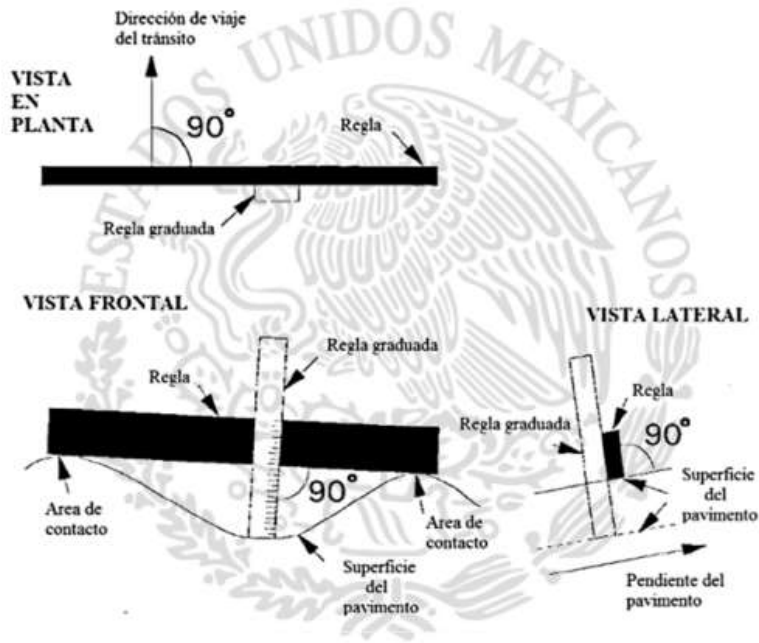


Figura 1.18 Configuración de la rodera. (S.C.T., M-MMP-4-07-019/16, 2016)

Actualmente se pueden usar diferentes tipos de equipos de medición de alto rendimiento, los cuales, se clasifican en función de la posición de medición, el tipo y número de sensores y la forma de aplicación de la carga. Existen tres tipos de equipos diferentes para determinar deflexiones con alto rendimiento:

- Equipo de impacto
- Equipo de medición estática
- Equipo de medición dinámica

#### 1.4.2.1 *Equipo de Impacto*

De acuerdo con el libro M-MMP-4-07-020/17 de la S.C.T. se debe colocar el equipo en un punto determinado del pavimento y aplicar un impacto sobre él para determinar las deflexiones verticales a diferentes distancias del punto de aplicación. La figura 1.19 describe el esquema de un deflectómetro de impacto.

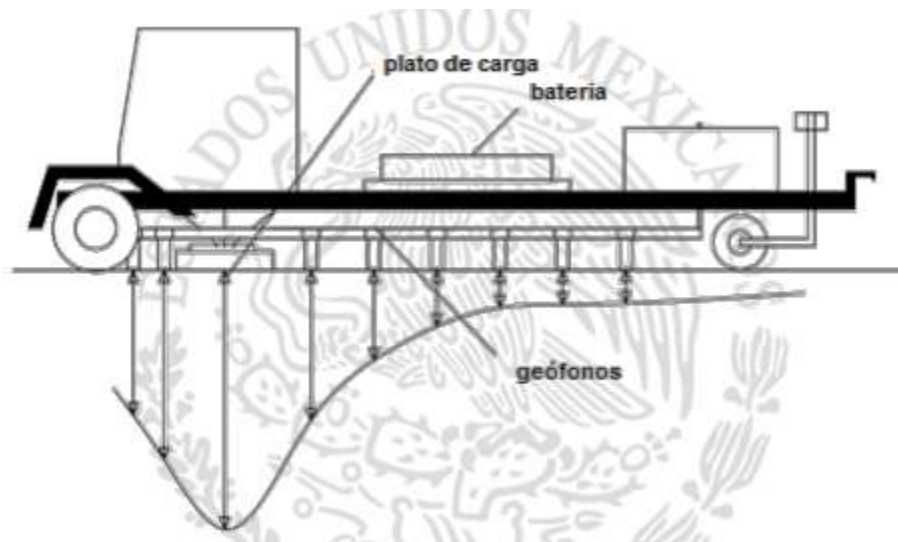


Figura 1.19 Esquema del deflectómetro de impacto.

Fuente: (S.C.T., M-MMP-4-07-020/17, 2017)

El equipo debe contar con al menos siete sensores de deflexión, sensores para medir la temperatura del aire, un sistema de control y adquisición de datos y un GPS. Todos los instrumentos del equipo deberán estar debidamente calibrados.

#### 1.4.2.2 *Equipo de Medición Estática*

Para medir deflexiones de manera estática se utiliza la viga Benkelman, la cual, se coloca entre las ruedas de un camión y se mide la respuesta de recuperación al momento en que el camión se mueve. La viga Benkelman es un equipo mecánico que consta de dos partes: El cuerpo sostén y un brazo móvil. El equipo posee un vibrador que evita que el indicador dial se trabe. La viga Benkelman se ilustra en la figura 1.20:



Figura 1.20 Esquema del equipo de medición estática.

Fuente: (S.C.T., M-MMP-4-07-020/17, 2017)

#### 1.4.2.3 *Equipos de medición dinámica*

Las cargas dinámicas son generadas con una masa de rotación contraria y operada a una frecuencia fija bajo un peso estático, estos equipos aplican una carga de magnitud variable sobre el pavimento que son controladas por el operador. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad colocados normalmente debajo de la carga y a distancias establecidas del centro de aplicación, cuenta con GPS y termómetro. La figura 1.21 muestra esquemáticamente el equipo de medición dinámica.

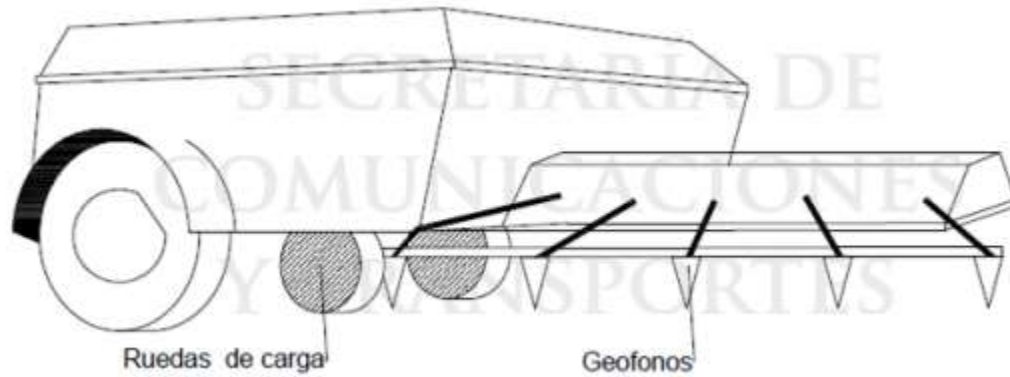


Figura 1.21 Esquema del equipo de medición dinámica.

Fuente: (S.C.T., M-MMP-4-07-022/17, 2017).

Con cualquiera de estos equipos se busca obtener una curva de deflexión, que es la medida de la deformación elástica de la superficie del pavimento a diferentes distancias respecto al punto de aplicación de la carga. La figura 1.22 muestra el esquema de una curva de deflexión.

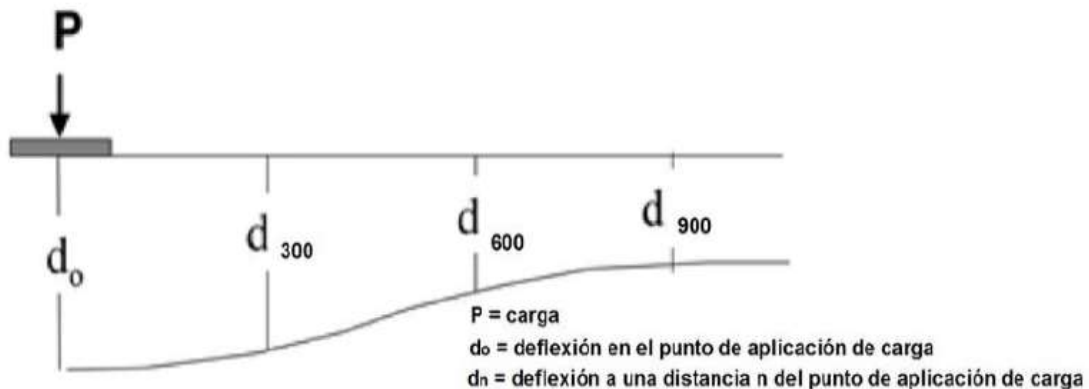


Figura 1.22 Esquema de una curva de deflexiones.

Fuente: (S.C.T., N-CSV-CAR-1-03-010/17, 2017)

Según la normativa de la S.C.T. las deflexiones medidas deberán ser normalizadas, esto significa que deberán ser corregidas debido a la influencia de la temperatura y el esfuerzo. La base de normalización de la norma son 20 grados Celsius para la temperatura y 700 kilopascales para el esfuerzo.

Para normalizar una deflexión por esfuerzo se utiliza la ecuación 1.1:

$$d_i = d_{i0} \left( \frac{P_r}{P_0} \right) \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

- $d_i$ : Deflexión del sensor  $i$ , corregida a la carga  $P_r$
- $d_{i0}$ : Deflexión del sensor  $i$ , medida en campo con la carga de aplicación  $P_0$
- $P_r$ : Carga a la cual se normalizarán las deflexiones
- $P_0$ : Carga en kiloNewtons aplicada en las mediciones de campo

## **1.5 Modelos de Deterioro**

Los modelos de deterioro buscan evaluar el tiempo de vida remanente que tiene una estructura de pavimento a partir del momento en que se pone en servicio. Es decir, se busca determinar el tiempo que soportará la estructura el tránsito vehicular con un nivel de servicio adecuado antes de que se requiera el diseño y construcción de una sobre capa.

Existen diferentes métodos para determinar la vida remanente del pavimento, el método mecanicista consiste en la evaluación de espectros de daño. Otros métodos de tipo empírico-mecanicista que destacan son los del Instituto del Asfalto y el método de la Deflexión Representativa entre otros, que serán descritos en el anexo 1.

### **1.5.1 Espectros de Daño**

El espectro de daño está definido por Miner (1945), en donde para cada tipo de eje " $i$ " y cada nivel de carga " $j$ " se obtiene el cociente entre el número de repeticiones admisibles " $N$ ". El daño total se calcula con la ecuación 1.2:

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad \text{Ec. 1.2}$$

El coeficiente de daño  $D$  representa un tipo de deterioro en el pavimento, el inverso de  $D$  representa el tiempo  $T$  en años en que se alcanzará el número de repeticiones admisible del deterioro. (Huang, 2004)

Se consideran dos tipos de deterioro principales:

- Deterioro por fatiga
- Deterioro por deformación

El deterioro por fatiga representa el límite en el que los agrietamientos de las capas llevarán a un pavimento a una condición intransitable. El número de repeticiones admisible para agrietamiento por fatiga  $N_f$  se determina con modelos de la ecuación 1.3 para los que se necesitan valores  $f_1$  y  $f_2$ . Estos valores se muestran en la figura 1.23:

$$N_f = f_1 \varepsilon_1^{-f_2} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Institución	$f_1$	$f_2$
Illinois DOT, USA	5.00E-06	3.00
TRRL, U.K. BRRC,	1.66E-10	4.32
Bélgica	4.92E-14	4.76

Figura 1.23 Parámetros de los modelos de agrietamiento por fatiga utilizados por diferentes instituciones.

Los modelos de deterioro por deformación permanente de capas inferiores están dados por la ecuación 1.4, en la figura 1.24 se muestran los valores para  $f_4$  y  $f_5$ .

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Institución	$f_4$	$f_5$	Deformación permanente máxima [mm]
Compañía Shell			
50% conf.	6.15E-07	4.000	---
85% conf.	1.94E-07	4.000	---
95% conf.	1.05E-07	4.000	---
Instituto			
Asfalto	1.36E-09	4.477	12.70
TRLL, U.K.	6.18E-08	3.970	10.16
BRRC, Bélgica	3.05E-09	4.350	---

Figura 1.24 Parámetros de los modelos de deterioro por deformación permanente de las capas inferiores utilizados por diversas instituciones.

## 1.6 Software IMT – PAVE

Actualmente contamos en nuestro país con el software IMT – PAVE de diseño de pavimentos con enfoque mecanicista desarrollado en el año 2013 por el Instituto Mexicano del Transporte bajo la dirección del Dr. Paul Garnica Anguas y el Mtro. en ing. Roberto Hernández.

Esta herramienta informática inicia con la ejecución de un proyecto nuevo, en el cual, se deberá introducir el TDPA de vehículos por día, los factores de distribución por sentido y por carril, el horizonte de proyecto de vida, la tasa de crecimiento y la distribución vehicular en porcentaje. Con estos datos se obtiene el volumen de tránsito para el horizonte de proyecto en porcentaje por tipo de eje y el número de repeticiones que este representa.

El software tiene precargados valores de tránsito iniciales que deberán ser cambiados de acuerdo con los datos obtenidos de aforos vehiculares. La figura 1.25 muestra la pestaña de tránsito del programa.

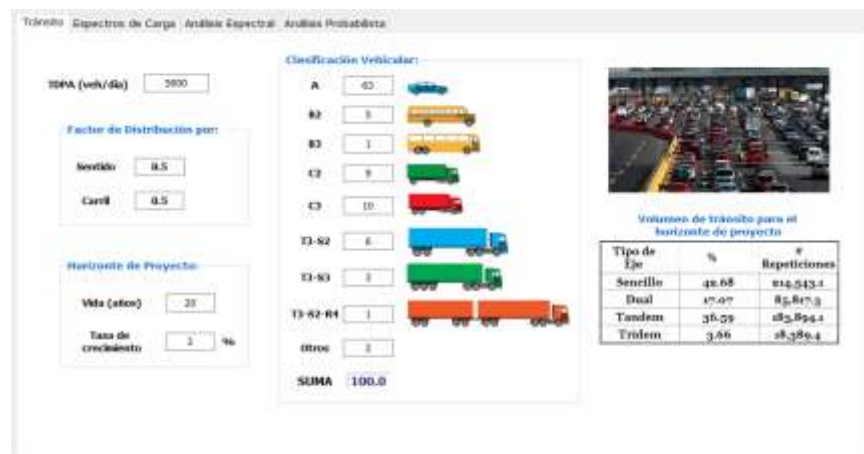


Figura 1.25 Pestaña de Tránsito de Proyecto del Software IMT- PAVE.

Fuente: IMT.

La pestaña siguiente hace referencia a los espectros de carga. El software cuenta con espectros precargados del estudio y análisis de espectros de carga

registrados desde el año 1993, mismos que pueden ser utilizados para el análisis de carga legal, ligera sobre carga, alta sobre carga, muy alta sobre carga y un apartado avanzado para introducir manualmente los valores correspondientes al sitio en estudio. Actualmente trabaja el Instituto Mexicano del Transporte en la publicación de la caracterización de espectros de carga en la red mexicana, con la cual, se podrán utilizar parámetros de ajuste para corredores y zonas económicas mexicanas. Estos datos se deben cargar para cada tipo de eje. La figura 1.26 muestra los espectros de carga precargados para la carga legal.

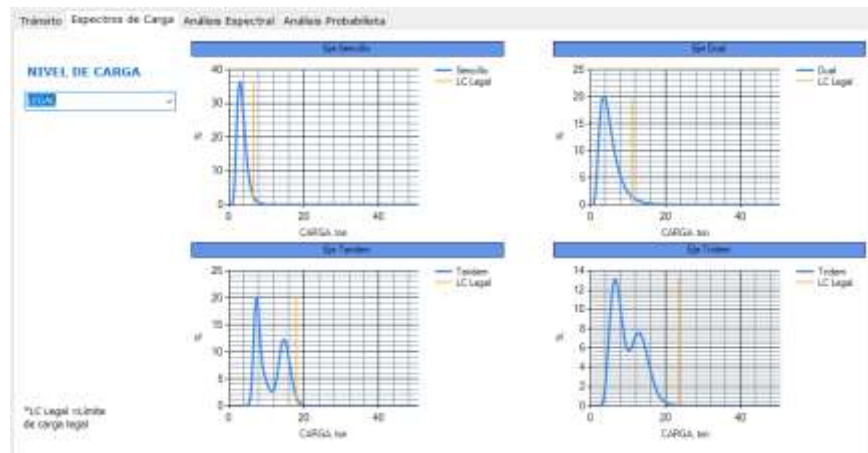


Figura 1.26 Pestaña de Espectros de Carga del IMT- PAVE.

Fuente: IMT.

A continuación, se realiza el análisis espectral, donde se deben describir los espesores de las diferentes capas de pavimento y su módulo de elasticidad. Al ejecutar este análisis se obtiene un resultado de vida por fatiga y por deformación, ambos en años. Al igual que la pestaña de tránsito, el software incluye datos iniciales que deberán ser cambiados según la estructura de pavimento que se esté diseñando. La figura 1.27 ilustra la pestaña del análisis espectral



Figura 1.27 Pestaña de Análisis Espectral del IMT – PAVE  
Fuente: IMT.

La última pestaña del software provee un análisis probabilista en el que utiliza la misma información de la estructura del pavimento, este análisis debe considerar un coeficiente de variación y un porcentaje de confiabilidad, el software nos propone coeficientes iniciales. La figura 1.28 ilustra la pestaña del análisis probabilista del IMT – PAVE.



Figura 1.28 Pestaña de Análisis Probabilista del IMT – PAVE  
Fuente: IMT.

Para el correcto uso de esta herramienta se deberá leer el manual del usuario que corresponde con el documento técnico No. 53 del Instituto Mexicano del Transporte y se encuentra para descarga gratuita en la página:

<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt53.pdf>.

## **1.7 Conclusiones del Capítulo 1**

El pavimento es una estructura multicapa de espesores y materiales compactados variables, que se construyen dentro de un marco normativo, que deben soportar principalmente el tránsito vehicular y las condiciones climatológicas del sitio donde se encuentra. El objetivo principal del diseño de un pavimento es el de proveer al usuario un tránsito seguro, cómodo y eficiente a lo largo de la vida útil o de diseño.

Las bases teóricas del comportamiento mecánico de las capas del pavimento están basadas en las teorías utilizadas en la mecánica de suelos. A lo largo de la vida de proyecto, el pavimento experimentará distintos tipos de respuestas mecánicas en cada una de las capas, por lo que comprender las propiedades mecánicas de los distintos materiales que conforman las capas del pavimento es fundamental para diseñar de manera óptima estructuras nuevas, así como, para determinar su vida remanente.

A pesar de que tanto los materiales a emplear en una estructura de pavimento como el tránsito pueden ser muy variados, contamos con un marco normativo de referencia para asegurar la calidad y durabilidad de los proyectos carreteros.

Caracterizar el tránsito es un aspecto fundamental en el diseño de pavimento, por ello, se propone que la mejor manera de hacerlo es a través de estaciones de pesaje dinámico, con las cuales es posible obtener el tipo de vehículo y su peso real. Con estos datos es posible generar la distribución de carga de un grupo de ejes durante un periodo de tiempo, conocidos como espectros de carga.

La auscultación de pavimentos para rehabilitación, reconstrucción o modernización de tramos carreteros puede ser realizada mediante pruebas destructivas mediante la excavación de pozos a cielo abierto o mediante pruebas no destructivas con equipos para medir las deflexiones en la superficie del pavimento, de una u otra forma se busca obtener el módulo de elasticidad de las capas para el análisis de vida remanente.

Determinar la vida remanente de un pavimento significa calcular el tiempo que tiene la estructura antes de que sea necesaria una sobre capa, a pesar de que existen diferentes metodologías se reconoce que el método de espectros de daño definido por Miner en 1945 considera deterioros por fatiga y por deformación y el método mecanicista por excelencia.

El IMT – PAVE es una herramienta informática desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte para el diseño de pavimentos con enfoque mecanicista que considera para el análisis de pavimentos los espectros de carga y daño.

## **Capítulo 2. Análisis Estadístico de la Capacidad Estructural en la Red Mexicana de Corredores**

El presente análisis estadístico fue realizado con la información de deflexiones por estado de la red Mexicana de Corredores del año 2018, reportada por la Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T., información que fue proporcionada por el Instituto Mexicano del Transporte. La información de 2018 consta de un estudio en una longitud total de 10549 km que representan más del 50% de la red total que atraviesa por todos los estados con excepción del estado de Guerrero, del cual, no se cuenta con ninguna información. Fueron registradas un total de 1417 secciones de pavimento diferentes después de haber sido identificadas las zonas homogéneas que cumplen con características similares en la estructura en cada punto. El tránsito fue diferente en cada uno de los registros.

Los objetivos particulares de este análisis son:

1. Construir una base de datos general, una nacional y a partir de ella, las bases de datos para cada corredor.
2. Determinar la longitud total analizada y el total de secciones por corredor.
3. Determinar los espesores máximos, mínimos y promedios encontrados de cada una de las capas del pavimento por corredor.
4. Determinar los módulos de elasticidad máximos, mínimos y promedios de cada una de las capas del pavimento por corredor.
5. Determinar el TDPA máximo, mínimo y promedio por corredor.
6. Determinar valores estadísticos adicionales como desviación estándar y coeficientes de variación de todos los resultados.

7. Proponer una sección de pavimento representativa para cada corredor que incluya los tipos de capas, espesores, módulos de elasticidad y TDPA.
8. Seleccionar un aforo vehicular medido en campo en función del TDPA representativo de la sección propuesta para cada corredor.
9. Seleccionar una deflexión medida en campo en función del módulo de elasticidad representativo de la sección propuesta para cada corredor.

Cumpliendo los objetivos particulares de este análisis es posible contar con todos los insumos para realizar los análisis espectrales con el software IMT – PAVE para el análisis nacional de referencia y por corredor. Es necesario determinar una sección de pavimento promedio pues los espesores y módulos de elasticidad de las capas varían de punto a punto por variados factores, entre los que destacan, la variación del clima a lo largo de los corredores, la diferencia de los materiales encontrados y utilizados en cada región que atraviesan los corredores y el proceso constructivo de cada subtramo que en conjunto conforma al corredor, entre otros. Cabe mencionar que la red de corredores fue construida con el paso del tiempo y cada subtramo tiene una edad diferente. Por el contrario, seleccionar un aforo vehicular real y actual en función del TDPA promedio otorga datos de interés como son los factores de distribución por carril y por sentido, la tasa de crecimiento y la composición vehicular que transita por los corredores afectados por los factores antes descritos. Además, seleccionar un aforo vehicular permite observar el comportamiento de los vehículos pesados en este año, el cual, es de particular interés para estimar la vida remanente de las estructuras detectadas.

Los resultados de este análisis se expresan con dos tipos de gráficos: De pastel, que muestran porcentajes para las diferentes variables como pueden ser los diferentes tipos de pavimento, bases o distribuciones vehiculares. Para los módulos de elasticidad y TDPA se utilizan gráficos de bigotes, donde los puntos azules representan los datos promedio utilizados y los extremos, los bigotes,

muestran los valores mínimos y máximos encontrados, con este tipo de gráfico se busca mostrar una referencia más sólida debido a la alta dispersión de los valores registrados. Las tablas siguientes sirven de referencia de valores comunes de módulos de elasticidad de materiales utilizados para las capas del pavimento, que servirá para compararlos con los valores estimados en este trabajo. Todos los resultados y figuras de este análisis son de elaboración propia.

Tabla 1.1 Módulos elásticos (E) típicos en materiales para pavimentación.

Material	Rango (MPa)	Valor típico (MPa)
Carpeta Asfáltica Convencional	2000-4000	3000
Carpeta Asfáltica con asfalto modificado	4000-6000	5000
Base estabilizada con cemento	750-2000	1500
Base estabilizada con asfalto	500-1500	1000
Base Hidráulica	270-350	310
Subrasante	190-260	220

Fuente: Garnica y Hernández, 2013

Tabla 2.1 Módulos elásticos (E) típicos en materiales para pavimentación

Fuente: Garnica y Hernández, 2013

Tabla 1.2. Valores típicos del módulo de resiliencia,  $M_r$ , para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S.

Manual SCT M-MMP-1-02/03

Clasificación del suelo	Rango de $M_r$ (MPa)	Valores típicos de $M_r$ (Mpa)
CH	34 - 90	55
CH+cal	100-200	150
CH+cemento	200-300	250
MH	55 - 120	80
CL	90 - 165	117
ML	50 - 100	75
SW	193 - 259	220
SP	166 - 228	193
SW-SC	148 - 214	176
SW-SM	166 - 228	193
SP-SC	148 - 214	176
SP-SM	166 - 228	193
SC	148 - 193	166
SM	193 - 259	221
GW	273 - 350	310
GW+cemento	750-2000	1500
GW+Asfalto	500-1500	1000
GP	245 - 300	270
GW-GC	193 - 276	238
GW-GM	245 - 279	266
GP-GC	193 - 269	235
GP-GM	214 - 276	252
GC	166 - 259	214
GM	228 - 290	266

Tabla 2.2 Valores típicos de módulo de resiliencia,  $M_r$ , para suelos clasificados con el S.U.C.S. Fuente: Garnica y Hernández, 2013

## **2.1 Corredores Carreteros Mexicanos**

De acuerdo con información de la S.C.T., en México, se ha identificado una red de 15 corredores carreteros troncales, cuya longitud total es aproximadamente de 19,250 km. Nuestra red enlaza zonas metropolitanas importantes y crea nodos de producción estratégicos. Estos corredores son:

- 1) México Nogales, con ramal a Tijuana
- 2) México Nuevo Laredo, con ramal a Piedras Negras
- 3) Querétaro Ciudad Juárez
- 4) Veracruz Monterrey, con ramal a Matamoros
- 5) México – Puebla – Progreso
- 6) Mazatlán – Matamoros
- 7) Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo
- 8) Manzanillo Tampico, con ramales a Lázaro Cárdenas
- 9) Circuito Transístmico
- 10) Acapulco – Tuxpan
- 11) Acapulco – Veracruz
- 12) Altiplano
- 13) Transpeninsular de Baja California
- 14) Peninsular de Yucatán
- 15) Del Pacífico

La figura 2.1 Muestra los corredores carreteros troncales que se extienden de manera longitudinal y transversal en nuestro país.



Figura 2.1 Corredores Carreteros Troncales de México. Fuente: IMT

De esta información se tomaron los siguientes datos para el análisis:

- 1) Estado
- 2) Clave o código del archivo del cual se tomó la información
- 3) Nombre de la carretera
- 4) Tramo y cuerpo
- 5) TDPA
- 6) Zona homogénea de las capas de pavimento
- 7) Cadenamiento de inicio y fin de cada tramo de estudio
- 8) Tipo de pavimento detectado en el tramo
- 9) Espesores de las capas de pavimento
- 10) Módulos de elasticidad de las capas del pavimento

Se procedió a analizar estadísticamente la información de manera nacional y para cada corredor utilizando el TDPA y las secciones que corresponden a cada uno. Se determinó el valor máximo, mínimo y promedio, así mismo, la desviación estándar y el coeficiente de variación para el tránsito, los espesores y módulos de

elasticidad de las capas. Con estos valores fue posible determinar una sección típica o promedio para cada corredor.

Una vez que se tuvo el TDPA promedio se seleccionó un aforo de tránsito real en función del mismo. Se tomaron los factores de distribución: Coeficiente direccional (C.D.) y Distribución de Carril (C.C), el horizonte de diseño, la tasa de crecimiento anual ( $r$ ) y la distribución vehicular.

Así mismo, se seleccionó una medición de deflexión real en función del módulo de elasticidad promedio de la capa de rodadura.

A continuación, se muestra el producto de este estudio.

## 2.2 *Análisis Nacional*

La muestra Nacional abarca una longitud total de 10549 km y 1417 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 96% de ellas son de pavimento flexible y el 4% de pavimento rígido. La figura 2.2 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.2 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.2.1 *Análisis Estructural del análisis nacional*

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base tratada con asfalto y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 79%, seguida de la base asfáltica con 11% y finalmente la base con cemento el 10% del total. La figura 2.3 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

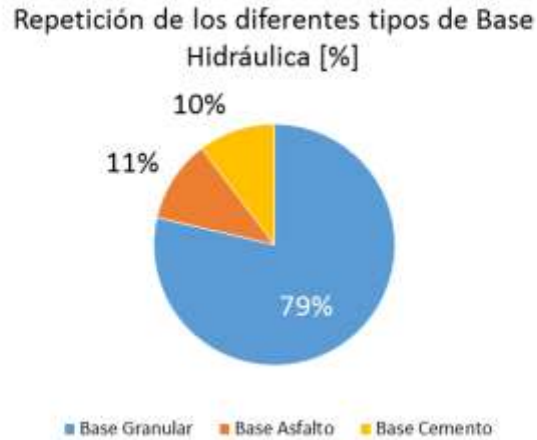


Figura 2.3 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales diferentes. El 85% de ellas corresponde a una capa subrasante, mientras que el 15% es de subbase. La figura 2.4 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa. En todas las estructuras que presentaron subbase fue identificada una cuarta capa correspondiente a la capa subrasante.



Figura 2.4 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis nacional consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 15 cm con módulo de elasticidad de 2627 Mpa soportada por una base granular de 22 cm con módulo de elasticidad de 375 Mpa y capa subrasante de 28 cm con un módulo de elasticidad de 75 Mpa. Las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 muestran estos datos de manera gráfica.

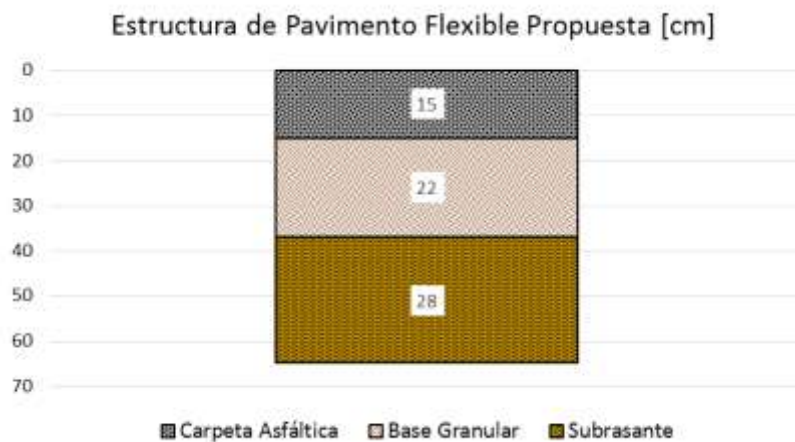


Figura 2.5 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

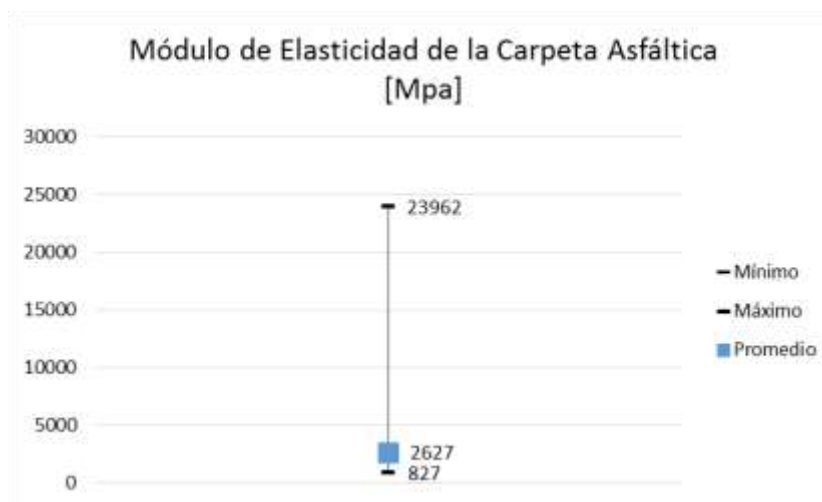


Figura 2.6 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

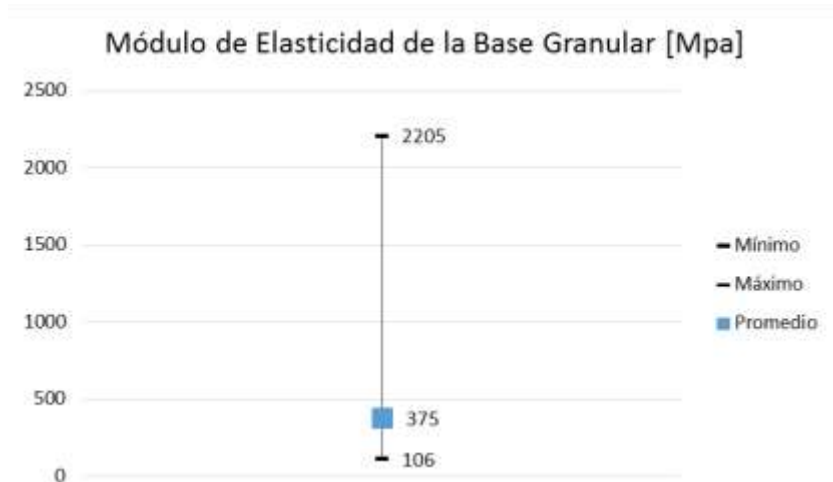


Figura 2.7 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

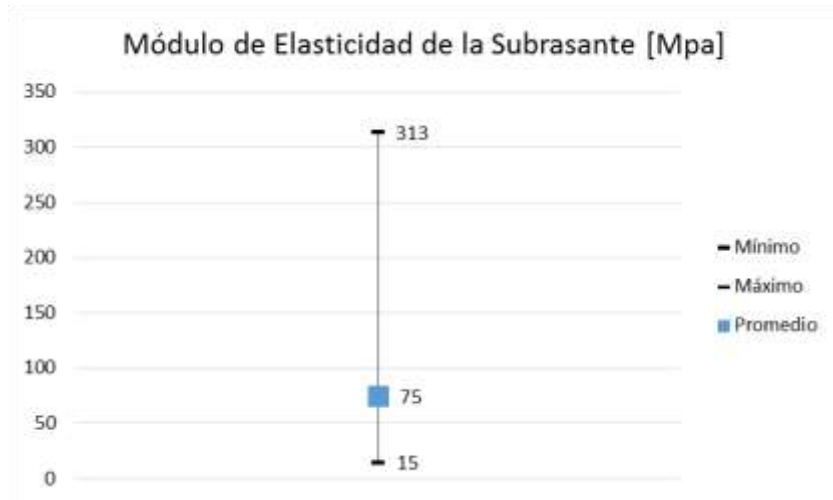


Figura 2.8 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.2.2 Análisis de Tránsito del análisis nacional

El análisis nacional muestra que el TDPA promedio es de 10147, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de

2.11%. La distribución vehicular se compone como lo muestra la figura 2.9 Las figuras 2.10 y 2.11 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	72.30%	T3-S2	8.30%
B2	2.70%	T3-S3	3.20%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	8.10%	T2-S2-R2	0.00%
C3	2.30%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.90%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	1.20%

Figura 2.9 Composición Vehicular

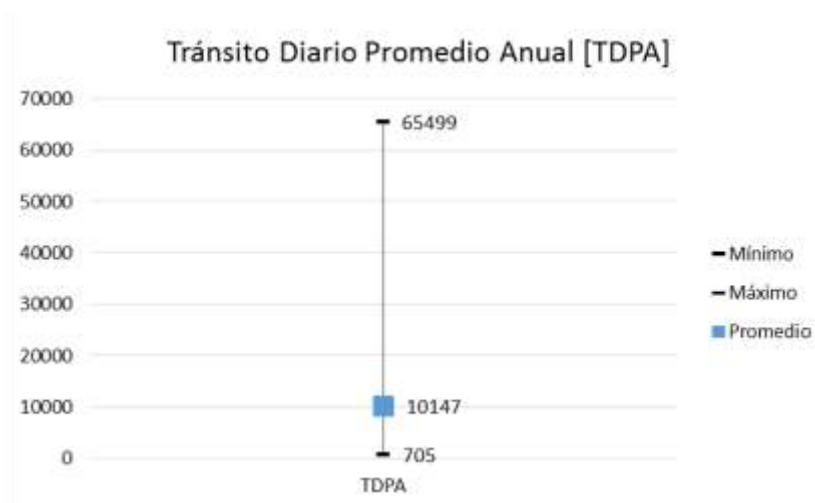


Figura 2.10 Transito Diario Promedio Anual

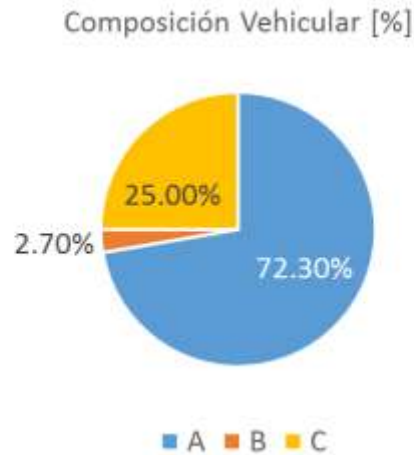


Figura 2.11 Composición Vehicular Simplificada

### 2.2.3 Deflexión del análisis nacional

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.12

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.45	0.08	0.24	94%	6%

Figura 2.12 Deflexión Normalizada en mm.

### 2.3 Análisis del Corredor México Nogales

La muestra del corredor México Nogales abarca una longitud total de 1445.102 km y 186 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 96% de ellas son de pavimento flexible y el 4% de pavimento rígido. La figura 2.13 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.13 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

#### 2.3.1 Análisis Estructural del corredor México Nogales

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base tratada con asfalto y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 78%, seguida de la base asfáltica con 15% y finalmente la base con cemento el 6% del total. La figura 2.14 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

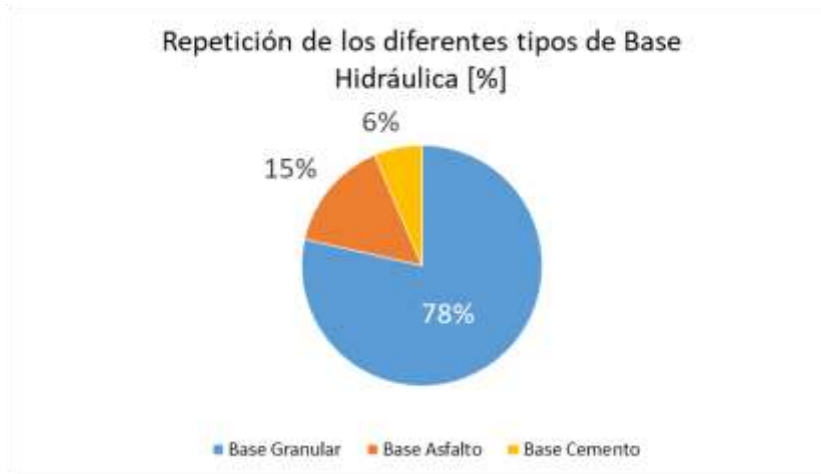


Figura 2.14 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales diferentes. El 89% de ellas corresponde a una capa subrasante, mientras que el 11% es de subbase. La figura 2.15 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa. En todas las estructuras que presentaron subbase fue identificada una cuarta capa correspondiente a la capa subrasante.



Figura 2.15 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor México Nogales consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 14 cm con módulo de elasticidad de 2621 Mpa soportada por una base granular de 20 cm con módulo de elasticidad de 334 Mpa y capa subrasante de 30 cm con un módulo de elasticidad de 69 Mpa. Las figuras 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19 muestran estos datos de manera gráfica.

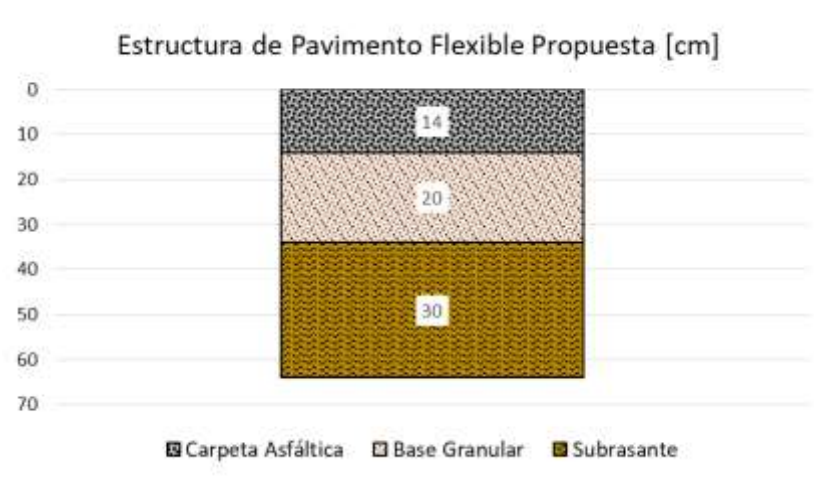


Figura 2.16 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

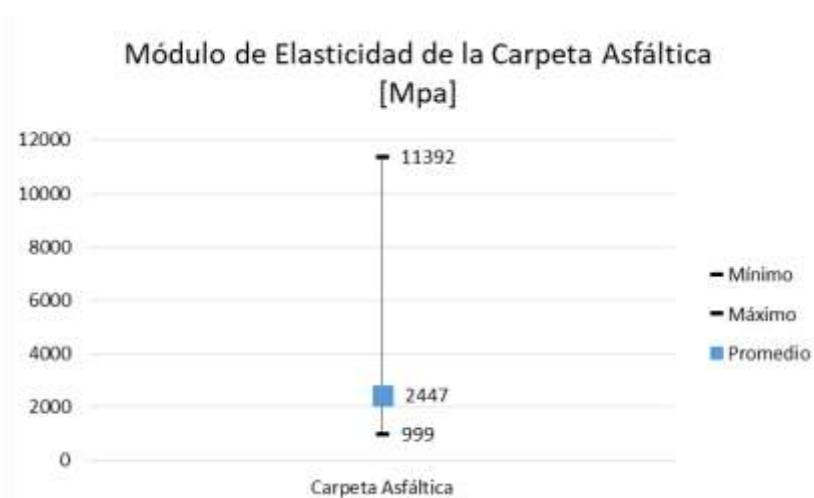


Figura 2.17 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica



Figura 2.18 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

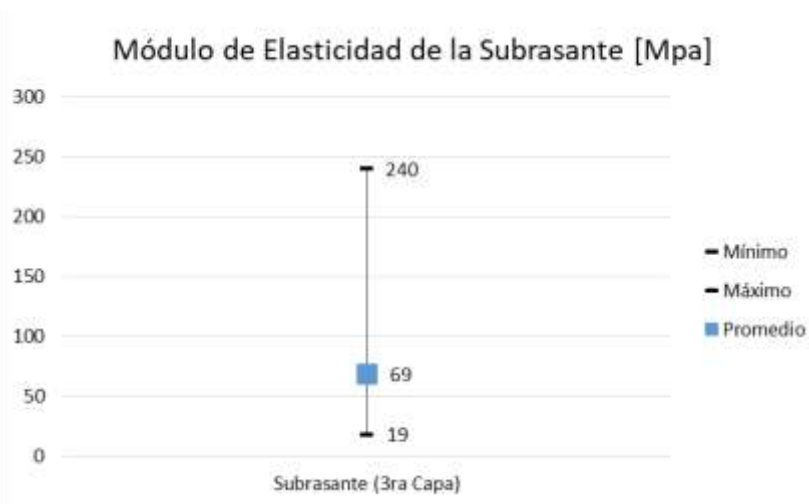


Figura 2.19 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.3.2 Análisis de Tránsito del corredor México Nogales

El análisis del corredor México Nogales muestra que el TDPA promedio es de 13725, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4.07%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.20. Las figuras 2.21 y 2.22 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	76.90%	T3-S2	6.40%
B2	3.50%	T3-S3	1.30%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	6.80%	T2-S2-R2	0.00%
C3	2.80%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.80%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.50%

Figura 2.20 Composición Vehicular

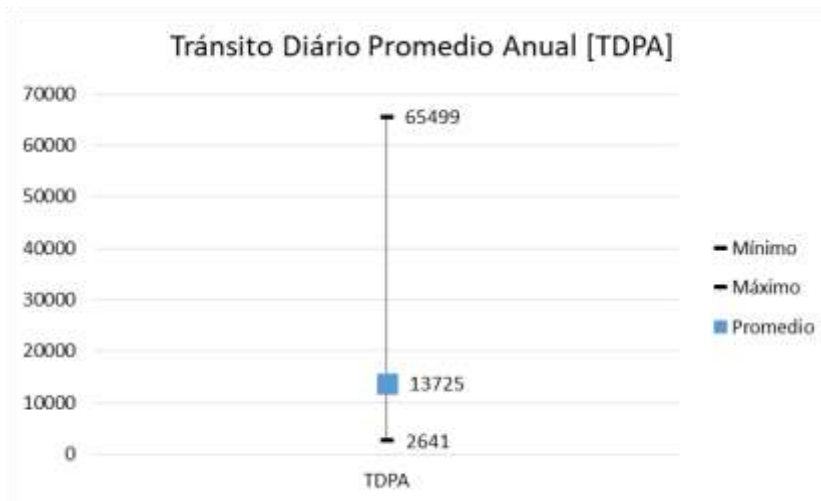


Figura 2.21 Tránsito Diario Promedio Anual

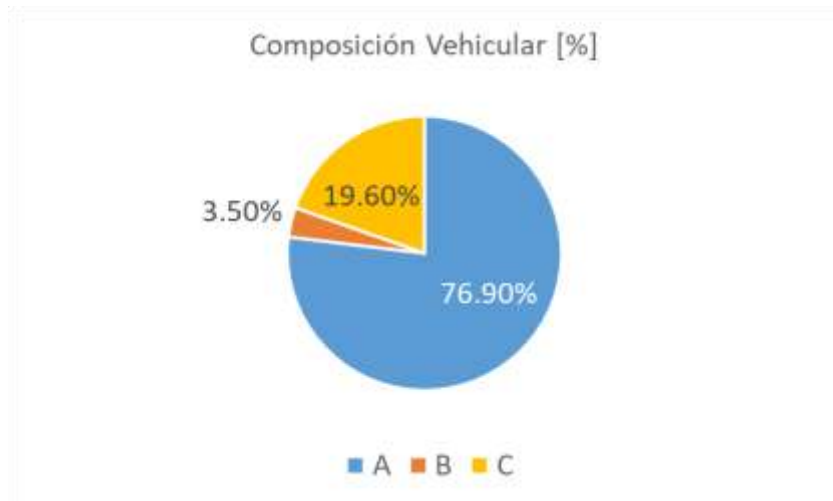


Figura 2.22 Composición Vehicular Simplificada

### 2.3.3 Deflexión del corredor México Nogales

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.23

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.17	0.18	0.89	5%	95%

Figura 2.23 Deflexión Normalizada en mm

## 2.4 Análisis del Corredor México Nuevo Laredo

La muestra del corredor México Nuevo Laredo abarca una longitud total de 1435.972 km y 199 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 66% de ellas son de pavimento flexible y el 34% de pavimento rígido. La figura 2.24 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.

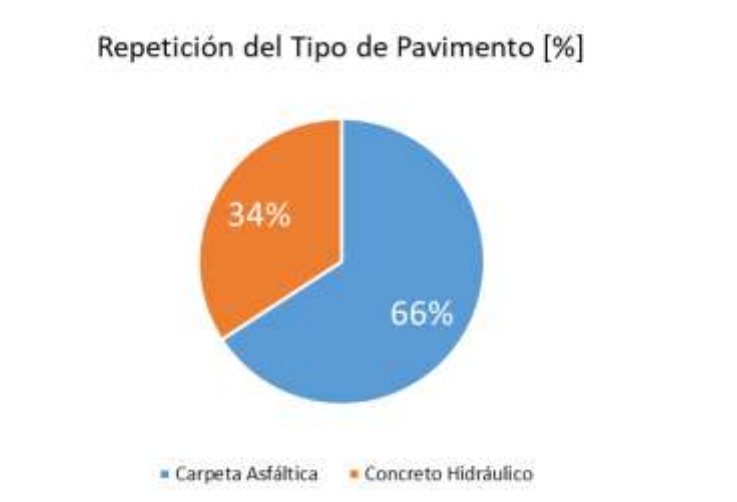


Figura 2.24 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.4.1 Análisis Estructural del corredor México Nuevo Laredo

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base tratada con asfalto y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 70%, seguida de la base asfáltica con 8% y finalmente la base con cemento el 21% del total. La figura 2.25 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica [%]

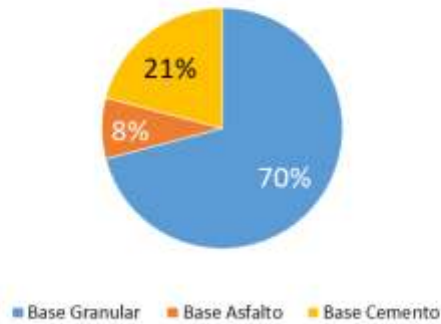


Figura 2.25 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales diferentes. El 91% de ellas corresponde a una capa subrasante, mientras que el 9% es de subbase. La figura 2.26 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa. En todas las estructuras que presentaron subbase fue identificada una cuarta capa correspondiente a la capa subrasante.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

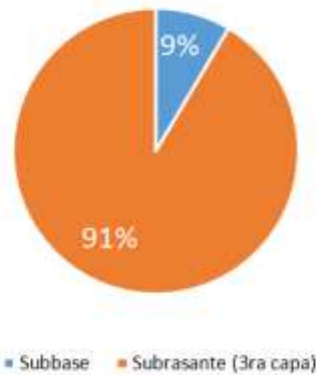


Figura 2.26 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor México Nuevo Laredo consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 18 cm con módulo de elasticidad de 3201 Mpa soportada por una base granular de 23 cm con módulo de elasticidad de 480 Mpa y capa subrasante de 27 cm con un módulo de elasticidad de 91 Mpa. Las figuras 2.27, 2.28, 2.29 y 2.30 muestran estos datos de manera gráfica.

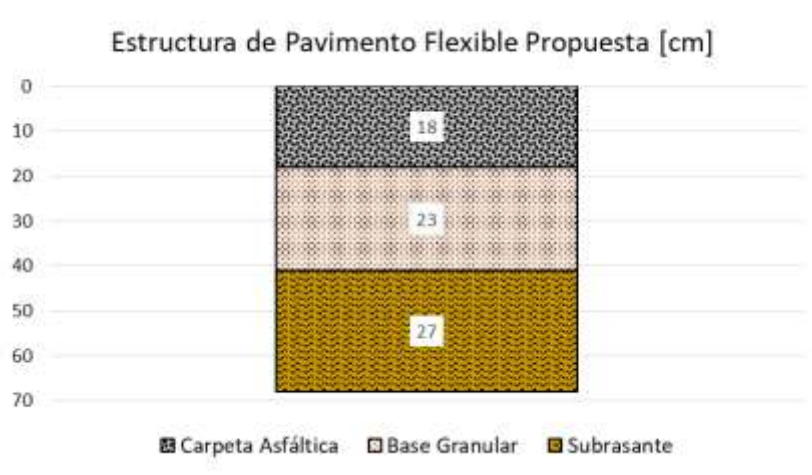


Figura 2.27 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

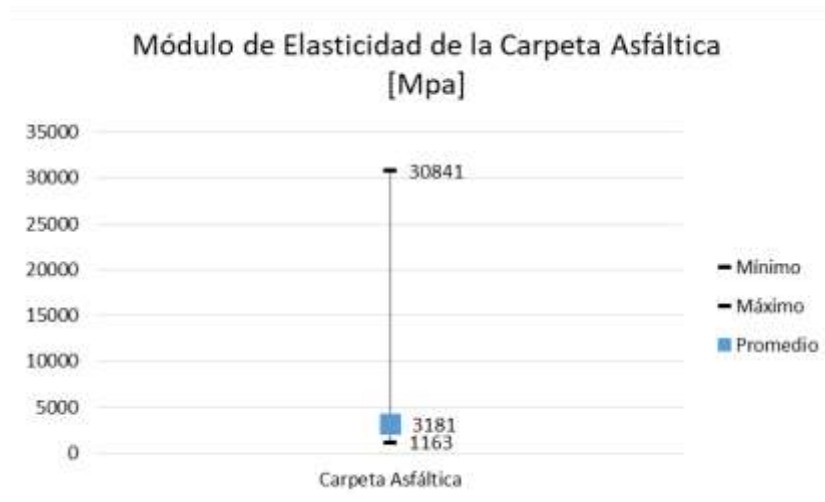


Figura 2.28 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

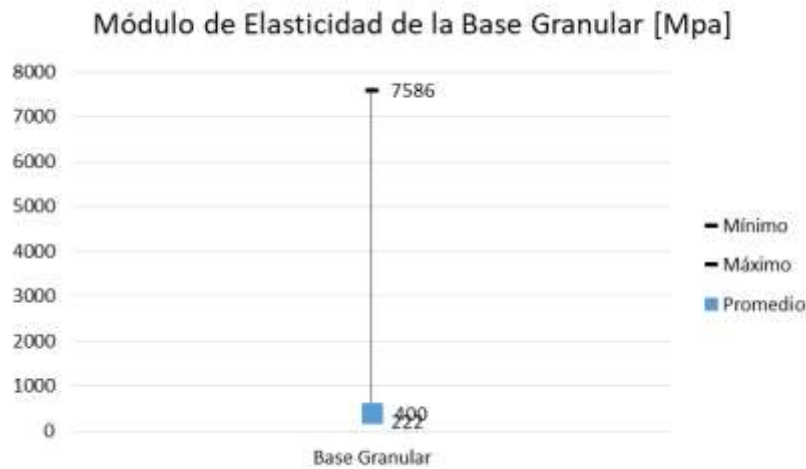


Figura 2.29 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

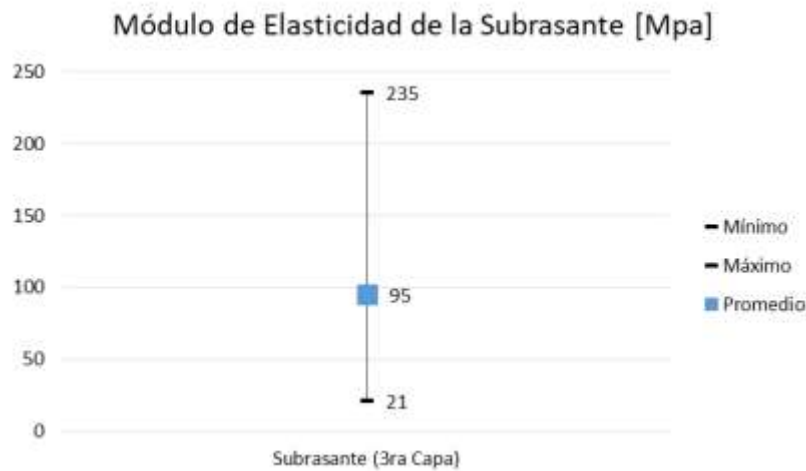


Figura 2.30 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

#### 2.4.2 Análisis de Tránsito del corredor México Nuevo Laredo

El análisis del corredor México Nuevo Laredo muestra que el TDPA promedio es de 15509, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4.07%. La distribución vehicular se compone

como lo muestra la figura 2.31. Las figuras 2.32 y 2.32 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	45.20%	T3-S2	30.30%
B2	4.30%	T3-S3	2.30%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	7.50%	T2-S2-R2	0.00%
C3	2.70%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	7.30%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.40%

Figura 2.31 Composición Vehicular



Figura 2.32 Transito Diario Promedio Anual

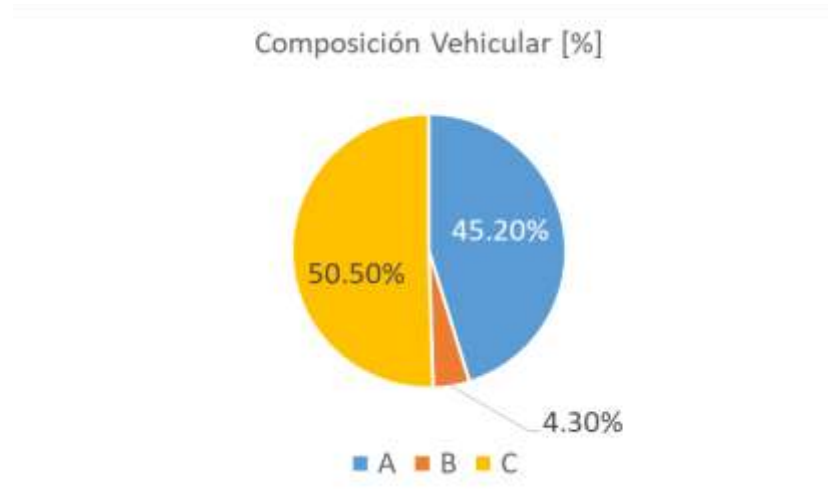


Figura 2.33 Composición Vehicular Simplificada

### 2.4.3 Deflexión del corredor México Nuevo Laredo

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.34.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.47	0.02	0.28	95%	5%

Figura 2.34 Deflexión Normalizada en mm

## 2.5 Análisis del Corredor Querétaro Cd. Juárez

La muestra del corredor Querétaro Cd. Juárez abarca una longitud total de 1245.805 km y 174 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 99% de ellas son de pavimento flexible y el 1% de pavimento rígido. La figura 2.35 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.35 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.5.1 Análisis Estructural del corredor Querétaro Cd. Juárez

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base tratada con asfalto y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 96%, seguida de la base asfáltica con 1% y finalmente la base con cemento el 3% del total. La figura 2.36 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica [%]

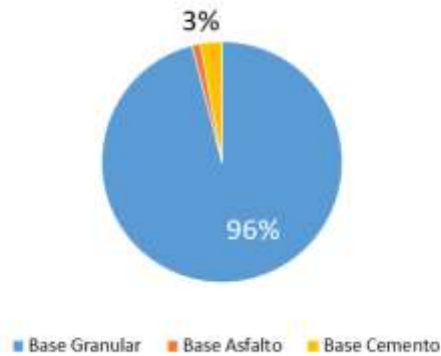


Figura 2.36 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectó un solo tipo de material, correspondiente a una capa subrasante, tal como lo muestra la figura 2.37.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

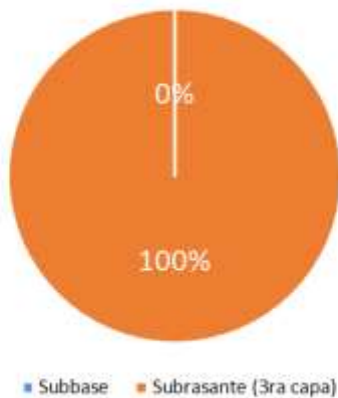


Figura 2.37 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Querétaro Cd. Juárez consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 16 cm con módulo de elasticidad de 2856 Mpa soportada por una base granular de 22 cm con módulo

de elasticidad de 349 Mpa y capa subrasante de 29 cm con un módulo de elasticidad de 68 Mpa. Las figuras 2.38, 2.39, 2.40 y 2.41 muestran estos datos de manera gráfica.

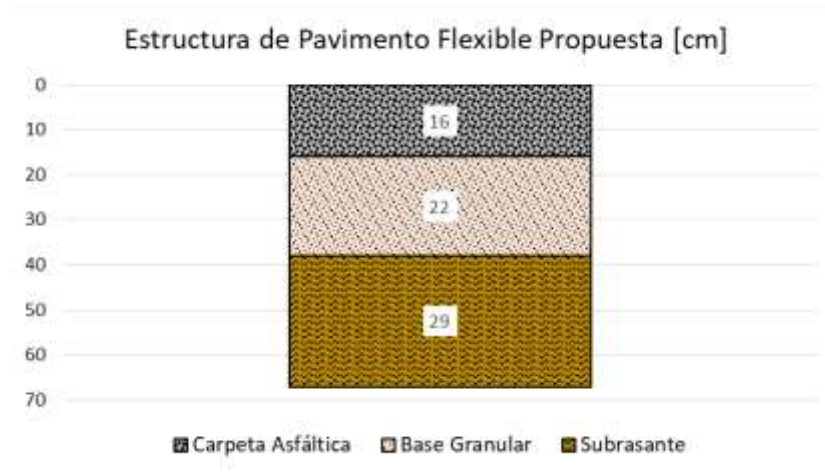


Figura 2.38 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

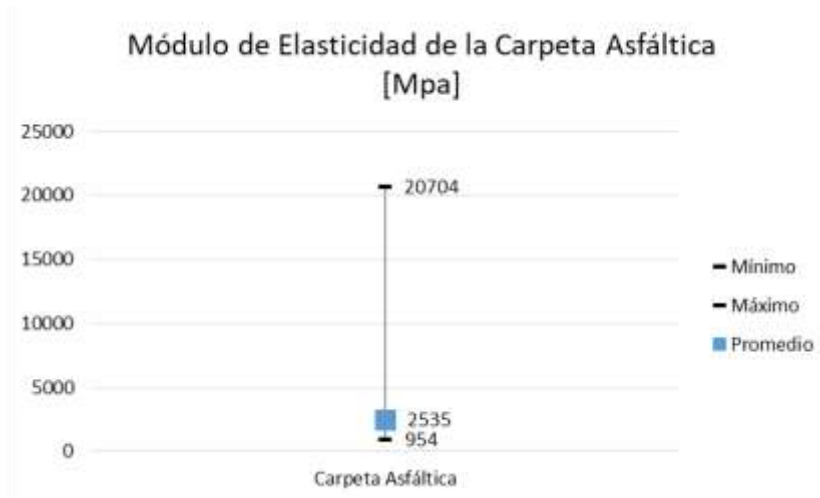


Figura 2.39 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

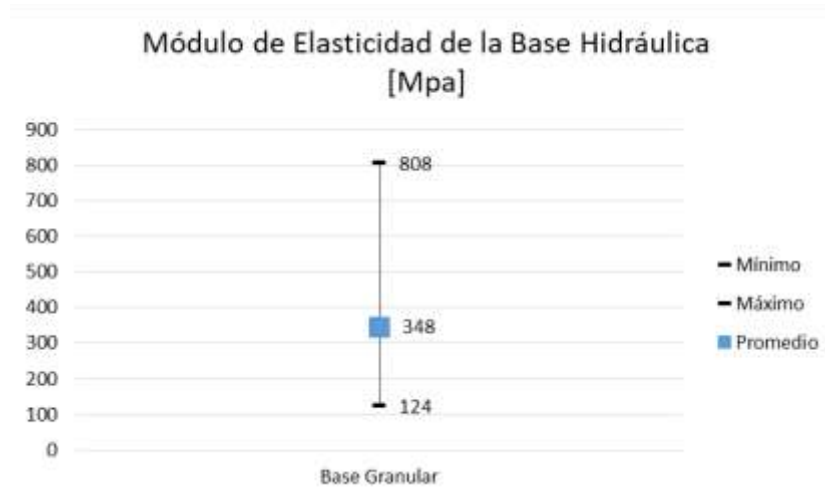


Figura 2.40 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

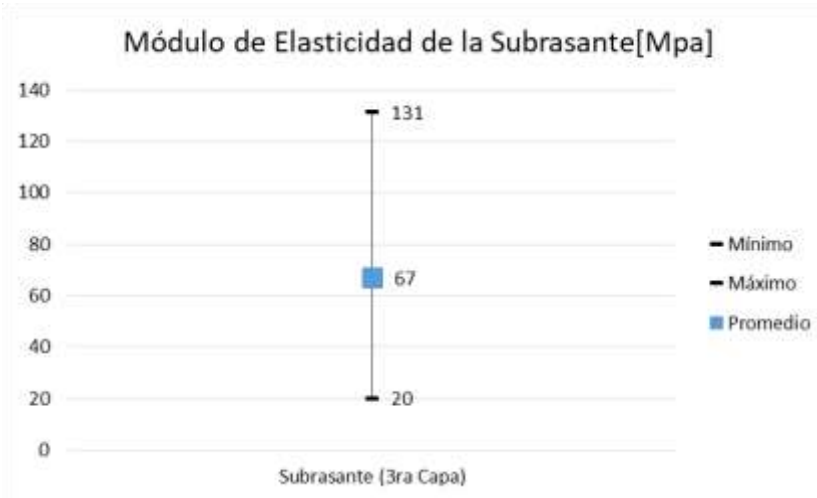


Figura 2.41 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.5.2 Análisis de Tránsito del corredor Querétaro Cd. Juárez

El análisis del corredor Querétaro Cd. Juárez muestra que el TDPA promedio es de 14386, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4.30%. La distribución vehicular se compone

como lo muestra la figura 2.42. Las figuras 2.43 y 2.44 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	75.90%	T3-S2	5.70%
B2	3.30%	T3-S3	1.80%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	8.90%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.80%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	2.20%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.40%

Figura 2.42 Composición Vehicular

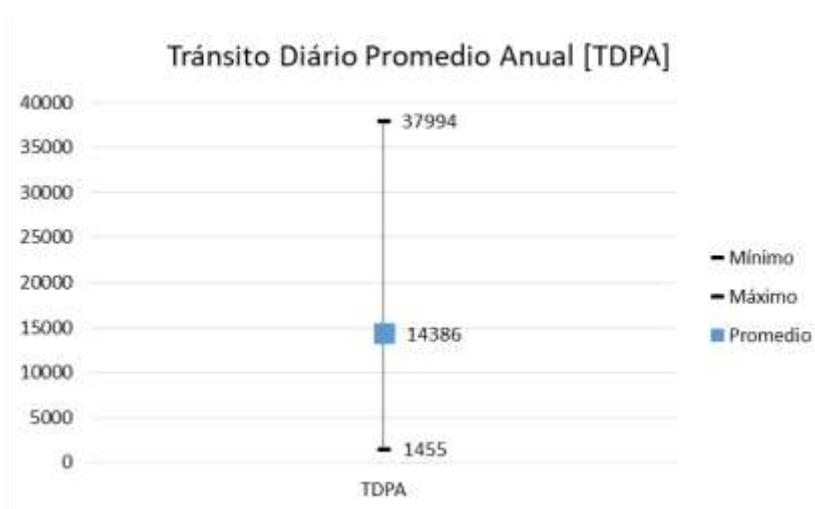


Figura 2.43 Transito Diario Promedio Anual

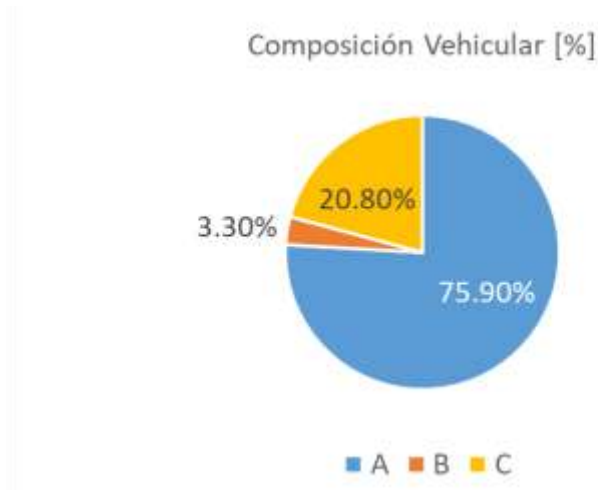


Figura 2.44 Composición Vehicular Simplificada

### 2.5.3 Deflexión del corredor Querétaro Cd. Juárez

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.45.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.54	0.09	0.29	96%	4%

Figura 2.45 Deflexión Normalizada en mm

## 2.6 *Análisis del Corredor Veracruz Monterrey*

La muestra del corredor Veracruz Monterrey abarca una longitud total de 1479.547 km y 286 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 100% de ellas son de pavimento flexible y el 0% de pavimento rígido. La figura 2.46 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.46 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.6.1 *Análisis Estructural del Corredor Veracruz Monterrey*

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron dos tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 88%, seguida de la base con cemento el 12% del total. La figura 2.47 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica [%]

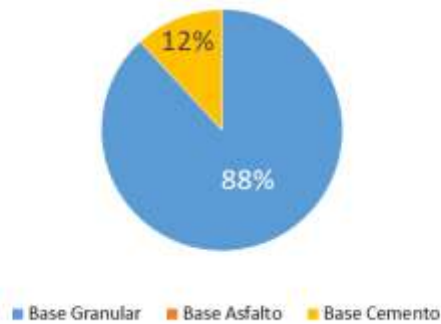


Figura 2.47 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales diferentes. El 85% de ellas corresponde a una capa subrasante, mientras que el 15% es de subbase. La figura 2.48 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa. En todas las estructuras que presentaron subbase fue identificada una cuarta capa correspondiente a la capa subrasante.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

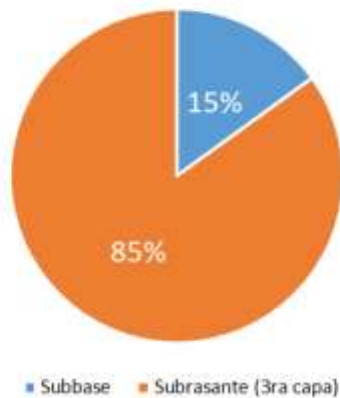


Figura 2.48 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Veracruz Monterrey consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 16 cm con módulo de elasticidad de 2461 Mpa soportada por una base granular de 24 cm con módulo de elasticidad de 401 Mpa y capa subrasante de 30 cm con un módulo de elasticidad de 83 Mpa. Las figuras 2.49, 2.50, 2.51 y 2.52 muestran estos datos de manera gráfica.

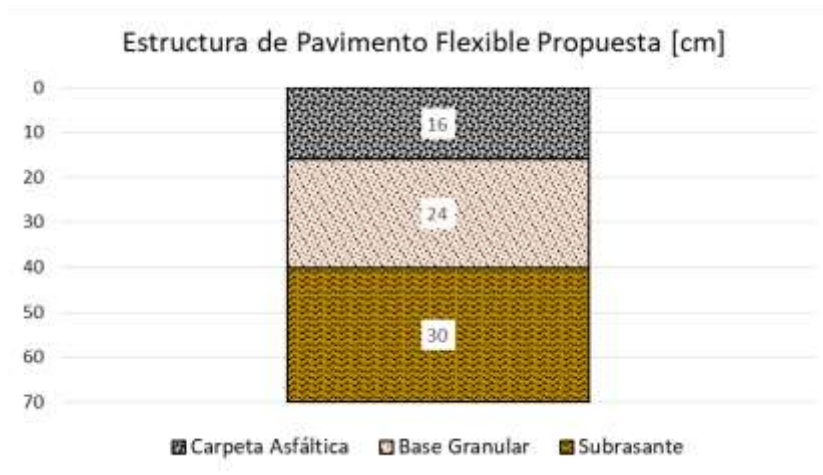


Figura 2.49 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

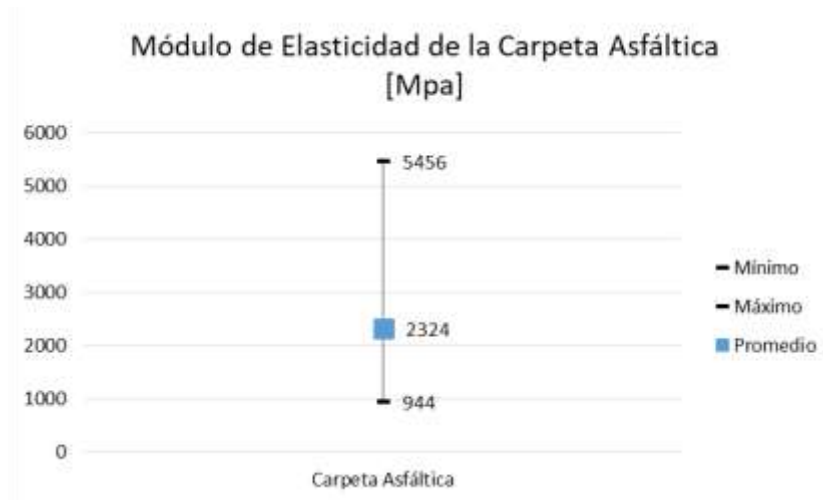


Figura 2.50 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

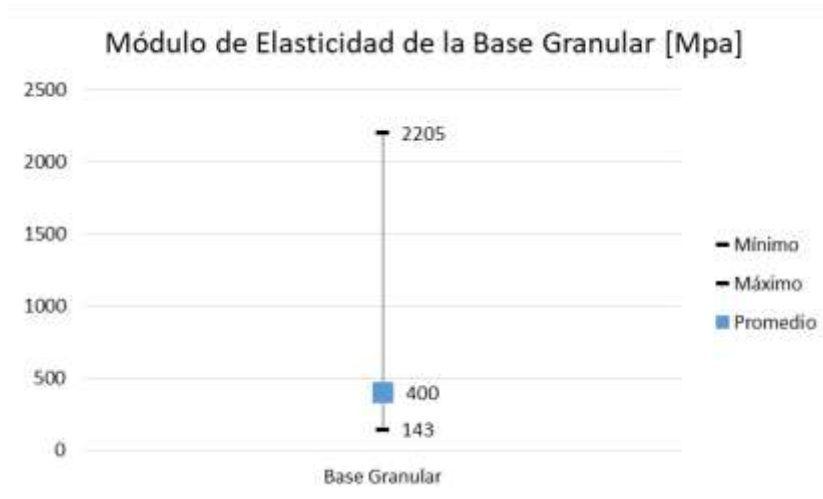


Figura 2.51 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

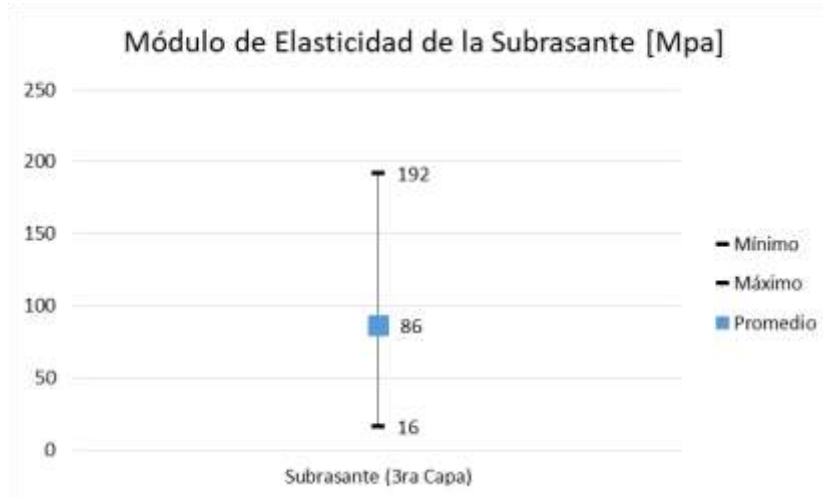


Figura 2.52 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.6.2 Análisis de Tránsito del corredor Veracruz Monterrey

El análisis del corredor Veracruz Monterrey muestra que el TDPA promedio es de 8034, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4.30%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.53. Las figuras 2.54 y 2.55 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	67.60%	T3-S2	9.10%
B2	4.00%	T3-S3	2.80%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	8.60%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.00%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	5.60%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	1.30%

Figura 2.53 Composición Vehicular

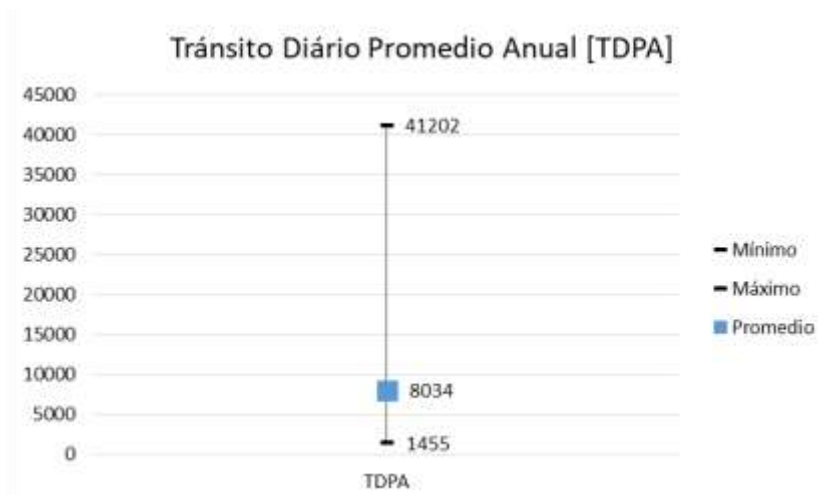


Figura 2.54 Transito Diario Promedio Anual

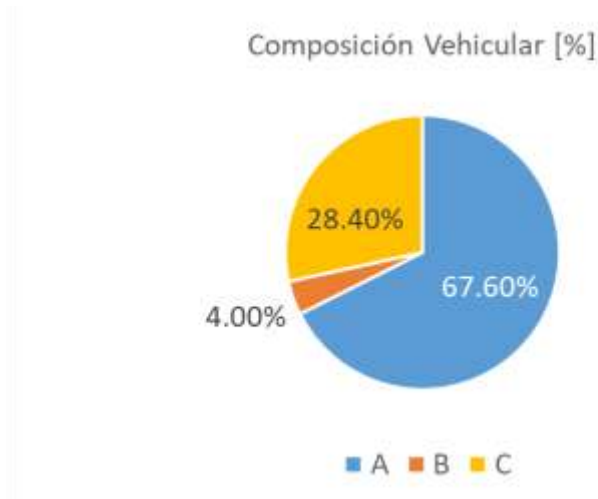


Figura 2.55 Composición Vehicular

### 2.6.3 Deflexión del corredor Veracruz Monterrey

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.56.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.86	0.16	0.62	32%	68%

Figura 2.56 Deflexión Normalizada en mm

## 2.7 Análisis del Corredor México Puebla Progreso

La muestra del corredor México Puebla Progreso abarca una longitud total de 1148.291 km y 139 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 100% de ellas son de pavimento flexible y el 0% de pavimento rígido. La figura 2.57 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.57 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.7.1 Análisis Estructural del corredor México Puebla Progreso

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 76%, base asfáltica con 8%, seguida de la base con cemento el 16% del total. La figura 2.58 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

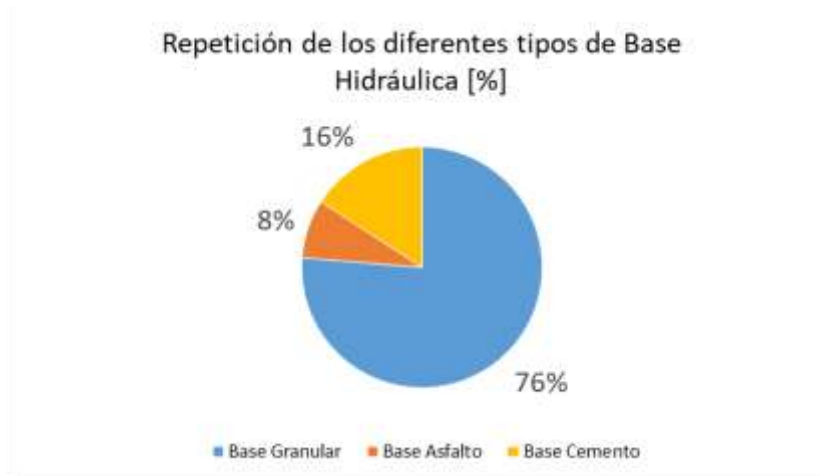


Figura 2.58 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales diferentes. El 83% de ellas corresponde a una capa subrasante, mientras que el 17% es de subbase. La figura 2.59 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa. En todas las estructuras que presentaron subbase fue identificada una cuarta capa correspondiente a la capa subrasante.



Figura 2.59 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor México Puebla Progreso consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 12 cm con módulo de elasticidad de 2661 Mpa soportada por una base granular de 20 cm con módulo de elasticidad de 415 Mpa y capa subrasante de 28 cm con un módulo de elasticidad de 78 Mpa. Las figuras 2.60, 2.61, 2.62 y 2.63 muestran estos datos de manera gráfica.

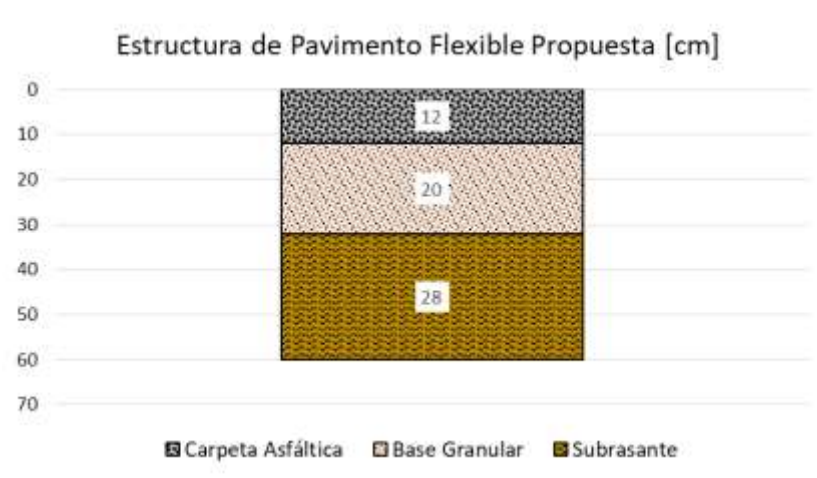


Figura 2.60 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

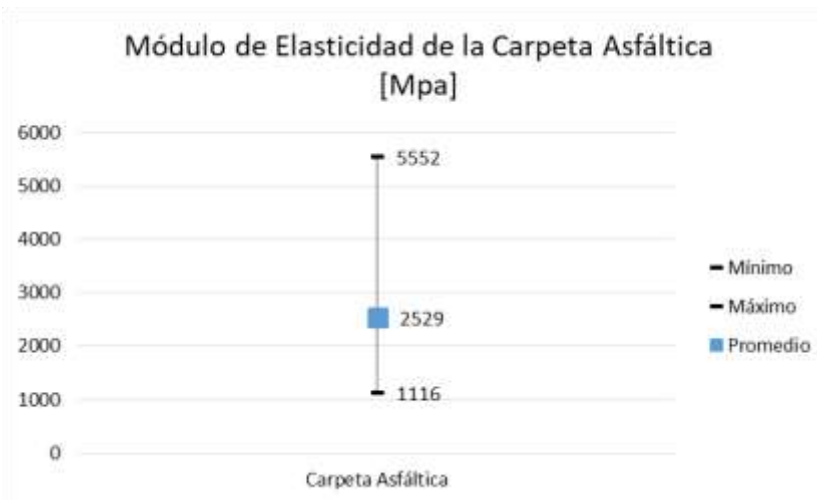


Figura 2.61 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

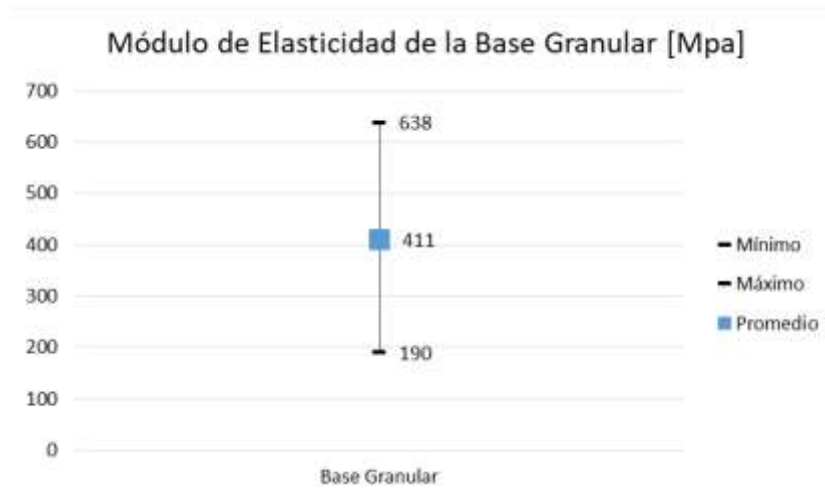


Figura 2.62 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

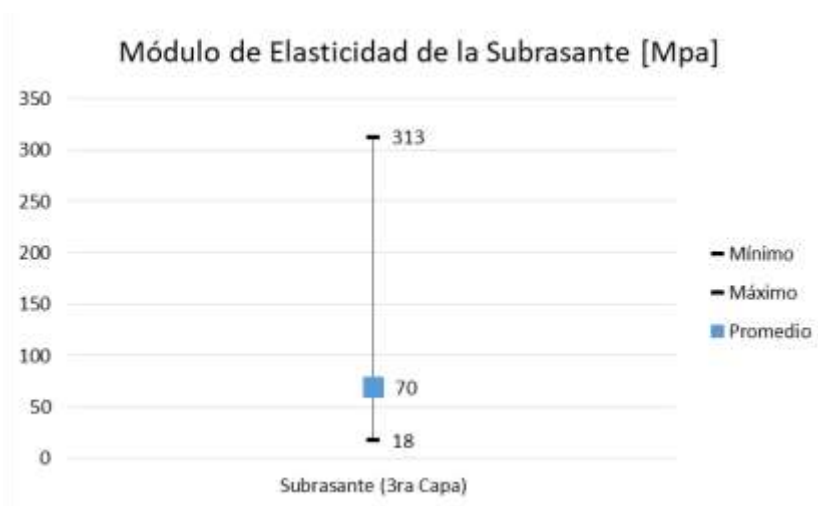


Figura 2.63 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.7.2 Análisis de Tránsito del corredor México Puebla Progreso

El análisis del corredor México Puebla Progreso muestra que el TDPA promedio es de 8999, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 0.50, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 2.07%. La distribución vehicular se compone

como lo muestra la figura 2.64. Las figuras 2.65 y 2.66 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	79.80%	T3-S2	4.80%
B2	4.80%	T3-S3	1.00%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	6.70%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.60%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	0.80%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.50%

Figura 2.64 Composición Vehicular

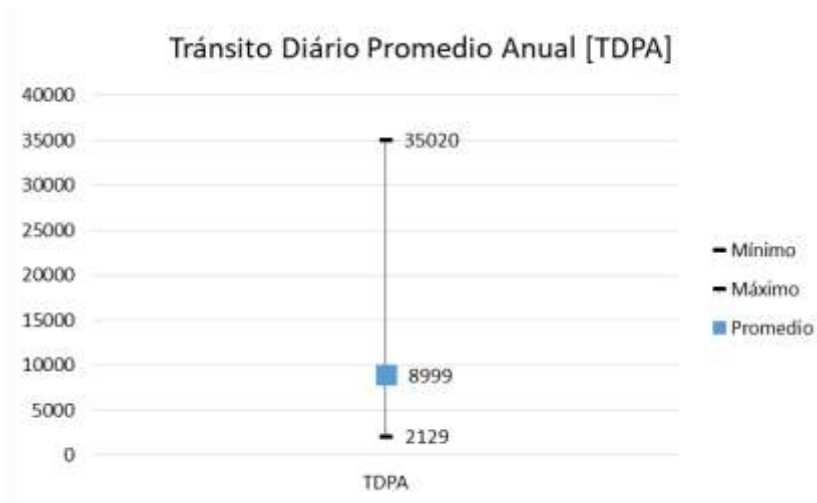


Figura 2.65 Transito Diario Promedio Anual

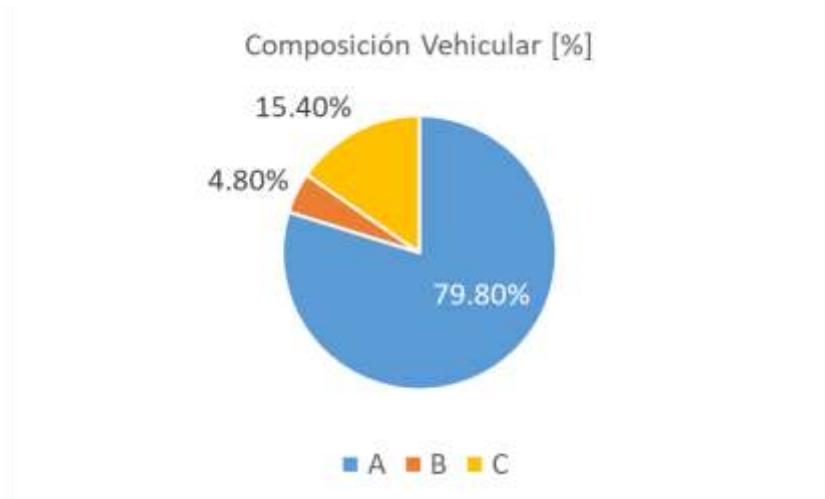


Figura 2.66 Composición Vehicular Simplificada

### 2.7.3 Deflexión del corredor México Puebla Progreso

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.67.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.64	0.10	0.61	66%	34%

Figura 2.67 Deflexión Normalizada en mm

## 2.8 Análisis del Corredor Mazatlán Matamoros

La muestra del corredor Mazatlán Matamoros abarca una longitud total de 218.5 km y 89 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 99% de ellas son de pavimento flexible y el 1% de pavimento rígido. La figura 2.68 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.68 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.8.1 Análisis Estructural del corredor Mazatlán Matamoros

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron dos tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 72% seguida de la base con cemento el 28% del total. La figura 2.69 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

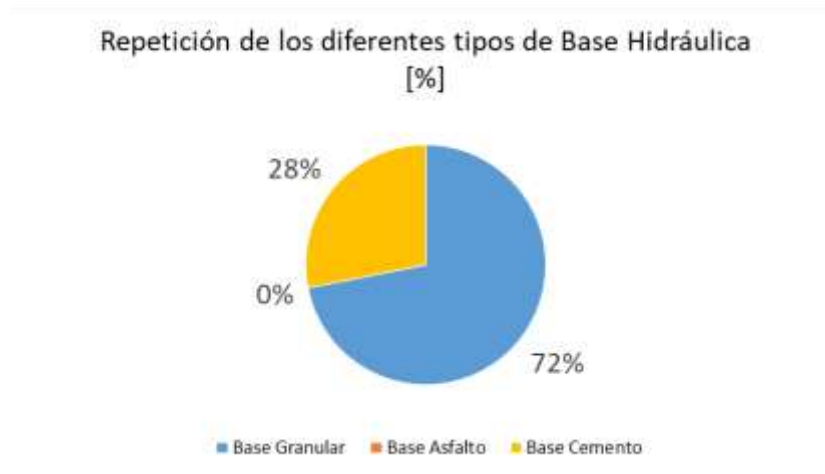


Figura 2.69 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectó un solo tipo de material, correspondiente a una subrasante. La figura 2.70 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.70 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Mazatlán Matamoros consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 15 cm con módulo de elasticidad de 2630 Mpa soportada por una base granular de 22 cm con módulo de elasticidad de 404 Mpa y capa subrasante de 31 cm con un módulo de elasticidad de 87 Mpa. Las figuras 2.71, 2.72, 2.73 y 2.74 muestran estos datos de manera gráfica.

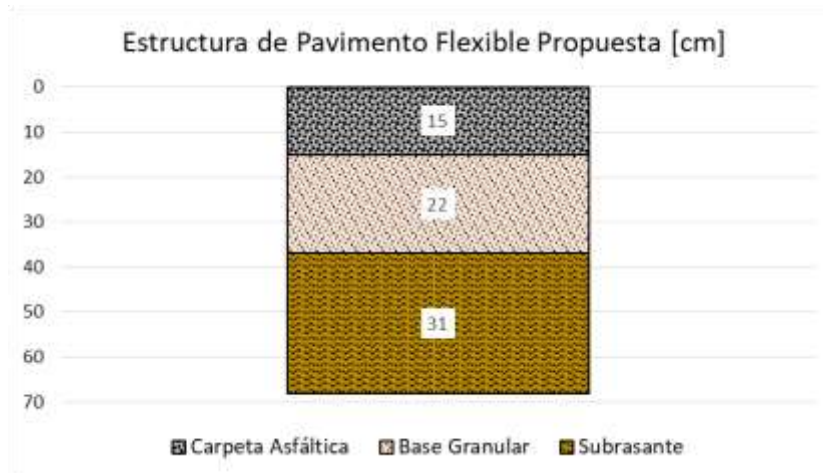


Figura 2.71 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

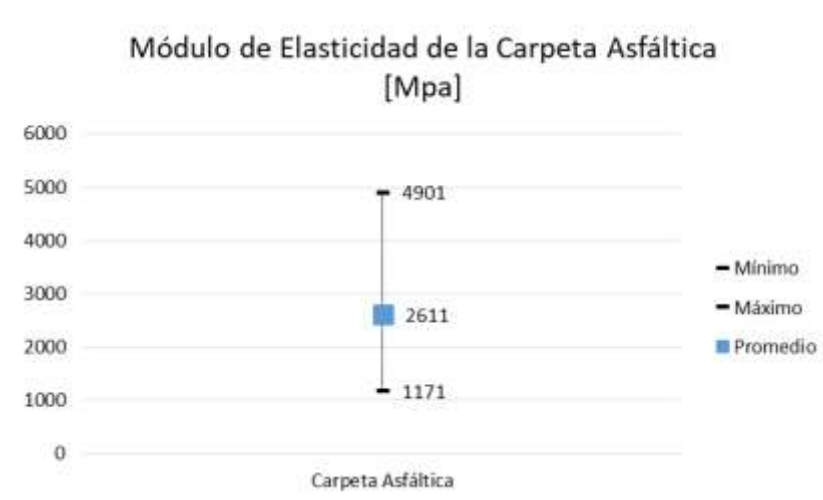


Figura 2.72 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

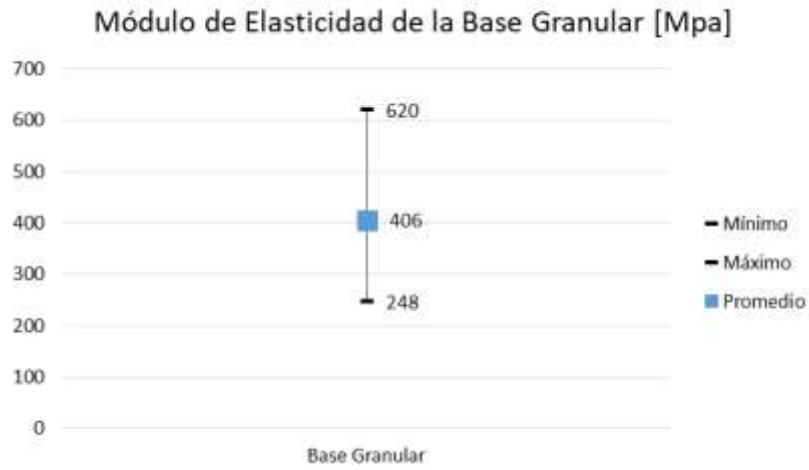


Figura 2.73 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

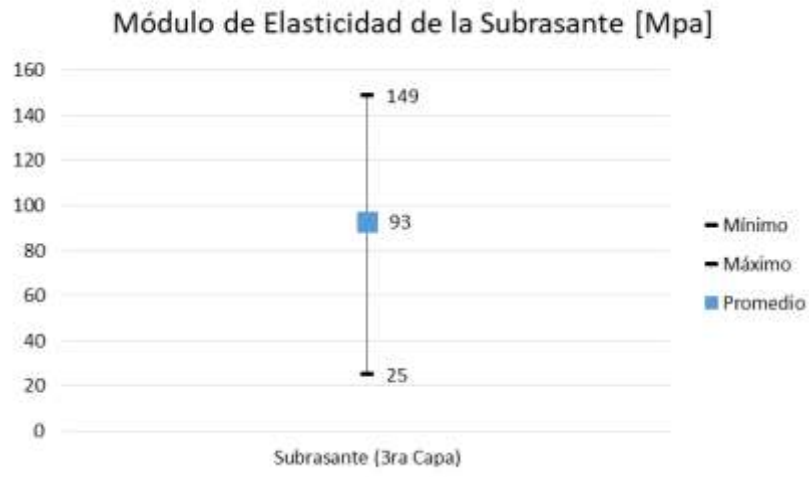


Figura 2.74 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.8.2 Análisis de Tránsito del corredor Mazatlán Matamoros

El análisis del corredor Mazatlán Matamoros muestra que el TDPA promedio es de 9307, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 3.75%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.75. Las figuras 2.76 y 2.77 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	28.60%	T3-S2	41.20%
B2	5.40%	T3-S3	5.10%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	8.80%	T2-S2-R2	0.00%
C3	2.40%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	6.70%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	1.80%

Figura 2.75 Composición Vehicular

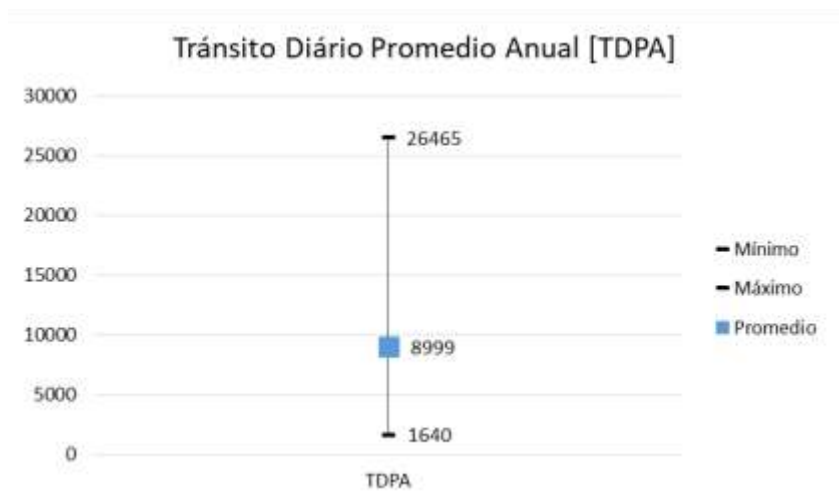


Figura 2.76 Transito Diario Promedio Anual

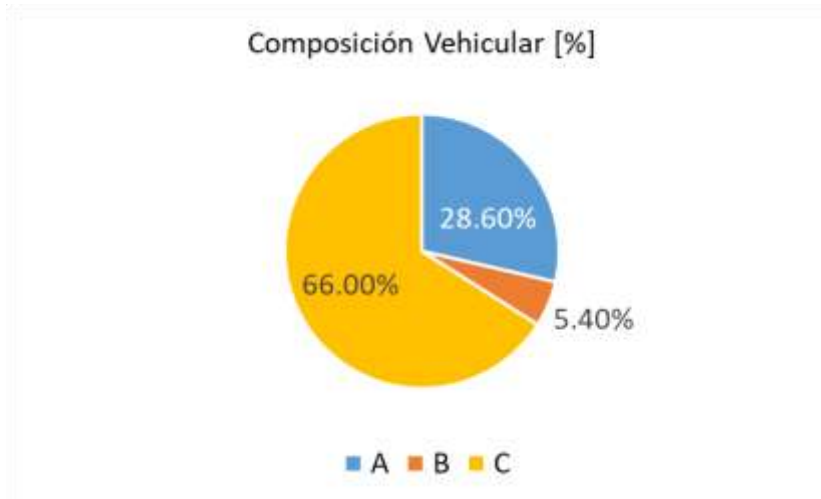


Figura 2.77 Composición Vehicular Simplificada

### 2.8.3 Deflexión del corredor Mazatlán Matamoros

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.78.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.45	0.09	0.24	97%	3%

Figura 2.78 Deflexión Normalizada en mm

## 2.9 Análisis del Corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo

La muestra del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo abarca una longitud total de 643.768 km y 98 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 97% de ellas son de pavimento flexible y el 3% de pavimento rígido. La figura 2.79 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.79 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.9.1 Análisis Estructural del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base asfáltica la más repetida con el 79% seguida de la base granular con el 19% y por último la base tratada con cemento con el 2% del total. La figura 2.80 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.



Figura 2.80 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales, correspondientes a una sub base y una subrasante, con el 67% y 33% de repetición respectivamente. La figura 2.81 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.81 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de cuatro capas que constan de carpeta asfáltica, base asfáltica, subbase y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo consta de cuatro capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 14 cm con módulo de elasticidad de 2446 Mpa soportada por una base asfáltica de 16 cm con módulo de elasticidad de 1313 Mpa, una subbase de 20 cm y 223 Mpa y capa subrasante de 31 cm con un módulo de elasticidad de 87 Mpa. Las figuras 2.82, 2.83, 2.84, 2.85 y 2.86 muestran estos datos de manera gráfica.

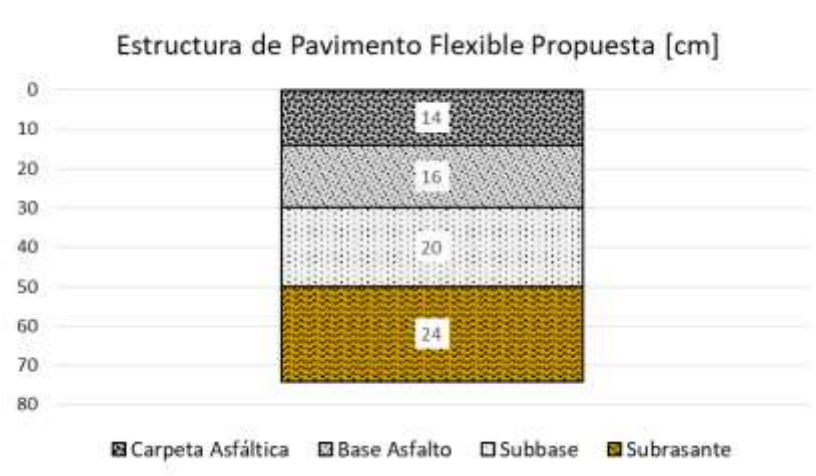


Figura 2.82 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

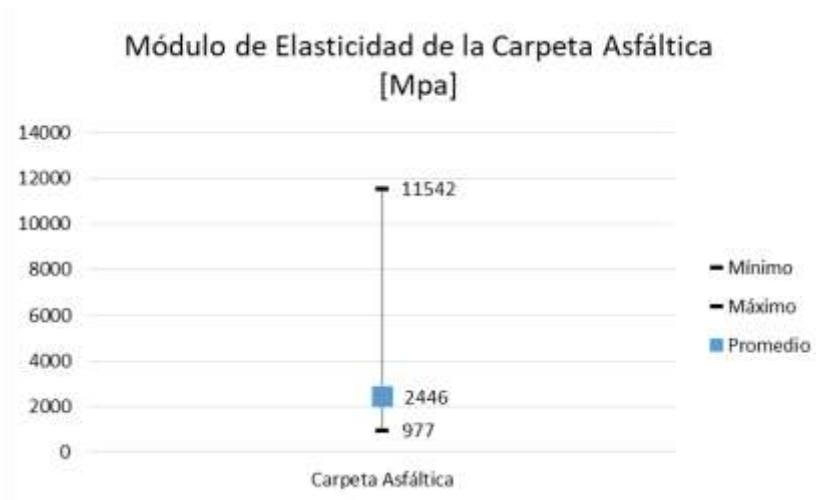


Figura 2.83 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

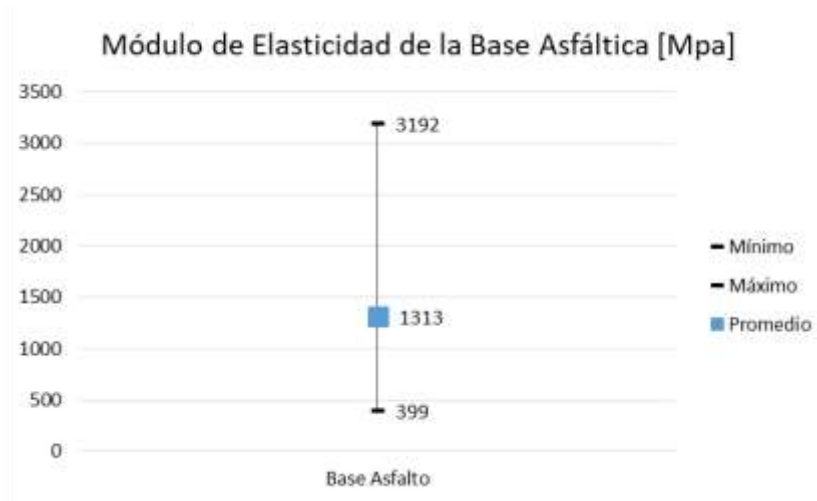


Figura 2.84 Módulo de Elasticidad de la Base Asfáltica

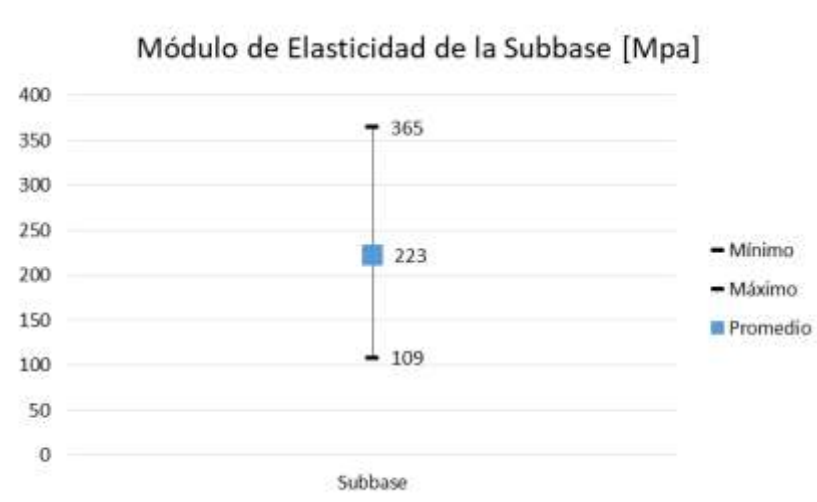


Figura 2.85 Módulo de Elasticidad de la Subbase

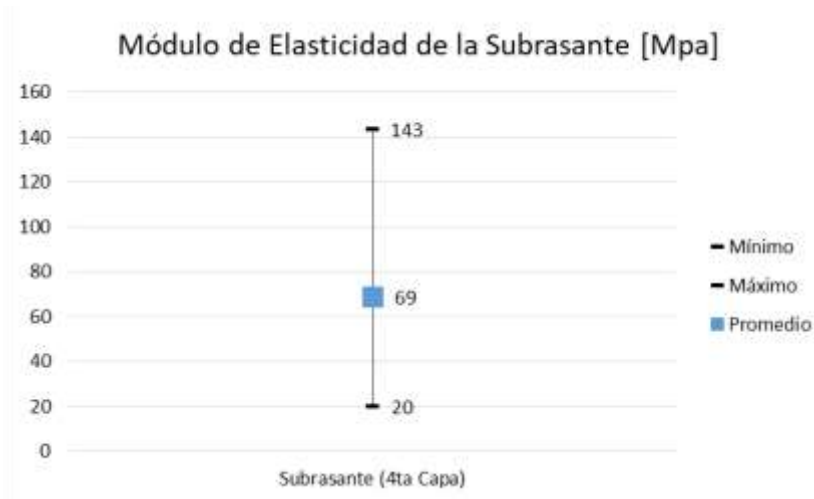


Figura 2.86 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.9.2 Análisis de Tránsito del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo

El análisis del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo muestra que el TDPA promedio es de 6983, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 5.33%. La distribución vehicular se compone como lo muestra la figura 2.87. Las figuras 2.88 y 2.89 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	83.30%	T3-S2	3.80%
B2	1.90%	T3-S3	1.10%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	6.60%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.30%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.60%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.40%

Figura 2.87 Composición Vehicular

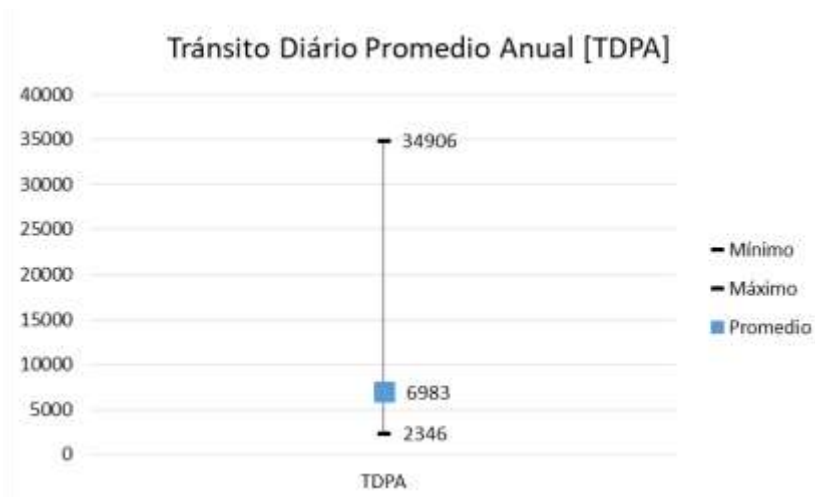


Figura 2.88 Transito Diario Promedio Anual

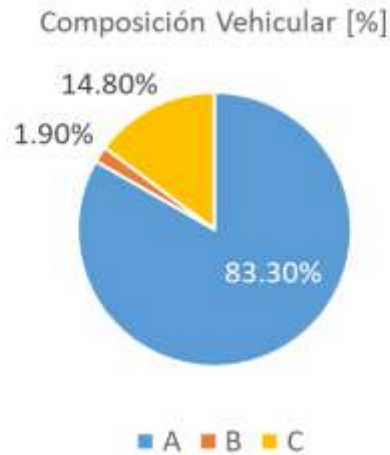


Figura 2.89 Composición Vehicular

### 2.9.3 Deflexión del corredor Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.90.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.71	0.22	0.66	50%	50%

Figura 2.90 Deflexión Normalizada en mm

## 2.10 Análisis del Corredor Manzanillo Tampico

La muestra del corredor Manzanillo Tampico abarca una longitud total de 524.361 km y 66 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 97% de ellas son de pavimento flexible y el 3% de pavimento rígido. La figura 2.91 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.

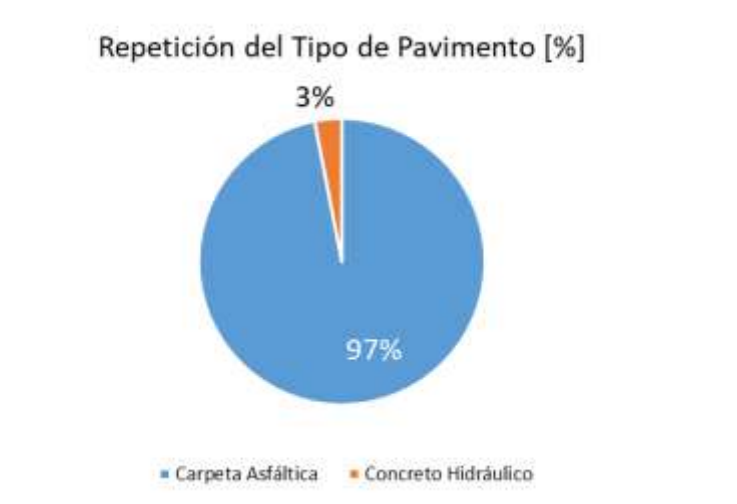


Figura 2.91 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.10.1 Análisis Estructural del corredor Manzanillo Tampico

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 83% seguida de la base cementada con el 11% y por último la base tratada con asfalto el 6% del total. La figura 2.92 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

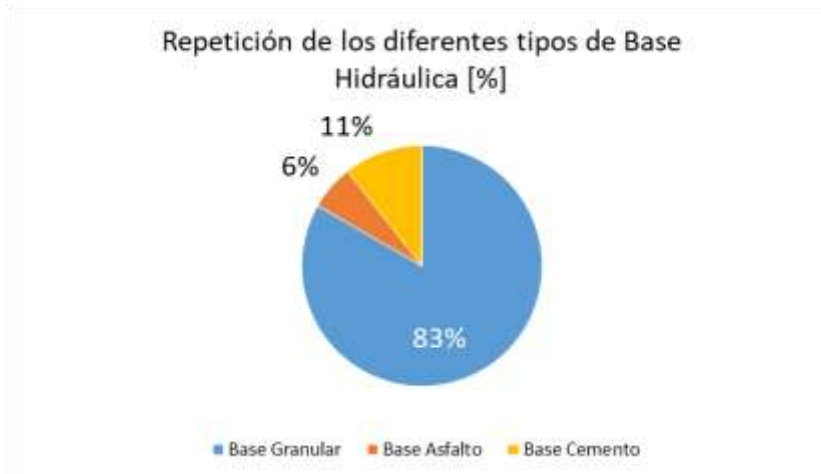


Figura 2.92 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectó un solo tipo de material, correspondiente a una subrasante, con el 100% de repetición. La figura 2.93 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.93 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Manzanillo Tampico consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 16 cm con módulo de

elasticidad de 2711 Mpa soportada por una base granular de 19 cm con módulo de elasticidad de 405 Mpa y capa subrasante de 26 cm con un módulo de elasticidad de 86 Mpa. Las figuras 2.94, 2.95, 2.96 y 2.97 muestran estos datos de manera gráfica.

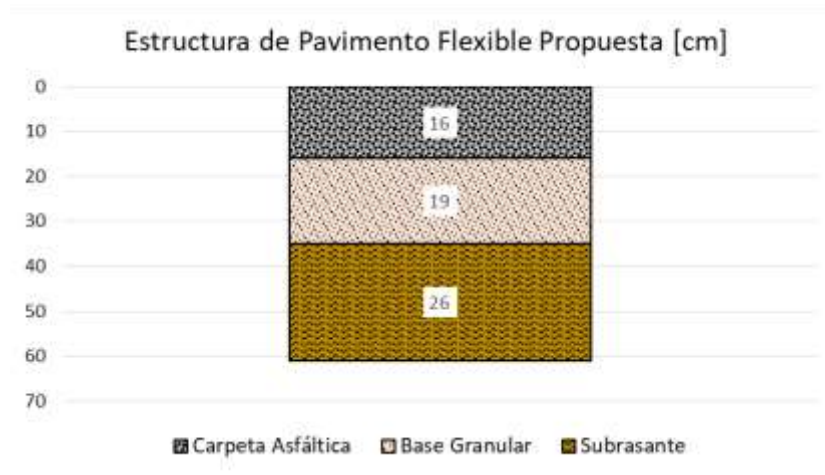


Figura 2.94 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

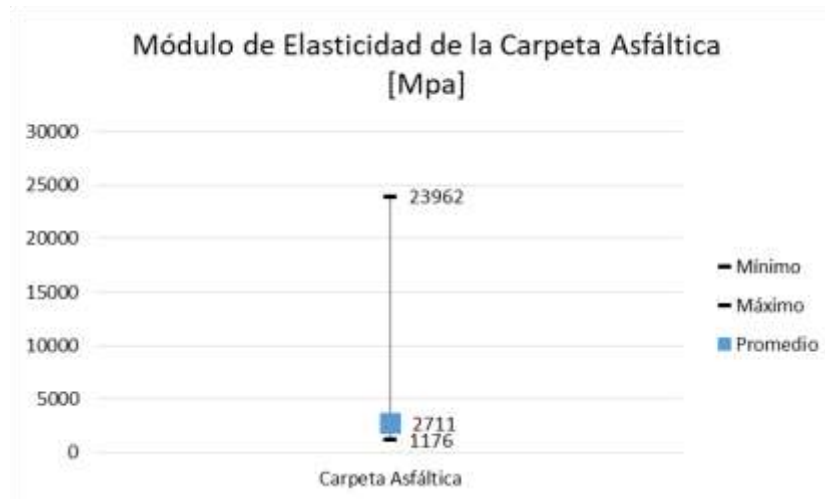


Figura 2.95 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

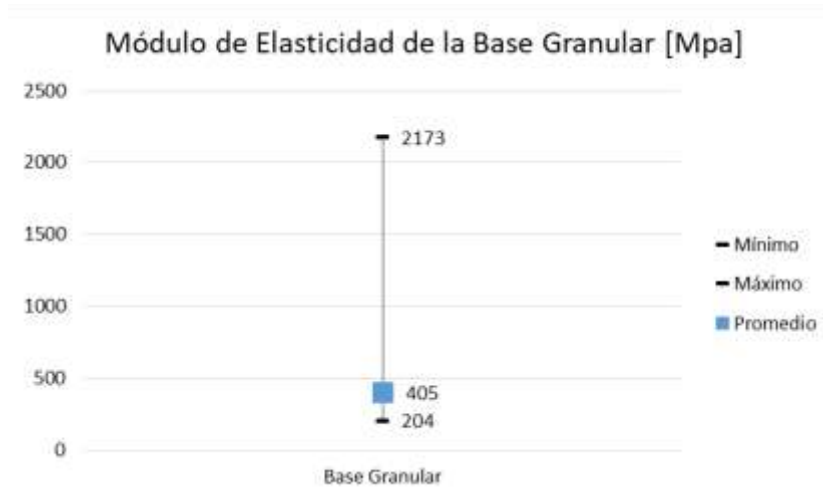


Figura 2.96 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

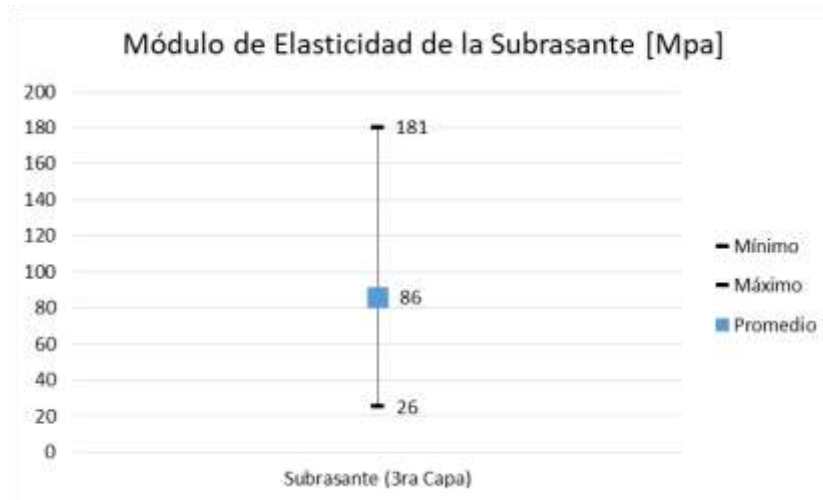


Figura 2.97 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.10.2 Análisis de Tránsito del corredor Manzanillo Tampico

El análisis del corredor Manzanillo Tampico muestra que el TDPA promedio es de 9454, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 6.90%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.98. Las figuras 2.99 y 2.100 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	78.80%	T3-S2	4.00%
B2	2.20%	T3-S3	2.40%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	6.90%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.90%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	3.00%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.80%

Figura 2.98 Composición Vehicular

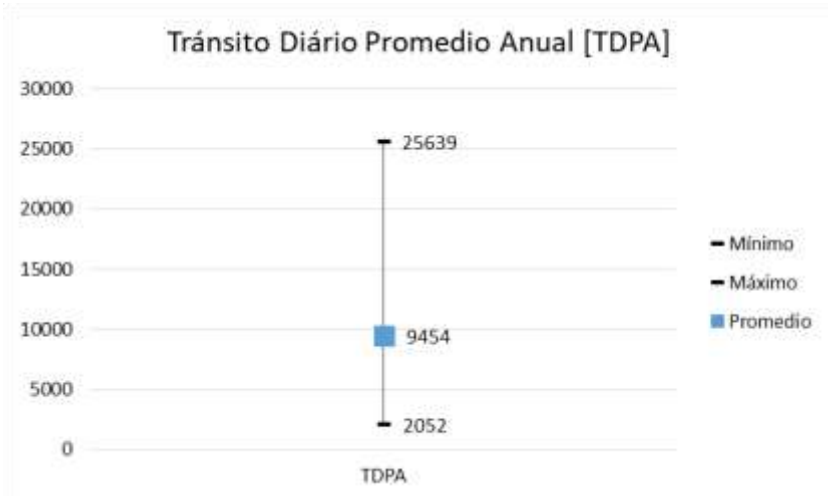


Figura 2.99 Transito Diario Promedio Anual

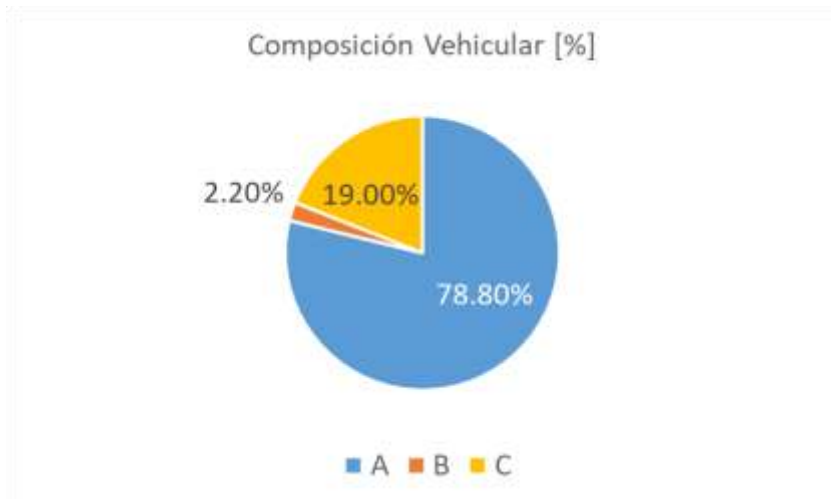


Figura 2.100 Composición Vehicular Simplificada

### 2.10.3 Deflexión del corredor Manzanillo Tampico

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.101.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.92	0.22	0.64	55%	45%

Figura 2.101 Deflexión Normalizada en mm

## 2.11 Análisis del Corredor Circuito Transístmico

La muestra del corredor Circuito Transístmico abarca una longitud total de 170.750 km y 91 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 98% de ellas son de pavimento flexible y el 2% de pavimento rígido. La figura 2.102 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.102 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.11.1 Análisis Estructural del corredor Circuito Transístmico

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base asfáltica la más repetida con el 54%, seguida de la base granular con el 42% y por último la base tratada con cemento el 4% del total. La figura 2.103 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.



Figura 2.103 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales, correspondientes a una subbase y una subrasante, con el 55% y 45% de repetición respectivamente. La figura 2.104 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.104 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de cuatro capas que constan de carpeta asfáltica, base asfáltica, subbase y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Circuito Transístmico consta de cuatro capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 12 cm con módulo de elasticidad de 2752 Mpa, soportada por una base asfáltica de 13 cm con módulo de elasticidad de 1357 Mpa, subbase de 20 cm y 225 Mpa y capa subrasante de 26 cm con un módulo de elasticidad de 68 Mpa. Las figuras 2.105, 2.106, 2.107, 2.108 y 2.109 muestran estos datos de manera gráfica.

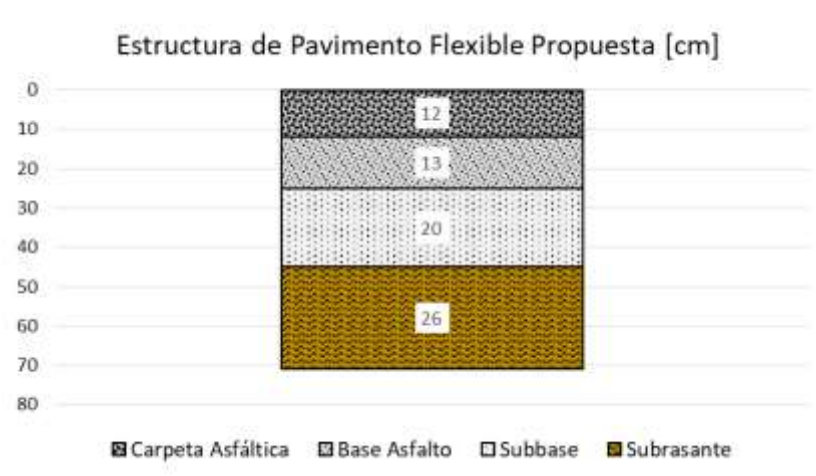


Figura 2.105 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

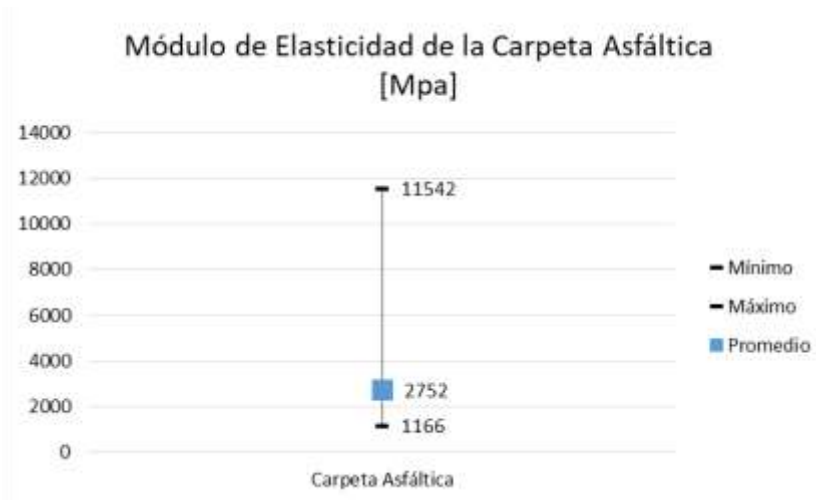


Figura 2.106 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

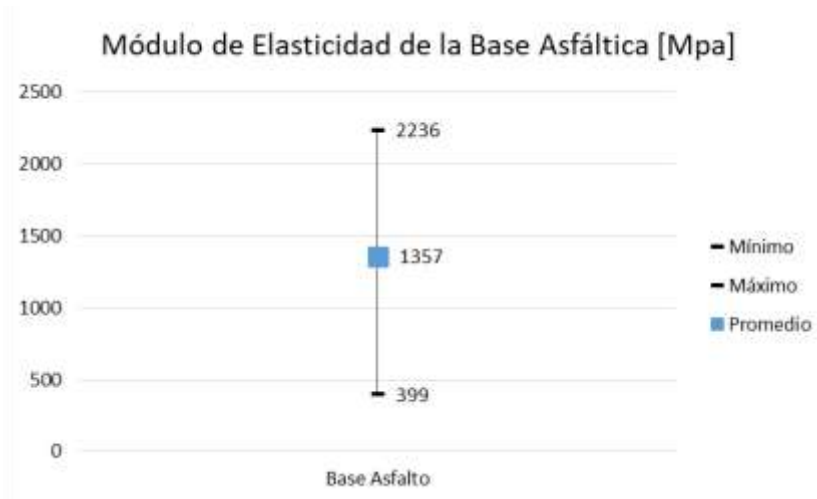


Figura 2.107 Módulo de Elasticidad de la Base Asfáltica

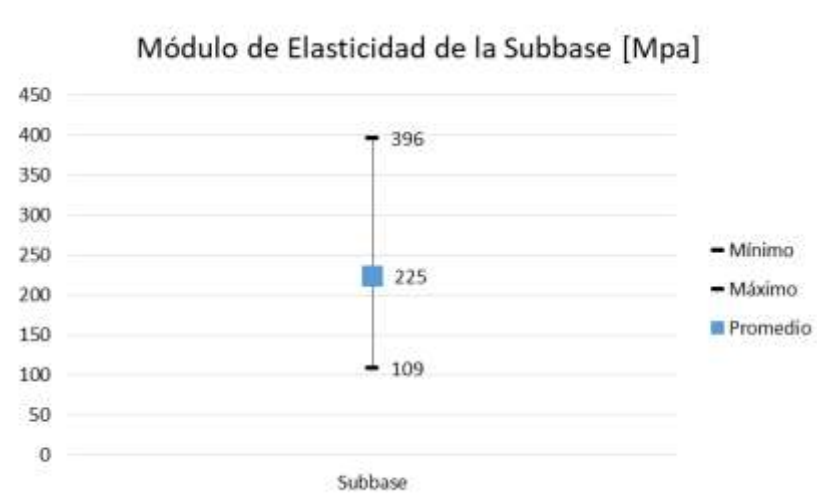


Figura 2.108 Módulo de Elasticidad de la Subbase

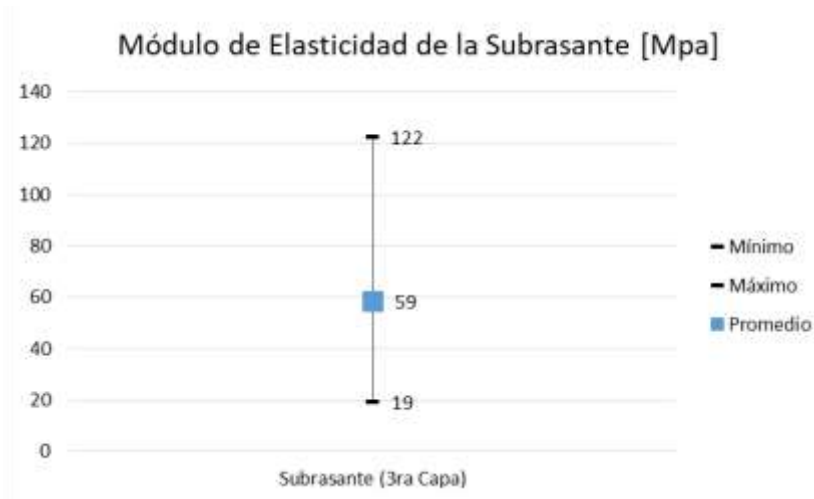


Figura 2.109 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.11.2 Análisis de Tránsito del corredor Circuito Transístmico

El análisis del corredor Circuito Transístmico muestra que el TDPA promedio es de 6099, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 7.41%. La distribución vehicular se compone como lo muestra la figura 2.110. Las figuras 2.111 y 2.112 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	79.10%	T3-S2	3.60%
B2	2.10%	T3-S3	1.40%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	9.20%	T2-S2-R2	0.00%
C3	3.60%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	0.60%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.40%

Figura 2.110 Composición Vehicular

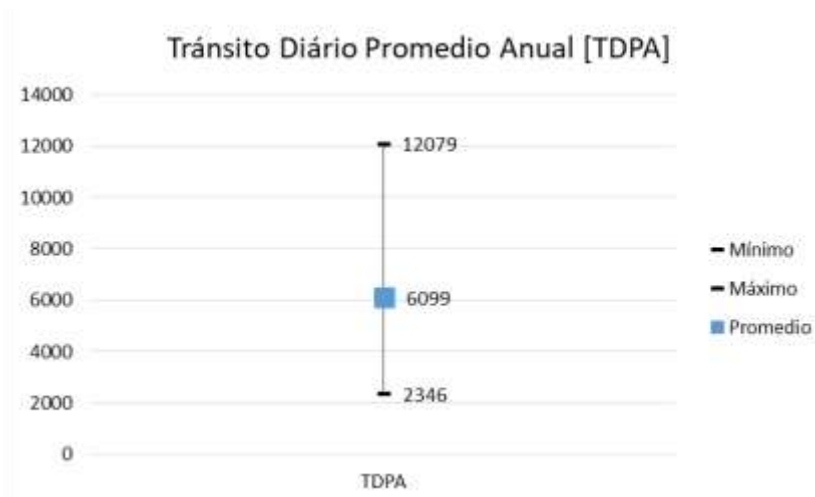


Figura 2.111 Transito Diario Promedio Anual

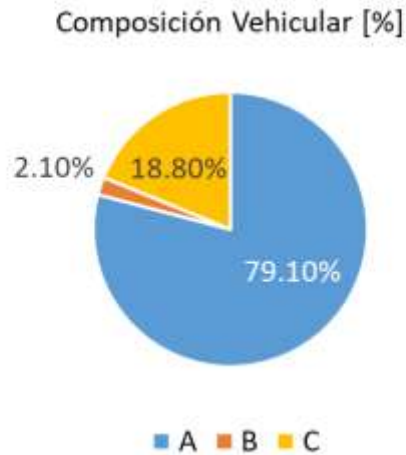


Figura 2.112 Composición Vehicular Simplificada

### 2.11.3 Deflexión del corredor Circuito Transístmico

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.123.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.62	0.05	0.86	36%	64%

Figura 2.113 Deflexión Normalizada en mm

## 2.12 *Análisis del Corredor Acapulco Tuxpan*

La muestra del corredor Acapulco Tuxpan abarca una longitud total de 302.200 km y 53 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 79% de ellas son de pavimento flexible y el 21% de pavimento rígido. La figura 2.114 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.114 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.12.1 *Análisis Estructural del corredor Acapulco Tuxpan*

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 57%, seguida de la base asfáltica con el 36% y por último la base tratada con cemento el 8% del total. La figura 2.115 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.



Figura 2.115 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales, correspondientes a una subbase y una subrasante, con el 17% y 83% de repetición respectivamente. La figura 2.116 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.116 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Acapulco Tuxpan consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 21 cm con módulo de elasticidad de 2427 Mpa, soportada por una base granular de 21 cm con módulo de elasticidad de 349 Mpa y capa subrasante de 24 cm con un módulo de elasticidad de 66 Mpa. Las figuras 2.117, 2.118, 2.119 y 2.120 muestran estos datos de manera gráfica.

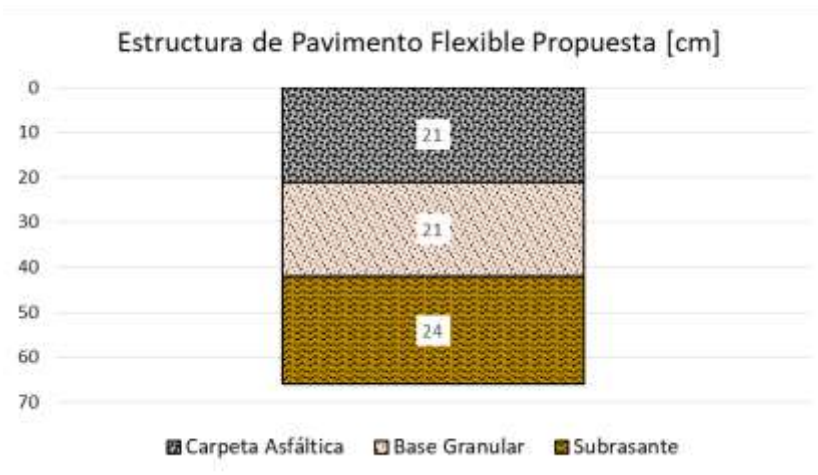


Figura 2.117 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

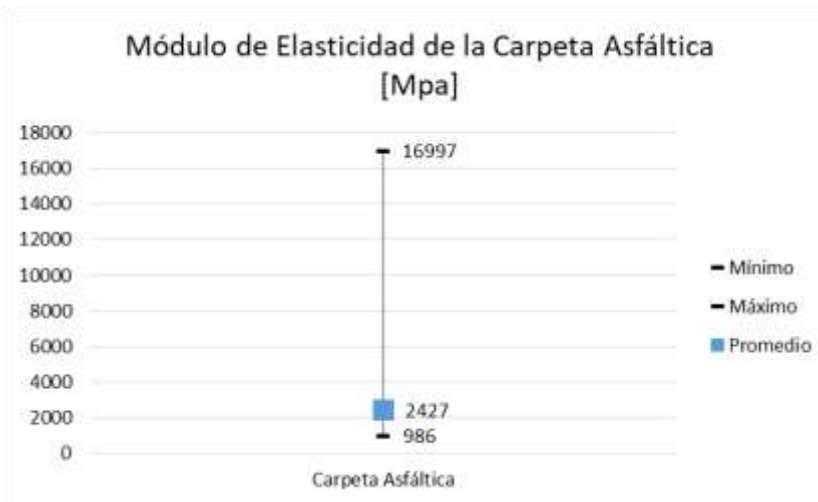


Figura 2.118 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

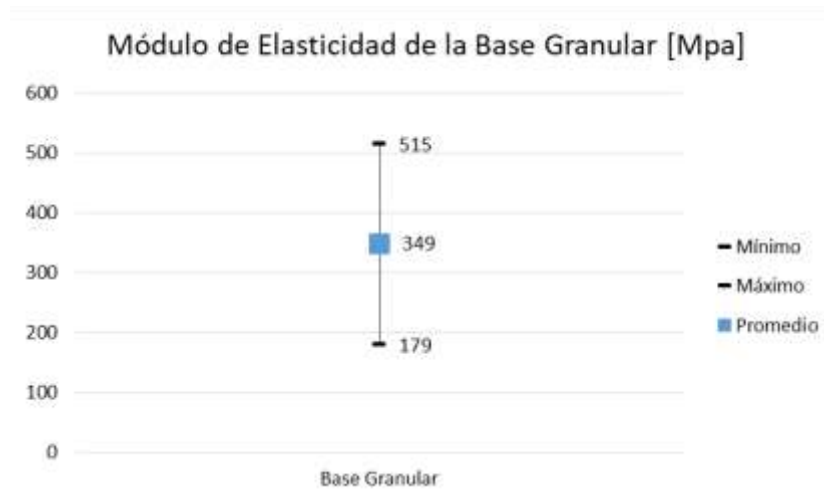


Figura 2.119 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

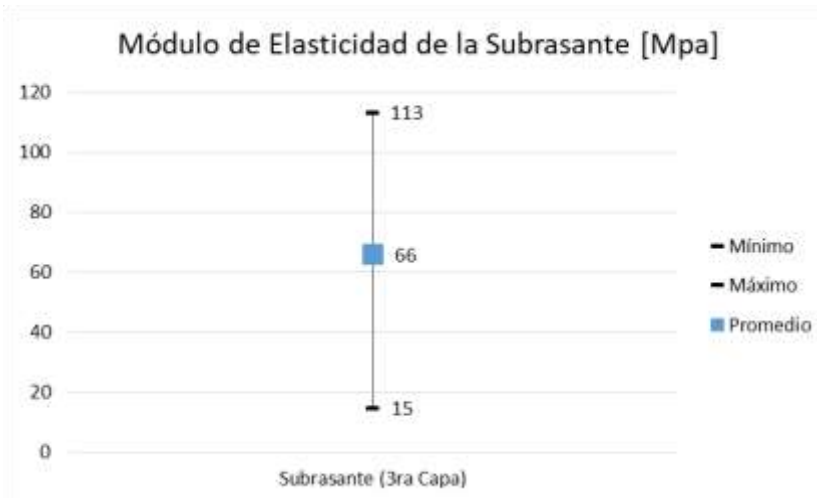


Figura 2.120 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.12.2 Análisis de Tránsito del corredor Acapulco Tuxpan

El análisis del corredor Acapulco Tuxpan muestra que el TDPA promedio es de 10484, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 6.00%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.121. Las figuras 2.122 y 2.123 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	78.90%	T3-S2	3.80%
B2	2.90%	T3-S3	1.80%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	7.40%	T2-S2-R2	0.00%
C3	3.40%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.40%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.40%

Figura 2.121 Composición Vehicular

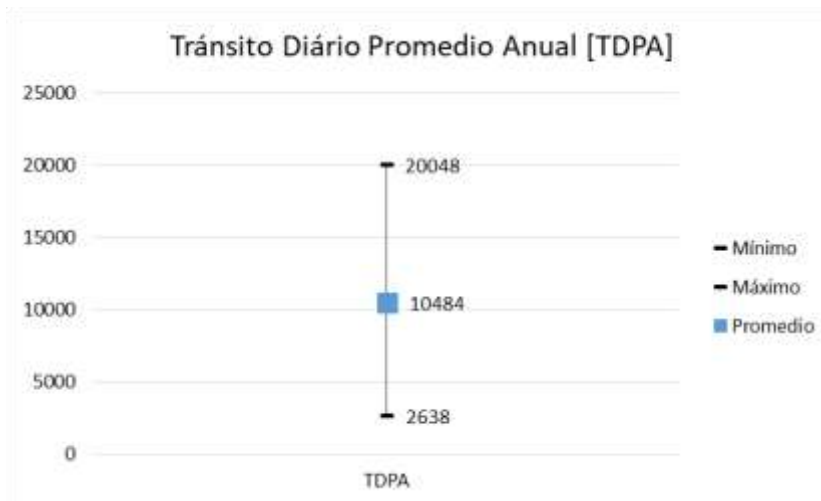


Figura 2.122 Transito Diario Promedio Anual

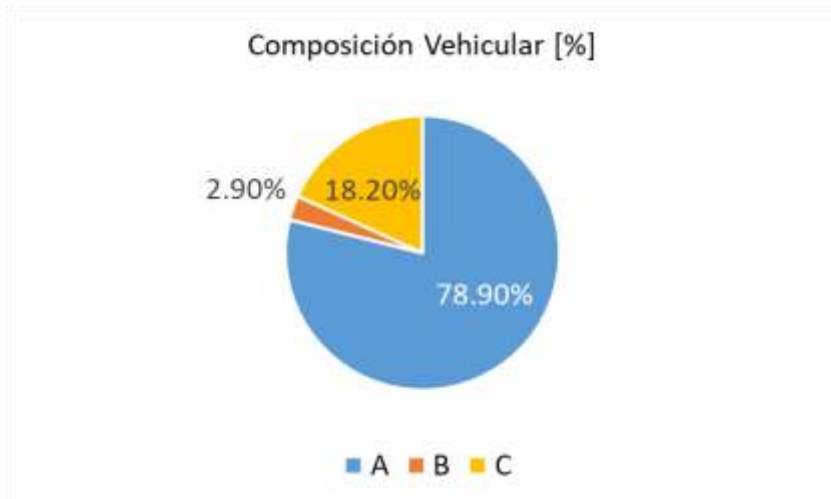


Figura 2.123 Composición Vehicular

### 2.12.3 Deflexión del corredor Acapulco Tuxpan

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.124.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.55	0.1	0.34	94%	6%

Figura 2.124 Deflexión Normalizada en mm

### 2.13 Análisis del Corredor Acapulco Veracruz

La muestra del corredor Acapulco Veracruz abarca una longitud total de 359.347 km y 62 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 100% de ellas son de pavimento flexible y ninguna de pavimento rígido. La figura 2.125 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.125 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

#### 2.13.1 Análisis Estructural del corredor Acapulco Veracruz

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 58%, seguida de la base asfáltica con el 32% y por último la base tratada con cemento el 10% del total. La figura 2.126 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica [%]

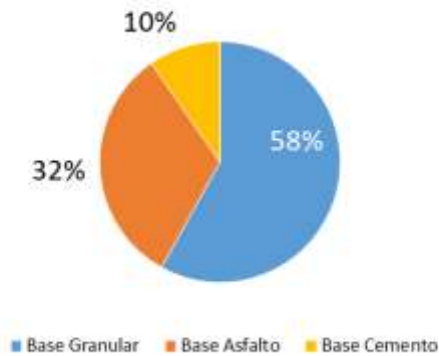


Figura 2.126 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales, correspondientes a una subbase y una subrasante, con el 40% y 60% de repetición respectivamente. La figura 2.127 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

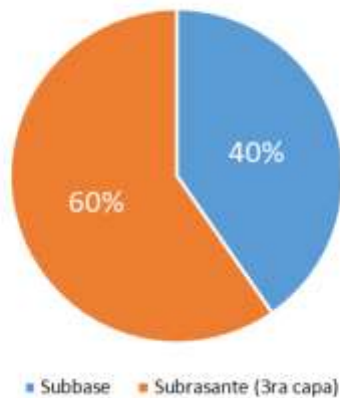


Figura 2.127 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Acapulco Veracruz consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 16 cm con módulo de elasticidad de 2309 Mpa, soportada por una base granular de 18 cm con módulo de elasticidad de 322 Mpa y capa subrasante de 23 cm con un módulo de elasticidad de 65 Mpa. Las figuras 2.128, 2.129, 2.130 y 2.131 muestran estos datos de manera gráfica.

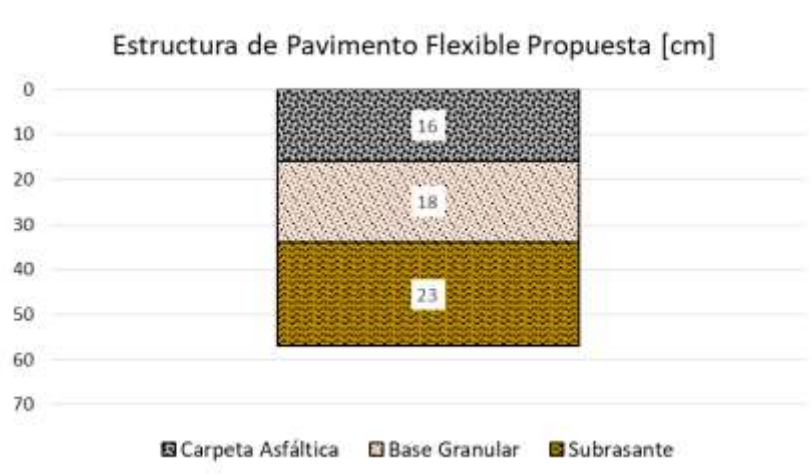


Figura 2.128 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

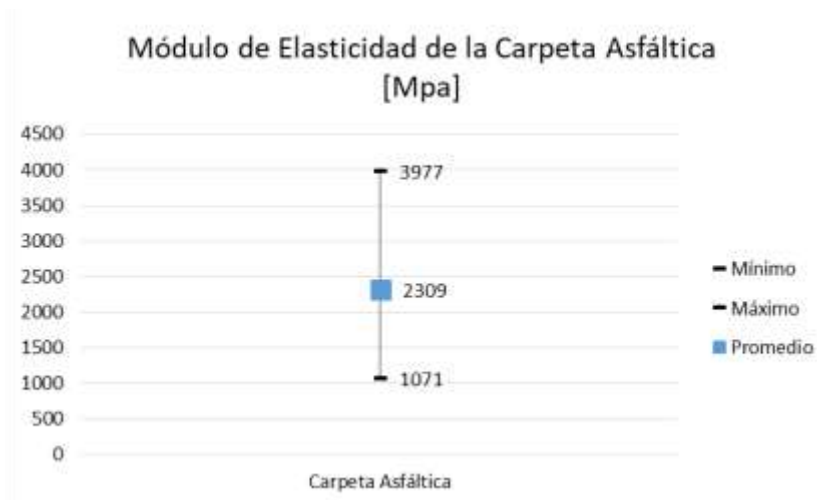


Figura 2.129 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica



Figura 2.130 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

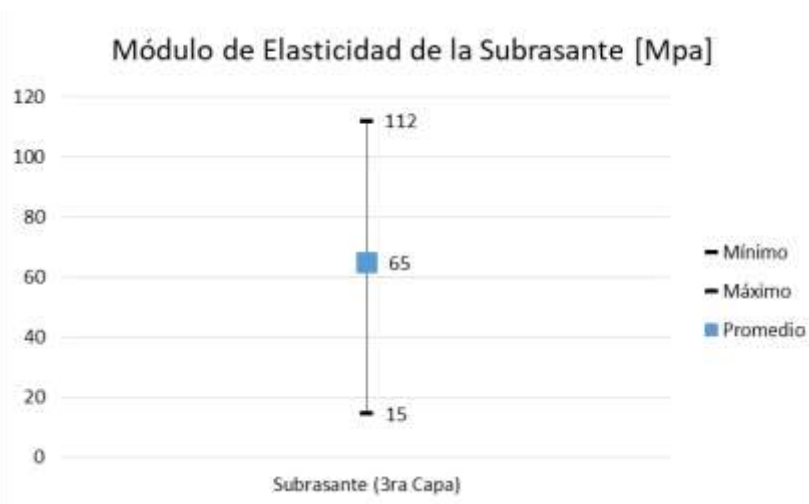


Figura 2.131 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.13.2 Análisis de Tránsito del corredor Acapulco Veracruz

El análisis del corredor Acapulco Veracruz muestra que el TDPA promedio es de 10073, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 2.63%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.132. Las figuras 2.133 y 2.134 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	82.20%	T3-S2	3.20%
B2	2.90%	T3-S3	2.20%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	5.60%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.60%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.80%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.50%

Figura 2.132 Composición Vehicular

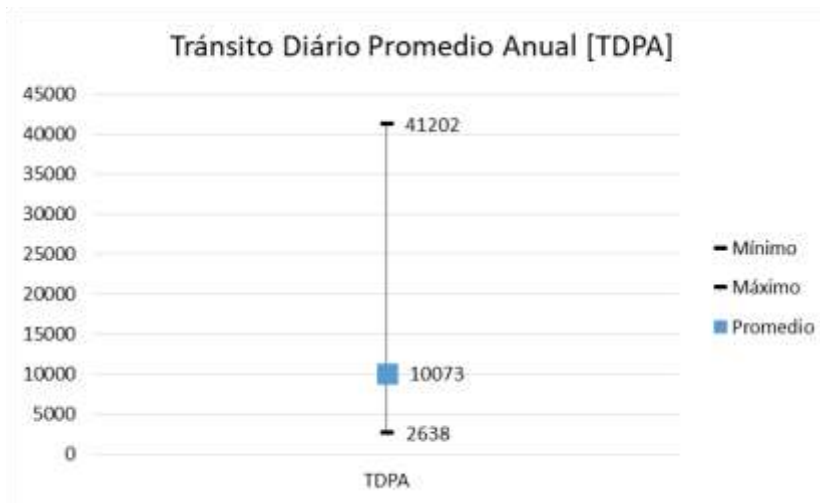


Figura 2.133 Transito Diario Promedio Anual

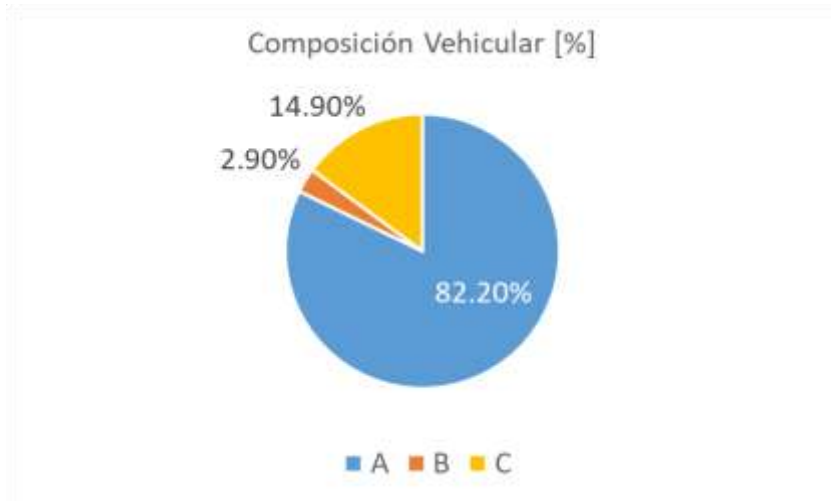


Figura 2.134 Composición Vehicular Simplificada

### 2.13.3 Deflexión del corredor Acapulco Veracruz

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.135.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.87	0.07	0.54	58%	42%

Figura 2.135 Deflexión Normalizada en mm

## 2.14 Análisis del Corredor del Altiplano

La muestra del corredor del Altiplano abarca una longitud total de 559.897 km y 122 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 98% de ellas son de pavimento flexible y el 2% de pavimento rígido. La figura 2.136 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.136 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.14.1 Análisis Estructural del corredor del Altiplano

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 86%, seguida de la base asfáltica con el 11% y por último la base tratada con cemento el 2% del total. La figura 2.137 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica [%]

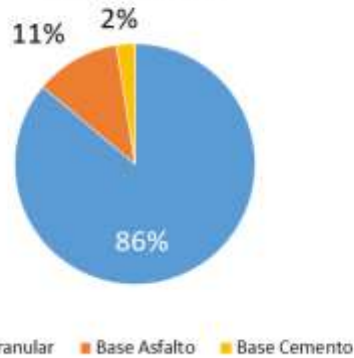


Figura 2.137 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de materiales, correspondientes a una subbase y una subrasante, con el 35% y 65% de repetición respectivamente. La figura 2.138 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

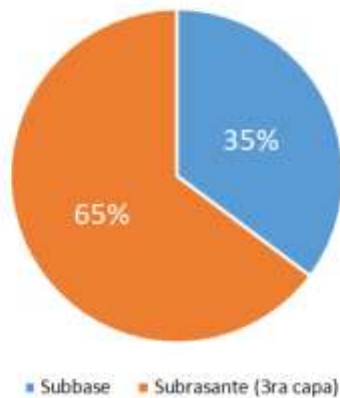


Figura 2.138 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor del Altiplano consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 17 cm con módulo de elasticidad de 2573 Mpa, soportada por una base granular de 20 cm con módulo de elasticidad de 253 Mpa y capa subrasante de 24 cm con un módulo de elasticidad de 59 Mpa. Las figuras 2.139, 2.140, 2.141 y 2.142 muestran estos datos de manera gráfica.

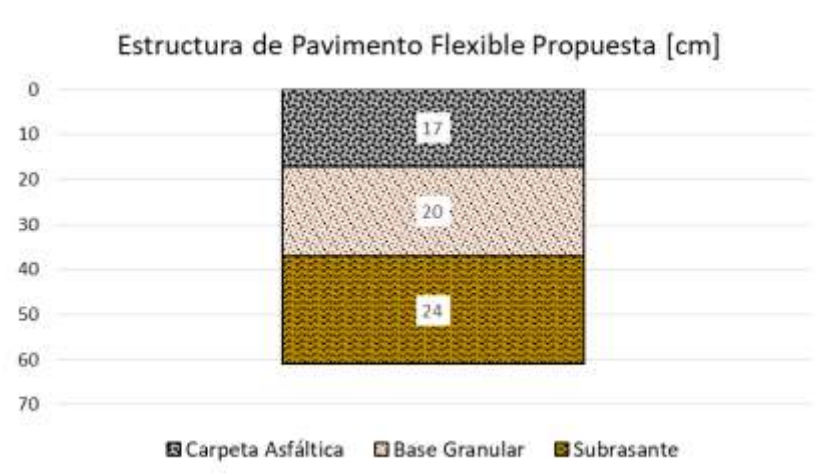


Figura 2.139 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

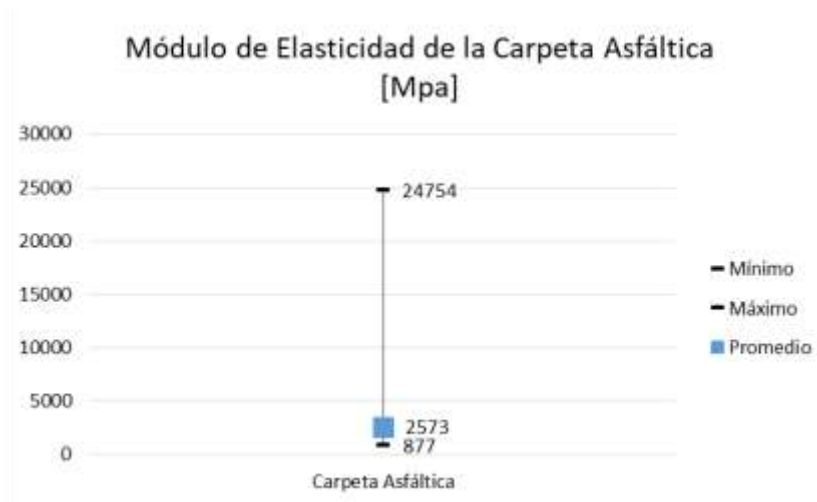


Figura 2.140 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

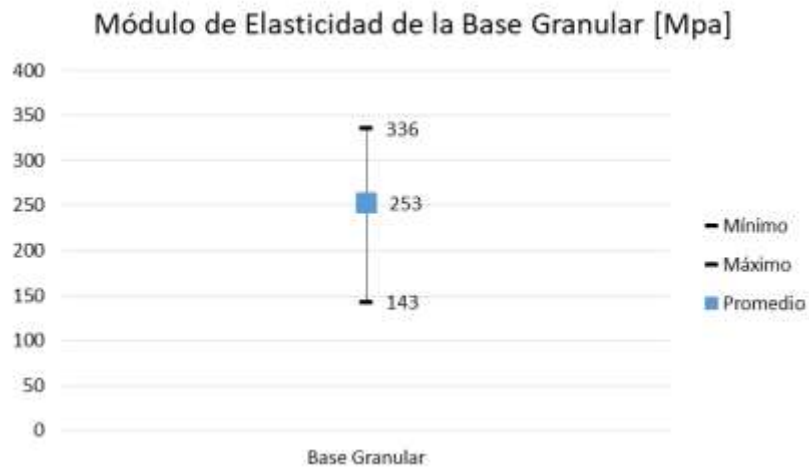


Figura 2.141 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

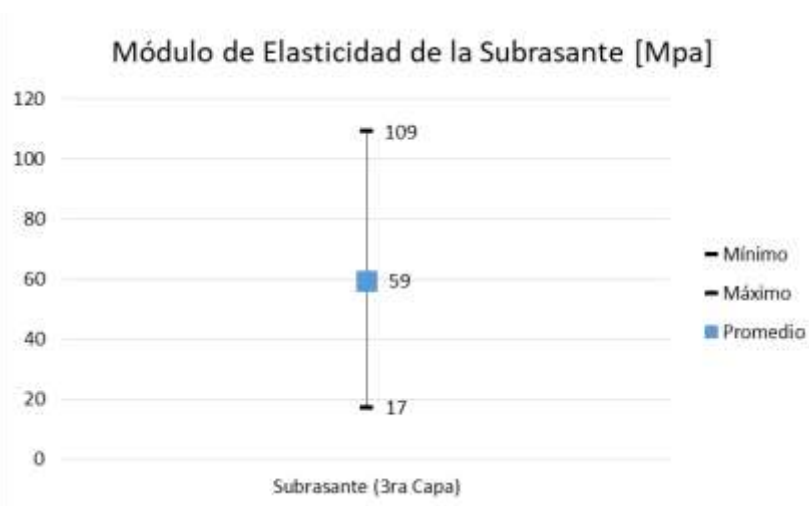


Figura 2.142 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.14.2 Análisis de Tránsito del corredor del Altiplano

El análisis del corredor del Altiplano muestra que el TDPA promedio es de 12866, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 6.63%. La distribución vehicular se compone como lo

muestra la figura 2.143. Las figuras 2.144 y 2.145 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	79.50%	T3-S2	5.70%
B2	2.50%	T3-S3	2.90%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	4.40%	T2-S2-R2	0.00%
C3	2.30%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.70%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	1.00%

Figura 2.143 Composición Vehicular

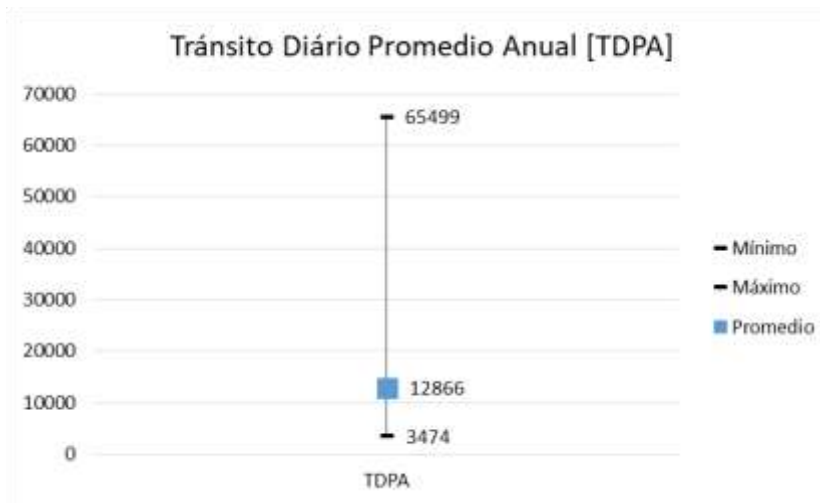


Figura 2.144 Transito Diario Promedio Anual

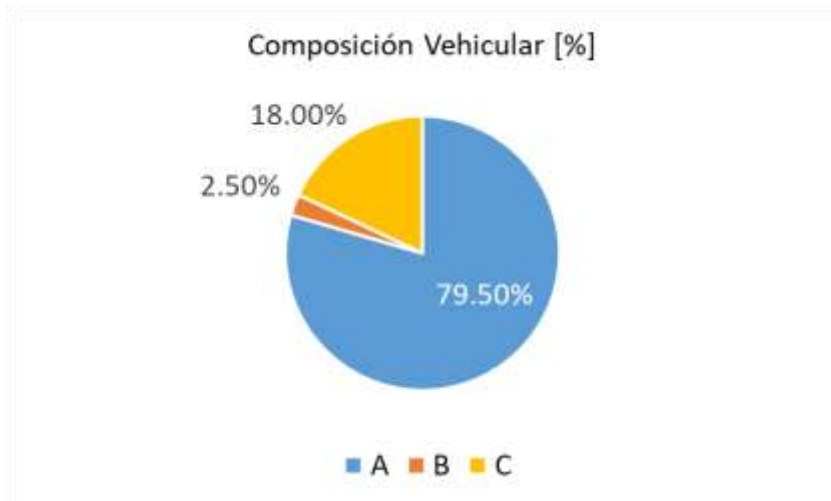


Figura 2.145 Composición Vehicular

### 2.14.3 Deflexión del corredor del Altiplano

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.146.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máy.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.27	0.11	0.75	42%	58%

Figura 2.146 Deflexión Normalizada en mm

## 2.15 Análisis del Corredor Transpeninsular de Baja California

La muestra del corredor del Altiplano abarca una longitud total de 1452.792 km y 133 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 89% de ellas son de pavimento flexible y el 11% de pavimento rígido. La figura 2.147 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.147 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.15.1 Análisis Estructural del corredor Transpeninsular de B.C.

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron dos tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 92%, seguida de la base tratada con cemento el 8% del total. La figura 2.148 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

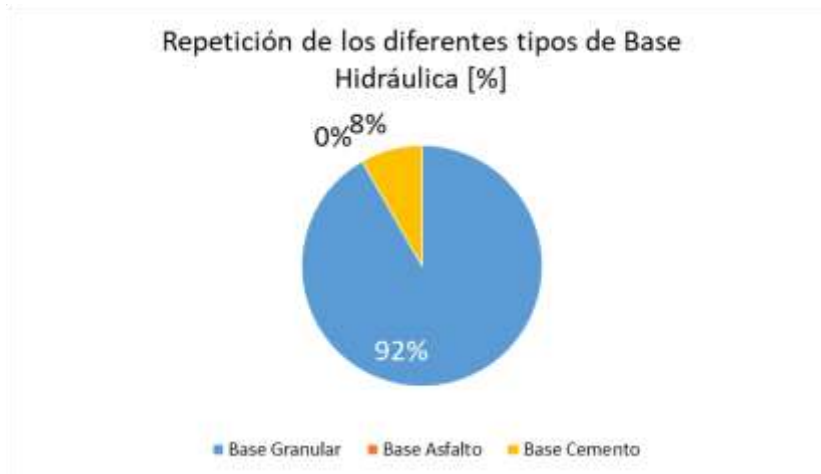


Figura 2.148 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectó un solo tipo de material, correspondiente a una capa subrasante. La figura 2.149 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.149 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor del Altiplano consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 11 cm con módulo de elasticidad de

3341 Mpa, soportada por una base granular de 20 cm con módulo de elasticidad de 360 Mpa y capa subrasante de 29 cm con un módulo de elasticidad de 72 Mpa. Las figuras 2.150, 2.151, 2.152 y 2.153 muestran estos datos de manera gráfica.

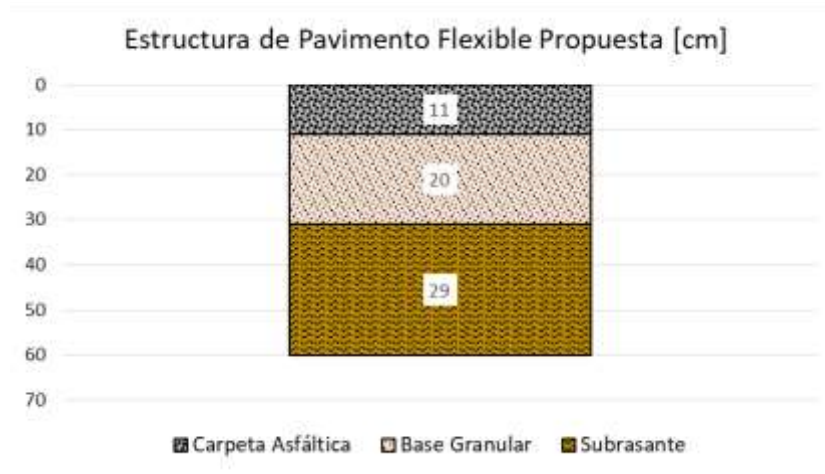


Figura 2.150 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

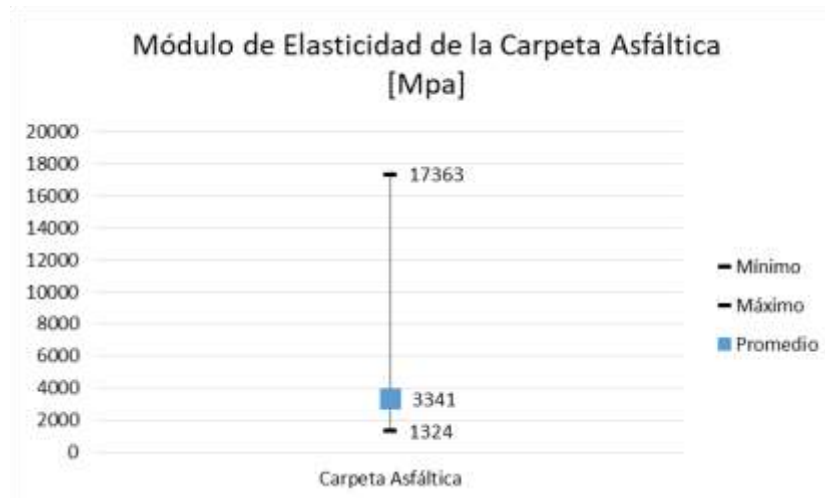


Figura 2.151 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

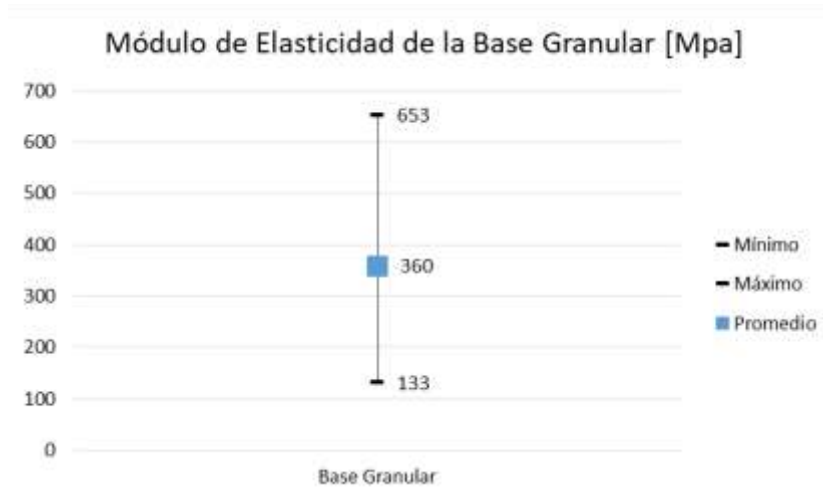


Figura 2.152 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

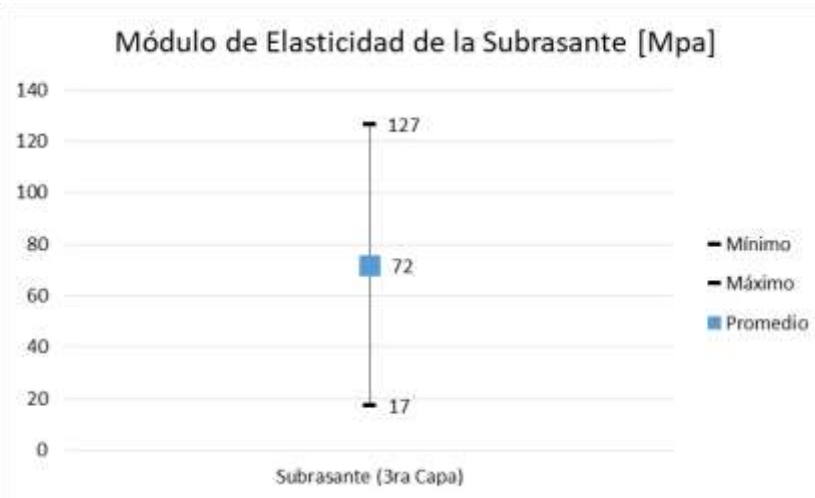


Figura 2.153 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.15.2 Análisis de Tránsito del corredor Transpeninsular de B.C.

El análisis del corredor Transpeninsular de Baja California muestra que el TDPA promedio es de 7405, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4.55%. La distribución vehicular se compone

como lo muestra la figura 2.154. Las figuras 2.155 y 2.156 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	84.40%	T3-S2	2.80%
B2	1.10%	T3-S3	0.80%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	8.20%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.50%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	1.10%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.10%

Figura 2.154 Composición Vehicular

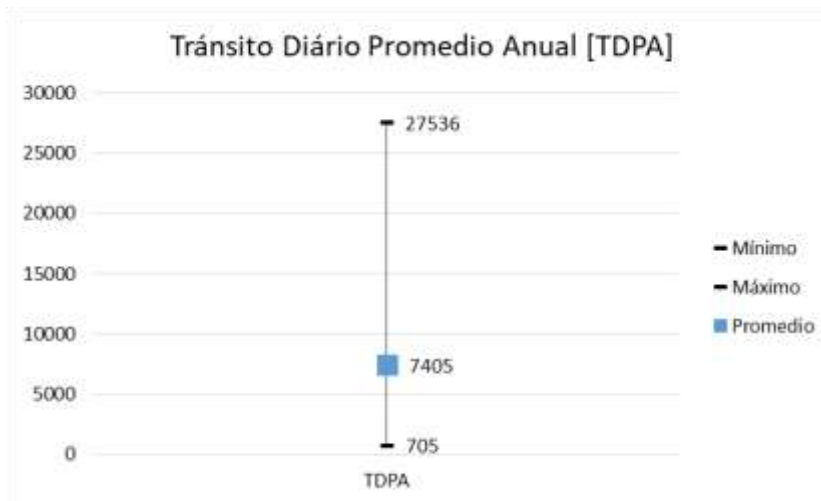


Figura 2.155 Transito Diario Promedio Anual

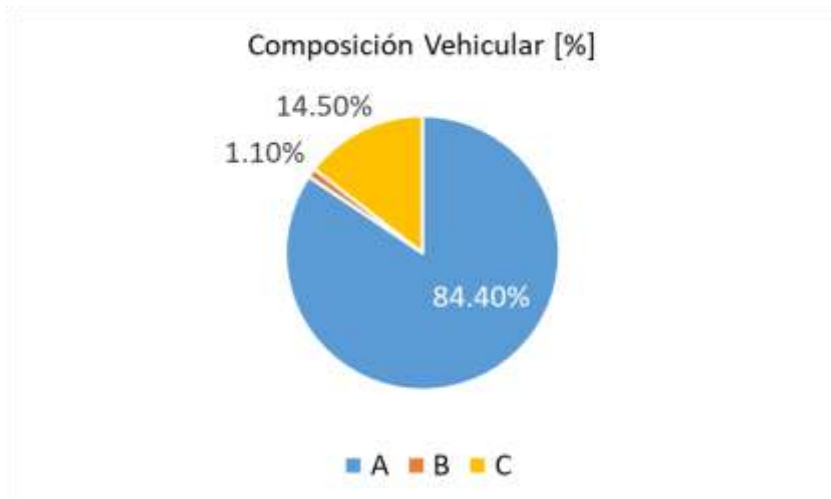


Figura 2.156 Composición Vehicular Simplificada

### 2.15.3 Deflexión del corredor Transpeninsular de B.C.

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.157.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.96	0.08	0.55	72%	28%

Figura 2.157 Deflexión Normalizada en mm

## 2.16 Análisis del Corredor Peninsular de Yucatán

La muestra del corredor Peninsular de Yucatán abarca una longitud total de 1103.304 km y 251 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 98% de ellas son de pavimento flexible y el 2% de pavimento rígido. La figura 2.158 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.158 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.16.1 Análisis Estructural del corredor Peninsular de Yucatán

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base granular la más repetida con el 55%, seguida de la base asfáltica con el 27% y base tratada con cemento el 19% del total. La figura 2.159 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

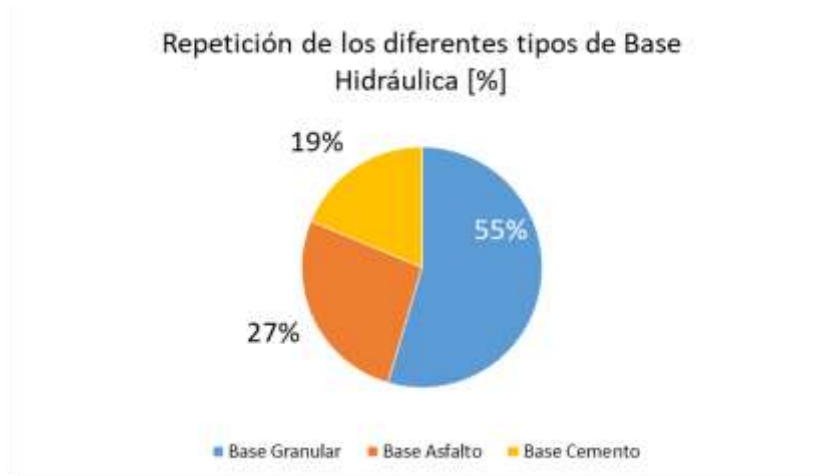


Figura 2.159 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de material, correspondientes a una subbase y una capa Subrasante con el 32% y 68% de repetición respectivamente. La figura 2.160 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.



Figura 2.160 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de tres capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor Peninsular de Yucatán consta de tres capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 13 cm con módulo de elasticidad de 3296 Mpa, soportada por una base granular de 20 cm con módulo de elasticidad de 432 Mpa y capa subrasante de 27 cm con un módulo de elasticidad de 78 Mpa. Las figuras 2.161, 2.162, 2.163 y 2.164 muestran estos datos de manera gráfica.

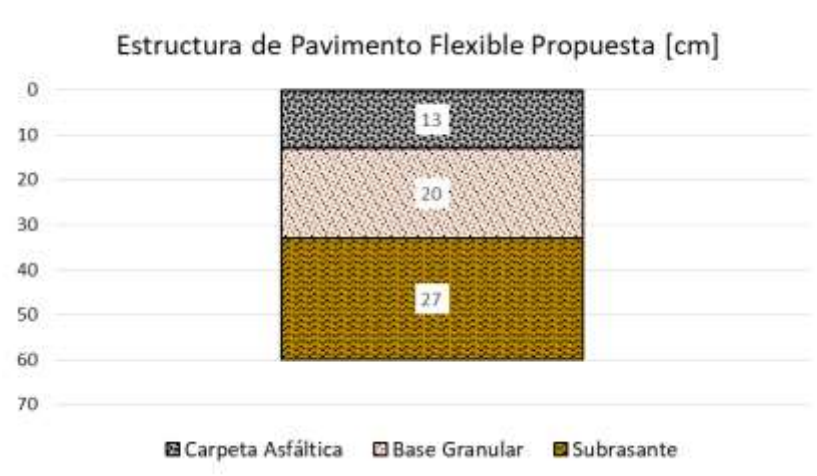


Figura 2.161 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

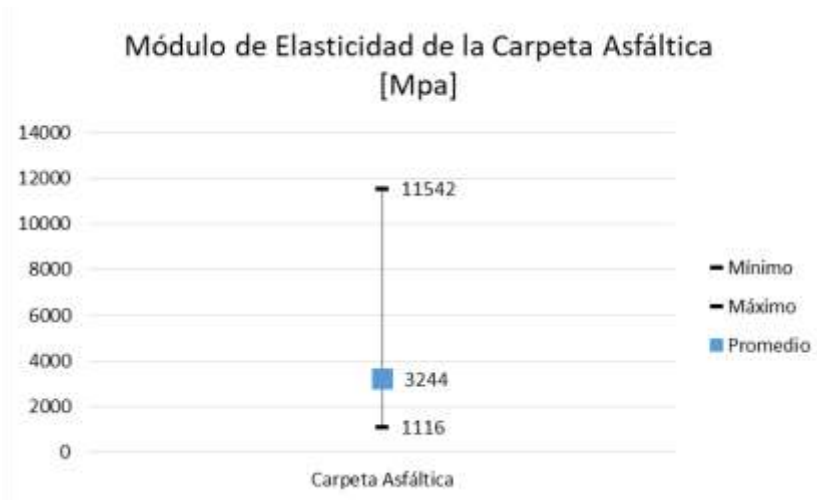


Figura 2.162 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

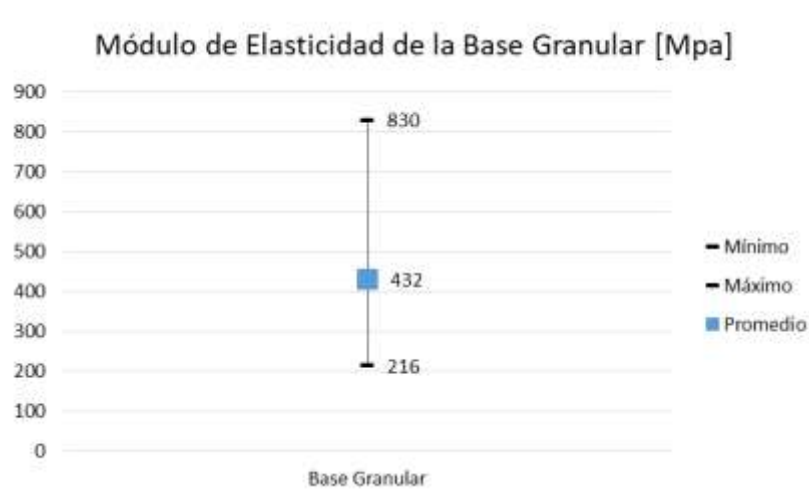


Figura 2.163 Módulo de Elasticidad de la Base Granular

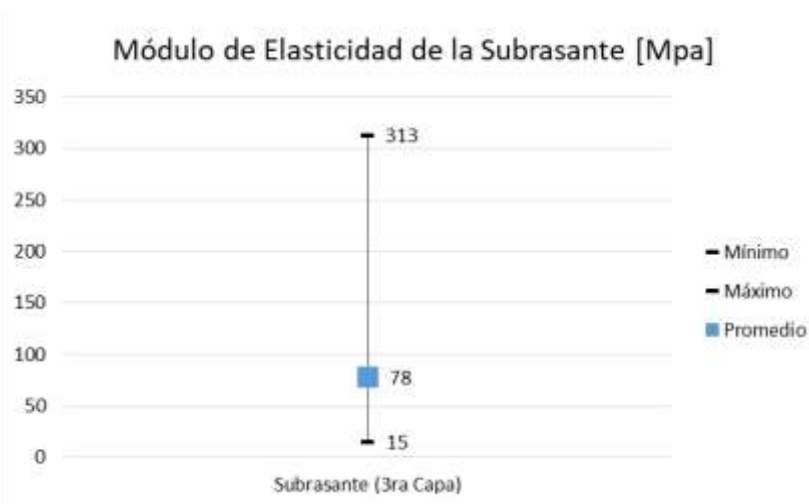


Figura 2.164 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.16.2 Análisis de Tránsito del corredor Peninsular de Yucatán

El análisis del corredor Peninsular de Yucatán muestra que el TDPA promedio es de 8543, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 0.50, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 2.07%. La distribución vehicular se compone

como lo muestra la figura 2.165. Las figuras 2.166 y 2.167 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	79.80%	T3-S2	4.80%
B2	4.80%	T3-S3	1.00%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	6.70%	T2-S2-R2	0.00%
C3	1.60%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	0.80%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.50%

Figura 2.165 Composición Vehicular

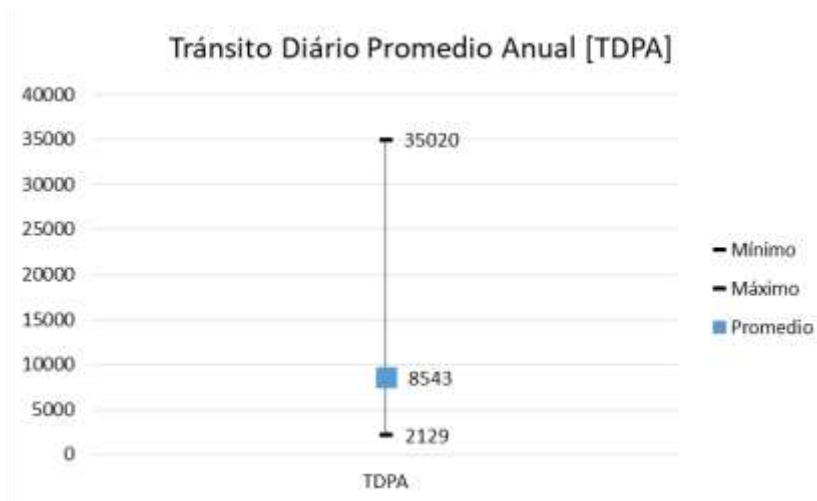


Figura 2.166 Transito Diario Promedio Anual

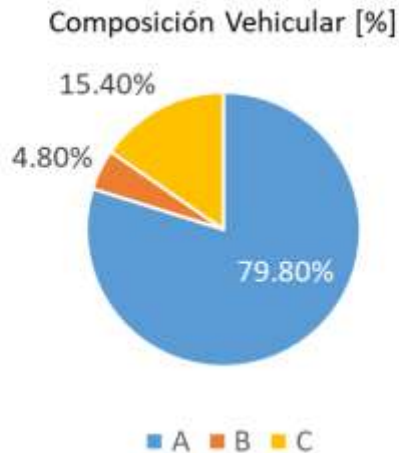


Figura 2.167 Composición Vehicular Simplificada

### 2.16.3 Deflexión del corredor Peninsular de Yucatán

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.168.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0.51	0.08	0.24	99%	1%

Figura 2.168 Deflexión Normalizada en mm

## 2.17 Análisis del Corredor del Pacífico

La muestra del corredor del Pacífico abarca una longitud total de 824.778 km y 122 secciones de pavimento distintas. De estas estructuras de pavimento se determinó que el 97% de ellas son de pavimento flexible y el 3% de pavimento rígido. La figura 2.169 muestra el porcentaje de repetición de cada tipo de pavimento.



Figura 2.169 Repetición del Tipo de Pavimento en porcentaje

### 2.17.1 Análisis Estructural del corredor del Pacífico

Del porcentaje de estructuras de pavimento flexible se identificaron tres tipos distintos de bases hidráulicas que son: Base granular, base asfáltica y base tratada con cemento. Siendo la base asfáltica la más repetida con el 69%, seguida de la base granular con el 29% y base tratada con cemento el 2% del total. La figura 2.170 muestra la repetición de los diferentes tipos de base hidráulica encontrados.

Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica

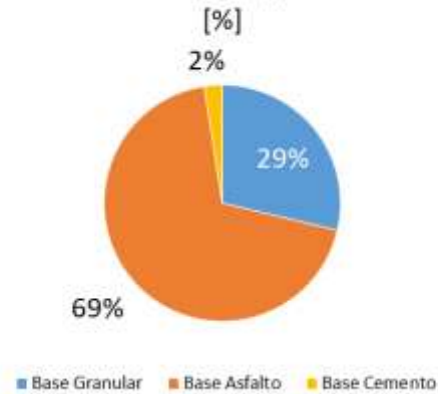


Figura 2.170 Repetición de los diferentes tipos de Base Hidráulica en porcentaje

En la tercera capa se detectaron dos tipos de material, correspondientes a una subbase y una capa Subrasante con el 53% y 47% de repetición respectivamente. La figura 2.171 muestra la repetición de los materiales encontrados en la tercera capa.

Repetición en Tercera Capa del Pavimento [%]

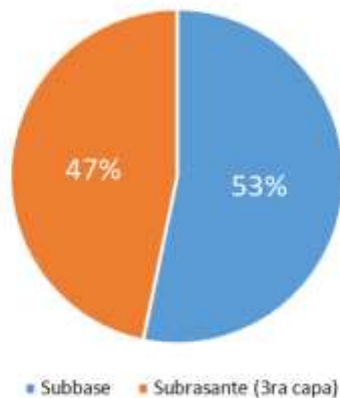


Figura 2.171 Repetición en la Tercera Capa del Pavimento en porcentaje

Estos datos significan que la mayoría de las estructuras detectadas son de cuatro capas que constan de carpeta asfáltica, base granular y capa subrasante. Por lo que fue posible proponer una estructura con base en los datos promedio.

La estructura propuesta para el análisis del corredor del Pacífico consta de cuatro capas, las cuales son: Carpeta asfáltica de 13 cm con módulo de elasticidad de 2570 Mpa, soportada por una base asfáltica de 17 cm con módulo de elasticidad de 1290 Mpa, subbase de 19 cm y 227 Mpa y capa subrasante de 26 cm con un módulo de elasticidad de 69 Mpa. Las figuras 2.172, 2.173, 2.174, 2.175 y 2.176 muestran estos datos de manera gráfica.

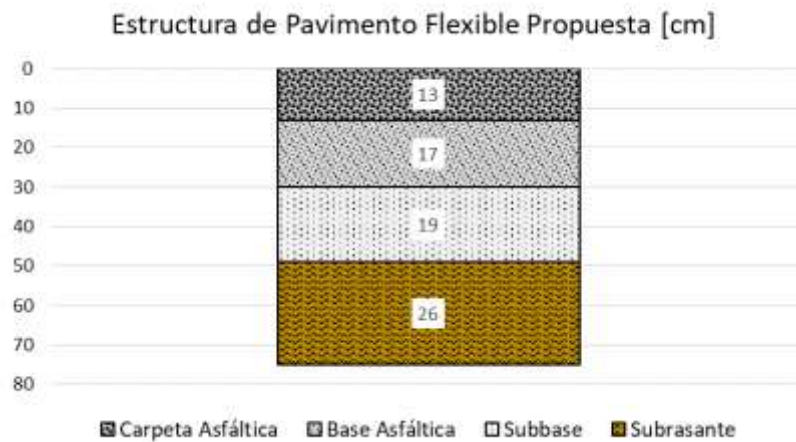


Figura 2.172 Estructura de Pavimento Flexible Propuesta

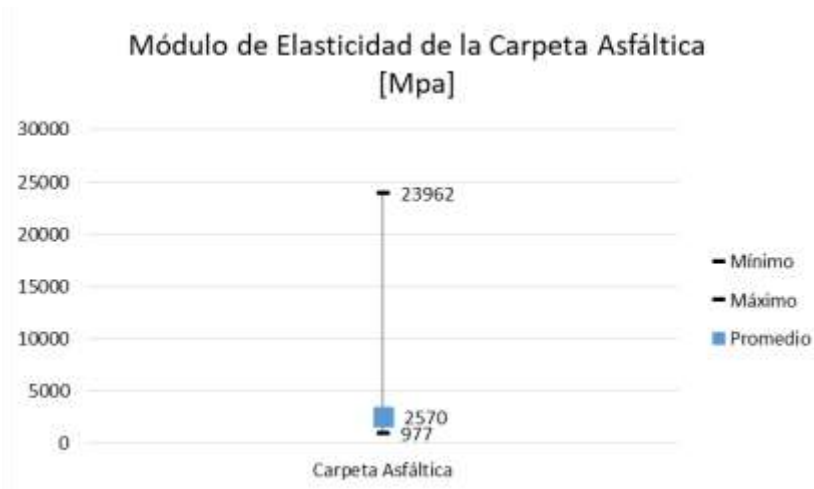


Figura 2.173 Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica

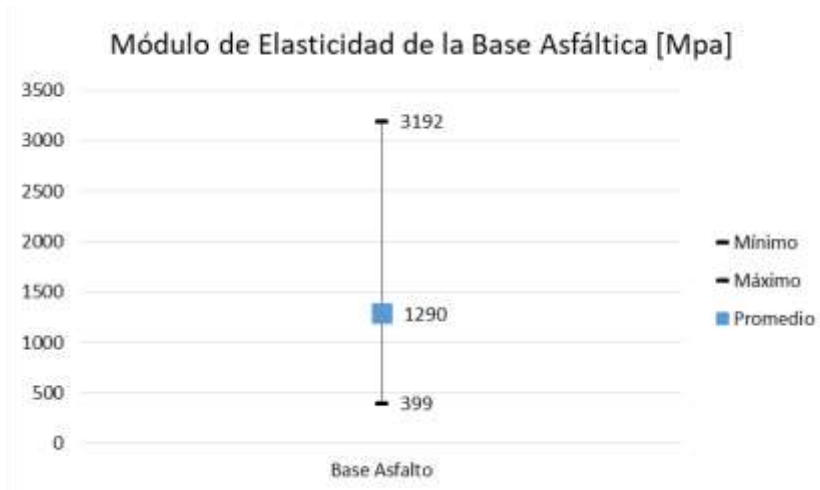


Figura 2.174 Módulo de Elasticidad de la Base Asfáltica

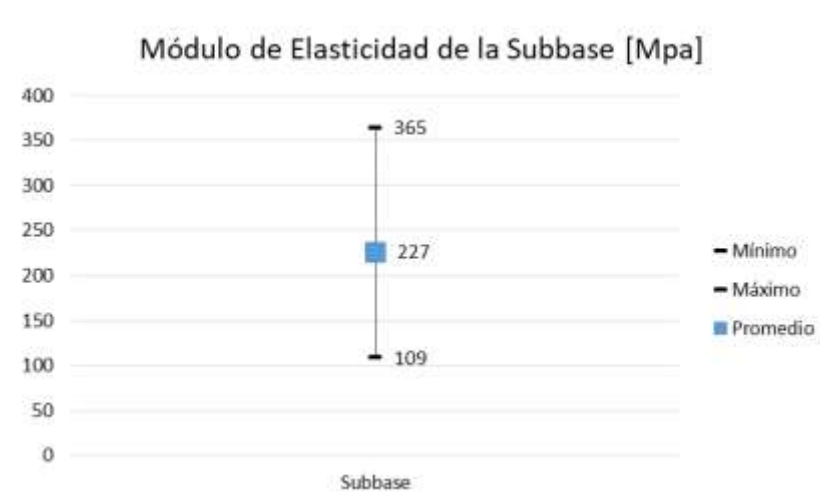


Figura 2.175 Módulo de Elasticidad de la Subbase

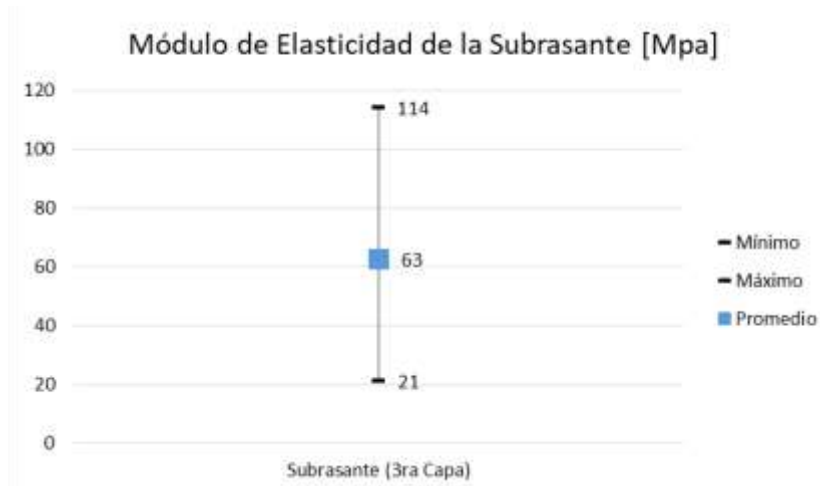


Figura 2.176 Módulo de Elasticidad de la Subrasante

### 2.17.2 Análisis de Tránsito corredor del Pacífico

El análisis del corredor del Pacífico muestra que el TDPA promedio es de 9250, con este dato fue posible identificar un aforo real que fuera el más parecido medido por la S.C.T. y utilizar esa distribución vehicular como representativa. De esta información de tránsito se tomó el coeficiente direccional (C.D.) de 1.00, distribución de carril (C.C.) de 1.00, periodo de diseño de 15 años y una tasa de crecimiento anual de 24.92%. La distribución vehicular se compone como lo muestra la figura 2.177. Las figuras 2.178 y 2.179 muestran el TPDA y la distribución vehicular simplificada.

Composición Vehicular			
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad
A2	62.50%	T3-S2	12.10%
B2	6.10%	T3-S3	2.10%
B3	0.00%	T2-S1-R2	0.00%
C2	9.90%	T2-S2-R2	0.00%
C3	3.80%	T2-S1-R3	0.00%
C2-R2	0.00%	T3-S1-R2	0.00%
C3-R2	0.00%	T3-S1-R3	0.00%
C2-R3	0.00%	T3-S2-R2	0.00%
C3-R3	0.00%	T3-S2-R3	0.00%
T2-S1	0.00%	T3-S2-R4	3.00%
T2-S2	0.00%	T2-S2-S2	0.00%
T2-S3	0.00%	T3-S2-S2	0.00%
T3-S1	0.00%	T3-S3-S2	0.00%
		Otros	0.50%

Figura 2.177 Composición Vehicular



Figura 2.178 Transito Diario Promedio Anual

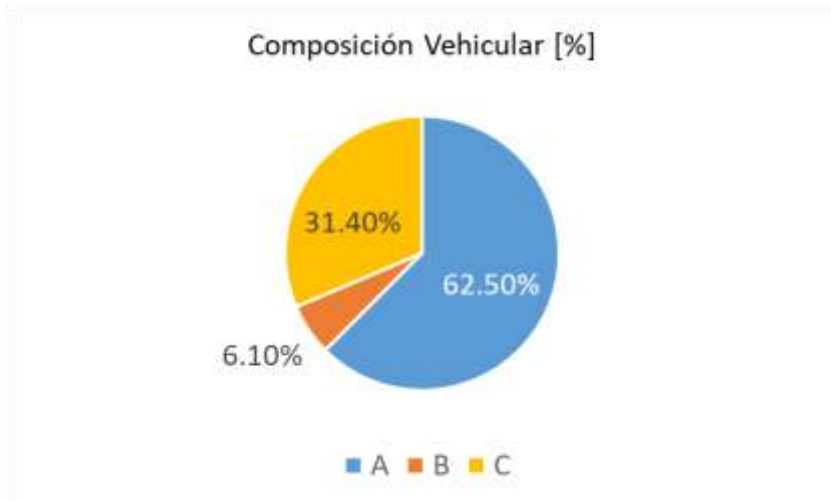


Figura 2.179 Composición Vehicular

### 2.17.3 Deflexión del corredor del Pacífico

Por último, se definió una deflexión normalizada representativa en función del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica. Se obtuvo una deflexión máxima, una mínima y una característica, así mismo, se le otorga una calificación general para todo el tramo. Información mostrada en la figura 2.180.

Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
1.56	0.17	0.96	19%	81%

Figura 2.180 Deflexión Normalizada en mm

## 2.18 Dispersión de los módulos de elasticidad de las capas del pavimento

Los valores de módulos de elasticidad promedio detectados fueron comparados contra valores típicos mostrados en las tablas 2.1 y 2.2 de este capítulo. Se puede observar que a pesar de la dispersión de los valores, para el caso de la carpeta asfáltica se encuentran, de manera general, por debajo del valor típico, pero por arriba del mínimo. La figura 2.181 muestra la dispersión del módulo elástico de la carpeta asfáltica.

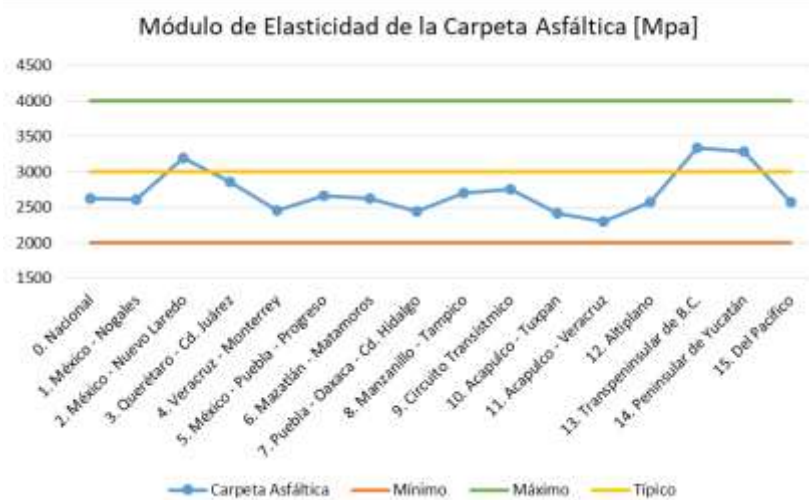


Figura 2.181 Dispersión del Módulo de Elasticidad de la Carpeta Asfáltica, en Mpa.

En el caso de la base granular se observa que la mayoría de los módulos elásticos se encuentran por encima del valor máximo esperado, así mismo, para el caso del corredor del Altiplano, se observa que el módulo elástico promedio se localiza por debajo del valor esperado mínimo. La figura 2.182 muestra esta información de manera gráfica.

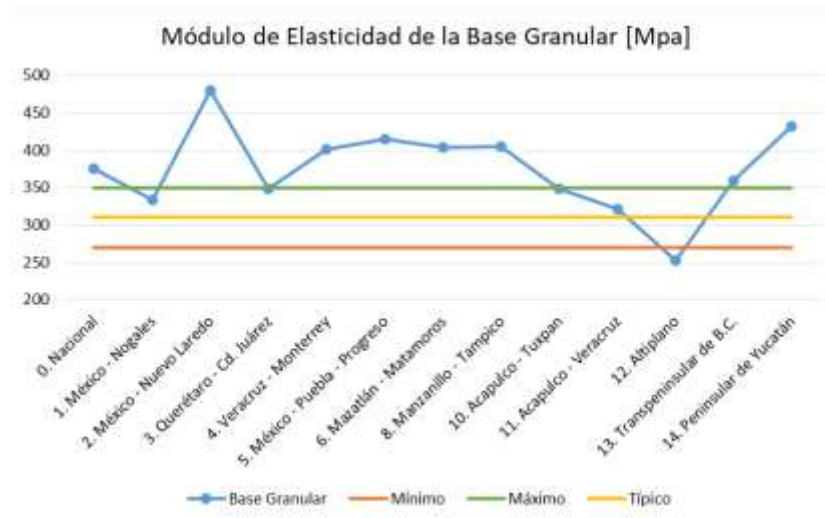


Figura 2.182 Dispersión del Módulo de Elasticidad de la Base Granular, en Mpa.

El módulo de elasticidad de la base asfáltica detectado en los corredores con estructuras propuestas de 4 capas, que son el de Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transísmico y del Pacifico, se localiza por arriba del valor típico sin llegar a rebasar el valor máximo. La figura 2.183 muestra esta dispersión de manera gráfica.

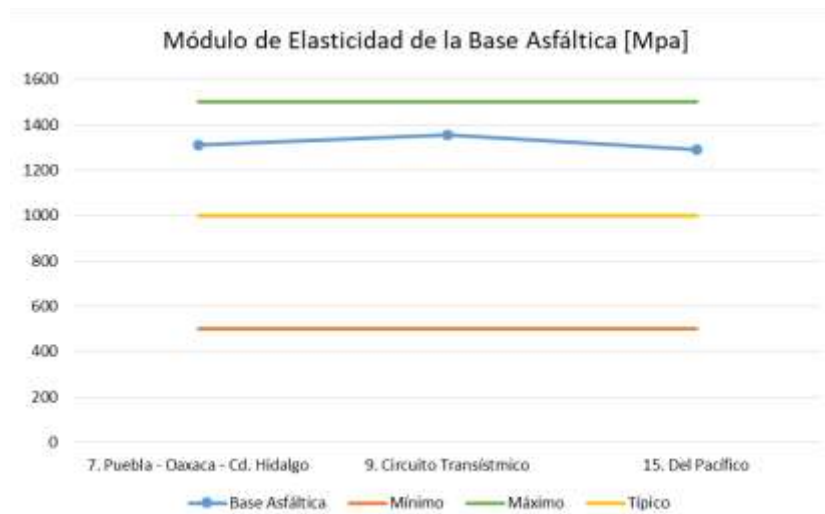


Figura 2.183 Dispersión del Módulo de Elasticidad de la Base Asfáltica, en Mpa.

Del mismo modo, en las estructuras de pavimento de cuatro capas anteriormente descritas se localizó una subbase, que cumple con el módulo elástico típico

esperado para un material de tipo arenoso bien graduado (SW). La dispersión de la subbase se ilustra en la figura 2.184.

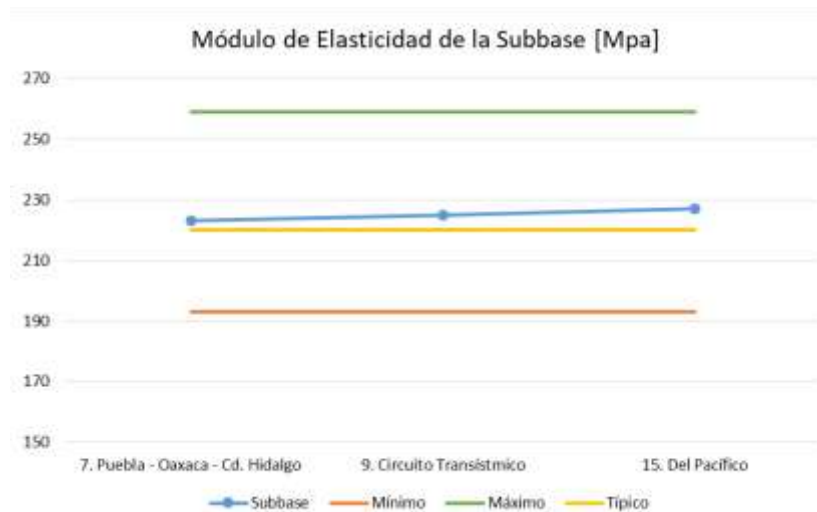


Figura 2.184 Dispersión del Módulo de Elasticidad de la Subbase, en Mpa.

Debajo de todas las capas de pavimento se localizó una capa de material empleado como subrasante. Cuando este material se compara contra los valores típicos esperados de un limo inorgánico de baja plasticidad (ML) se puede observar que la capa subrasante de todos los corredores se encuentra dentro de los valores típicos esperados. La figura 2.185 muestra esta información de manera gráfica.

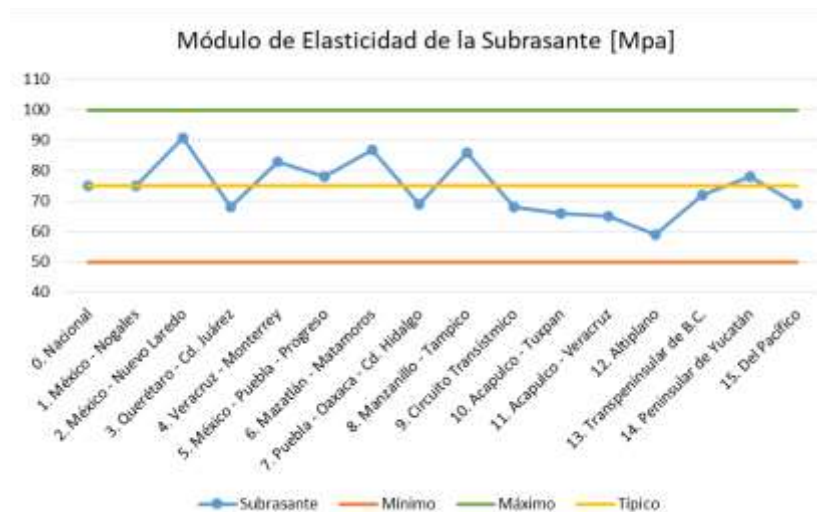


Figura 2.185 Dispersión del Módulo de Elasticidad de la Subrasante, en Mpa.

## **2.19 Conclusiones del Capítulo 2**

Se han identificado en nuestro país una red de 15 corredores carreteros troncales, mismos que enlazan zonas metropolitanas importantes y crea nodos de producción estratégicos. La S.C.T. a través de la Dirección General de Servicios Técnicos monitorea y recaba información sobre el estado anual de los mismos.

Contando con la información del año 2018 fue posible identificar un total 1417 secciones de pavimento diferentes, así como un tránsito distinto en cada registro. De esta muestra se realizó un análisis estadístico tanto a nivel nacional como por cada corredor.

El pavimento de tipo flexible es el más utilizado en todos los corredores, el espesor mínimo detectado es de 11 cm, el máximo de 21 cm y el promedio de 15 cm, el módulo de elasticidad de la carpeta tuvo un valor mínimo de 2309 Mpa, máximo de 3341 Mpa y promedio de 2718 Mpa.

La dispersión tan grande en los diferentes espesores y módulos de elasticidad permite observar que algunos tipos de estructuras son probables sobre carpetas de distintos espesores y módulos elásticos que fueron reportadas como una carpeta única con un módulo de elasticidad único.

La base granular es la más utilizada a nivel nacional y en 12 de los 15 corredores, con un espesor mínimo de 18 cm, máximo de 24 cm y promedio de 21 cm. El módulo de elasticidad de la base granular se estimó con un mínimo de 253 Mpa, un máximo de 480 Mpa y un promedio de 375 Mpa, estos valores significan que la base hidráulica de tipo granular tiene una dispersión menor respecto a la carpeta asfáltica. Los valores más altos de espesor y módulo elástico permiten observar que algunas bases granulares son probables sobre encarpetamientos como el caso de la carpeta asfáltica.

En 3 de los 15 corredores, el de Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transístmico y el corredor del Pacífico, se identificó una estructura que en lugar de base granular cuenta con una base asfáltica soportada por una sub base granular. El

espesor mínimo de la base asfáltica en estos corredores es de 13 cm, máximo de 17 cm y promedio de 15 cm, con módulo de elasticidad mínimo de 1290 Mpa, máximo de 1357 Mpa y promedio de 1320 Mpa. La subbase que la soporta tiene un espesor mínimo de 19 cm, máximo de 20 cm y promedio de 20 cm, ya redondeados, el módulo de elasticidad de la sub base es mínimo de 223 Mpa, máximo de 227 Mpa y promedio de 225 Mpa. Se observa que la dispersión de estos valores es mucho menor.

La dispersión de los módulos elásticos de los materiales para cada capa fue comparada contra valores típicos de referencia proporcionados por el Instituto Mexicano del Transporte. De manera general, se observa que los módulos elásticos utilizados se encuentran dentro de los parámetros de referencia indicados con excepción de la base granular que muestra una alta dispersión, con valores por debajo del mínimo, cercanos al valor típico y máximo, sin embargo, algunos valores promedio utilizados para la base granular se observan por encima de los valores de referencia.

Tanto en el análisis nacional como los análisis para cada corredor se detectó al fondo de la estructura una capa Subrasante con espesor mínimo de 23 cm, máximo de 31 cm y promedio de 27 cm, con un módulo de elasticidad mínimo de 59 Mpa, máximo de 91 Mpa y promedio de 74 Mpa.

En el anexo 2 se presenta el resumen de las secciones propuestas con sus espesores y módulos de elasticidad.

El análisis de tránsito se realizó contabilizando todos los TDPA registrados, una vez que se tuvo un valor promedio de TDPA para el análisis nacional y para cada corredor se determinó buscar el aforo vehicular real que fuera más aproximado al TDPA promedio, ya que estos aforos incluyen en su análisis los factores de distribución, la tasa de crecimiento y la distribución vehicular reales.

De los vehículos pesados, los C, el tipo T3-S2 es el vehículo más utilizado con un 9.35% promedio, seguido del C2 con 7.52% y T3-S2-R4 con 2.58%. En algunos

corredores se observa que predomina el T3-S2-R4 alcanzando un máximo de 7.30% de utilización como es el caso del corredor México Nuevo Laredo

El factor direccional es de 1.0 en todos los corredores a excepción del corredor México Puebla Progreso y el corredor Peninsular de Yucatán que fue de 0.5 y el factor de carril fue 1.0 en todos los análisis.

La tasa de crecimiento es mínima de 2.07%, máximo de 7.41% y promedio de 4.44%

El TDPA es mínimo de 6099, máximo de 15509 y promedio de 10079.

En el anexo 3 se presenta el resumen del tránsito que incluye los factores de distribución, horizonte de diseño, TDPA y distribución vehicular de cada corredor y análisis nacional.

Realizar un análisis nacional con todos los datos nos muestra un panorama general, el análisis por corredor nos permite observar que en ciertas regiones predomina una tendencia.

### **Capítulo 3 Valoración de la Vida Remanente en la Red Mexicana de Corredores**

El análisis espectral se realizó con el software IMT PAVE, el cual considera los conceptos de espectros de carga y de daño como la base para definir dos tipos principales de deterioro: Fatiga y deformación, asociados a fallas por agrietamiento y compresión respectivamente, presentes en la estructura de pavimento y terracerías. A partir de ello es posible determinar la vida remanente de estructuras de pavimento.

Los espectros de carga “se definen como la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje” (Garnica Anguas, XVI CILA - Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 2011) y se calculan para caracterizar el tránsito que circula a velocidad de operación utilizando estaciones pesaje dinámico, mismas que permiten conocer el peso real de los vehículos, con principal interés en los más pesados para el diseño de pavimento, los vehículos tipo C, como es el caso de los vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4, ya que además son también los que transitan más lento y por lo tanto, son los vehículos que generan los mayores daños. La correcta caracterización del tránsito es de relevancia en vías de alto tránsito vehicular como lo son los corredores carreteros mexicanos.

Los espectros de daño se determinan a partir del concepto de daño definido por Miner (1945), en donde para cada tipo de eje,  $i$ , y cada nivel de carga,  $j$ , se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondientes por año,  $n$ , y el número de repeticiones admisibles,  $N$ , para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación 3.1.

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

El cociente  $D$  se asocia a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los daños por fatiga donde se presentan agrietamientos y los daños por deformación, donde se observa el reacomodo de los materiales. El tiempo,  $T$ , en años, en que se alcanzará el número de repeticiones admisible de algún tipo de deterioro se determina con el inverso de  $D$ . Mismo que deberá ser comparado con el horizonte de proyecto.

Los daños por fatiga representan fallas por agrietamiento en la estructura de pavimento y deberán ser determinados donde se localice el esfuerzo máximo,  $\sigma_t$ , siendo la fibra inferior de la capa que se analiza el punto más crítico. Para determinar el número de repeticiones admisible por fatiga,  $N_f$ , se utiliza la ecuación 3.2.

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Los daños por deformación unitaria de compresión máxima,  $\sigma_c$ , se localizan en la parte superior de las capas. Este cálculo supone un comportamiento elástico de los materiales. Con la ecuación 3.3 se determinan los modelos por deformación permanente de las capas inferiores del pavimento.

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Los parámetros utilizados por el software corresponden con los parámetros del Laboratorio de Investigación Británico sobre Transporte Carretero, TRRL, donde:  $f_1 = 1.66E-10$ ,  $f_2 = 4.32$ ,  $f_4 = 6.18E-08$  y  $f_5 = 3.97$  respectivamente.

Con el método de Odermark (1949) se puede proponer una sección homogénea equivalente de las capas del pavimento, este procedimiento está basado en la

suposición de que los esfuerzos y deformaciones por debajo de una capa dependen de la rigidez de esa capa solamente. Si el espesor, el módulo y la relación de Poisson de una capa son cambiados, pero la rigidez permanece sin cambiar, los esfuerzos y deformaciones por debajo de la capa deben también permanecer sin cambiar. (Coria Gutiérrez, Hernández Domínguez, & Garnica Anguas, 2018). El método se basa en la ecuación 3.4.

$$h_{eq1} = (f)(h_1) \sqrt[3]{\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

$f = 1.0$  para la primera interface, independiente del número de capas.

$f = 0.8$  para la segunda capa de un sistema de dos capas

$f = 0.9$  para la segunda capa en delante de un sistema de  $n$ -capas.

$h_n$  = Espesores de la capa  $n$ .

$E_n$  = Módulo de elasticidad de la capa  $n$ .

$\nu_n$  = Relación de Poisson de la capa  $n$ .

Por último, las deformaciones unitarias se basan en la teoría de Burmister (1943) basada en la distribución de esfuerzos y desplazamientos en un sistema de dos capas con comportamientos homogéneos, isótropos y linealmente elásticos. La primera capa se supone infinita horizontalmente, pero con un espesor,  $h$ , definido; La segunda capa se asume como infinita. Se supone que entre las dos capas hay un contacto continuo. El software IMT PAVE provee en su programación resoluciones matemáticas muy aproximadas de la ecuación diferencial para sistemas multicapa analizadas y resueltas por Burmister.

Los objetivos particulares de este capítulo son:

1. Describir los principios teóricos sobre los que se basa el software IMT PAVE.
2. Concentrar de manera resumida para cada corredor la información descrita en el capítulo II sobre las características del tránsito y de la estructura de pavimento.
3. Ingresar todos los insumos en el software IMT PAVE para realizar un análisis espectral por fatiga y deformación para los distintos niveles de carga.
4. Determinar la variación de vida remanente por fatiga y deformación de los corredores carreteros para distintos escenarios de carga.
5. Comparar los resultados de los corredores con el resultado del análisis nacional.
6. Observar la variación de los resultados de vida remanente de los corredores.

Con el TDPA, los factores de distribución por sentido y por carril, la vida de proyecto, tasa de crecimiento, distribución vehicular, espesores y módulos de elasticidad promedio de cada capa del pavimento de las estructuras propuestas fue posible ingresar la información en el software IMT – PAVE 3.1 para realizar un análisis espectral con los espectros de carga precargados por el Instituto Mexicano del Transporte de carga legal, ligera sobrecarga, alta sobre carga y muy alta sobrecarga para obtener la vida remanente por fatiga y por deformación en años. De acuerdo con la información de la S.C.T., en todos los casos, se consideró una vida útil o de proyecto de 15 años.

Para cada análisis espectral se muestran los valores utilizados simplificados de tránsito y de las estructuras propuestas tanto en espesores como módulos de elasticidad. Los resultados obtenidos del análisis de vida por fatiga se muestran

para el análisis nacional y para cada corredor. A continuación, se muestran los resultados del análisis espectral de manera gráfica para observar la variación de la vida remanente de una misma estructura, mismo tránsito y misma tasa de crecimiento, pero diferentes niveles de carga. Las figuras del análisis espectral por corredor muestran también con área azul el resultado del análisis nacional permitiendo comparar ambos resultados. El análisis por deformación fue despreciado pues el Software considera que los datos ingresados son para un proyecto nuevo y el resultado obtenido mostraría el tiempo que tardaría en deformarse la estructura por el tránsito vehicular. Ya que estos corredores no son nuevos y están actualmente en servicio se asume que ya se encuentran deformados. El presente análisis y todas las figuras de este capítulo son de elaboración propia.

### 3.1 Análisis Espectral Nacional

La figura 3.1 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	2.11	Carpeta Asfáltica	15	2627
Distribución Vehicular				Base Granular	22	375
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	28	75
10147	72.30	2.70	25.00	Espesor Total	65	

Figura 3.1 Insumos del análisis nacional

El análisis espectral nacional muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 10.5 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 7.3 años, con alta sobre carga se obtuvieron 3.3 años y para el caso más crítico, el de muy alta sobre carga, se obtuvieron 1.5 años de vida remanente. La figura 3.2 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.

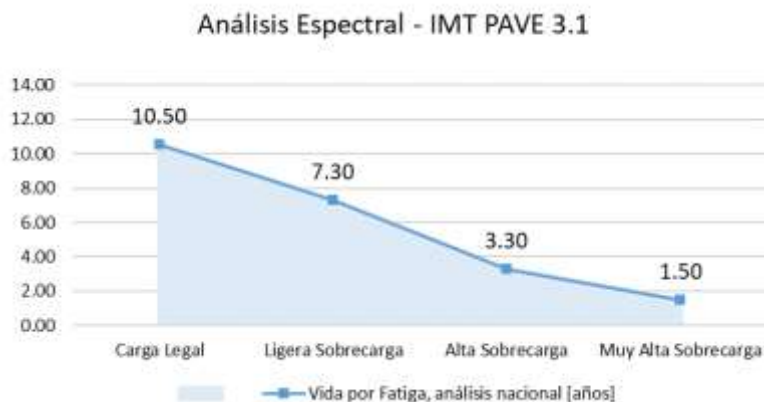


Figura 3.2 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Análisis Nacional

### 3.2 Análisis Espectral del corredor México Nogales

La figura 3.3 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.07	Carpeta Asfáltica	14	2621
Distribución Vehicular				Base Granular	20	334
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	30	75
13725	76.90	3.50	19.60	Espesor Total	64	

Figura 3.3 Insumos del corredor México Nogales

El Análisis Espectral del corredor México Nogales muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 4.1 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 2.9 años, con alta sobre carga se obtuvo 1.40 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 0.0 años de vida. La figura 3.4 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.

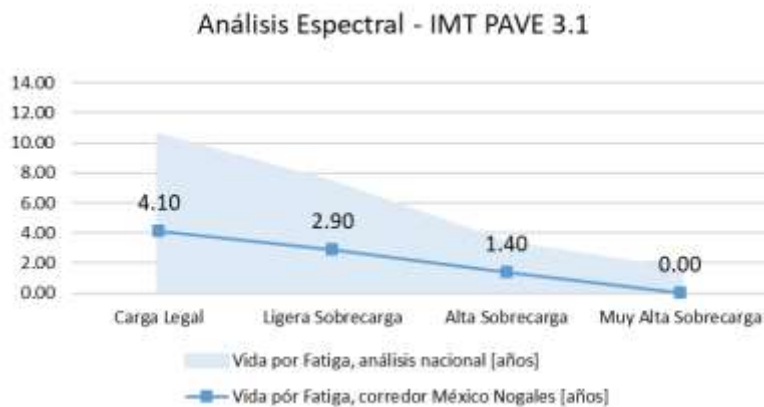


Figura 3.4 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor México Nogales

### 3.3 Análisis Espectral del corredor México Nuevo Laredo

La figura 3.5 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.07	Carpeta Asfáltica	18	3201
Distribución Vehicular				Base Granular	23	480
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	27	91
15509	45.20	4.30	50.50	Espesor Total	68	

Figura 3.5 Insumos del corredor México Nuevo Laredo

El Análisis Espectral del corredor México Nuevo Laredo muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 10.5 años, con alta sobre carga se obtuvo 4.0 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 1.7 años de vida. La figura 3.6 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple con carga legal el horizonte de proyecto.



Figura 3.6 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor México Nuevo Laredo

### 3.4 Análisis Espectral del corredor Querétaro Cd. Juárez

La figura 3.7 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.30	Carpeta Asfáltica	16	2856
Distribución Vehicular				Base Granular	22	349
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	29	68
14386	75.90	3.30	20.80	Espesor Total	67	

Figura 3.7 Insumos del corredor Querétaro Cd. Juárez

El Análisis Espectral del corredor Querétaro Cd. Juárez muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 9.1 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 6.4 años, con alta sobre carga se obtuvo 2.9 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 1.2 años de vida. La figura 3.8 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.

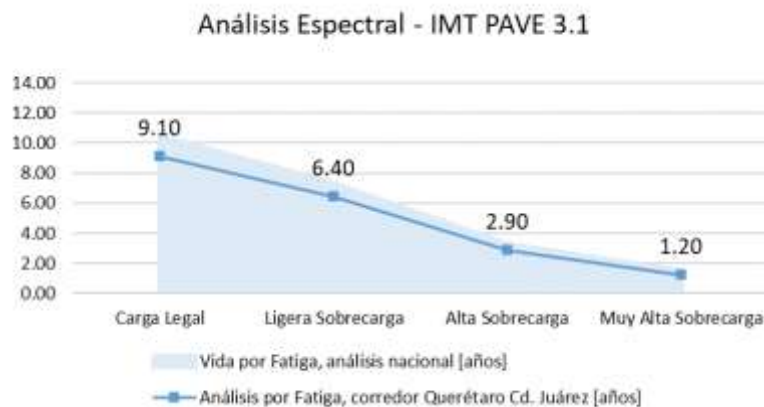


Figura 3.8 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Querétaro Cd. Juárez

### 3.5 Análisis Espectral del corredor Veracruz Monterrey

La figura 3.9 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.30	Carpeta Asfáltica	16	2461
Distribución Vehicular				Base Granular	24	401
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	30	83
8034	67.60	4.00	28.40	Espesor Total	70	

Figura 3.9 Insumos del corredor Veracruz Monterrey

El Análisis Espectral del corredor Veracruz Monterrey muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 12.7 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 8.5 años, con alta sobre carga se obtuvo 2.9 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 1.2 años de vida. La figura 3.10 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.



Figura 3.10 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Veracruz Monterrey

### 3.6 Análisis Espectral del corredor México Puebla Progreso

La figura 3.11 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	2.07	Carpeta Asfáltica	12	2661
Distribución Vehicular				Base Granular	20	415
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	28	78
8999	79.80	4.80	15.40	Espesor Total	60	

Figura 3.11 Insumos del corredor México Puebla Progreso

El Análisis Espectral del corredor México Puebla Progreso muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 9.0 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 6.6 años, con alta sobre carga se obtuvo 3.3 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 1.6 años de vida. La figura 3.12 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.



Figura 3.12 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor México Puebla Progreso

### 3.7 Análisis Espectral del corredor Mazatlán Matamoros

La figura 3.13 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	3.75	Carpeta Asfáltica	15	2630
Distribución Vehicular				Base Granular	22	404
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	31	87
9307	28.60	5.40	66.00	Espesor Total	68	

Figura 3.13 Estructura propuesta del corredor Mazatlán Matamoros

El Análisis Espectral del corredor Mazatlán Matamoros muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 4.0 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 2.8 años, con alta sobre carga se obtuvo 1.1 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 0.0 años de vida. La figura 3.14 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.



Figura 3.14 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Mazatlán Matamoros

### 3.8 Análisis Espectral del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo

La figura 3.15 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	5.33	Carpeta Asfáltica	14	2446
Distribución Vehicular				Base Asfáltica	16	1313
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subbase	20	223
6983	83.30	1.90	14.80	Subrasante	24	69
				Espesor Total	74	

Figura 3.15 Insumos del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo

El Análisis Espectral del corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se mantiene en 15.0 años, con alta sobre carga se obtuvo 15.0 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo también 15.0 años de vida. La figura 3.16 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en todos los casos el horizonte de proyecto.



Figura 3.16 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Puebla Oaxaca Ciudad Hidalgo

### 3.9 Análisis Espectral del corredor Manzanillo Tampico

La figura 3.17 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	6.90	Carpeta Asfáltica	16	2711
Distribución Vehicular				Base Granular	19	405
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	26	86
9454	78.80	2.20	19.00	Espesor Total	61	

Figura 3.17 Insumos del corredor Manzanillo Tampico

El Análisis Espectral del corredor Manzanillo Tampico muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 11.8 años, con alta sobre carga se obtuvo 5.2 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 2.3 años de vida. La figura 3.18 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en el caso de carga legal el horizonte de proyecto.

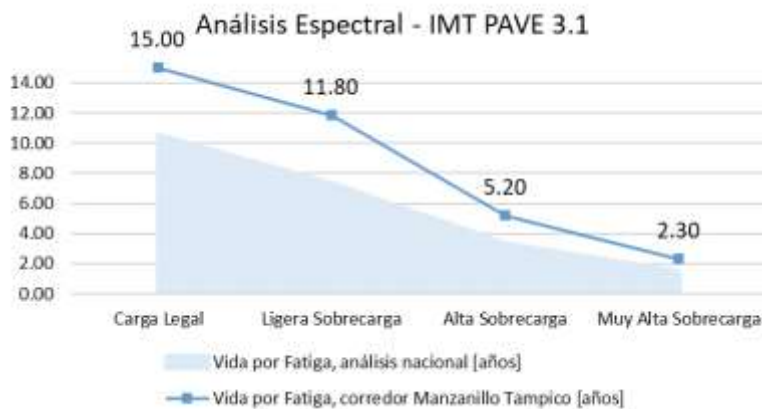


Figura 3.18 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Manzanillo Tampico

### 3.10 Análisis Espectral del corredor Circuito Transísmico

La figura 3.19 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	7.41	Carpeta Asfáltica	12	2752
Distribución Vehicular				Base Asfáltica	13	1357
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subbase	20	225
6099	79.10	2.10	18.80	Subrasante	26	68
				Espesor Total	71	

Figura 3.19 Estructura propuesta del corredor Circuito Transísmico

El Análisis Espectral del corredor Circuito Transísmico muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se mantiene en 15.0 años, con alta sobre carga se obtuvo 15.0 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo también 15.0 años de vida. La figura 3.20 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en todos los casos el horizonte de proyecto.



Figura 3.20 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Circuito Transísmico

### 3.11 Análisis Espectral del corredor Acapulco Tuxpan

La figura 3.21 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	6.00	Carpeta Asfáltica	21	2427
Distribución Vehicular				Base Granular	21	349
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	24	66
10484	78.90	2.90	18.20	Espesor Total	66	

Figura 3.21 Insumos del corredor Acapulco Tuxpan

El Análisis Espectral del corredor Acapulco Tuxpan muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se mantiene en 15.0 años, con alta sobre carga se obtuvo 13.2 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 5.5 años de vida. La figura 3.22 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en el caso de carga legal y ligera sobrecarga el horizonte de proyecto.



Figura 3.22 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Acapulco Tuxpan

### 3.12 Análisis Espectral del corredor Acapulco Veracruz

La figura 3.23 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	2.63	Carpeta Asfáltica	16	2309
Distribución Vehicular				Base Granular	18	322
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	23	65
10073	82.20	2.90	18.20	Espesor Total	57	

Figura 3.23 Insumos del corredor Acapulco Veracruz

El Análisis Espectral del corredor Acapulco Veracruz muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 11.5 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 8.1 años, con alta sobre carga se obtuvo 3.7 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 1.6 años de vida. La figura 3.24 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.



Figura 3.24 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Acapulco Veracruz

### 3.13 Análisis Espectral del corredor del Altiplano

La figura 3.25 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	6.63	Carpeta Asfáltica	17	2573
Distribución Vehicular				Base Granular	20	253
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	24	59
12866	79.50	2.50	18.00	Espesor Total	61	

Figura 3.25 Insumos propuesta del corredor del Altiplano

El Análisis Espectral del corredor del Altiplano muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 5.5 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 3.5 años, con alta sobre carga se obtuvo 1.4 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 0.0 años de vida. La figura 3.26 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.

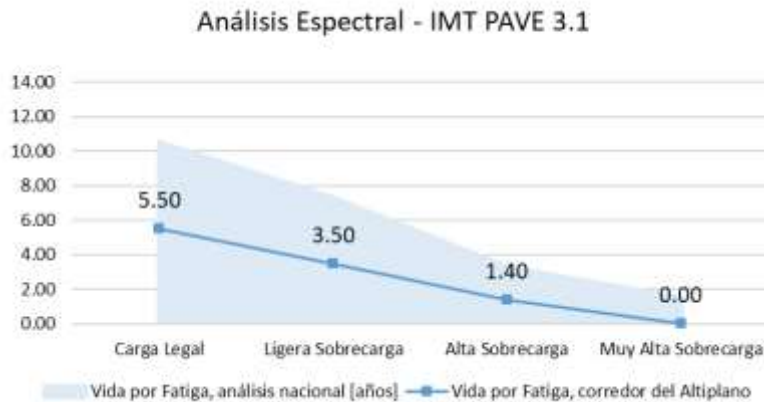


Figura 3.26 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor del Altiplano

### 3.14 Análisis Espectral del corredor Transpeninsular de Baja California

La figura 3.27 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.55	Carpeta Asfáltica	11	3341
Distribución Vehicular				Base Granular	20	360
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	29	72
7405	84.40	1.10	14.50	Espesor Total	60	

Figura 3.27 Insumos del corredor Transpeninsular de Baja California

El Análisis Espectral del corredor Transpeninsular de Baja California muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 5.0 años, al aumentar ligeramente la carga se ve reducido a 3.7 años, con alta sobre carga se obtuvo 1.8 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 0.0 años de vida. La figura 3.28 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado no se cumple en ningún caso el horizonte de proyecto.



Figura 3.28 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Transpeninsular de Baja California

### 3.15 Análisis Espectral del corredor Peninsular de Yucatán

La figura 3.29 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
0.5	1.0	15	2.07	Carpeta Asfáltica	13	3296
Distribución Vehicular				Base Granular	20	432
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subrasante	27	78
8543	79.80	4.80	15.40	Espesor Total	60	

Figura 3.29 Insumos del corredor Peninsular de Yucatán

El Análisis Espectral del corredor Peninsular de Yucatán muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se mantiene en 15.0 años, con alta sobre carga se obtuvo, igualmente, 15.0 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo 7.1 años de vida. La figura 3.30 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en el caso de carga legal, ligera sobrecarga y alta sobrecarga el horizonte de proyecto.



Figura 3.30 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor Peninsular de Yucatán

### 3.16 Análisis Espectral del corredor del Pacífico

La figura 3.31 muestra las características del tránsito y la sección de pavimento propuesta, insumos utilizados para el análisis espectral de manera simplificada.

Tránsito				Estructura Propuesta		
Factores de Distribución		Horizonte de Diseño		Capa	Espesor [cm]	E [Mpa]
Direccional	Carril	Periodo [años]	Tasa [%]			
1.0	1.0	15	4.92	Carpeta Asfáltica	13	2570
Distribución Vehicular				Base Asfáltica	17	1290
TDPA	A [%]	B [%]	C [%]	Subbase	19	227
9250	62.50	6.10	31.40	Subrasante	26	69
				Espesor Total	75	

Figura 3.31 Insumos del corredor Peninsular de Yucatán

El Análisis Espectral del corredor del Pacífico muestra que para la carga legal se tiene una vida remanente de 15.0 años, al aumentar ligeramente la carga se mantiene en 15.0 años, con alta sobre carga se obtuvo 15.0 años y para el caso más crítico, muy alta sobre carga, se obtuvo también 15.0 años de vida. La figura 3.32 muestra estos resultados de manera gráfica. Con la estructura propuesta y el tránsito aforado se cumple en todos los casos el horizonte de proyecto.

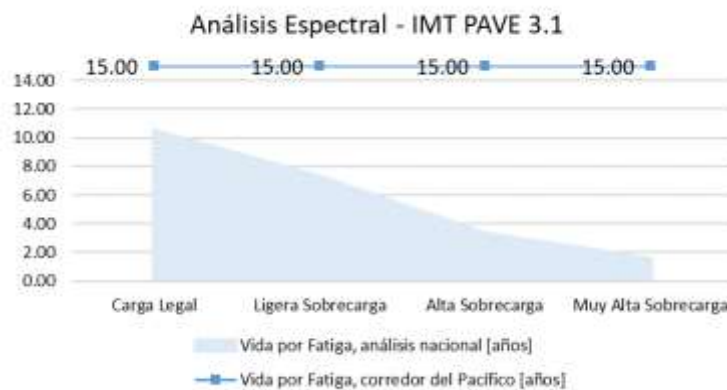


Figura 3.32 Análisis Espectral para Vida por Fatiga en años, Corredor del Pacífico

### **3.17 Análisis Estadístico de los resultados**

Una vez que se obtuvieron todos los resultados de los análisis espectrales para cada corredor fue necesario evaluarlos y obtener parámetros de referencia que consideran el análisis nacional y los análisis para cada corredor.

En este análisis se desprecian los corredores con estructuras de 4 capas, pues en todos los casos se obtuvo un resultado de 15 años o más de vida remanente, estos corredores son el Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transístmico y el corredor de Pacífico.

En el caso de las estructuras propuestas de 3 capas para los corredores se tiene que el espectro de carga legal se tiene una vida remanente mínima de 4.10 años, máximo de 15 años y promedio de 7.90 años.

Para el espectro de carga con ligera sobrecarga se tiene una vida remanente mínima de 2.8 años, máxima de 15 años y promedio de 9.19 años.

Para el espectro de carga con alta sobrecarga se tiene una vida remanente mínima de 1.10 años, máxima de 15 años y promedio de 4.72 años.

Para el espectro de carga con muy alta sobrecarga se tiene una vida remanente mínima de 1.20 años, máxima de 15 años y promedio de 7.10 años

La figura 3.33 muestra el análisis estadístico de los resultados promedio para los distintos espectros de carga aplicados en el análisis nacional y todos los corredores de 3 capas.

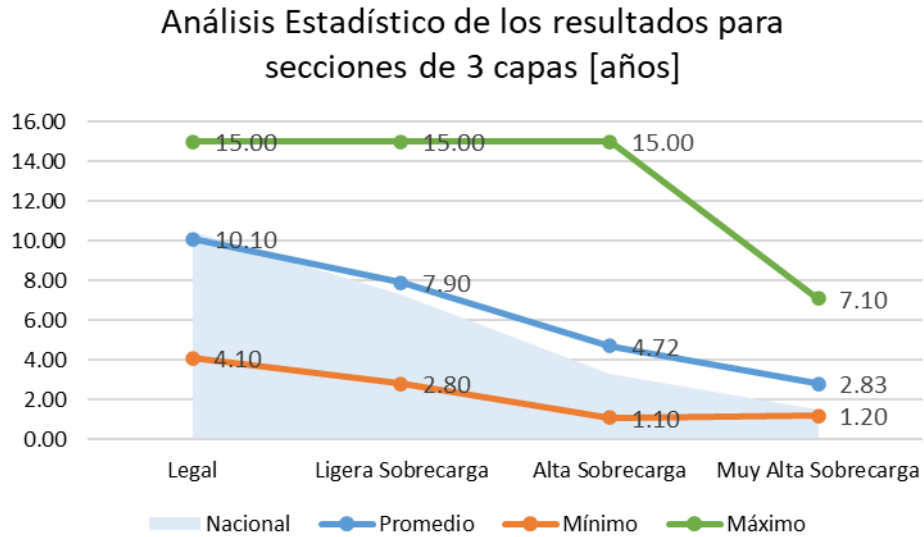


Figura 3.33 Análisis Estadístico de los Resultados para secciones de 3 capas, en años.

De los resultados obtenidos se observa que los corredores con estructuras de pavimento propuestas de cuatro capas (carpeta asfáltica, base asfáltica, subbase y subrasante), que son, el de Puebla Hidalgo Cd. Juárez, Circuito Transístmico y el del Pacífico, cuentan con una valoración de 15 años de vida remanente para todos los niveles de carga, por el contrario, los corredores con estructuras de pavimento propuestas de 3 capas (carpeta asfáltica, base granular y subrasante) tienen una significativa variación en la vida remanente por fatiga en función del nivel de sobrecarga con el que se modele. El caso más crítico lo presenta el corredor México Nogales con tan solo 4.1 años de vida remanente por fatiga en el caso de carga legal, 2.9 años con ligera sobrecarga, 1.4 años con alta sobrecarga y menor a uno con muy alta sobre carga. Lo sigue el corredor Mazatlán Matamoros con 4.30 años de vida remanente en el caso de carga legal, 2.8 años para ligera sobre carga, 1.1 años para alta sobre carga y menor a 1 si se presentara una condición de muy alta sobrecarga, el tercer corredor con los resultados más críticos es el corredor Transpeninsular de Baja California ya que para el caso de carga legal se tienen 5 años de vida remanente, con ligera sobrecarga disminuye a 3.7 años, con alta sobrecarga 1.8 años y un valor menor a un año en el escenario de muy alta sobrecarga. El corredor del Altiplano presenta

condiciones similares con una valoración de 5.5 años de vida remanente por fatiga con carga legal, 3.5 años con ligera sobrecarga, 1.4 años con alta sobre carga y menos de un año con un tránsito de muy alta sobrecarga. El quinto corredor más crítico es el de México Puebla Progreso pues para una condición de tránsito legal presenta una vida remanente por fatiga de 9 años, 6.6 años con ligera sobrecarga, 3.3 años con alta sobre carga y solo 1.6 años con una condición de muy alta sobrecarga; una condición similar presenta el corredor de Querétaro Cd. Juárez, en sexto lugar, con una vida remanente por fatiga en el caso de espectros de carga legal de 9.1 años, 6.4 años con ligera sobrecarga, 2.9 años con alta sobrecarga y 1.2 años con muy alta sobrecarga. El análisis nacional se encuentra a la mitad de la evaluación con 10.5 años de vida remanente con carga legal, 7.3 años con ligera sobrecarga, 3.3 años con alta sobrecarga y 1.5 años con muy alta sobrecarga. El corredor Acapulco Veracruz presenta una significativa mejoría respecto a los casos más críticos, pues conserva 11.5 años de vida remanente si la condición de espectros de carga se mantiene legal, disminuye a 8.1 años con ligera sobrecarga, 3.7 años con alta sobrecarga y 1.6 años con muy alta sobrecarga. El corredor Veracruz Monterrey presenta 12.7 años de vida para el caso legal, 8.5 años con ligera sobrecarga, 3.6 años con alta sobrecarga y 1.6 años con muy alta sobrecarga. En adelante se describen los corredores con secciones de tres capas que obtuvieron los mejores resultados, siendo el corredor México Nuevo Laredo el que continua pues obtuvo 15 años de vida remanente para la condición de carga legal, 10.5 años con ligera sobrecarga, 4.0 años con alta sobrecarga y 1.7 años con muy alta sobre carga. El corredor Manzanillo Tampico presenta 15 años para carga legal, 11.8 años para ligera sobrecarga, 5.2 años para alta sobrecarga y 2.3 años para muy alta sobrecarga. El corredor Acapulco Tuxpan presenta 15 años de vida remanente tanto para condición legal como ligera sobrecarga, 13.2 años para alta sobrecarga y 5.5 años para muy alta sobrecarga. El corredor Peninsular de Yucatán obtuvo la mejor calificación de los corredores con estructuras de pavimento propuesto de tres capas pues tanto para carga legal, como ligera sobrecarga y alta sobrecarga se pronostica una vida remanente por fatiga de 15 años, la única variación se presenta en el escenario de

muy alta sobrecarga pues se obtienen 7.1 años. La figura 3.34 muestra de manera gráfica la comparación de la vida remanente por fatiga para cada corredor con estructuras de pavimento propuestas de tres capas y en los escenarios de espectros de carga legal, ligera sobrecarga, alta sobrecarga y muy alta sobrecarga, se observa la disminución de vida en función del nivel de carga y sobrecarga con el que se modele. En la figura se desprecian los corredores de estructuras de pavimento propuestas de cuatro capas pues no presentaron ninguna variación y se mantuvieron con un pronóstico de vida remanente de 15 años o más para todos los posibles escenarios.

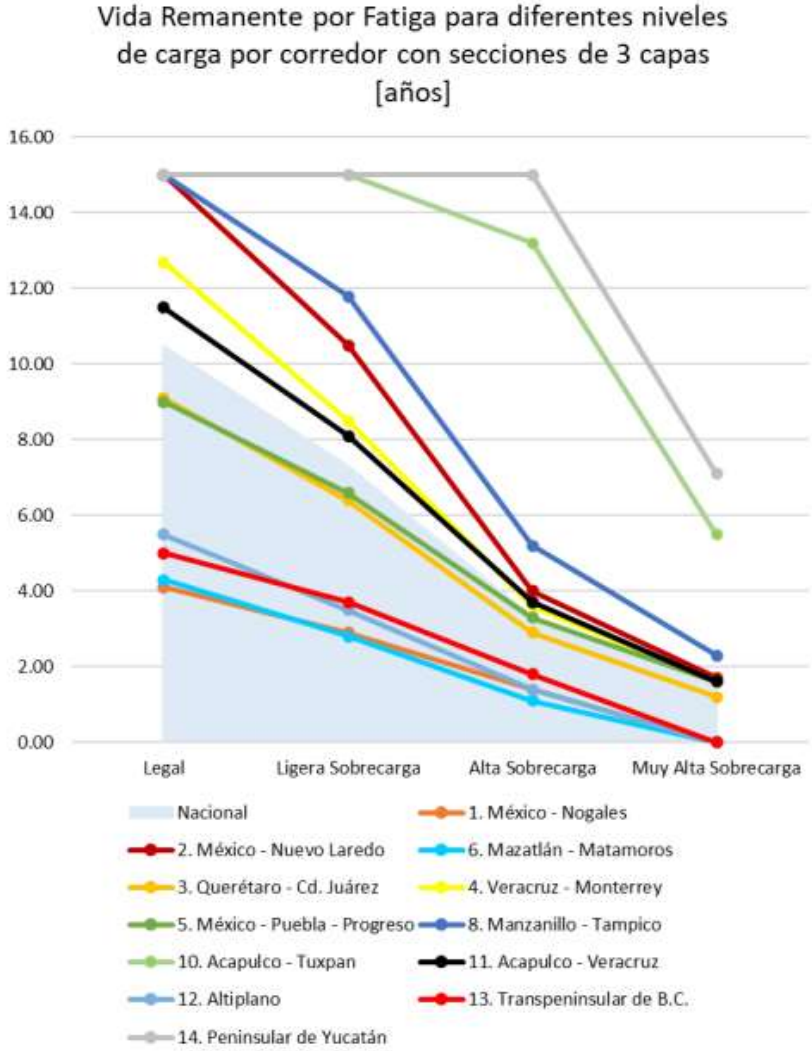


Figura 3.34 Variación de la vida remanente por fatiga para diferentes niveles de carga por corredor con secciones de pavimento de 3 capas

### **3.18 Conclusiones del Capítulo 3**

El análisis espectral considera dos tipos de daño: Fatiga y deformación, asociados a agrietamientos y compresión respectivamente, presentes en las estructuras de pavimento y terracerías por acción del tránsito vehicular. Por ello, es fundamental caracterizar el tránsito a partir de estaciones de pesaje dinámico, pues con ellas se determinan no solamente los tipos de eje y la velocidad a la que circulan los vehículos, sino también su peso real. Con la correcta caracterización del tránsito es posible calcular espectros de carga. El inverso del cociente de daño,  $D$ , definido por Miner (1945) devuelve el tiempo, en años, en que una estructura de pavimento alcanza las repeticiones admisibles de tránsito y que podrá ser comparado con el tiempo de vida de una estructura. El software IMT PAVE funciona utilizando el método de Odermark (1949) con el que se puede proponer una sección homogénea equivalente de las capas del pavimento, este procedimiento está basado en la suposición de que los esfuerzos y deformaciones por debajo de una capa dependen de la rigidez de esa capa solamente. Si el espesor, el módulo y la relación de Poisson de una capa son cambiados, pero la rigidez permanece sin cambiar, los esfuerzos y deformaciones por debajo de la capa deben también permanecer sin cambiar. Por último, las deformaciones unitarias se basan en la teoría de Burmister (1943) basada en la distribución de esfuerzos y desplazamientos en un sistema de dos capas con comportamientos homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos. La primera capa se supone infinita horizontalmente, pero con un espesor,  $h$ , definido; La segunda capa se asume como infinita. Se supone que entre las dos capas hay un contacto continuo. El software IMT PAVE provee en su programación resoluciones matemáticas muy aproximadas de la ecuación diferencial para sistemas multicapa analizadas y resueltas por Burmister.

Con la información de tránsito y las secciones estructurales propuestas en el capítulo II fue posible realizar un análisis espectral con el software IMT – PAVE 3.1.

El análisis espectral considera determinar la vida remanente por fatiga y por deformación empleando espectros de carga legal y diferentes niveles de sobrecarga. En todos los casos se consideró una vida de proyecto de 15 años.

Se despreció el análisis por deformación pues se asume que las estructuras analizadas no son nuevas y se encuentran actualmente deformadas.

Los resultados obtenidos para el análisis espectral por fatiga de los corredores que tienen estructuras de pavimento de 3 capas (carpeta asfáltica, base granular y subrasante) muestran significativa variación entre la carga legal y la muy alta sobre carga. Se observa que los corredores que están formados por cuatro capas (carpeta asfáltica, base asfáltica, subbase y subrasante) cumplieron para todos los espectros de carga con la vida de proyecto. El anexo 4 muestra el resumen del análisis espectral completo.

La vida remanente promedio por fatiga para el espectro de carga legal es de 11.04 años, para ligera sobrecarga es de 9.19 años, para alta sobrecarga 6.56 años y para muy alta sobrecarga 5.76 años, por lo tanto, regular estrictamente los vehículos de carga que transitan por los corredores de México impacta significativamente en los años de servicio que una estructura de pavimento puede ofrecer.

El caso más crítico lo presenta el corredor México Nogales con tan solo 4.1 años de vida remanente por fatiga en el caso de carga legal, 2.9 años con ligera sobrecarga, 1.4 años con alta sobrecarga y menor a uno con muy alta sobre carga. Se observa la variación de años de vida remanente en función del espectro de carga con el que se modele.

Para zonas de alto tránsito vehicular pesado se recomienda utilizar estructuras de pavimento de 4 capas, como las descritas en los corredores Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transistmico y corredor del pacífico, pues son las que obtuvieron los mejores resultados presentando 15 años de vida remanente para todas las condiciones de carga.

Es posible diseñar estructuras de pavimento flexible que trabajen mecánicamente de forma adecuada aceptando condiciones extremas de tránsito para periodos de diseño aceptables. Compete al diseñador proponer estructuras de pavimento que consideren los distintos escenarios de carga y a la autoridad correspondiente actualizar y regular la carga que circula por los corredores carreteros de México.

## **Capítulo 4. Conclusiones**

El autotransporte por carretera predomina en nuestro país, año con año se suman kilómetros pavimentados de nuevos proyectos como libramientos y ampliaciones a nuestra red carretera. Estos proyectos consideran en el diseño de pavimento, de manera general, una vida útil o de servicio de 15 años en promedio. Nuestra infraestructura carretera es uno de los mayores activos con los que cuenta la nación y requiere de programas de conservación que garanticen un nivel de servicio adecuado, costos de operación moderados y seguridad para el usuario. Tomar decisiones asertivas sobre la destinación de recursos para la preservación está en función del soporte técnico, mismo que deberá ser lo más preciso posible. Los expertos técnicos tienen el reto de rediseñar las estructuras existentes con metodologías que superen a las utilizadas en el diseño original, tanto en proyecto geométrico como los espesores de las capas del pavimento, analizando las condiciones actuales del camino y buscando alternativas de solución que provean nuevamente 15 años de vida antes de llegar a pronosticar la demolición y reconstrucción de un tramo

En la red carretera pavimentada y libre de cuota se ha identificado que contamos con 15 corredores troncales que conectan de manera longitudinal y transversal capitales, ciudades y centros generadores estratégicos de nuestro país como puertos, aeropuertos y zonas industriales, entre otros. La Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T. realiza campañas anuales de auscultación para determinar el estado actual de estos corredores, la presente investigación se realizó con la información del 2018 y tiene por objetivo principal determinar la vida remanente de los corredores carreteros utilizando una metodología mecanicista para pavimentos asfálticos desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte.

El pavimento es una estructura multicapa de espesores y materiales compactados variables, que se construyen dentro de un marco normativo, que deben soportar principalmente el tránsito vehicular y las condiciones climatológicas del sitio donde se encuentra. El objetivo principal del diseño de un pavimento es el de proveer al usuario un tránsito seguro, cómodo y eficiente a lo largo de la vida útil o de diseño.

Las bases teóricas del comportamiento mecánico de las capas del pavimento están basadas en las teorías utilizadas en la mecánica de suelos. A lo largo de la vida de proyecto, el pavimento experimentará distintos tipos de respuestas mecánicas en cada una de las capas, por lo que comprender las propiedades mecánicas de los distintos materiales que conforman las capas del pavimento es fundamental para diseñar de manera óptima estructuras nuevas, así como, para determinar su vida remanente.

A pesar de que tanto los materiales a emplear en una estructura de pavimento como el tránsito pueden ser muy variados, contamos con un marco normativo de referencia para asegurar la calidad y durabilidad de los proyectos carreteros.

Caracterizar el tránsito es un aspecto fundamental en el diseño de pavimento, por ello, se propone que la mejor manera de hacerlo es a través de estaciones de pesaje dinámico, con las cuales es posible obtener el tipo de vehículo y su peso real. Con estos datos es posible generar la distribución de carga de un grupo de ejes durante un periodo de tiempo, conocidos como espectros de carga.

La auscultación de pavimentos para rehabilitación, reconstrucción o modernización de tramos carreteros puede ser realizada mediante pruebas destructivas mediante la excavación de pozos a cielo abierto o mediante pruebas no destructivas con equipos para medir las deflexiones en la superficie del pavimento, de una u otra forma se busca obtener el módulo de elasticidad de las capas para el análisis de vida remanente.

Determinar la vida remanente de un pavimento significa calcular el tiempo que tiene la estructura antes de que sea necesaria una sobre capa, a pesar de que

existen diferentes metodologías se reconoce que el método de espectros de daño definido por Miner en 1945 considera deterioros por fatiga y por deformación y el método mecanicista por excelencia.

El IMT – PAVE es una herramienta informática desarrollada por el Instituto Mexicano del Transporte para el diseño de pavimentos con enfoque mecanicista que considera para el análisis de pavimentos los espectros de carga y daño.

Se han identificado en nuestro país una red de 15 corredores carreteros troncales, mismos que enlazan zonas metropolitanas importantes y crea nodos de producción estratégicos. La S.C.T. a través de la Dirección General de Servicios Técnicos monitorea y recaba información sobre el estado anual de los mismos.

Contando con la información del año 2018 fue posible identificar un total 1417 secciones de pavimento diferentes, así como un tránsito distinto en cada registro. De esta muestra se realizó un análisis estadístico tanto a nivel nacional como por cada corredor.

El pavimento de tipo flexible es el más utilizado en todos los corredores, el espesor mínimo detectado es de 11 cm, el máximo de 21 cm y el promedio de 15 cm, el módulo de elasticidad de la carpeta tuvo un valor mínimo de 2309 Mpa, máximo de 3341 Mpa y promedio de 2718 Mpa.

La dispersión tan grande en los diferentes espesores y módulos de elasticidad permite observar que algunos tipos de estructuras son probables sobre carpetas de distintos espesores y módulos elásticos que fueron reportadas como una carpeta única con un módulo de elasticidad único.

La base granular es la más utilizada a nivel nacional y en 12 de los 15 corredores, con un espesor mínimo de 18 cm, máximo de 24 cm y promedio de 21 cm. El módulo de elasticidad de la base granular se estimó con un mínimo de 253 Mpa, un máximo de 480 Mpa y un promedio de 375 Mpa, estos valores significan que la base hidráulica de tipo granular tiene una dispersión menor respecto a la carpeta asfáltica. Los valores más altos de espesor y módulo elástico permiten observar

que algunas bases granulares son probables sobre encarpetamientos como el caso de la carpeta asfáltica.

En 3 de los 15 corredores, el de Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transístmico y el corredor del Pacífico, se identificó una estructura que en lugar de base granular cuenta con una base asfáltica soportada por una sub base granular. El espesor mínimo de la base asfáltica en estos corredores es de 13 cm, máximo de 17 cm y promedio de 15 cm, con módulo de elasticidad mínimo de 1290 Mpa, máximo de 1357 Mpa y promedio de 1320 Mpa. La subbase que la soporta tiene un espesor mínimo de 19 cm, máximo de 20 cm y promedio de 20 cm, ya redondeados, el módulo de elasticidad de la sub base es mínimo de 223 Mpa, máximo de 227 Mpa y promedio de 225 Mpa. Se observa que la dispersión de estos valores es mucho menor.

La dispersión de los módulos elásticos de los materiales para cada capa fue comparada contra valores típicos de referencia proporcionados por el Instituto Mexicano del Transporte. De manera general, se observa que los módulos elásticos utilizados se encuentran dentro de los parámetros de referencia indicados con excepción de la base granular que muestra una alta dispersión, con valores por debajo del mínimo, cercanos al valor típico y máximo, sin embargo, algunos valores promedio utilizados para la base granular se observan por encima de los valores de referencia.

Tanto en el análisis nacional como los análisis para cada corredor se detectó al fondo de la estructura una capa Subrasante con espesor mínimo de 23 cm, máximo de 31 cm y promedio de 27 cm, con un módulo de elasticidad mínimo de 59 Mpa, máximo de 91 Mpa y promedio de 74 Mpa.

En el anexo 2 se presenta el resumen de las secciones propuestas con sus espesores y módulos de elasticidad.

El análisis de tránsito se realizó contabilizando todos los TDPA registrados, una vez que se tuvo un valor promedio de TDPA para el análisis nacional y para cada corredor se determinó buscar el aforo vehicular real que fuera más aproximado al

TDPA promedio, ya que estos aforos incluyen en su análisis los factores de distribución, la tasa de crecimiento y la distribución vehicular reales.

De los vehículos pesados, los C, el tipo T3-S2 es el vehículo más utilizado con un 9.35% promedio, seguido del C2 con 7.52% y T3-S2-R4 con 2.58%. En algunos corredores se observa que predomina el T3-S2-R4 alcanzando un máximo de 7.30% de utilización como es el caso del corredor México Nuevo Laredo

El factor direccional es de 1.0 en todos los corredores a excepción del corredor México Puebla Progreso y el corredor Peninsular de Yucatán que fue de 0.5 y el factor de carril fue 1.0 en todos los análisis.

La tasa de crecimiento es mínima de 2.07%, máximo de 7.41% y promedio de 4.44%

El TDPA es mínimo de 6099, máximo de 15509 y promedio de 10079.

En el anexo 3 se presenta el resumen del tránsito que incluye los factores de distribución, horizonte de diseño, TDPA y distribución vehicular de cada corredor y análisis nacional.

Realizar un análisis nacional con todos los datos nos muestra un panorama general, el análisis por corredor nos permite observar que en ciertas regiones predomina una tendencia.

El análisis espectral considera dos tipos de daño: Fatiga y deformación, asociados a agrietamientos y compresión respectivamente, presentes en las estructuras de pavimento y terracerías por acción del tránsito vehicular. Por ello, es fundamental caracterizar el tránsito a partir de estaciones de pesaje dinámico, pues con ellas se determinan no solamente los tipos de eje y la velocidad a la que circulan los vehículos, sino también su peso real. Con la correcta caracterización del tránsito es posible calcular espectros de carga. El inverso del cociente de daño,  $D$ , definido por Miner (1945) devuelve el tiempo, en años, en que una estructura de pavimento alcanza las repeticiones admisibles de tránsito y que podrá ser comparado con el tiempo de vida de una estructura. El software IMT PAVE funciona utilizando el método de Odermark (1949) con el que se puede proponer una sección

homogénea equivalente de las capas del pavimento, este procedimiento está basado en la suposición de que los esfuerzos y deformaciones por debajo de una capa dependen de la rigidez de esa capa solamente. Si el espesor, el módulo y la relación de Poisson de una capa son cambiados, pero la rigidez permanece sin cambiar, los esfuerzos y deformaciones por debajo de la capa deben también permanecer sin cambiar. Por último, las deformaciones unitarias se basan en la teoría de Burmister (1943) basada en la distribución de esfuerzos y desplazamientos en un sistema de dos capas con comportamientos homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos. La primera capa se supone infinita horizontalmente, pero con un espesor,  $h$ , definido; La segunda capa se asume como infinita. Se supone que entre las dos capas hay un contacto continuo. El software IMT PAVE provee en su programación resoluciones matemáticas muy aproximadas de la ecuación diferencial para sistemas multicapa analizadas y resueltas por Burmister.

Con la información de tránsito y las secciones estructurales propuestas en el capítulo II fue posible realizar un análisis espectral con el software IMT – PAVE 3.1. El análisis espectral considera determinar la vida remanente por fatiga y por deformación empleando espectros de carga legal y diferentes niveles de sobrecarga. En todos los casos se consideró una vida de proyecto de 15 años. Se despreció el análisis por deformación pues se asume que las estructuras analizadas no son nuevas y se encuentran actualmente deformadas.

Los resultados obtenidos para el análisis espectral por fatiga de los corredores que tienen estructuras de pavimento de 3 capas (carpeta asfáltica, base granular y subrasante) muestran significativa variación entre la carga legal y la muy alta sobre carga. Se observa que los corredores que están formados por cuatro capas (carpeta asfáltica, base asfáltica, subbase y subrasante) cumplieron para todos los espectros de carga con la vida de proyecto. El anexo 4 muestra el resumen del análisis espectral completo.

La vida remanente promedio por fatiga para el espectro de carga legal es de 11.04 años, para ligera sobrecarga es de 9.19 años, para alta sobrecarga 6.56 años y

para muy alta sobrecarga 5.76 años, por lo tanto, regular estrictamente los vehículos de carga que transitan por los corredores de México impacta significativamente en los años de servicio que una estructura de pavimento puede ofrecer.

El caso más crítico lo presenta el corredor México Nogales con tan solo 4.1 años de vida remanente por fatiga en el caso de carga legal, 2.9 años con ligera sobrecarga, 1.4 años con alta sobrecarga y menor a uno con muy alta sobre carga. Se observa la variación de años de vida remanente en función del espectro de carga con el que se modele.

Para zonas de alto tránsito vehicular pesado se recomienda utilizar estructuras de pavimento de 4 capas, como las descritas en los corredores Puebla Oaxaca Cd. Hidalgo, Circuito Transístmico y corredor del pacífico, pues son las que obtuvieron los mejores resultados presentando 15 años de vida remanente para todas las condiciones de carga.

Es posible diseñar estructuras de pavimento flexible que trabajen mecánicamente de forma adecuada aceptando condiciones extremas de tránsito para periodos de diseño aceptables. Compete al diseñador proponer estructuras de pavimento que consideren los distintos escenarios de carga y a la autoridad correspondiente actualizar y regular la carga que circula por los corredores carreteros de México.

Resulta importante analizar la información para cada corredor por separado pues, aunque el análisis nacional es una referencia general hay aspectos particulares de cada corredor que podrían ser tomados como minoría y a su vez despreciados.

Fueron realizadas visitas de campo a tramos carreteros cercanos para la revisión de la presente información que se presentan en los anexos 5 y 6, concluyendo que la información proporcionada por la S.C.T. tiene concordancia con la condición estructural observada.

## **Anexo 1. Modelos de Deterioro empírico-mecanicistas**

### 1. Método del Instituto del Asfalto

El instituto del Asfalto (1983) desarrolló un método para determinar la vida remanente de un pavimento existente y lo define como “*el tiempo restante antes de que una sobre capa sea necesaria*” (Huang, 2004). Para calcularla es necesario:

1. Determinar la deflexión representativa  $\delta_{rrd}$  en pulgadas.
2. Con la ecuación A1.1 se determina la vida remanente (ESAL)

$$(ESAL)_r = \left(\frac{1.0363}{\delta_{rrd}}\right)^{4.1017} \quad \text{Ec. A1.1}$$

3. Estimar los ESALS de diseño para el año en curso  $(ESALS)_0$  y determinar el factor de crecimiento con la ecuación A1.2:

$$\text{Factor de Crecimiento} = \frac{(ESAL)_r}{(ESAL)_0} \quad \text{Ec. A1.2}$$

4. Estimar la tasa de crecimiento de tráfico en porcentaje y encontrar el periodo de diseño correspondiente al factor de crecimiento de la figura A1.1. El periodo de diseño es el estimado número de años antes de que una sobre capa sea necesaria.

Design period (years)	Annual growth rate (%)							
	No growth	2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Source: After AI (1981a).

Figura A1.1 Tasa de crecimiento anual. Fuente: (Huang, 2004)

## 2. Método de la deflexión Representativa

En este método se deben medir al menos 10 deflexiones para cada sección de análisis y un mínimo de 13 mediciones por kilómetro, las mediciones se realizan con la viga Benkelman y deberán registrar su temperatura normalizada a 21°C.

Será necesario determinar la deflexión de rebote representativa (RRD por sus siglas en inglés), con la ecuación A1.3.

$$\delta_{rrd} = (\delta + 2s)Fc \quad \text{Ec. A1.3}$$

Donde:

- $\delta_{rrrd}$  = Deflexión de rebote
- $\delta$  = Deflexión media
- s = Desviación Estándar
- F = Factor de ajuste por temperatura
- C = Factor de Ajuste del periodo crítico

Para determinar el factor de temperatura se utiliza la figura A1.2

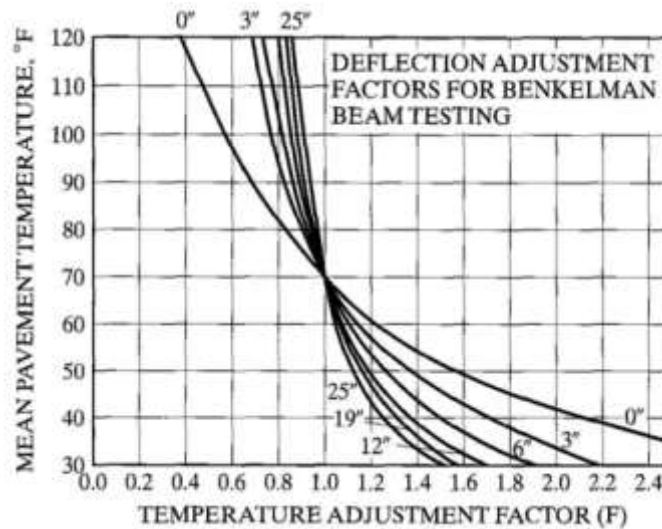


Figura A1.2 Factores de ajuste por temperatura para diferentes espesores de bases granulares (Huang, 2004)

Estos métodos, como algunos otros, permiten determinar un periodo de diseño en años en función de una deflexión, sin embargo, no consideran aspectos fundamentales del desempeño de los materiales de cada capa del pavimento, dejando de lado los deterioros por fatiga y están basados en factores de ajuste obtenidos de múltiples pruebas en distintos caminos, permitiendo la aproximación a un periodo de diseño.

## Anexo 2. Resumen de Secciones Propuestas

La figura A2.1 muestra el resumen de las estructuras propuestas obtenidas de los resultados del análisis estadístico de los archivos de deflexiones del año 2018 entregados por la Dirección de Servicios Técnicos de la S.C.T.

Corredor	Capas [cm]					Espesor Total	Módulo de Elasticidad [Mpa]				
	Carpeta Asfáltica	Base Granular	Base Asfáltica	Subbase	Subrasante		Carpeta Asfáltica	Base Granular	Base Asfáltica	Subbase	Subrasante
Nacional	15	22			28	65	2627	375			75
1. México - Nogales	14	20			30	64	2621	334			75
2. México - Nuevo Laredo	18	23			27	68	3201	480			91
3. Querétaro - Cd. Juárez	16	22			29	67	2856	349			68
4. Veracruz - Monterrey	16	24			30	70	2461	401			83
5. México - Puebla - Progreso	12	20			28	60	2661	415			78
6. Mazatlán - Matamoros	15	22			31	68	2630	404			87
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	14		16	20	24	74	2446		1313	223	69
8. Manzanillo - Tampico	16	19			26	61	2711	405			86
9. Circuito Transísmico	12		13	20	26	71	2752		1357	225	68
10. Acapulco - Tuxpan	21	21			24	66	2427	349			66
11. Acapulco - Veracruz	16	18			23	57	2309	322			65
12. Altiplano	17	20			24	61	2573	253			59
13. Transpeninsular de B.C.	11	20			29	60	3341	360			72
14. Peninsular de Yucatán	13	20			27	60	3296	432			78
15. Del Pacífico	13		17	19	26	75	2570		1290	227	69
Mínimo	11	18	13	19	23	57	2309	253	1290	223	59
Máximo	21	24	17	20	31	75	3341	480	1357	227	91
Promedio	15	21	15	20	27	65	2718	375	1320	225	74

Figura A2.1 Resumen de Secciones Propuestas

Así mismo se ilustra en las figuras A2.2 y A2.3 de manera gráfica los espesores de las capas de pavimento por corredor para estructuras de 3 y 4 capas.

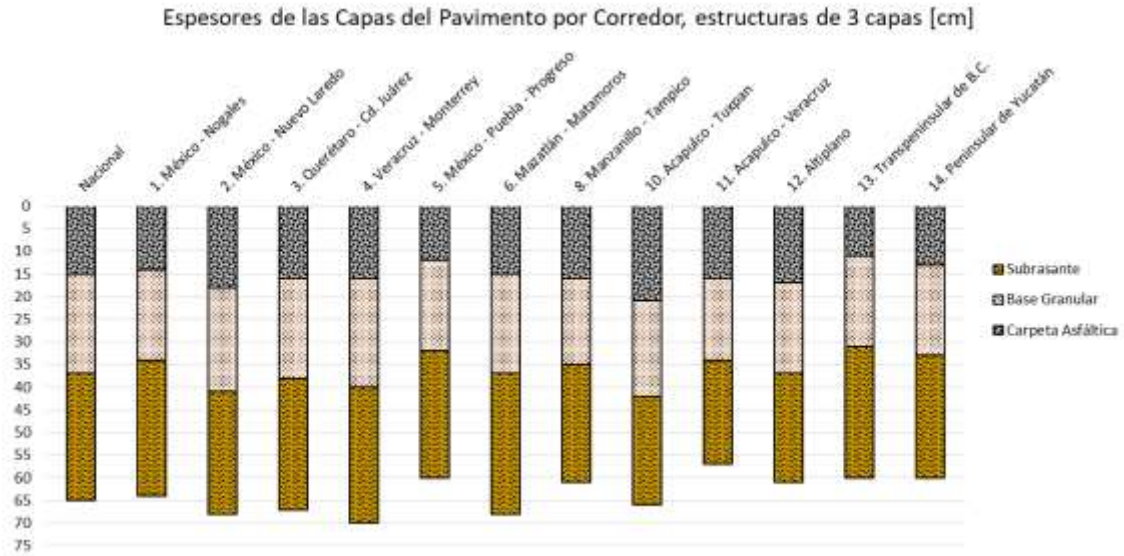


Figura A2.2 Espesores de las Capas del Pavimento por Corredor, estructuras de 3 capas [cm].

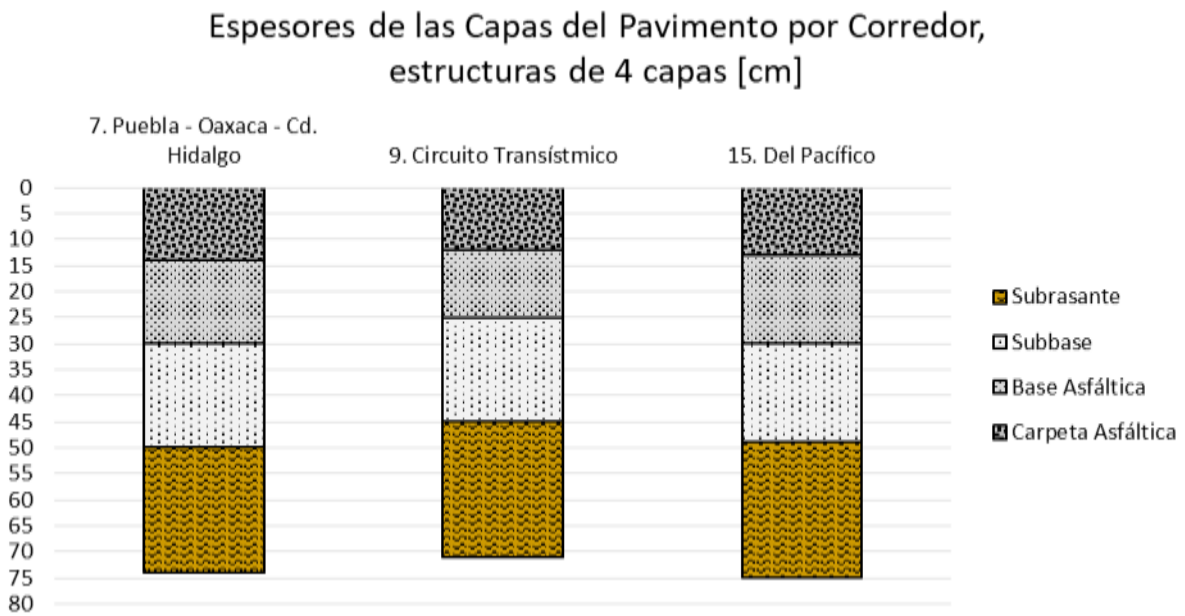


Figura A2.3 Espesores de las Capas del Pavimento por corredor, estructuras de 4 capas [cm].

### **Anexo 3. Resumen de Tránsito**

Las figuras A3.1, A3.2 y A3.3 muestran el resumen del tránsito obtenido de los resultados del análisis estadístico de los archivos de deflexiones del año 2018 entregados por la Dirección de Servicios Técnicos de la S.C.T.

Corredor	Fact. De Distribución	
	Direccional [C.D]	Carril [C.C]
Nacional	1.0	1.0
1. México - Nogales	1.0	1.0
2. México - Nuevo Laredo	1.0	1.0
3. Querétaro - Cd. Juárez	1.0	1.0
4. Veracruz - Monterrey	1.0	1.0
5. México - Puebla - Progreso	0.5	1.0
6. Mazatlán - Matamoros	1.0	1.0
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	1.0	1.0
8. Manzanillo - Tampico	1.0	1.0
9. Circuito Transístmico	1.0	1.0
10. Acapulco - Tuxpan	1.0	1.0
11. Acapulco - Veracruz	1.0	1.0
12. Altiplano	1.0	1.0
13. Transpeninsular de B.C.	1.0	1.0
14. Peninsular de Yucatán	0.5	1.0
15. Del Pacífico	1.0	1.0

Figura A3.1 Resumen de Factores de Distribución

Corredor	Horizonte de Diseño	
	Periodo [Años]	Tasa [%]
Nacional	15	2.11%
1. México - Nogales	15	4.07%
2. México - Nuevo Laredo	15	4.07%
3. Querétaro - Cd. Juárez	15	4.30%
4. Veracruz - Monterrey	15	4.30%
5. México - Puebla - Progreso	15	2.07%
6. Mazatlán - Matamoros	15	3.75%
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	15	5.33%
8. Manzanillo - Tampico	15	6.90%
9. Circuito Transístmico	15	7.41%
10. Acapulco - Tuxpan	15	6.00%
11. Acapulco - Veracruz	15	2.63%
12. Altiplano	15	6.63%
13. Transpeninsular de B.C.	15	4.55%
14. Peninsular de Yucatán	15	2.07%
15. Del Pacífico	15	4.92%

Figura A3.2 Resumen del Horizonte de Diseño

Corredor	TDPA	A2 [%]	B2 [%]	C2 [%]	C3 [%]	T3-S2 [%]	T3-S3 [%]	T3-S2-R4 [%]	Otros [%]	Total [%]
Nacional	10147	72.30%	2.70%	8.10%	2.30%	8.30%	3.20%	1.90%	1.20%	100%
1. México - Nogales	13725	76.90%	3.50%	6.80%	2.80%	6.40%	1.30%	1.80%	0.50%	100%
2. México - Nuevo Laredo	15509	45.20%	4.30%	7.50%	2.70%	30.30%	2.30%	7.30%	0.40%	100%
3. Querétaro - Cd. Juárez	14386	75.90%	3.30%	8.90%	1.80%	5.70%	1.80%	2.20%	0.40%	100%
4. Veracruz - Monterrey	8034	67.60%	4.00%	8.60%	1.00%	9.10%	2.80%	5.60%	1.30%	100%
5. México - Puebla - Progreso	8999	79.80%	4.80%	6.70%	1.60%	4.80%	1.00%	0.80%	0.50%	100%
6. Mazatlán - Matamoros	9307	28.60%	5.40%	8.80%	2.40%	41.20%	5.10%	6.70%	1.80%	100%
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	6983	83.30%	1.90%	6.60%	1.30%	3.80%	1.10%	1.60%	0.40%	100%
8. Manzanillo - Tampico	9454	78.80%	2.20%	6.90%	1.90%	4.00%	2.40%	3.00%	0.80%	100%
9. Circuito Transístmico	6099	79.10%	2.10%	9.20%	3.60%	3.60%	1.40%	0.60%	0.40%	100%
10. Acapulco - Tuxpan	10484	78.90%	2.90%	7.40%	3.40%	3.80%	1.80%	1.40%	0.40%	100%
11. Acapulco - Veracruz	10073	82.20%	2.90%	5.60%	1.60%	3.20%	2.20%	1.80%	0.50%	100%
12. Altiplano	12866	79.50%	2.50%	4.40%	2.30%	5.70%	2.90%	1.70%	1.00%	100%
13. Transpeninsular de B.C.	7405	84.40%	1.10%	8.20%	1.50%	2.80%	0.80%	1.10%	0.10%	100%
14. Peninsular de Yucatán	8543	79.80%	4.80%	6.70%	1.60%	4.80%	1.00%	0.80%	0.50%	100%
15. Del Pacífico	9250	62.50%	6.10%	9.90%	3.80%	12.10%	2.10%	3.00%	0.50%	100%
Mínimo	6099	28.60%	1.10%	4.40%	1.00%	2.80%	0.80%	0.60%	0.10%	
Máximo	15509	84.40%	6.10%	9.90%	3.80%	41.20%	5.10%	7.30%	1.80%	
Promedio	10079	72.18%	3.41%	7.52%	2.23%	9.35%	2.08%	2.58%	0.67%	

Figura A3.3 Resumen del TDPA y la Composición Vehicular

Corredor	TDPA	Porcentaje de Distribución Vehicular			Total
		A	B	C	
		[%]	[%]	[%]	[%]
Nacional	10147	72.30%	2.70%	25.00%	100%
1. México - Nogales	13725	76.90%	3.50%	19.60%	100%
2. México - Nuevo Laredo	15509	45.20%	4.30%	50.50%	100%
3. Querétaro - Cd. Juárez	14386	75.90%	3.30%	20.80%	100%
4. Veracruz - Monterrey	8034	67.60%	4.00%	28.40%	100%
5. México - Puebla - Progreso	8999	79.80%	4.80%	15.40%	100%
6. Mazatlán - Matamoros	9307	28.60%	5.40%	66.00%	100%
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	6983	83.30%	1.90%	14.80%	100%
8. Manzanillo - Tampico	9454	78.80%	2.20%	19.00%	100%
9. Circuito Transístmico	6099	79.10%	2.10%	18.80%	100%
10. Acapulco - Tuxpan	10484	78.90%	2.90%	18.20%	100%
11. Acapulco - Veracruz	10073	82.20%	2.90%	14.90%	100%
12. Altiplano	12866	79.50%	2.50%	18.00%	100%
13. Transpeninsular de B.C.	7405	84.40%	1.10%	14.50%	100%
14. Peninsular de Yucatán	8543	79.80%	4.80%	15.40%	100%
15. Del Pacífico	9250	62.50%	6.10%	31.40%	100%
Mínimo	6099	28.60%	1.10%	14.50%	
Máximo	15509	84.40%	6.10%	66.00%	
Promedio	10079	72.18%	3.41%	24.42%	

Figura A3.4 Resumen del TDPA con el Porcentaje de Distribución Vehicular Simplificado

## Anexo 4. Resumen del Análisis Espectral

Las figura A4.1 muestra el resumen del análisis espectral para fatiga y para deformación realizados con los resultados del análisis estadístico de los archivos de deflexiones del año 2018 entregados por la Dirección de Servicios Técnicos de la S.C.T. y el Software IMT – PAVE del Instituto Mexicano del Transporte.

Corredor	Espectro de Carga							
	Legal		Ligera Sobrecarga		Alta Sobrecarga		Muy Alta Sobrecarga	
	Fatiga [Años]	Deformación [Años]	Fatiga [Años]	Deformación [Años]	Fatiga [Años]	Deformación [Años]	Fatiga [Años]	Deformación [Años]
Nacional	10.50	1.00	7.30	<1	3.30	<1	1.50	<1
1. México - Nogales	4.10	<1	2.90	<1	1.40	<1	<1	<1
2. México - Nuevo Laredo	15.00	1.30	10.50	<1	4.00	<1	1.70	<1
3. Querétaro - Cd. Juárez	9.10	<1	6.40	<1	2.90	<1	1.20	<1
4. Veracruz - Monterrey	12.70	1.60	8.50	=1	3.60	<1	1.60	<1
5. México - Puebla - Progreso	9.00	<1	6.60	<1	3.30	<1	1.60	<1
6. Mazatlán - Matamoros	4.30	<1	2.80	<1	1.10	<1	<1	<1
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	15.00	3.50	15.00	2.30	15.00	1.00	15.00	<1
8. Manzanillo - Tampico	15.00	1.10	11.80	<1	5.20	<1	2.30	<1
9. Circuito Transistmico	15.00	1.50	15.00	1.10	15.00	<1	15.00	<1
10. Acapulco - Tuxpan	15.00	2.30	15.00	1.60	13.20	<1	5.50	<1
11. Acapulco - Veracruz	11.50	<1	8.10	<1	3.70	<1	1.60	<1
12. Altiplano	5.50	<1	3.50	<1	1.40	<1	<1	<1
13. Transpeninsular de B.C.	5.00	<1	3.70	<1	1.80	<1	<1	<1
14. Peninsular de Yucatán	15.00	2.40	15.00	1.70	15.00	<1	7.10	<1
15. Del Pacífico	15.00	1.10	15.00	<1	15.00	<1	15.00	<1
<b>Todos los Corredores</b>								
Mínimo	4.10	1.10	2.80	1.10	1.10	1.00	1.20	0.00
Máximo	15.00	3.50	15.00	2.30	15.00	1.00	15.00	0.00
Promedio	11.08	1.85	9.32	1.68	6.77	1.00	6.15	0.00
<b>Corredores de 3 capas</b>								
Mínimo	4.10	1.10	2.80	1.60	1.10	0.00	1.20	0.00
Máximo	15.00	2.40	15.00	1.70	15.00	0.00	7.10	0.00
Promedio	10.10	1.74	7.90	1.65	4.72	0.00	2.83	0.00
<b>Corredores de 4 Capas</b>								
Mínimo	15.00	1.10	15.00	1.10	15.00	1.00	15.00	0.00
Máximo	15.00	3.50	15.00	2.30	15.00	1.00	15.00	0.00
Promedio	15.00	2.03	15.00	1.70	15.00	1.00	15.00	0.00

Figura A4.1 Resumen del Análisis Espectral

La figura A4.2 muestra gráficamente el análisis estadístico de comparación entre los resultados de vida remanente de los corredores con secciones propuestas de 3

capas y el análisis nacional, mismo que se representa con el área azul. Las estructuras de 4 capas fueron despreciadas para este análisis pues cumplen con el horizonte de proyecto para todos los niveles de carga.

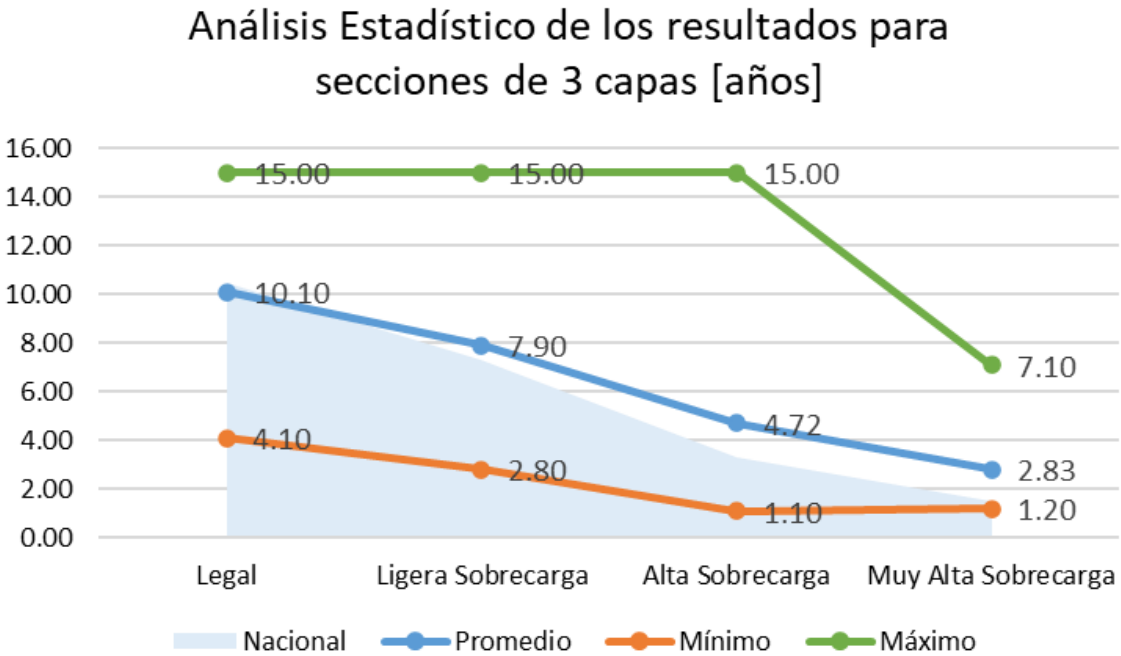


Figura A4.2 Resumen del Análisis Estadístico de los resultados para secciones de 3 capas, en años

La figura A4.3 muestra la vida remanente por fatiga para diferentes niveles de carga por corredor con secciones de 3 capas, el área azul representa el resultado nacional para tener un punto de comparación. Los corredores con estructuras de 4 capas fueron despreciados en este análisis pues cumplen con el horizonte de proyecto para todos los niveles de carga.

Vida Remanente por Fatiga para diferentes niveles de carga por corredor con secciones de 3 capas [años]

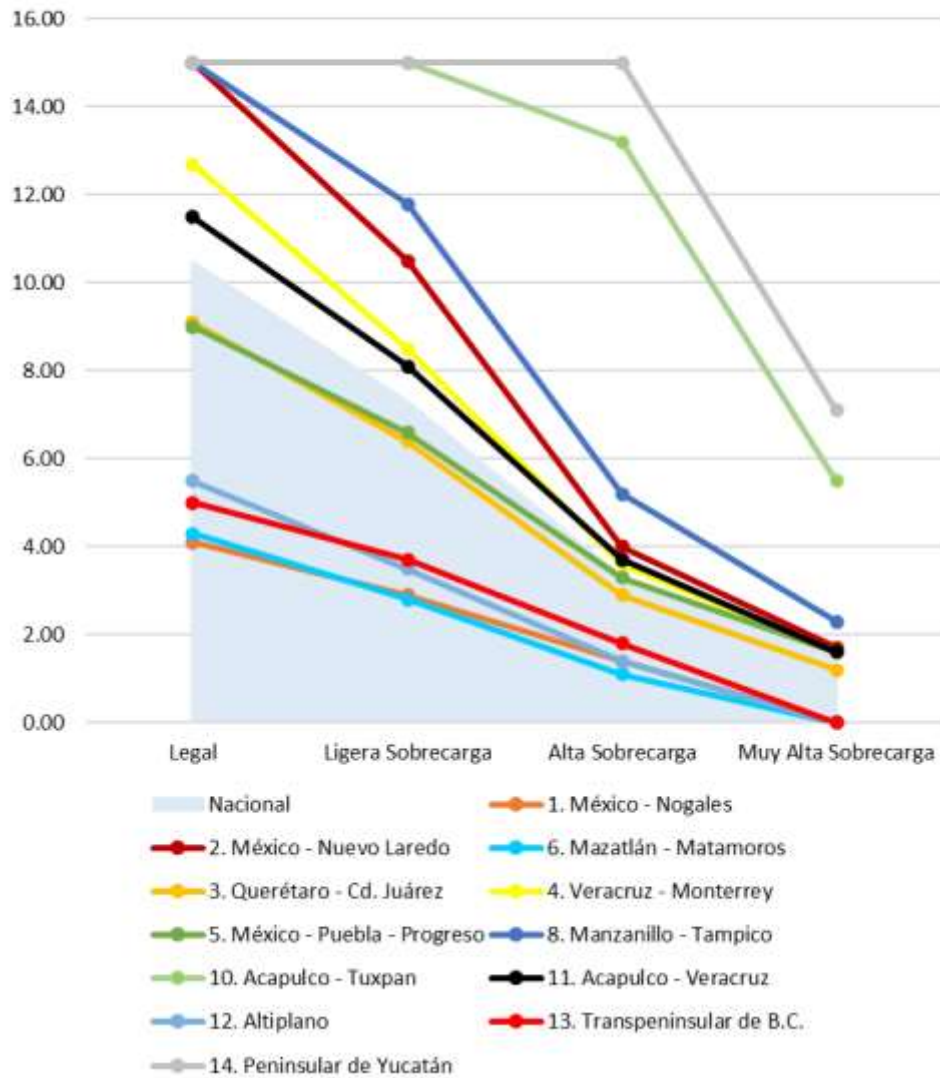


Figura A4.3 Vida Remanente por Fatiga para diferentes niveles de carga por corredor con secciones de 3 capas, en años

## Anexo 5. Resumen de Deflexiones

Las figura A5.1 muestra el resumen de deflexiones seleccionadas obtenidas de los resultados del análisis estadístico de los archivos de deflexiones del año 2018 entregados por la Dirección de Servicios Técnicos de la S.C.T. y el Software IMT – PAVE del Instituto Mexicano del Transporte.

Las deflexiones fueron seleccionadas en función del módulo de elasticidad promedio de cada corredor, se buscó el archivo con el módulo de elasticidad más próximo al promedio, la deflexión normalizada se muestra en mm y es máxima, mínima y característica, además otorga una calificación general. Se muestra el estado y el nombre del archivo del cual se tomó la información.

Corredor	Estado	Código	E Carpeta [Mpa]		Deflexión Normalizada [mm]			Calificación [%]	
			Promedio	Utilizado	Máx.	Min.	Característica	Buena	Mala
0. Nacional	Sonora	SON015B--CT2-264.0-267.4	2627	2627	0.45	0.08	0.24	94%	6%
1. México - Nogales	Sinaloa	SIN015B--CT3-119.7-131.4	2621	2612	1.17	0.18	0.89	5%	95%
2. México - Nuevo Laredo	Querétaro	A-064-01	3201	3268	1.47	0.02	0.28	95%	5%
3. Querétaro - Cd. Juárez	Zacatecas	ZAC045YY-CT1-004.0-017.5	2856	2876	0.54	0.09	0.29	96%	4%
4. Veracruz - Monterrey	Tamaulipas	TAM101L6-CT1-000.0-004.7	2461	2465	0.86	0.16	0.62	32%	68%
5. México - Puebla - Progreso	Campeche	CAM186K--CT1-154.6-295.9	2661	2679	1.64	0.10	0.61	66%	34%
6. Mazatlán - Matamoros	Nuevo León	NLE040YL-CT1-174.7-188.8	2630	2621	0.45	0.09	0.24	97%	3%
7. Puebla - Oaxaca - Cd. Hidalgo	Oaxaca	OAX190V8-CT1-031.0-032.0	2446	2447	0.71	0.22	0.66	50%	50%
8. Manzanillo - Tampico	S.L.P	SLP080AH-CT1-064.2-070.2	2711	2720	0.92	0.22	0.64	55%	45%
9. Circuito Transistmico	Oaxaca	OAX190J--CT5-000.0-091.8	2752	2754	1.62	0.05	0.86	36%	64%
10. Acapulco - Tuxpan	Veracruz	VER130AT-CT1-186.6-197.0	2427	2773	0.55	0.1	0.34	94%	6%
11. Acapulco - Veracruz	Puebla	PUE190BA-CT5-029.9-063.4	2309	2302	0.87	0.07	0.54	58%	42%
12. Altiplano	Tlaxcala	TLA136H--CT1-122.5-141.9	2573	2566	1.27	0.11	0.75	42%	58%
13. Transpeninsular de B.C.	B.C.	BCA002AA-CT1-073.0-090.0	3341	3327	0.96	0.08	0.55	72%	28%
14. Peninsular de Yucatán	Campeche	CAM18018-CT3-009.8-050.2	3296	3294	0.51	0.08	0.24	99%	1%
15. Del Pacífico	Michoacán	MIC037GN-CT1-003.5-019.1	2570	2561	1.56	0.17	0.96	19%	81%
Máximo			3341	3327	1.64	0.22	0.96		
Mínimo			2309	2302	0.45	0.02	0.24		
Promedio			2718	2743	0.97	0.11	0.54		

Figura A5.1 Resumen de Deflexiones

De acuerdo con el criterio de la S.C.T. una deflexión obtiene una calificación positiva cuando la lectura es menor a 40 mm, por el contrario, cuando la lectura de la deflexión es mayor a 40 mm se considera que la calificación es mala. La figura A5.2 muestra de manera gráfica la calificación de cada corredor en función de la deflexión seleccionada.

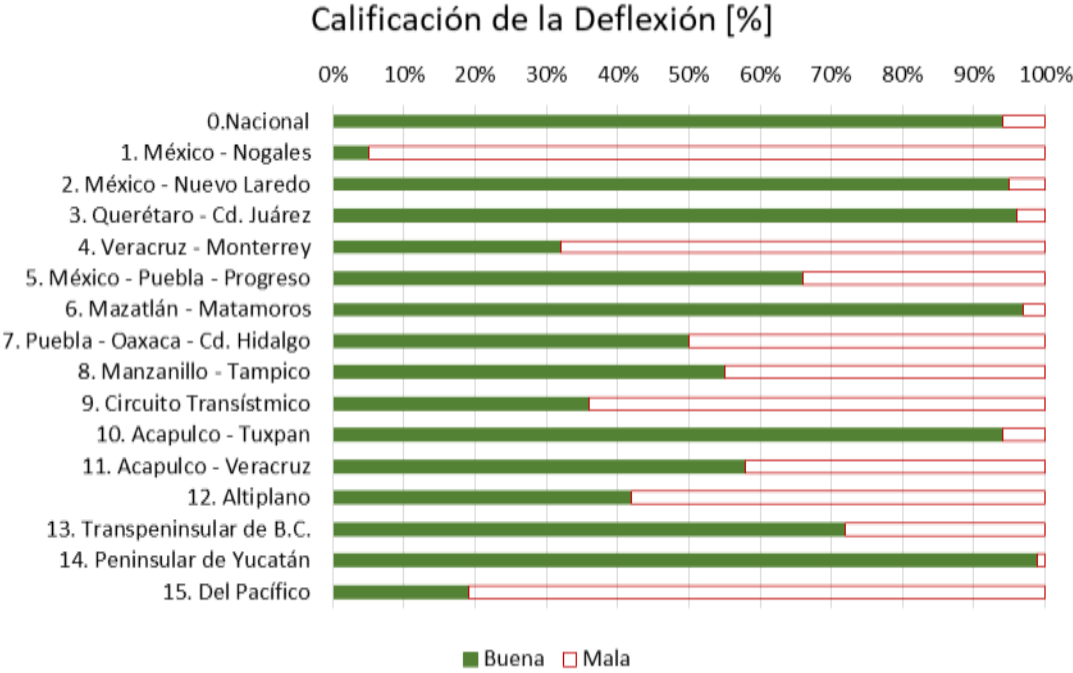


Figura A5.2 Calificación de la Deflexión por Corredor en porcentaje

## **Anexo 6. Condición Estructural de Pavimentos en la Red Federal Libre**

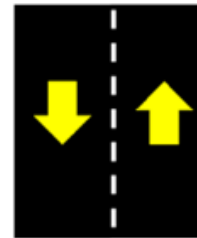
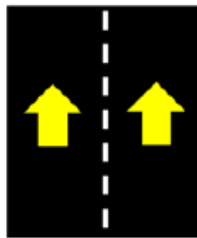
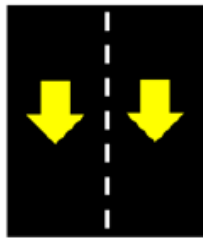
### **Tramo Puebla – Atlixco – Izucar de Matamoros**

- CARRETERA PUEBLA- HUAJUAPAN DE LEÓN, TRAMO PUEBLA-ATLIXCO (MEX-190)
- CARRETERA PUEBLA- HUAJUAPAN DE LEÓN, TRAMO ATLIXCO-IZUCAR DE MATAMOROS (MEX-190)



Fecha de recorrido: sábado 15 de febrero 2020

**PUEBLA-ATLIXCO KM 6+400 AL KM 29+000  
(SENTIDO DE CADENAMIENTO ASCENDENTE)  
MEX-190**



Del km 6+400 al km 15+500  
(4 carriles de circulación)

Del km 15+500 al km 29+000  
(2 carriles de circulación)

Km 7+150, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente

$E_1 = 1,621 \text{ MPa}$	Carpeta Asfáltica	22 cm
$E_2 = 112 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	15 cm
$E_3 = 63 \text{ MPa}$	Subrasante	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**494 micras (0.494 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 7+650, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,141 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 175 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 57 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**501 micras (0.501 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT.

**Km 8+150, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,199 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 109 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 39 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**736 micras (0.736 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT.

**Km 8+650, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,248 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 160 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 49 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**483 micras (0.483mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



**Km 9+150, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,003 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 109 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 52 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**790 micras (0.790 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 18+150, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,737 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 208 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 84 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**475 micras (0.475 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



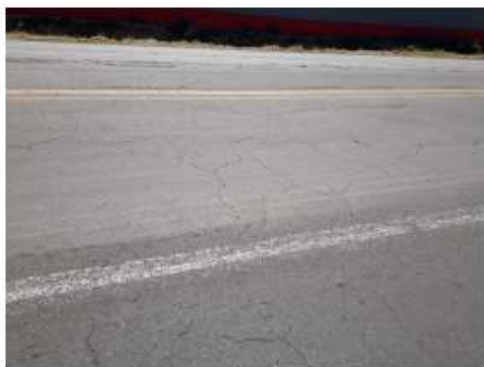
La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 19+150, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,818 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 165 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	15 cm
$E_3 = 61 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	32 cm

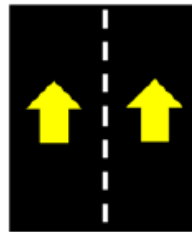
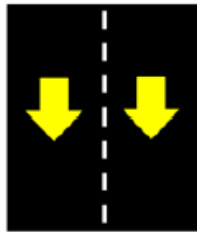
Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**398 micras (0.398 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**

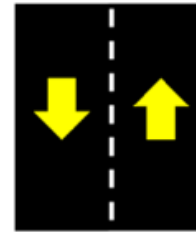


La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**ATLIXCO-IZÚCAR DE MATAMOROS KM 31+000 AL KM  
53+000  
(SENTIDO DE CADENAMIENTO ASCENDENTE)  
MEX 190**



Del km 31+000 al km 55+000  
(4 carriles de circulación)



Del km 55+000 al km 63+000  
(2 carriles de circulación)

Km 35+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente

$E_1 = 974 \text{ MPa}$	Carpeta Asfáltica	22 cm
$E_2 = 113 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 72 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**653 micras (0.653 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 37+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,674 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 311 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 104 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**278 micras (0.278 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 38+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,351 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 408 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 106 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**263 micras (0.263 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 39+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,559 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 109 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 61 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**489 micras (0.489 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 40+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,095 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 200 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 45 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**427 micras (0.427 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 41+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 3,154 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 286 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 100 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**291 micras (0.291 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 42+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 3,080 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 425 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 112 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**225 micras (0.225 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 44+000, carril de baja en sentido de cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,844 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 350 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 107 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima normalizada a 700 kPa = **262 micras (0.262 mm)**

**El pavimento presenta problemas por deformación permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 45+000, carril de baja en sentido de cadenamiento ascendente**

$E_1 = 3,096 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 256 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 83 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima normalizada a 700 kPa = **282 micras (0.282 mm)**

**El pavimento presenta problemas por deformación permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 46+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,449 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 424 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 151 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**320 micras (0.320 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 47+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,474 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 559 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 95 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**322 micras (0.322 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 48+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,850 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 363 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 115 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**325 micras (0.325 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 49+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,647 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 520 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 58 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**411 micras (0.411 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 51+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,622 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 338 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 58 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**388 micras (0.388 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 52+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,149 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 159 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 59 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**562 micras (0.562 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por fatiga y  
por deformación  
permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 53+000, carril de baja en sentido de cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,071 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 222 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 32 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima normalizada a 700 kPa = **655 micras (0.655 mm)**

**El pavimento presenta problemas por fatiga y por deformación permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 54+000, carril de baja en sentido de cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,003 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 112 \text{ MPa}$	<b>Base Hidráulica</b>	23 cm
$E_3 = 30 \text{ MPa}$	<b>Subrasante</b>	21 cm

Deflexión máxima normalizada a 700 kPa = **575 micras (0.575 mm)**

**El pavimento presenta problemas por fatiga y por deformación permanente (IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 57+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 3,728 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 489 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 113 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**261 micras (0.261 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



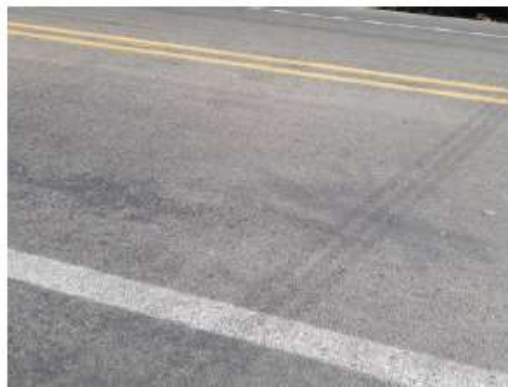
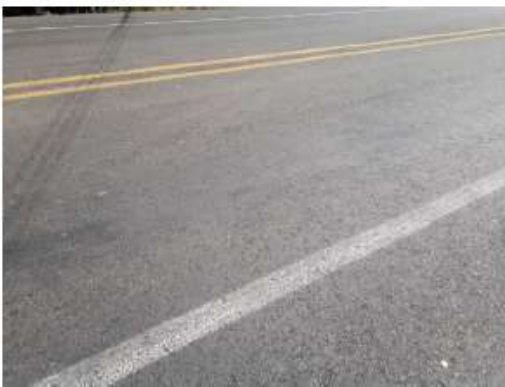
La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 58+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 2,555 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	22 cm
$E_2 = 426 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	23 cm
$E_3 = 108 \text{ MPa}$	Subrasante	21 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**230 micras (0.230 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

## **Anexo 7. Condición Estructural de Pavimentos en la Red Federal Libre**

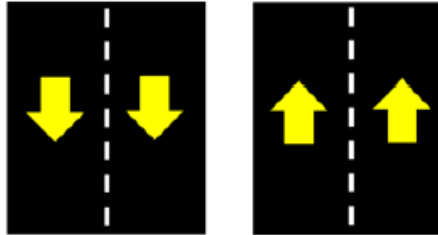
### **Libramiento de Tlaxcala (Ambos Cuerpos)**

- LIBRAMIENTO DE TLAXCALA (AMBOS CUERPOS)



Fecha de recorrido: domingo 16 de febrero 2020

## LIBRAMIENTO DE TLAXCALA (SENTIDO DE CADENAMIENTO ASCENDENTE)



Del km 0+000 al km 11+000  
(4 carriles de circulación)

Km 5+120, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente

$E_1 = 3,724 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 376 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 125 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 97 \text{ MPa}$	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**401 micras (0.401 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 5+680, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 4,096 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 458 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 186 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 75 \text{ MPa}$	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**311 micras (0.311 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 7+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,850 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 260 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 114 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 48 \text{ MPa}$	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**667 micras (0.667 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 8+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 1,912 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 447 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 186 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 77 \text{ MPa}$	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**492 micras (0.492 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 9+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente**

$E_1 = 3,070 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 380 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 164 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 101 \text{ MPa}$	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**388 micras (0.388 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

Km 11+000, carril de baja en sentido de  
cadenamiento ascendente

$E_1 = 1,744 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	16 cm
$E_2 = 413 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	12 cm
$E_3 = 284 \text{ MPa}$	Sub-base	23 cm
$E_4 = 111 \text{ MPa}$	Subrasante	

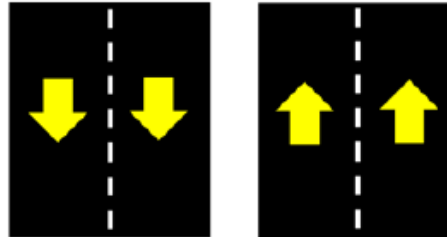
Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**394 micras (0.394 mm)**

El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

## LIBRAMIENTO DE TLAXCALA (SENTIDO DE CADENAMIENTO DESCENDENTE)



Del km 0+000 al km 11+000  
(4 carriles de circulación)

Km 0+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente

$E_1 = 1,830 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	19 cm
$E_2 = 393 \text{ MPa}$	Base Cementada	20 cm
$E_3 = 96 \text{ MPa}$	Subrasante	20 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**449 micras (0.449 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 3+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 2,654 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	19 cm
$E_2 = 5,758 \text{ MPa}$	Base Cementada	20 cm
$E_3 = 80 \text{ MPa}$	Subrasante	20 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**241 micras (0.241 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 5+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 2,913 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	19 cm
$E_2 = 1,204 \text{ MPa}$	Base Cementada	20 cm
$E_3 = 61 \text{ MPa}$	Subrasante	20 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**352 micras (0.352 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 6+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 1,384 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	19 cm
$E_2 = 1,181 \text{ MPa}$	Base Cementada	20 cm
$E_3 = 43 \text{ MPa}$	Subrasante	20 cm

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**395 micras (0.395 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 7+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 5,594 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	12 cm
$E_2 = 544 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	19 cm
$E_3 = 106 \text{ MPa}$	Sub-base	20 cm
	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**422 micras (0.422 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 8+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 2,080 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	12 cm
$E_2 = 359 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	19 cm
$E_3 = 129 \text{ MPa}$	Sub-base	20 cm
	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**518 micras (0.518 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

**Km 9+800, carril de baja en sentido de  
cadenamiento descendente**

$E_1 = 3,158 \text{ MPa}$	<b>Carpeta Asfáltica</b>	12 cm
$E_2 = 393 \text{ MPa}$	Base Hidráulica	19 cm
$E_3 = 164 \text{ MPa}$	Sub-base	20 cm
	Subrasante	

Deflexión máxima  
normalizada a 700 kPa =  
**435 micras (0.435 mm)**

**El pavimento presenta  
problemas por  
deformación permanente  
(IMT PAVE)**



La información de espesores, deflectometría y módulos elásticos fueron proporcionados por el IMT

## **Bibliografía**

Coria Gutiérrez, C. A., Hernández Domínguez, R. I., & Garnica Anguas, P. (2018). *Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles; un enfoque mecanicista*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

Das, B. M. (2013). *Fundamentos De Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.

Diario Oficial de la Federación. (2017). *NOM-012-SCT-2-2017*.

Garnica Anguas, P. (2011). XVI CILA - Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. *Espectros de Daño: Un Concepto Mecanicista para Diseño de Pavimentos*, (pág. 11).

Garnica Anguas, P. (2013). Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos. *Quinta Conferencia Magistral "Alfonso Rico Rodríguez"* (pág. 48). AMIVTAC & SMIG.

Garnica Anguas, P., & Hernández Domínguez, R. (2013). *Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky: Pearson.

S.C.T. (2004). *N-CMT.4.02.003/04*.

S.C.T. (2009). *N-CTR-CAR-1-04-006/09*.

S.C.T. (2016). *M-MMP-4-07-019/16*.

S.C.T. (2016). *N-CMT-4-02-002/16*.

S.C.T. (2017). *M-MMP-4-07-020/17*.

S.C.T. (2017). *M-MMP-4-07-022/17*.

S.C.T. (2017). *N-CSV-CAR-1-03-010/17*.

S.C.T. (2017). *N-CSV-CAR-1-03-010/17*.

S.C.T. (2018). *Anuario Estadístico del Sector de Comunicaciones y Transportes*.