



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

**“METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL EN PAVIMENTOS
FLEXIBLES, A TRAVÉS DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS
TERRESTRES

PRESENTA:
ING. JUAN MANUEL TINOCO OROZCO

ASESOR:
DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

CO-ASESOR:
M.I. NOÉ HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ



UNIVERSIDAD MICHUACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

Morelia, Mich., Enero de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	i
LISTA DE FIGURAS	ii
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	x
OBJETIVOS.....	xi
OBJETIVO GENERAL.....	xi
OBJETIVOS PARTICULARES	xi
ALCANCES.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.0 MARCO TEÓRICO	6
1.1 ANTECEDENTES.....	6
1.2 EVOLUCIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO.....	8
1.2.1 DYNATEST.....	14
1.2.2 KUAB.....	15
1.2.3 JILS.....	16
1.3 RETROCÁLCULO: FUNDAMENTOS, METODOLOGÍAS Y RECIENTES AVANCES.....	20
CAPÍTULO 2 RETROCÁLCULO.....	33
2.0 RETROCÁLCULO.....	34

2.1 PROGRAMAS DE APOYO	34
2.1.1 SOFTWARE CALBACK.....	34
2.1.2 EVERCALC	40
2.2 METODOLOGÍA PROPUESTA	46
2.2.1 DETECCIÓN DE DATOS INCONGRUENTES O ATÍPICOS.....	47
2.2.2 SECCIONES HOMOGÉNEAS.....	53
2.2.3 OBTENCIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS	60
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VIDA REMANENTE	64
3.0 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VIDA REMANENTE	65
3.1 DEFINICIÓN DE VIDA REMANENTE.....	65
3.2 MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM	66
3.3 MÉTODO IMT-PAVE	69
3.4 MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO	73
CAPÍTULO 4 CASOS DE ESTUDIO	79
4.0 CASOS DE ESTUDIO.....	80
4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO.....	80
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO	81
4.2.1 TRAMO, CARRETERA MÉXICO-PACHUCA	81
4.2.2 TRAMO, CARRETERA TAPANATEPEC-TALISMÁN.....	82
4.2.3 TRAMO, CARRETERA OAXACA-TEHUANTEPEC	84
4.2.4 TRAMO, CARRETERA PUEBLA-XALAPA.....	85
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	87
5.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	88
5.1 MÓDULOS ELÁSTICOS.....	88

5.2 ANÁLISIS DE LA VIDA REMANENTE	92
5.3 OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS Y ESTIMACIÓN DEL DAÑO	98
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	107
CONCLUSIONES	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO A. SECCIONES HOMOGÉNEAS	119
A.1 SECCIONES HOMOGÉNEAS POR LA FUNCIÓN $g(i)$	120
A.2 LARGUILLOS DE LAS SECCIONES HOMOGÉNEAS	123
ANEXO B. RESULTADOS VIDA REMANENTE	126
RESULTADOS DE LA VIDA REMANENTE.....	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Programas de Retrocálculo Estático. (Chatti et al., 2017)	25
Tabla 1.2: Programas de Retrocálculo Dinámico. (Chatti et al., 2017)	26
Tabla 1.3: Rango de valores de relación de Poisson. (University of California Pavement Research Center, 2008)	29
Tabla 1.4: Rango típico de módulos. (University of California Pavement Research Center, 2008)	29
Tabla 2.1: Ejemplo 1 de datos de deflexión	50
Tabla 2.2: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 1	50
Tabla 2.3: Ejemplo 2 de datos de deflexión	51
Tabla 2.4: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 2.....	51
Tabla 2.5: Ejemplo 3 de datos de deflexión	52
Tabla 2.6: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 3.....	52
Tabla 4.1: Tramos de estudio.....	80
Tabla 4.2: Datos de tránsito, tramo del km 59+500 al 77+500, de la carretera México-Pachuca	82
Tabla 4.3: Datos de tránsito, tramo km 125+000 al 140+000, de la carretera Tapanatepec-Talismán.....	83
Tabla 4.4: Datos de tránsito, tramo km 67+000 al 80+000, de la carretera Oaxaca-Tehuantepec	84
Tabla 4.5: Datos de tránsito, tramo km 111+200 al 126+200, de la carretera Puebla-Xalapa	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quince Corredores Troncales (SCT, 2015).....	2
Figura 1.1: Cuenca de deflexión típica del Pavimento Flexible (Smith et al., 2017).7	
Figura 1.2: Solución de un sistema de dos resortes con una masa intermedia (Axel O. Bohn, 1989).	9
Figura 1.3: Arreglo de muelle con un resorte (Axel O. Bohn, 1989).	10
Figura 1.4: Primer Deflectómetro Danés (Axel O. Bohn, 1989).....	10
Figura 1.5: Deflectómetro de impacto actual (Smith et al., 2017).....	11
Figura 1.6: Arreglo típico de los sensores de un Deflectómetro de impacto (Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., 2010).	12
Figura 1.7: Diagrama de un Deflectómetro de impacto FWD (Chatti et al., 2017). 13	
Figura 1.8: Modelo Dynatest 8000 FWD (Chatti et al., 2017).	14
Figura 1.9: Modelo Dynatest HWD 8082 (Chatti et al., 2017).....	15
Figura 1.10: Deflectómetro KUAB (Chatti et al., 2017).....	16
Figura 1.11: Modelo JILS 20 (jilsfwd.com, 2017).....	17
Figura 1.12: Esquema del RDD (Smith et al., 2017).	19
Figura 1.13: Sistema de medición de carga y deflexión RDD (Smith et al., 2017).19	
Figura 1.14: Esquema del RWD (Smith et al., 2017).....	20
Figura 1.15: Diagrama típico del proceso de retrocálculo. (Das, 2008).....	24
Figura 2.1: Ventana de inicio software CalBack.....	36
Figura 2.2: Modelos de respuesta y parámetros de búsqueda, CalBack	37
Figura 2.3: Ejemplo de base de datos de Access para CalBack.....	37
Figura 2.4: Ventana de retrocálculo, CalBack	38
Figura 2.5: Ventana de impresión, CalBack	39
Figura 2.6: Ventana principal, CalBack	39
Figura 2.7: Ventana de inicio Evercalc (Washington State Department of Transportation, 2005).....	40
Figura 2.8: Diagrama de flujo, Evercalc (Washington State Department of Transportation, 2005).....	41
Figura 2.9: Modos de retrocálculo en Evercalc	44

Figura 2.10: Ventana de archivo general de datos (Washington State Department of Transportation, 2005).....	44
Figura 2.11: Ventana de archivo de datos de deflexión (Washington State Department of Transportation, 2005).	45
Figura 2.12: Conversión de archivo FWD (Washington State Department of Transportation, 2005).....	46
Figura 2.13: Detección de valores atípicos en CalBack (University of California Pavement Research Center, 2008).	48
Figura 2.14: Secciones homogéneas, tramo km 59+500 al 77+500, carretera México-Pachuca, a) Función $g(i)$ para los espesores de capa, b) Espesores de capa por sección homogénea	56
Figura 2.15: Larguillo de secciones homogéneas, tramo México-Pachuca km 59+500 al 77+500	58
Figura 2.16: Espesores Promedio	59
Figura 2.17: Comparación de espesores de capa	60
Figura 2.18: Espesores finales utilizados	61
Figura 2.19: Rango de aceptación de los módulos	62
Figura 2.20: Metodología de retrocálculo propuesta	63
Figura 3.1: Definición gráfica de Vida Remanentes. (Balla, 2010)	65
Figura 3.2: Ejemplo de espectros de carga para los diferentes tipos de ejes (Garnica & Hernandez, 2013).	70
Figura 4.1: Tramos de estudio (Google Earth, 2017).	81
Figura 4.2: Tramo México-Pachuca (Google Earth, 2017).	81
Figura 4.3: Tramo Tapanatepec-Talismán (Google Earth, 2017).	83
Figura 4.4: Tramo Oaxaca-Tehuantepec (Google Earth, 2017).	84
Figura 4.5: Tramo Puebla-Xalapa (Google Earth, 2017).	85
Figura 5.1: Módulos de carpeta, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	89
Figura 5.2: Módulos de la capa de base, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	90

Figura 5.3: Módulos de la capa subrasante, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	91
Figura 5.4: Vida remanente del Tramo 59+500 al 77+500 de la carretera México-Pachuca	93
Figura 5.5: Vida remanente del Tramo km 125+000 al 140+000 de la carretera Tapanatepec-Talismán.....	94
Figura 5.6: Vida remanente Tramo km 67+000 al 80+000 de la carretera Oaxaca-Tehuantepec	94
Figura 5.7: Vida remanente del Tramo km 111+200 al 126+200 de la carretera Puebla-Xalapa.....	95
Figura 5.8: Curvas maestras estimadas, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	100
Figura 5.9: Curvas de daño estimadas para la carpeta asfáltica, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	101
Figura 5.10: Índice de daño estimado, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo 2, 3 y 4	102
Figura 5.11: Agrietamiento por fatiga, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa	104
Figura 5.12: Relación vida remanente-daño-agrietamiento.....	105

DEDICATORIA

A Dios por darme licencia de vida para realizar mis estudios como una persona de bien y escalar hasta el lugar donde me encuentro el día de hoy.

A mis Padres por apoyarme en cada paso que he dado a pesar de las adversidades, por enseñarme a lo largo de este camino a ser una persona de bien, por darme consejos para salir adelante y cumplir mis metas.

A mi novia Michelle Mayrani quien es mi inspiración y uno de mis principales motores de vida, por su gran amor que siempre me ha servido de apoyo incondicional a pesar de la distancia, por siempre estar conmigo en las buenas y malas así, como darme alientos para siempre seguir adelante.

A mis hermanos por el apoyo brindado para cumplir esta meta, en especial a mi hermana Ana María por su gran apoyo y sobre todo económico para concluir esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con gran fervor a mi Co-Asesor de tesis, el M.I. Noé Hernández Fernández, por su amistad y el gran apoyo brindado para la realización de este trabajo de tesis durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Al departamento de Estudios de Campo, en especial al Ingeniero Antonio Noé Robles Hernández, de la Dirección General de Servicios Técnicos, SCT, por brindarnos la información necesaria para el desarrollo de este trabajo

A la Dra. Alexandra Ossa López, investigadora del laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería, UNAM, por el recibimiento y el gran apoyo brindado durante mi estancia a través del programa de Movilidad Nacional de CONACYT, en ese lugar.

A mi Director de tesis el Dr. Jorge Alarcón Ibarra por todo el apoyo brindado durante mis estudios de Maestría.

A todo el personal y compañeros del Laboratorio de Vías Terrestres de la UNAM por todo el apoyo brindado en el tiempo de mi estancia.

Al Posgrado de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por haberme permitido cursar mis estudios de Maestría en su recinto.

RESUMEN

A través de los años, México ha desarrollado una amplia red carretera, la cual necesita ser evaluada periódicamente para conocer el estado en que se encuentra, con el objetivo de definir las acciones requeridas para mantener su adecuado funcionamiento. Dentro de las características evaluadas, el comportamiento estructural del pavimento se considera un factor preponderante para determinar su capacidad de carga y vida útil al momento de realizar la evaluación. Una técnica ampliamente reconocida a nivel mundial para llevar a cabo esta tarea son las pruebas no destructivas. Dentro de ellas, el Deflectómetro de impacto es el utilizado con mayor frecuencia para evaluar la integridad estructural de un pavimento, es decir, con él se obtienen las deflexiones de superficie o la respuesta del pavimento ante la aplicación de una carga.

En el presente trabajo de investigación se analizaron las deflexiones medidas con el Deflectómetro de impacto en secciones de pavimento ubicadas en distintos puntos de México, las deflexiones fueron obtenidas en diferentes campañas de auscultación del año 2012 al año 2016. El objetivo de la presente investigación es, desarrollar una metodología completa y confiable para evaluar el daño estructural en los pavimentos flexibles a través de los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo, para ello se utilizó el software “CalBack” (Retrocálculo de California) desarrollado por el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC). Aunado a esto se hace una revisión de las metodologías para el cálculo de la vida remanente del pavimento comúnmente utilizadas en México, con la finalidad de contrastar las ventajas, desventajas y la funcionalidad de cada una de ellas.

Finalmente, se estimó el daño obteniendo las curvas maestras y se graficaron los módulos obtenidos a la temperatura de referencia (20°C), con la finalidad de ver el comportamiento de la rigidez con el paso del tiempo, así como la estimación de un índice de daño a través de una relación entre los módulos. Por último, se graficó la

evolución del agrietamiento por fatiga para comprobar si existe una relación entre este deterioro y la rigidez del pavimento.

Palabras clave: Deflectómetro de impacto, deflexiones, retrocálculo, pavimento flexible, daño.

ABSTRACT

Over the years, Mexico has developed a large road network, which needs to be evaluated periodically to know the state in which it is with the objective of defining the actions required to maintain its proper functioning. Within the evaluated characteristics the structural behavior of the pavement is considered a preponderant factor to determine its load capacity and remaining useful life at the time of the evaluation. One technique widely recognized worldwide to carry out this task is non-destructive testing. Within them, the Impact Deflectometer is the most frequently used to evaluate the structural integrity of a pavement, ie with it the surface deflections or the pavement response are obtained with the application of a load.

In the present work the deflections measured with the Deflectometer of impact in sections of pavement located in different points of Mexico were analyzed, the deflections were obtained in different auscultation campaigns from year 2012 to the year 2016. The objective of the investigation is to develop a complete and reliable methodology to evaluate the structural damage in the flexible pavements through the elastic modules obtained by Backcalculation, using the software "CalBack" (California Backcalculation) developed by the University of California Pavement Research Center (UCPRC). In addition to this, a review is made of the methodologies for calculating the remaining pavement life commonly used in Mexico in order to compare the advantages, disadvantages and functionality of each one of them.

Finally the damage was estimated by obtaining the master curves and plotting the modules obtained at the reference temperature (20 ° C) in order to see the behavior of stiffness over time, as well as the estimation of a damage index through the relationship between the modulus. Finally, fatigue cracking was plotted to check if there is a relationship between this deterioration and pavement stiffness.

Key words: Deflectometer of impact, deflections, Backcalculation, flexible pavement, damage.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México la principal dependencia encargada de la construcción y conservación del patrimonio carretero, es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), quien ha venido haciendo la medición de varios parámetros superficiales y estructurales de la red carretera a su cargo desde 1999.

Sin embargo, hasta antes del año 2012 no se habían elaborado estudios integrales, por lo que, a partir de ese año, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) implementó el programa de Auscultación de la Red Carretera Federal, iniciando en ese año con la auscultación de la red de cuota, corredores carreteros y red básica libre, con el objeto de determinar las condiciones funcionales y estructurales de la red.

Con respecto a las características de superficie se han venido evaluando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), la profundidad de rodera, la macrotextura e inventario de deterioros. Por otro lado, en cuanto a las condiciones estructurales, se han venido midiendo las deflexiones de superficie, las cuales son el principal insumo para obtener el pronóstico del comportamiento estructural del pavimento.

Principalmente, las deflexiones de superficie son usadas para la estimación de los módulos elásticos de las capas del pavimento, a través del retrocálculo. Sin embargo, no existe una metodología definida para el proceso de retrocálculo, por lo que, esta práctica se realiza a juicio del analista. Otro problema al que nos enfrentamos es que los datos existentes de deflexiones suelen tener valores incongruentes o atípicos en ellos, por lo que, es necesario realizar un pre-proceso de estos datos antes de utilizarlos en la obtención de los módulos elásticos a través del retrocálculo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología adecuada y estructurada para realizar el proceso de retrocálculo, con las deflexiones de superficie proporcionadas por la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como la evaluación del daño a partir de los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar una amplia investigación bibliográfica del Deflectómetro de impacto y del proceso de retrocálculo
- Comparar el funcionamiento y los resultados obtenidos de dos herramientas informáticas para realizar el retrocálculo de las secciones de estudio
- Obtener los módulos elásticos de las capas del pavimento de cada uno de los tramos con las dos herramientas
- Revisar y aplicar algunas de las metodologías para obtener la vida remanente del pavimento, comúnmente utilizadas en México
- Estimar el daño de los pavimentos analizados a partir de los módulos elásticos obtenidos por retrocálculo

ALCANCES

Obtener y comparar con los datos de los años 2012, 2014 y 2016 los módulos elásticos de las capas del pavimento de cuatro tramos carreteros a través del retrocálculo, desarrollando una metodología que sea adecuada y confiable para llevar a cabo este proceso. También se propone hacer una revisión de algunas de las metodologías para el cálculo de la vida remanente del pavimento comúnmente utilizadas en México, con la finalidad de contrastar las ventajas, desventajas y la funcionalidad de cada una de ellas. Aunado a esto, se realiza una estimación del

daño estructural del pavimento a partir de los módulos elásticos de las capas del pavimento, obtenidos a través del proceso de retrocálculo, buscando una relación del comportamiento de los módulos y el agrietamiento por fatiga de los pavimentos flexibles en estudio.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad en México y en el resto del mundo, la infraestructura carretera es el principal modo de transporte de personas y mercancías. Se ha observado con el paso del tiempo que los caminos juegan un papel muy importante para el desarrollo de las regiones. Esto se sustenta con las cifras publicadas en el anuario estadístico de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), donde el autotransporte en el año 2015 (último año de registro) tuvo una participación mayor que los demás modos de transporte, con el 55.9% en el movimiento de carga, en comparación con el marítimo que tuvo un 31.2%, el ferroviario 12.8% y el aéreo con 0.1%, del total de la carga movida que ascendió a 935.9 millones de toneladas (SCT, 2015)

En México la mayoría de las carreteras están a cargo del gobierno federal y constituyen los corredores carreteros (Figura 1), que proporcionan acceso y comunicación a las principales ciudades, fronteras y puertos marítimos del país y, por lo tanto, registran la mayor parte del transporte de pasajeros y carga.

Las cifras de la SCT publicadas en el anuario estadístico, indican que para el año 2015 México contaba con una red total compuesta por 390,301 kilómetros de carreteras.



Figura 1: Quince Corredores Troncales (SCT, 2015).

Sin embargo, no es suficiente con haber construido una gran red carretera, ya que, después de ponerla en operación requiere ser evaluada periódicamente para

conocer el estado en que se encuentra, con el objetivo de poder definir las acciones requeridas para mantener un adecuado funcionamiento. Dentro de las características que se evalúan el comportamiento estructural del pavimento es considerado un factor muy importante para conocer la capacidad de carga y vida útil al momento de realizar la evaluación. En la actualidad una técnica muy común y ampliamente reconocida a nivel mundial son las pruebas no destructivas. Dentro de ellas el Deflectómetro de impacto juega un papel muy importante, ya que es el equipo utilizado con mayor frecuencia para obtener la respuesta estructural del pavimento, es decir, con él se obtienen las deflexiones en la superficie del pavimento como respuesta ante la aplicación de una carga.

Este equipo tiene sus orígenes en la década de los años 60's. En el año de 1964 el profesor Thagesen quien laboraba en ese momento en el laboratorio Danés de carreteras, sugirió que un estudiante realizara una investigación sobre el Deflectómetro de caída de masa como su proyecto terminal. En la actualidad podemos encontrar distintos fabricantes de estos equipos como Dynatest, KUAB, JILS, entre otros.

Las deflexiones que obtenemos a través del Deflectómetro de impacto se consideran como pruebas no destructivas y en la actualidad juegan un papel muy importante en el ámbito de los pavimentos, ya que a través de ellas podemos obtener los módulos elásticos de las capas de un pavimento por medio de un proceso de cálculo inverso conocido como retrocálculo. El propósito del retrocálculo es principalmente obtener los módulos elásticos "in situ" de las diferentes capas de pavimento. Este proceso se inicia proponiendo los valores de módulos elásticos con los cuales se calculan las deflexiones y posteriormente se comparan estas deflexiones calculadas con las deflexiones medidas; los valores de módulo asumidos se ajustan de forma iterativa. Este proceso se repite hasta que los valores de deflexiones calculados y observados coinciden en un cierto rango definido.

En el presente trabajo se definió una metodología para realizar el proceso de retrocálculo, apoyándose en dos herramientas informáticas conocidas como

CalBack (Retrocálculo de California) desarrollada en el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC) y Evercalc desarrollado por el departamento de Transporte de Washington (WSDOT). Con estas herramientas se obtendrán los módulos elásticos a través del retrocálculo de cuatro tramos carreteros localizados en diferentes puntos de México, los cuales se describen en el tercer capítulo.

Una vez obtenidos y comparados los módulos elásticos de las capas del pavimento, y definido el procedimiento a seguir para su obtención, se revisarán tres metodologías para la obtención de la vida remanente del pavimento. Las tres metodologías a revisar son: Instituto de Ingeniería de la UNAM, IMT PAVE e Instituto del Asfalto. Este análisis se hará con la finalidad de contrastar cada uno de los métodos, para comentar sus características, ventajas y desventajas.

Finalmente, se hace una estimación del daño a partir del comportamiento de los módulos elásticos de las capas del pavimento, obtenidos con el proceso de retrocálculo planteado. El primer paso fue obtener las curvas maestras para las capas asfálticas, a través de un modelo matemático para cada uno de los años de estudio con el objetivo de observar su comportamiento en el tiempo de análisis. Seguido de esto se graficaron los módulos obtenidos a la temperatura de referencia, para estimar las curvas de daño y observar su tendencia. Después se obtuvo un índice de daño a través de una relación entre los módulos obtenidos por retrocálculo con la finalidad de cuantificarlo numéricamente.

Por último, se analizó la distribución del agrietamiento cuantificado de las campañas de auscultación con el objetivo de definir una relación con el daño estimado en la estructura del pavimento.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.0 MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

Las técnicas de evaluación de pavimentos son utilizadas en todo el mundo, para recopilar y analizar información sobre el estado de las carreteras; son utilizadas como una herramienta técnica, objetiva, sistemática y reproducible para evaluar la eficiencia y eficacia de las obras a lo largo de toda su vida útil (Roy, Sibaja, & Porras, 2008).

Las evaluaciones modernas de pavimentos involucran análisis, que incluyen diagnósticos tanto de la capacidad estructural de las vías, como de su capacidad funcional en términos de confort y costos de operación de los vehículos, así como elementos de diseño geométrico, seguridad vial y de su condición superficial, lo cual permite tener un enfoque integral de los diversos problemas asociados a la infraestructura vial (Roy et al., 2008).

Todos estos elementos en combinación, deben servir de guía para que las administraciones puedan determinar las políticas y estrategias de intervención, tanto a nivel de red, como a nivel de proyecto y lograr así que estas estrategias resulten en inversiones eficientes y eficaces de los limitados fondos públicos (Roy et al., 2008).

La caracterización del pavimento es fundamental, con el objetivo de definir los criterios para el mantenimiento y por ende un adecuado funcionamiento de una vía. Refiriéndonos a la evaluación estructural del pavimento, recurrimos a las pruebas no destructivas, las cuales son un método muy utilizado y con gran reconocimiento a nivel internacional.

Los métodos de pruebas no destructivas de propagación de ondas fueron iniciados por la fuerza aérea de los Estados Unidos, para evaluaciones no destructivas de pavimentos a finales de los años sesenta. Sin embargo, no se adoptó formalmente un procedimiento para las evaluaciones rutinarias hasta 1978. Para finales de los setentas, el comportamiento de propagación de ondas transitorias se comprendió

mejor y ya se tenía disponible una instrumentación más fiable para medir la respuesta del pavimento.

En este tipo de pruebas el historial de deflexión-tiempo del movimiento de una carga dinámica aplicada, es registrado por varios receptores o sensores colocados sobre la superficie del pavimento. Mediante el cálculo del tiempo de recorrido de una onda superficial entre receptores adyacentes producido por diferentes frecuencias, se obtiene una curva de dispersión de velocidades a frecuencias (Richter, 1997).

La recopilación y análisis de los datos de deflexión del pavimento, es una forma relativamente rápida y fácil de evaluar la condición estructural de un pavimento existente. Los primeros trabajos realizados por Hveem, indicaban la relación entre la magnitud de las deflexiones y el comportamiento del pavimento, es decir, los pavimentos “más débiles” presentan deflexiones más grandes, los pavimentos “más fuertes” presentan deflexiones más pequeñas (Smith et al., 2017).

A lo largo de los años se han utilizado diferentes equipos de prueba para obtener la deflexión, partiendo de equipos con micrómetros, hasta equipos más sofisticados con tecnología láser. No obstante todos los equipos para medir las deflexiones operan bajo el mismo principio. Se aplica una carga conocida en la superficie del pavimento y el resultado es la deflexión máxima de superficie. En la Figura 1.1 se muestra de forma esquemática una cuenca de deflexión típica de un pavimento.

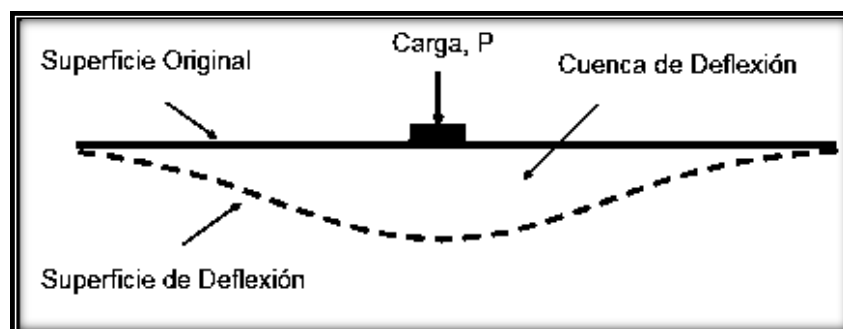


Figura 1.1: Cuenca de deflexión típica del Pavimento Flexible (Smith et al., 2017).

Las ventajas de utilizar las pruebas no destructivas (NDT), incluyen: (a) su naturaleza no destructiva y (b) el cierre insignificante del carril con un mínimo impacto en el flujo de tráfico. Los resultados de las NDT se utilizan para:

1. Cálculo de los módulos elásticos de capa para pavimentos flexibles y rígidos.
2. Estimar la eficiencia de transferencia de carga de las barras de pasadores en pavimentos rígidos.
3. Evaluar la presencia de huecos debajo de la losa.
4. Evaluar la capacidad estructural del pavimento.
5. Diseño del espesor de refuerzo (sobrecarpetas).

1.2 EVOLUCIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

El Deflectómetro de impacto, es el dispositivo más utilizado en la actualidad para medir la respuesta estructural del pavimento ante la aplicación de una carga.

Este equipo tiene sus orígenes en la década de los años 60's. En el año de 1964 el profesor Thagesen, quien laboraba en ese momento en el laboratorio Danés de carreteras, le sugirió a uno de sus estudiantes que realizara su trabajo de investigación acerca del Deflectómetro de caída de masa como su proyecto doctoral. El Deflectómetro se construyó en el laboratorio mencionado, pero no hubo tiempo para probarlo. Posteriormente, este trabajo de investigación se dividió en dos proyectos; uno realizado en 1964 por Finn Hansen y otro realizado por Per Ullidtz y Michael Gautier en 1965 (Axel O. Bohn, 1989).

Poco tiempo después, un estudio piloto realizado con el dispositivo del Laboratorio Danés de Carreteras mostró que, en cuanto al ciclo de carga, este dispositivo era inferior a los dispositivos construidos por el Laboratorio Francés de Carreteras. Las pruebas realizadas por el Laboratorio Francés demostraron que con un dispositivo de peso descendente, el cual consistía en una masa que se soltaba en un resorte no amortiguado, la considerable masa del muelle complicaba el ciclo de aplicación

de fuerza durante el ensayo (Axel O. Bohn, 1989). Por lo que, se buscó una solución a este problema, la solución que se planteó se muestra en la Figura 1.2.

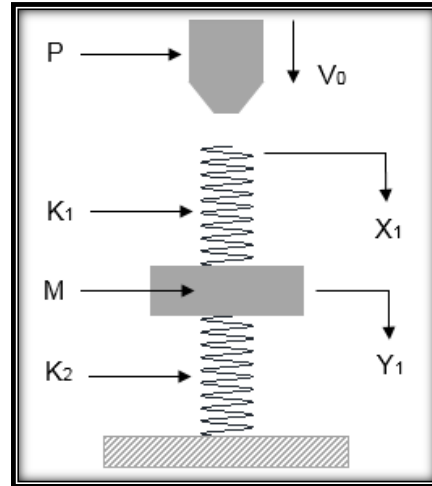


Figura 1.2: Solución de un sistema de dos resortes con una masa intermedia (Axel O. Bohn, 1989).

Con esta solución se alcanzaba el objetivo deseado: la forma del ciclo de aplicación de la fuerza fue una curva sinusoidal. Este principio se desarrolló más y se aplicó para la construcción del Falling Weight Deflectometer (FWD). Sin embargo, el impacto no estaba por debajo de los 40-50 milisegundos, por lo que se consideró que no era una buena simulación de una carga real de una rueda en movimiento (Axel O. Bohn, 1989).

Tiempo después, en el Laboratorio Francés de Carreteras se realizaron pruebas con un arreglo distinto, optaron por aplicar una combinación de un muelle y un amortiguador, de esta manera se logró un tiempo de impacto de 28 milisegundos (tiempo que se asemeja el paso de un neumático en movimiento) con lo que se alcanzó una mejor simulación del efecto de una rueda cargada en movimiento (Axel O. Bohn, 1989). En la Figura 1.3 se muestra un diagrama del dispositivo mencionado.

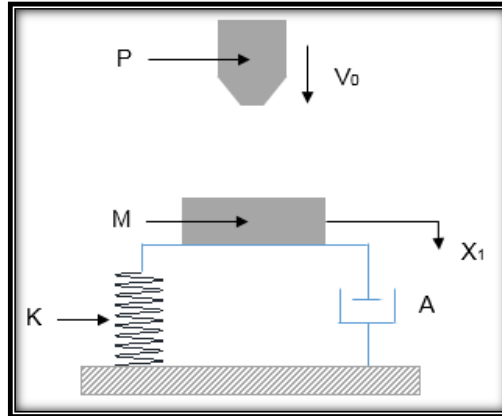


Figura 1.3: Arreglo de muelle con un resorte (Axel O. Bohn, 1989).

Con base en los resultados obtenidos por el Laboratorio Francés de Carreteras, se construyó en la Universidad Técnica de Dinamarca (DTH) el primer Deflectómetro de fabricación Danesa, del cual se muestra un diagrama en la Figura 1.4. Este primer Deflectómetro no era muy fácil de operar. Una persona sostenía el medidor de deflexión constantemente mientras que el peso pasaba por su cabeza, tampoco era fácil de transportar (Axel O. Bohn, 1989)

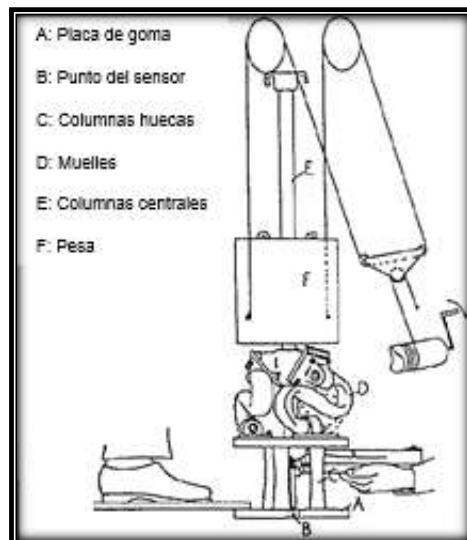


Figura 1.4: Primer Deflectómetro Danés (Axel O. Bohn, 1989).

Hoy en día, los Deflectómetros comerciales de peso descendente se entregan con vigas instaladas, las cuales están equipadas con 6 o 7 geófonos para la medición de deflexión a diferentes distancias. El número de geófonos puede incrementarse a 9 en algunos de los casos, según sea requerido (Axel O. Bohn, 1989).

Comúnmente, el equipo está montado en un remolque, el cual contiene un conjunto de pesas que se pueden dejar caer libremente desde alturas normalizadas sobre una placa apoyada en el pavimento y cuya área es representativa del contacto de los neumáticos de un vehículo o de una aeronave, según sea el caso. Las pesas y su altura de caída pueden combinarse de manera que pueden obtenerse rangos de impactos de 20 a 240 KN, para el HWD de Dynatest (2,700 a 24,500 kg), lo cual permite simular desde el paso de un vehículo de carga mediano hasta el paso de una aeronave de grandes dimensiones. En Figura 1.5 se muestra un Deflectómetro de impacto actual.



Figura 1.5: Deflectómetro de impacto actual (Smith et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, la carga cae sobre una placa circular cuya superficie es similar al área de contacto de un neumático, y los efectos reproducidos por el impacto en el pavimento son determinados en siete sensores, cuyas posiciones típicas pueden ser las que se muestran en la Figura 1.6 (Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., 2010).

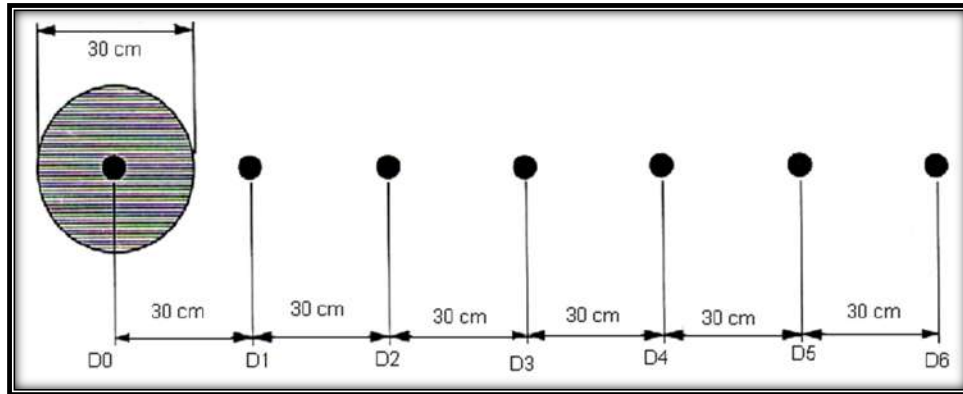


Figura 1.6: Arreglo típico de los sensores de un Deflectómetro de impacto (Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., 2010).

Si bien, estas distancias pueden modificarse de acuerdo con las recomendaciones de algunos organismos. Mediante un procesamiento de las mediciones de campo, el dispositivo permite obtener las deflexiones bajo cada uno de los sensores, pudiendo definirse, por lo tanto, la forma y dimensiones de la cuenca de deflexiones, aspectos que están relacionados con el espesor y rigidez del pavimento, las características de los materiales de apoyo y la magnitud de la carga aplicada. A través de un procedimiento de cálculo inverso, pueden determinarse los módulos de elasticidad de las diferentes capas del pavimento y la subrasante.

Con el paso del tiempo y el amplio desarrollo tecnológico, se ha mejorado el FWD. La recopilación de datos por computadora se implementó en 1981. En 1982 se añadió el control total de la operación de FWD por computadora. En los últimos años se le ha añadido la capacidad de mostrar y registrar el historial de tiempo del impulso de carga y las señales de deflexión, junto con la medición de la temperatura del aire y del pavimento, la medición electrónica del sistema de posicionamiento global (GPS), entre otras mejoras.

La norma ASTM D-4694-96, indica que los componentes básicos de un FWD son los siguientes (Chatti et al., 2017):

- Celda de carga: El FWD libera masas con pesos variables conocidos (de 13.5 a más de 222.5 kN) desde una altura determinada sobre una placa de carga

apoyada sobre el pavimento, produciendo sobre esta una carga similar en magnitud y duración a la de la rueda de un vehículo en movimiento.

- Transductor de desplazamiento variable lineal (LVDT), geófonos y acelerómetros: Una serie de sensores que están situados a distancias fijas de la placa de carga. El sistema debe mostrar y almacenar las mediciones de deflexión con una resolución de +/- 0.1 milésimas o menos. El espaciamiento del sensor depende de la superficie del pavimento que se esté probando y del número de sensores en el FWD.
- Sensores de temperatura infrarrojos: Temperatura de la superficie del pavimento y temperatura del aire.
- Medición electrónica de la distancia
- Unidad de control y adquisición de datos

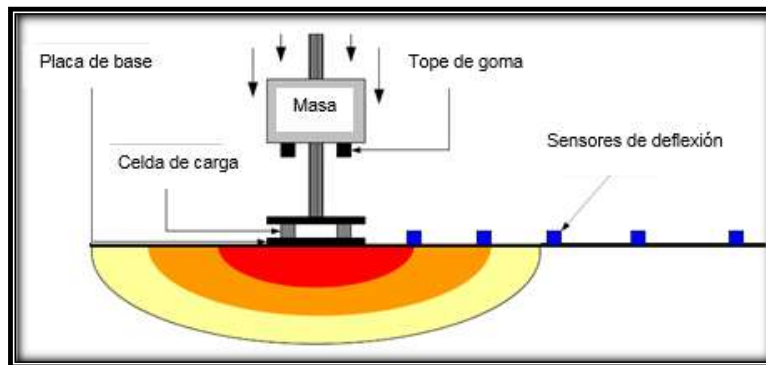


Figura 1.7: Diagrama de un Deflectómetro de impacto FWD (Chatti et al., 2017).

En la actualidad existen diversos fabricantes de Deflectómetros de impacto, sin embargo, en México los que tienen mayor presencia son los que a continuación se mencionan y describen brevemente (Irwin, Ph.D., & P.E., 2002):

- Dynatest (Instalaciones de fabricación en Dinamarca y los Estados Unidos)
- KUAB (Suecia)
- JILS (Estados Unidos)

1.2.1 DYNATEST

Dynatest ofrece actualmente dos modelos de remolque FWD, el 8000 y el 8082. El 8000 aplica cargas de impacto máximo en el rango de 7 a 120 KN (1,500 a 27,000 lbf), mientras que el modelo 8082 (HWD) (Denominado "Deflectómetro de peso pesado") aplica cargas de impacto máximas en el Rango de 30 a 320 KN (6,500 a 71,800 lbf). Los rendimientos de medición con el HWD van desde 200 a 300 puntos por día aproximadamente, dependiendo de los requisitos de control de tráfico y pruebas específicas.

Con el Deflectómetro de Dynatest se pueden utilizar dos tamaños de platos diferentes: una unidad de 300 mm (11.8 pulgadas) o una placa de diámetro de 450 mm (17.7 pulgadas). La placa más pequeña se utiliza típicamente para Pavimentos de carreteras, mientras que la placa mayor es comúnmente usada en pavimentos de aeropuertos. En la Figura 1.8 y 1.9 se muestran los modelos Dynatest (Chatti et al., 2017).

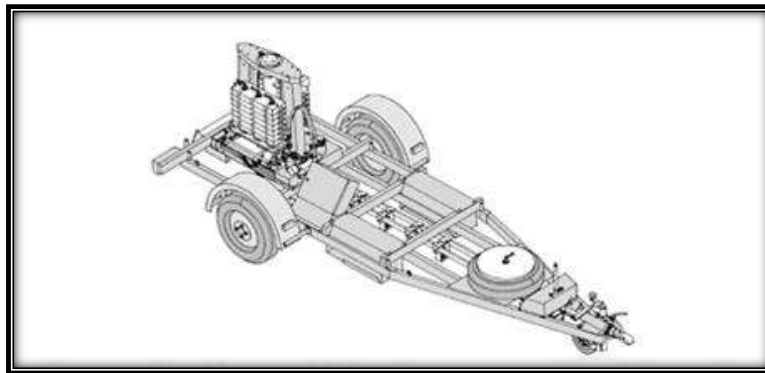


Figura 1.8: Modelo Dynatest 8000 FWD (Chatti et al., 2017).

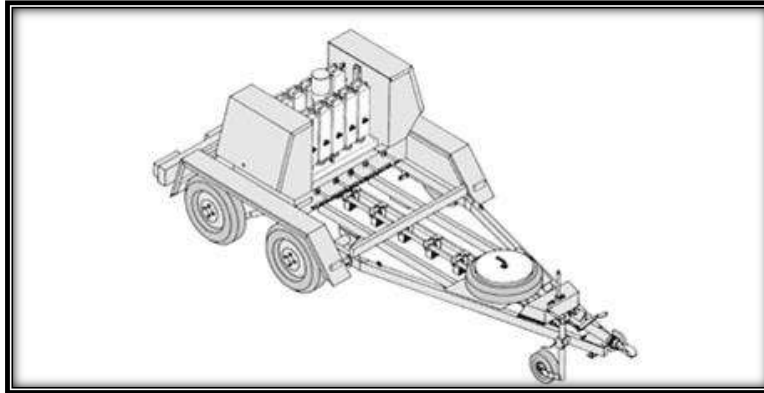


Figura 1.9: Modelo Dynatest HWD 8082 (Chatti et al., 2017).

1.2.2 KUAB

El FWD de la empresa KUAB, es un dispositivo de carga por impulso dinámico montado en remolque que puede ser jalado por cualquier vehículo adecuado. Al igual que otros FWD, el dispositivo KUAB tiene un sistema de carga y una serie de sensores de deflexión. Sin embargo, también tiene un rasgo característico propio, incluyendo una carcasa metálica que encierra completamente el sistema de carga (ver Figura 1.10). Algunas otras de sus características son las siguientes: (Chatti et al., 2017):

- Configuración de dos masas: La masa de carga inicial se deja caer sobre un sistema intermedio de amortiguación. Luego transmite la fuerza a otro sistema de amortiguación, que a su vez transmite la carga a la placa. El uso del sistema de dos masas crea un pulso de carga más suave que simula los efectos reales de un vehículo en movimiento.
- Placa de carga segmentada: Este tipo de placa garantiza una distribución de presión uniforme sobre toda la superficie de la placa.
- Sismómetros: Siete sismómetros entran en contacto con la superficie durante la prueba y miden la deflexión desde el plato de carga. Un sensor se coloca sobre la carga y los otros seis detrás y delante de la carga para medir el desplazamiento a diferentes distancias de la placa de carga. Cada sismómetro incluye un Transductor de desplazamiento variable lineal (LVDT). En comparación con otros sensores de FWD, los sismómetros pueden

proporcionar las lecturas de deflexión más directas y tienen un rango de medición más grande. Los sensores de medición tiene un rango de 0 a 50 milésimas de segundo.

Están disponibles cuatro modelos de KUAB (KUAB 50, KUAB 120, KUAB 150 y KUAB 240), Siendo la diferencia primaria la magnitud de la carga que se puede aplicar. El rango de cargas va desde 3,000 a 14,000 lbf (13.5 a 62.5 KN), con el KUAB 50, siendo el más ligero, hasta KUAB 240 con cargas de hasta 66,000 lbf (300 KN). Los cuatro modelos soportan hasta siete sensores y tienen disponible dos placas de carga al igual que el Dynatest: de 11.8 y 17.7 pulgadas (30 y 45 cm) de diámetro (Chatti et al., 2017).



Figura 1.10: Deflectómetro KUAB (Chatti et al., 2017).

1.2.3 JILS

JILS por su parte, produce tres sistemas FWD: JILS-20, JILS-20HF y JILS-20T con Radar de Penetración (GPR). El JILS-20 es un FWD que está montado en un remolque de doble eje al igual que los Dynatest FWD, el sistema incluye una placa de carga de 30 centímetros (12 pulgadas), Transductor de distancia longitudinal (DMI), hardware de medición de temperatura y un sistema de monitoreo de video. Tiene un motor de gasolina independiente con un alternador de 12 V. Además, se podrían montar hasta 10 sensores en el vehículo (ver Figura 1.11). La compañía también proporciona su software de recolección de datos de FWD. JILS-20HF es

un FWD de carga pesada. Está diseñado para ensayar pavimentos de aeropuertos o pavimentos de carreteras de gran espesor. Las especificaciones son similares a las JILS-20. El JILS-20T es idéntico al JILS-20 excepto que incorpora un sistema GPR con el FWD (Chatti et al., 2017).



Figura 1.11: Modelo JILS 20 (jilswd.com, 2017).

El Deflectómetro de impacto, aun cuando es considerado como un equipo de alto rendimiento en la auscultación de carreteras, su uso a través del tiempo ha mostrado ciertos problemas o desventajas. Una de ellas es que el equipo toma mediciones puntuales, por lo que, se vuelve estacionario y esto genera perturbaciones al tránsito.

Derivado de esto se han realizado investigaciones en algunos países, entre ellos Estados Unidos, Suecia y Dinamarca, para producir un dispositivo de mayor velocidad para el monitoreo de la capacidad estructural del pavimento a nivel de red, es decir, dispositivos automáticos de mayor velocidad con ruedas cargadas. Actualmente puede existir más de un equipo que realice esta tarea. Sin embargo, el principio general es el mismo para todos los dispositivos, el cual consiste en medir sin contacto la deformación del pavimento al paso de una rueda cargada y comparar el perfil en condiciones de carga, con un perfil (no cargado) de referencia (Broutin, 2010).

El principal objetivo de estos dispositivos, no es necesariamente evaluar la capacidad portante del pavimento a lo largo de todo el perfil del camino, por lo que, se centra en dos objetivos específicos:

1. Determinar los niveles de capacidad de carga, para definir áreas homogéneas y tener un mejor objetivo de las pruebas de resistencia.
2. Obtener mediciones relativas fiables para seguir la evolución de la capacidad de carga con el tiempo.

Existen, distintos prototipos en diferentes partes del mundo. Los dispositivos americanos son el Deflectómetro de peso rodante (RWD) (Briggs et al., 1999) y el Deflectómetro de rueda (RWD) (Herr y Johnson, 1995), desarrollados respectivamente por Dynatest Consulting y Quest Integrating Applied Research Associates. El dispositivo Sueco desarrollado por VTI (Instituto Nacional Sueco de Investigación de Carreteras y Transportes) llamado el Probador de Deflexión de Carreteras (RDT) (Andren y Lenngren, 2000). Finalmente, el dispositivo Danés desarrollado conjuntamente por DRI (el Instituto Danés para las Carreteras) y la empresa Greenwood SAS Engineering, fue inicialmente llamado Deflectógrafo de Alta Velocidad (HSD) y luego renombrado como TSD (Traffic Speed Deflectometer).

Todos estos aparatos (excepto el RWD para aeropuertos) permiten mediciones a velocidad de tráfico normal (hasta 80 km/h) (Broutin, 2010).

Otro dispositivo es el RDD (The Rolling Dynamic Deflectometer), desarrollado en la Universidad de Texas a mediados de la década de 1990, es un Deflectómetro que aplica grandes cargas cíclicas al pavimento y mide el efecto cíclico inducido. En el RDD, se utilizan varios sensores para medir deflexiones a diferentes distancias de las áreas cargadas. Sin embargo, a menudo se recoge y estudia la deflexión máxima para proporcionar una indicación de la rigidez general del pavimento para que este pueda ser dividido en áreas de respuesta similar. Las pruebas de deflexión pueden realizarse mientras el vehículo RDD viaja a velocidades de hasta 2.4 km/h (1.5 mi/h). El camión tiene un peso bruto aproximado de 22,000 kg (44,000 lb). En las Figuras 1.12 y 1.13 se muestra esquemáticamente el RDD (Smith et al., 2017).

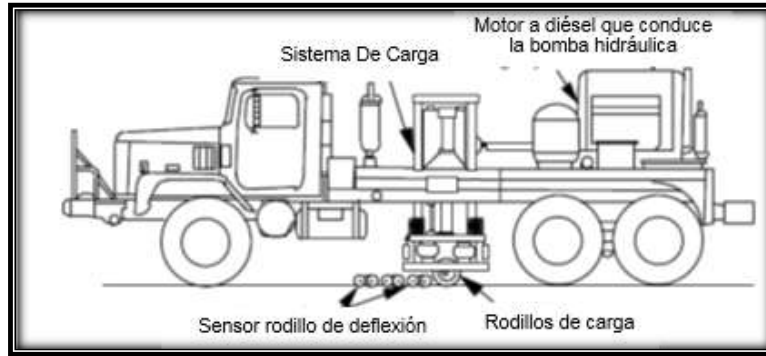


Figura 1.12: Esquema del RDD (Smith et al., 2017).

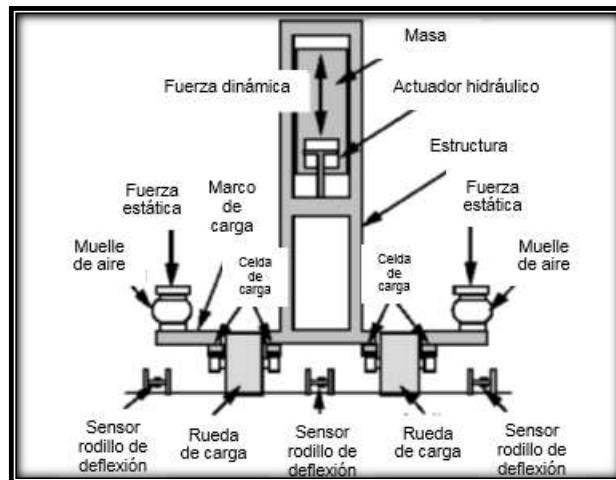


Figura 1.13: Sistema de medición de carga y deflexión RDD (Smith et al., 2017).

El RWD (Rolling Wheel Deflectometer), es un semi-remolque de un eje sencillo dual, equipado con cuatro láseres montados sobre una viga de aluminio debajo del remolque, para medir las deflexiones (ver Figura 1.14). El remolque es de 16 m (53 pies) de largo y puede variar la carga del eje individual de 8,160 a 10,890 kilogramos (18,000 a 24,000 libras) mediante el uso de tanques de agua instalados permanentemente sobre el eje trasero. El largo tráiler fue seleccionado para minimizar el rebote diferencial desde el frente hasta la parte trasera del remolque y permitir la longitud de la viga a lo largo, de modo que los láseres delanteros estén lo suficientemente alejados del eje del tractor trasero. La viga de aluminio mide 7.8 m (25.5 pies) de largo y está equipada con cuatro láseres planos montados a 2.6 m

(8.5 pies) de distancia, con el láser más alejado, situado a 152 mm (6 pulgadas) detrás de la línea central del eje (Smith et al., 2017).



Figura 1.14: Esquema del RWD (Smith et al., 2017).

La configuración del RWD permite la recolección de datos de deflexión a velocidades de hasta 88 km/h (55 mi/h) en intervalos de 12.2 mm (0.5 pulgadas). Los ensayos de este equipo son de alta productividad ya que se pueden obtener datos de deflexión del pavimento de más de 483 km (300 millas) en un solo día. Los datos de deflexión medidos con este equipo han sido comparados con datos obtenidos con Deflectómetro de impacto FWD de manera satisfactoria (Gedafa, 2008).

1.3 RETROCÁLCULO: FUNDAMENTOS, METODOLOGÍAS Y RECIENTES AVANCES.

La ingeniería de caminos ha evolucionado en los últimos años hacia la preservación y rehabilitación de carreteras existentes, en lugar de la construcción de nuevas carreteras. El pavimento es probado in situ, a través de pruebas no destructivas (descritas en el apartado anterior) y los datos se procesan para determinar los módulos de las capas en el lugar. A este proceso se le denomina “Retrocálculo” o “Cálculo Inverso” (por sus siglas en inglés Backcalculation). El Retrocálculo es muy popular hoy en día debido a tres importantes avances en el campo de la ingeniería de pavimentos (Offei, Young, Ksaibati, & Apronti, 2013):

- El descubrimiento de la relación entre la deflexión del pavimento y la resistencia del pavimento (1935-1960)
- El desarrollo de teorías mecanicistas que relacionan las propiedades fundamentales de los materiales con los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en un sistema estratificado, así como los programas informáticos (1940-1970)
- Desarrollo de dispositivos de prueba para medir la deflexión del pavimento (1955-1980)

Hveem fue uno de los pioneros en relacionar la deflexión del pavimento con la resistencia del pavimento. En un estudio de Hveem, comenzó a medir las deflexiones transitorias de los pavimentos en 1938, utilizando transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT, por sus siglas en inglés) en 43 proyectos, para medir las deflexiones debidas a las cargas de ruedas en movimiento. Las mediciones se correlacionaron con deflexiones de superficie medidas con viga Benkelman. Hveem complementó el estudio realizando mediciones en laboratorio de las propiedades elásticas de los materiales. (Offei et al., 2013).

El estudio de Hveem concluyó que: "Sin duda, los resultados de futuras investigaciones de deflexión sobre una variedad de secciones estructurales de pavimento, a través de los Estados Unidos permitirán a los ingenieros de carreteras asignar niveles seguros de deflexión con una certeza razonable de que no estarán excesivamente fatigados durante su vida de diseño. Estos niveles de deflexión necesariamente tendrán en cuenta los materiales locales, el clima, el diseño de la mezcla asfáltica y las prácticas de construcción" (Offei et al., 2013).

Hveem et al. (1962), se dieron cuenta de que en ausencia de una teoría unificadora para analizar y comprender las deformaciones del pavimento, sería necesario desarrollar criterios de deflexión limitantes para cada sección estructural del pavimento, para cada tipo de material y para cada condición ambiental.

En la década de los 40's, los investigadores comenzaron a trabajar en el desarrollo de la teoría de capas elásticas y en programas informáticos para la automatización del procedimiento de retrocálculo. Varios investigadores aportaron las herramientas

teóricas de base mecanicista que permitirían el cálculo de las deflexiones del pavimento. Las teorías del sistema elástico de una capa habían sido publicadas por Boussinesq en 1885 y por Westergaard en 1925, para una placa elástica sobre una superficie líquida densa (es decir, sin acoplamiento por cortante).

Un estudio de Burmister (1962), proporcionó las primeras soluciones teóricas para un sistema de dos o más capas elásticas, basado en el uso de las funciones de Bessel. Un estudio de Schiffman (1962), se basó en el modelo de Burmister para proporcionar una solución general para un sistema de n capas elásticas. Sobre la base de esta solución, los programas informáticos de retrocálculo se desarrollaron a mediados de los años sesenta por las compañías petroleras CHEVRON y Shell (Offei et al., 2013).

Las hipótesis hechas en la teoría del sistema de dos capas de Burmister son las siguientes:

- Los suelos de cada una de las dos capas son homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos
- La capa superior (capa 1) al igual que las demás, se considera sin peso y es de extensión infinita en la dirección horizontal, pero de espesor finito. La capa inferior (subrasante) es de extensión infinita horizontal y verticalmente
- Condiciones de contorno:
 - a) La superficie de la capa superior es libre de esfuerzo normal y de corte fuera del límite del área de carga
 - b) A una profundidad infinita los esfuerzos y desplazamientos en la subrasante son iguales a cero
- La solución del problema de dos capas satisface la condición de continuidad de esfuerzos y desplazamientos a través de la interfaz entre las capas superior e inferior, es decir, en la interfaz, los esfuerzos normales y de corte, los desplazamientos verticales y horizontales son iguales en las dos capas
- El valor de la relación de Poisson es 0.5

Basado en las hipótesis anteriores, Burmister redujo la complicada ecuación diferencial de la teoría elástica, a expresiones más simples como se muestra a continuación:

- Para áreas flexibles cargadas:

$$\Delta = 1.5 \frac{\sigma r}{E_2} F$$

$$E_2 = 1.5 \frac{\sigma r}{\Delta} F$$

- Para áreas rígidas cargadas:

$$\Delta = 1.18 \frac{\sigma r}{E_2} F$$

$$E_2 = 1.18 \frac{\sigma r}{\Delta} F$$

Dónde Δ es la deflexión, σ es el esfuerzo, r es el radio de apoyo, E_2 es el módulo de la capa inferior (Subrasante) y F es el llamado factor de deflexión que es adimensional y es función de ambas relaciones, del módulo de elasticidad de la subrasante del pavimento y de la relación de la profundidad con el radio de apoyo (Han, 1973).

Es sólo desde el advenimiento de la alta velocidad digital de computadoras, que la teoría ha adquirido una mayor importancia y se ha extendido a sistemas multicapa (Warren y Dieckman, 1963).

El propósito del retrocálculo es principalmente, como ya se ha mencionado, obtener los módulos elásticos in situ (E) de las diferentes capas que constituyen un pavimento, a partir de pruebas no destructivas y de la respuesta que tiene el pavimento ante la aplicación de una carga, obteniendo dicha respuesta a través de soluciones de la teoría elástica multicapa. El término respuesta del pavimento se refiere al cálculo de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que se generan en el pavimento cuando es sometido a las cargas vehiculares. En el proceso de retrocálculo, los valores de deflexión son calculados para los valores de los módulos elásticos determinados, para posteriormente, ser comparados con los valores de

deflexión medidos en campo con el Deflectómetro de impacto, los valores de módulos asumidos se ajustan adicionalmente para la siguiente iteración, es decir, cada iteración parte del módulo asumido anteriormente. La iteración del módulo continúa hasta que los valores de deflexión calculados y los medidos coinciden estrechamente en un rango definido. Esto lo podemos observar de manera esquemática en la Figura 1.15.

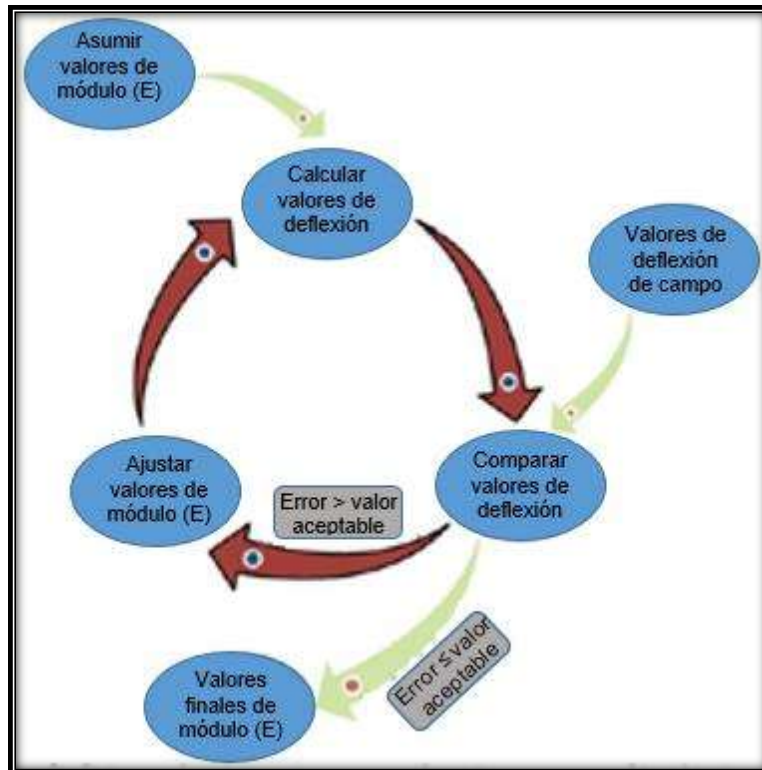


Figura 1.15: Diagrama típico del proceso de retrocálculo. (Das, 2008)

Existen dos tipos de métodos para realizar el retrocálculo. El primer método es el estático, que considera que la carga aplicada a la superficie del pavimento es una carga estática y se puede realizar de tres maneras distintas. La primera se basa en técnicas de iteración, la segunda en la búsqueda de una base de datos de cuencas de deflexión, y la tercera en el uso de ecuaciones de regresión ajustadas a una base de datos de cuencas de deflexión.

El otro método es el dinámico, el cual se basa en soluciones de frecuencia o tiempo. La carga aplicada y el historial de tiempo de las mediciones de deflexión se

transforman en el dominio de frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT).

Actualmente estos métodos se encuentran implícitos en programas informáticos. En la Tabla 1.1 y 1.2 se muestran algunos de estos programas.

Tabla 1.1: Programas de Retrocálculo Estático. (Chatti et al., 2017)

Nombre	Método de Retrocálculo	Análisis No Lineal	Número Máximo de Capas	Módulo Semilla	Rango de Módulos Aceptable	Capacidad para Fijar Módulos	Esquema de Convergencia	Función de Ponderación de Errores
BISDEF	Iterativo	No	Número de deflexiones, mejor para 3 incógnitas	Requerido	Requerido	Si	Suma de cuadrados de error absoluto	Si
CHEVDEF	Iterativo	No	Número de deflexiones, mejor para 3 incógnitas	Requerido	Requerido	Si	Suma de cuadrados de error absoluto	Si
ELMOD	Iterativo	Si (solo Subrasante)	4 (Excluyendo la capa rígida)	No	No	Si	Error Relativo de 5 sensores	No
ELSDEF	Iterativo	No	Número de deflexiones, mejor para 3 incógnitas	Requerido	Requerido	Si	Suma de cuadrados de error absoluto	Si
EVERCALC	Iterativo	Si (solo Subrasante)	5	Requerido (4 y más capas)	Requerido	Si	Suma de error absoluto	si
ISSEM4	Iterativo	si (concepto de cilindro finito)	4	Requerido	Requerido	Si	Error Relativo de deflexión	No
MICHBACK	Método de Newton	No	Número de deflexiones, mejor para 3 incógnitas	Requerido	Requerido	Si	Suma de cuadrados de error absoluto	
MODCOP5	Iterativo	Si	2 a 15 capas; máximo 5 capas desconocidas	Requerido	Requerido	Si	Error relativo en los sensores de deflexión	No
MODULUS	Base de Datos	Si	4 desconocidas más capa rígida	Requerido	Requerido	Si	Suma de cuadrados de error absoluto	si

En la Tabla 1.1 se mencionan algunos programas que utilizan los métodos estáticos. Estos programas utilizan como base de cálculo la teoría elástica multicapa; la mayoría de ellos utilizan un método iterativo en el retrocálculo y como esquema de convergencia el error absoluto de la suma de los cuadrados. Una diferencia marcada entre estos programas es el número de capas que se pueden utilizar en el proceso de análisis.

En la Tabla 1.2, se muestran los programas de retrocálculo dinámico los cuales se basan en el dominio de la frecuencia y el tiempo. Como se puede observar, en dicha tabla existe un menor número de programas disponibles con este enfoque, esto debido a que el tema del retrocálculo dinámico tiene poco desarrollo en la actualidad. Estos programas utilizan métodos de cálculo inversos basados principalmente en las teorías de los mínimos cuadrados.

Tabla 1.2: Programas de Retrocálculo Dinámico. (Chatti et al., 2017)

Programa	Dominio	Método Inverso	Programa Avanzado
BKGREEN	Frecuencia	Optimización de mínimos cuadrados No lineal	GREEN
PAVE-SID	Frecuencia	Sistema de Identificación (SID)	SCALPOT
FEDPAN	Tiempo	Mínimos cuadrados lineales	SAP IV
DYNABACK	Frecuencia / tiempo	Método de Newton con descomposición de mínimos cuadrados o valor singular	SAPSI
EVERCALC II	Tiempo	Mínimo cuadrado no lineal, optimización con regularización Tikhonov y método de continuidad	FEM

Debido a que el proceso de retrocálculo es iterativo y puede generar resultados distintos de acuerdo a quien realice el cálculo, existe la controversia de la certeza de los resultados obtenidos. De acuerdo con investigaciones realizadas en otros países y a la experiencia que ha venido dejando esta investigación al autor de este documento, se pueden valorar los resultados desde dos puntos de vista: 1) a partir de la experiencia del ingeniero que realiza la evaluación y su conocimiento en materiales, sin embargo, esta idea es muy subjetiva ya que comúnmente quien hace

el análisis no siempre es un especialista en el área y 2) ajustar los módulos obtenidos a través del proceso de retrocálculo a una temperatura de referencia y compararlos con valores típicos recomendados.

Desde el punto de vista del autor de este trabajo, la opción dos sería la mejor, dado que no siempre quien juzgará la fiabilidad de los resultados será un experto en el ámbito. Sin embargo, tiene una cierta desventaja el comparar los módulos obtenidos a través del proceso de retrocálculo con los obtenidos en un laboratorio, ya que siempre existirá una diferencia entre un resultado y el otro. Esta diferencia es debida a diversos factores, es decir, las condiciones de temperatura, esfuerzo, humedad, velocidad de carga, duración de la carga, densidad del material, entre otros, no son las mismas para ensayos de laboratorio y de campo, pues en laboratorio se tienen condiciones controladas, lo cual en campo es difícil controlar. También, el equipo de medición requiere de ser calibrado antes de realizar alguna prueba, así como la capacitación y experiencia del operador del equipo de prueba juegan un papel muy importante.

Diversos estudios demuestran que existe una importante diferencia entre los módulos elásticos obtenidos de ensayos de laboratorio y los estimados a través de las deflexiones de superficie por medio de la técnica del retrocálculo. Estos estudios concluyen que las diferencias entre los módulos elásticos de las capas obtenidos a través del retrocálculo y los medidos en laboratorio tienen una diferencia que oscila entre un 20% y 40% normalmente, sin embargo, existen algunos otros estudios que concluyeron que la diferencia puede ser mayor, por ejemplo, Nazarian et al. (1998), obtuvo resultados de una comparación entre los módulos obtenidos en laboratorio y los obtenidos por retrocálculo, para distintos materiales en Texas. Los resultados indicaron que los módulos de materiales vírgenes (material de banco sin haber sido utilizado anteriormente) y en servicio del mismo banco son diferentes. Llegaron a la conclusión de que los módulos del retrocálculo y de laboratorio presentaban la misma tendencia, teniendo en laboratorio un módulo 70% más alto que los módulos por retrocálculo (Offei et al., 2013).

Zhou (2000), realizó una comparación entre el laboratorio y los valores de módulo obtenidos por retrocálculo para el concreto asfáltico (AC) y los materiales de base granular en dos sitios de pruebas FWD en el estado de Oregon. El estudio muestra las comparaciones entre el laboratorio y los valores de módulo de campo. Los análisis demuestran que los módulos obtenidos en el retrocálculo para la capa de concreto asfáltico (AC) eran más bajos que las mediciones de laboratorio a la misma temperatura, en un rango de 20% a 30%. Sin embargo, para el material de base granular, los módulos calculados de nuevo fueron más altos que los módulos medidos en el laboratorio (Offei et al., 2013).

Ping et al. (2001), realizaron un estudio comparativo entre el laboratorio y los módulos obtenidos por retrocálculo con pruebas del FWD para materiales granulares en Florida. Su estudio indica que existe una correlación razonable entre los módulos por retrocálculo y los módulos resilientes de laboratorio. Concluyeron que los módulos calculados por retrocálculo eran aproximadamente 1.8 veces más altos que los módulos elásticos de laboratorio, para los materiales granulares compactados a contenidos de humedad y densidades in situ principalmente en la subrasante. Los autores señalaron que este hallazgo estaba en general de acuerdo con la guía de diseño AASHTO, que establece que los módulos por retrocálculo son típicamente entre 2 y 3 veces más altos que los módulos de laboratorio (Chatti et al., 2017).

En las Tablas 1.3 y 1.4, se muestran los rangos y valores típicos de módulos de elasticidad y relaciones de Poisson recomendados para diferentes materiales. Se eligieron para fines de comparación los módulos típicos recomendados en el manual del software CalBack, ya que, los módulos de elasticidad presentados aquí fueron obtenidos a través de pruebas realizadas a los diferentes materiales que componen las capas de los pavimentos existentes.

Tabla 1.4: Rango típico de módulos.
(University of California Pavement
Research Center, 2008)

Material	Rango E (Mpa)
Mezcla asfáltica en caliente	3000 - 4000
Concreto con cemento Portland	14000 - 56000
Materiales estabilizados	35 - 14000
Materiales no estabilizados	35 - 690

Tabla 1.3: Rango de valores de relación
de Poisson. (University of California
Pavement Research Center, 2008)

Material	Relación de Poisson
Concreto asfáltico	0.35
Concreto con cemento Portland	0.15 - 0.20
Base/Subbase estabilizada	0.25 - 0.35
Base/Subbase no estabilizada	0.35
Subrasante cohesiva (grano fino)	0.45
Subrasante sin cohesión (grano grueso)	0.35 - 0.40
Capa rígida	0.35 ó menos

1.3.1 PERSPECTIVA DEL RETROCÁLCULO DINÁMICO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles son estructuras de múltiples capas, típicamente construidos con una capa superior viscoelástica de concreto asfáltico y capas granulares por debajo de ella. La respuesta combinada de materiales viscoelásticos lineales y elásticos que están en unión perfecta es viscoelástica lineal.

Las propiedades mecánicas características, de sistemas viscoelásticos isotrópico-termoreológico simples son el módulo de relajación $E(t)$, el creep compliance $D(t)$, el módulo (dinámico) complejo E^* y los factores de cambio tiempo-temperatura. Estas propiedades características a menudo se expresan a una temperatura específica de referencia en términos de una "curva maestra". Para materiales termoreológicamente simples, estas propiedades características pueden ser

generadas en cualquier tiempo (o frecuencia) y temperatura, usando el principio de superposición tiempo-temperatura.

Existen estudios actuales, como el realizado por el departamento de transporte de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en su publicación FHWA-HRT-15-063 donde se desarrollaron dos algoritmos viscoelásticos multicapa. El primero (llamado LAVA/LAVAP), asume la capa de concreto asfáltico como un material viscoelástico lineal y las capas no ligadas (granulares) como elásticas lineales. El segundo algoritmo (denominado LAVAN), asume también la capa de concreto asfáltico como un material viscoelástico lineal, sin embargo, puede considerar los módulos elásticos no lineales (dependientes del esfuerzo) de las capas no ligadas, que desde un punto de vista más particular, este algoritmo representa algo más cercano a la realidad, ya que, la rigidez de las capas granulares si se ve afectada por la variación de los esfuerzos aplicados al pavimento.

Estos dos modelos, se utilizaron para desarrollar dos algoritmos de retrocálculo basados en GA (algoritmo genético) (llamados BACKLAVA/BACKLAVAP y BACKLAVAN), para determinar el módulo de relajación (E_t) o el módulo complejo (E^*) de la curva maestra de las capas de concreto asfáltico y las propiedades del material no ligado de los pavimentos en servicio.

Los investigadores concluyeron en este trabajo que, las propiedades viscoelásticas de la capa de concreto asfáltico se pueden obtener usando un esquema de dos etapas. La primera etapa es un retrocálculo elástico para determinar el módulo de la capa no ligada y después un retrocálculo viscoelástico del módulo de relajación (E_t) de la capa de concreto asfáltico, manteniendo fijas las propiedades de la capa no unida (Chatti et al., 2017).

También concluyen que, en caso de la presencia de efectos dinámicos considerables, los algoritmos (BACKLAVA y BACKLAVAN) deben utilizarse con precaución o utilizar el algoritmo de retrocálculo dinámico (DYNABACK-VE). Los algoritmos presentados en la investigación predicen el comportamiento del pavimento flexible como una estructura amortiguada viscoelástica, suponiendo que no tiene masa (Chatti et al., 2017).

La herramienta DYNABACK-VE, es una solución para el retrocálculo dinámico viscoelástico en el dominio del tiempo, para parámetros de pavimentos flexibles multicapa bajo pruebas del Deflectómetro FWD, en el dominio del tiempo. Este método utiliza una solución viscoelástica en el dominio del tiempo como una rutina directa (ViscoWave-II) y una rutina híbrida (DYNABACK-VE: algoritmo genético (GA) y el método Levenberg-Marquardt (LM modificado) para el análisis de retrocálculo. Para el retrocálculo basado en el algoritmo genético (GA), se recomienda utilizar DYNABACK-VE con un tamaño de muestra de 300 y un número de generaciones de 15. La ventaja de esta solución es que puede analizar la respuesta de los sistemas de pavimento en el dominio del tiempo y por lo tanto puede acomodar las propiedades de capa dependientes del tiempo e incorporar la propagación de ondas (Chatti et al., 2017).

Las investigaciones actuales realizadas sobre el tema del retrocálculo dinámico en pavimentos flexibles, tratan de simular de una mejor manera las condiciones reales de un pavimento en servicio. En esta metodología, se obtiene una respuesta combinada entre materiales viscoelásticos lineales (concreto asfáltico) y materiales elásticos no ligados (granulares) que pueden ser considerados como lineales o no lineales según sea el caso, es decir, que pueden ser considerados dependientes del esfuerzo o no.

A través de esta metodología se obtienen los módulos de las diferentes capas del pavimento a partir de una solución dinámica en el dominio del tiempo utilizando pruebas no destructivas con Deflectómetro de impacto

Esta metodología es aplicable únicamente a pavimentos flexibles y no funciona para pavimentos rígidos, ya que, se basa en modelos viscoelásticos y como el concreto hidráulico es un material muy rígido no es considerado como viscoelástico debido al comportamiento que presenta. De igual forma la respuesta de un pavimento flexible no es la misma que en un pavimento rígido, por lo que, la transferencia de cargas no se da de la misma forma debido a que un pavimento de concreto hidráulico tiene una alta rigidez y absorbe en la primera capa la mayor parte de los

esfuerzos, a diferencia de un pavimento flexible que transmite gran parte de los esfuerzos a las capas inferiores.

Otra diferencia entre ambos pavimentos, que hace la metodología del retrocálculo dinámico exclusiva de los pavimentos flexibles, es que en los pavimentos flexibles la primera capa de material viscoelástico es considerada de longitud infinita en la dirección horizontal, a diferencia de un pavimento rígido en donde la primer capa está compuesta de bloques de dimensión finita en la dirección horizontal, unidos unos con otros a través de barras de acero conocidas como pasajuntas, las cuales tienen como finalidad la transferencia de carga de un bloque a otro, haciendo así distinta la transferencia de cargas y por ende de los esfuerzos entre ambos tipos de pavimento.

CAPÍTULO 2

RETROCÁLCULO

2.0 RETROCÁLCULO

El Retrocálculo o Cálculo Inverso, es un proceso a través del cual obtenemos los módulos elásticos de las capas del pavimento, en donde intervienen o son requeridos datos de auscultación medidos en campo como son, las deflexiones (respuesta del pavimento ante la aplicación de una carga) obtenidas con Deflectómetro de impacto y los espesores de capa medidos con radar de penetración (GPR).

En este capítulo se verá a detalle la metodología desarrollada para el proceso de retrocálculo en esta investigación. En la metodología propuesta, se hacen una serie de recomendaciones para llevar a cabo el proceso de retrocálculo. El objetivo de la metodología es definir un procedimiento que sirva de guía al momento de realizar el retrocálculo, con el cual se busca que los resultados sean más confiables y reproducibles independientemente de quien realice el proceso de retrocálculo.

2.1 PROGRAMAS DE APOYO

Los programas de apoyo empleados para el proceso de retrocálculo son el software CalBack del Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC) y Evercalc del Departamento de Transporte de Washington (WSDOT), los cuales serán brevemente descritos a continuación.

2.1.1 SOFTWARE CALBACK

CalBack es una herramienta desarrollada bajo las actividades de investigación de la Universidad de California. El software CalBack versión 1.01-2010925, sirve para el análisis de distintos tipos de pavimentos entre los cuales se encuentran los de tipo flexibles, rígidos, y compuestos. En la Figura 2.1 se muestra la ventana de inicio del programa.

CalBack, ofrece una serie de características importantes que hace que sea una herramienta única y útil para los ingenieros de pavimentos. Los datos pueden introducirse directamente desde un archivo JILS FWD, una base de datos de

Dynatest FWD, y desde un base de datos de ELMOD (University of California Pavement Research Center, 2008).

Los datos de deflexión importados de la base de datos son revisados mediante diversos filtros a través de un conjunto de reglas que determinan la confiabilidad de los datos. Los datos de deflexión con anomalías son marcados y se solicita al usuario que acepte, descarte, o corrija los datos antes del ser utilizados en el proceso de retrocálculo.

El software CalBack se utiliza para determinar los módulos de cada capa del pavimento, a través de las pruebas de deflexión utilizando un Deflectómetro de Impacto. Los módulos de cada una de las capas no se pueden calcular directamente, sino que se determinan usando un procedimiento inverso. El programa iniciará el cálculo a partir de unos módulos iniciales propuestos por el programa o modificados por el usuario, calculando la deflexión en cada uno de los sensores (geófonos) para la carga utilizada en la prueba con el Deflectómetro de impacto. Las deflexiones calculadas se comparan con los valores medidos en campo con el Deflectómetro, sí el ajuste entre las deflexiones medidas y calculadas no es satisfactoria, los módulos de entrada son modificados (por el usuario o por el programa) y las deflexiones se calculan de nuevo. Este proceso se repite hasta que ya no es posible reducir la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas, o hasta que se ha obtenido un ajuste satisfactorio entre deflexiones.

Para el cálculo, el programa requiere de ciertos datos de entrada como: espesores de capa, seleccionar un tipo de material de la base de datos del programa, y un valor de módulo inicial asignado por el programa o por el usuario. Una vez introducidos todos los datos de entrada se puede iniciar el cálculo de un solo punto medido a la vez, o de todos los puntos de medición del tramo de estudio. Lo que realiza el programa durante el cálculo es una serie de iteraciones, donde los módulos de entrada se cambian varias veces a fin de reducir la diferencia entre las deflexiones medidas y calculadas. El proceso iterativo continuará hasta que el programa no sea capaz de reducir más la diferencia entre las deflexiones.



Figura 2.1: Ventana de inicio software CalBack

El programa tiene tres modelos de respuesta:

1. Odemark-Boussinesq
2. WES
3. LEAP

El programa usa por default la teoría Odemark–Boussinesq para el cálculo de las deflexiones mediante las cuales se hacen las iteraciones en la búsqueda del gradiente que relacione los valores medidos con los calculados. También se pueden utilizar otros dos modelos de respuesta basados en la teoría elástica multicapas. El WES es el modelo desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el modelo LEAP (Layer Elastic Analysis Pavement) es desarrollado por la Universidad de California (ver Figura 2.2).

El programa además cuenta con tres parámetros o motores de búsqueda:

1. Búsqueda de gradiente
2. Filtro Kalman
3. Algoritmo Genético

Los dos primeros, son modelos de ajuste sencillos que realizan el cálculo de manera rápida, pero con un bajo número de iteraciones, a diferencia del algoritmo genético (basado en las redes neuronales) que realiza un mayor número de iteraciones, por

lo que, puede ser más lento el cálculo utilizando este método, sin embargo, con él se logra un mejor ajuste entre las deflexiones medidas y las calculadas.

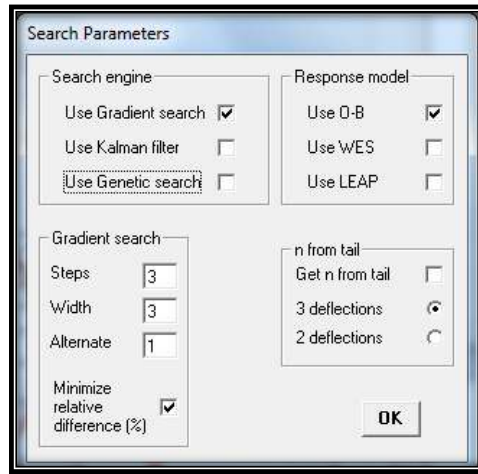


Figura 2.2: Modelos de respuesta y parámetros de búsqueda, CalBack

Para la interpretación de los datos de deflexión el programa requiere de una base de datos del programa Access (Figura 2.3). La base de datos deberá contener los valores de las deflexiones en micras, el esfuerzo y la carga a las que fueron medidas las deflexiones, así como el número de geófonos utilizados en la prueba. También deberá contener las estaciones de medición y las temperaturas tanto del aire como de la superficie del pavimento.

Estacion	Carga	Esfuerzo	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	mensaje para agregar
2	2	678	47.92	454.0	321.0	253.0	199.0	122.0	78.0	42.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	3	863	46.72	620.0	390.0	256.0	184.0	100.0	67.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	4	893	48.39	444.0	311.0	248.0	204.0	123.0	83.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	5	897	49.27	292.0	218.0	181.0	152.0	104.0	78.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	6	890	48.77	280.0	155.0	153.0	126.0	88.0	89.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	7	882	48.23	270.0	206.0	156.0	129.0	82.0	58.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	8	881	48.39	181.0	145.0	120.0	100.0	72.0	37.0	36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	9	897	49.27	220.0	143.0	112.0	90.0	59.0	46.0	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	10	678	47.92	300.0	300.0	250.0	142.0	63.0	36.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	11	863	47.03	542.0	317.0	242.0	177.0	102.0	69.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	12	887	48.36	342.0	197.0	132.0	88.0	39.0	23.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13	13	899	49.43	252.0	157.0	118.0	94.0	64.0	46.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	14	885	48.42	408.0	268.0	195.0	144.0	87.0	64.0	42.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
15	15	887	48.56	415.0	219.0	138.0	87.0	50.0	36.0	36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	16	885	48.42	493.0	299.0	206.0	144.0	82.0	59.0	36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
17	17	883	48.39	280.0	170.0	135.0	100.0	39.0	19.0	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	18	894	49.06	143.0	108.0	85.0	89.0	49.0	37.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Figura 2.3: Ejemplo de base de datos de Access para CalBack

Una vez creada o abierta una base de datos así, como introducidos todos los valores requeridos por el programa se podrá iniciar el proceso del retrocálculo, seleccionando el modelo de respuesta y el parámetro de búsqueda deseado. La ventana de retrocálculo es la que se muestra en la Figura 2.4.

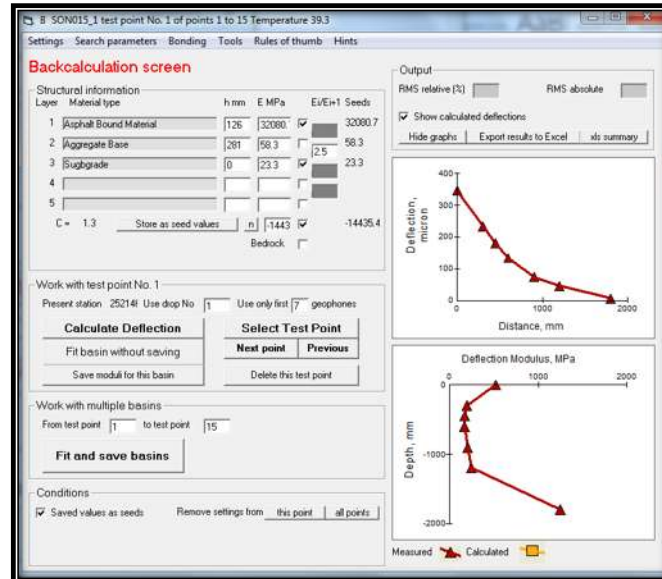


Figura 2.4: Ventana de retrocálculo, CalBack

Asimismo, el programa también muestra una ventana de impresión de los resultados del retrocálculo (ver Figura 2.5), en la cual podemos ver de manera gráfica el RMS (Root Mean Square), el módulo calculado a la temperatura de medición, el módulo ajustado a la temperatura de referencia (en este caso es 20 °C), la temperatura de las mediciones y la curva maestra. Además, de visualizar gráficamente los resultados en la ventana también, pueden ser exportados los valores obtenidos a Excel.

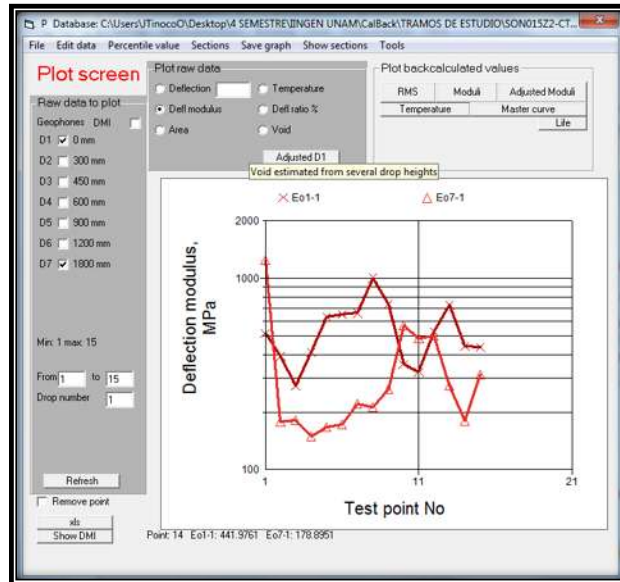


Figura 2.5: Ventana de impresión, CalBack

El programa se puede ejecutar en dos modos, normal y avanzado, como se muestra en la Figura 2.6. El modo avanzado es el más completo y permite utilizar todas las funciones del programa y por el contrario en el modo normal se restringen algunas funciones del programa como, por ejemplo, la elección del modelo de respuesta y los parámetros de búsqueda. Si se desea realizar un análisis más completo se recomienda utilizar el programa en el modo avanzado.

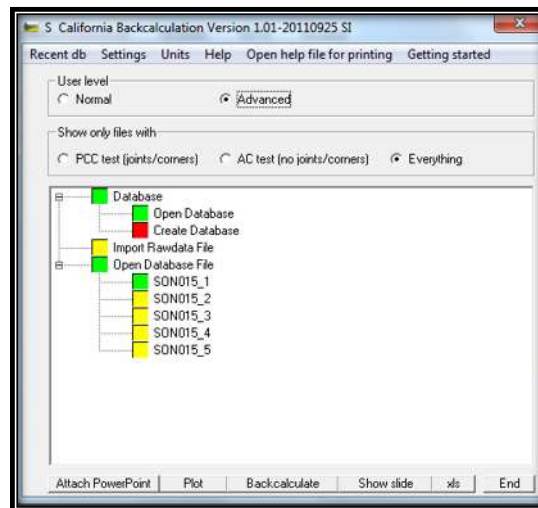


Figura 2.6: Ventana principal, CalBack

2.1.2 EVERCALC

Evercalc es un programa de la paquetería EVERSERIES, desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT). En la Figura 2.7 se muestra la ventana de inicio del programa.

Evercalc es un programa informático de análisis de pavimentos, que calcula los módulos "elásticos" de las capas de pavimento. Evercalc estima el módulo de elasticidad para cada capa del pavimento, determina los coeficientes de sensibilidad al esfuerzo para materiales no estabilizados, esfuerzos y deformaciones a diversas profundidades y opcionalmente normaliza el módulo de la HMA (Mezcla asfáltica en caliente) a una condición estándar de laboratorio (temperatura) (Washington State Department of Transportation, 2005).

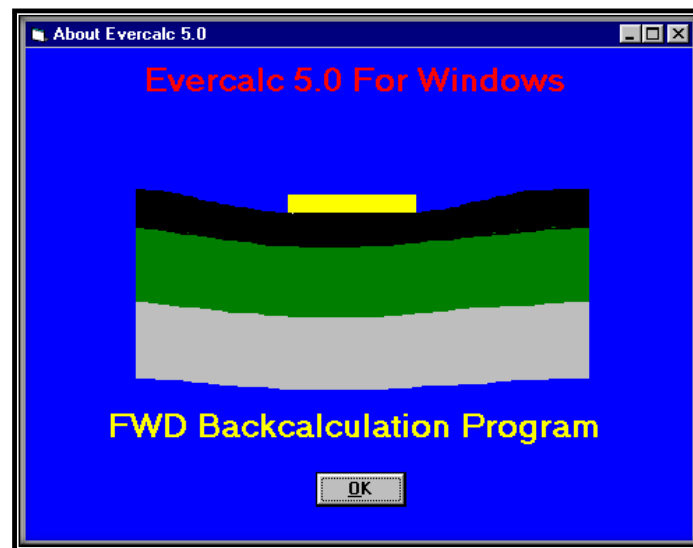


Figura 2.7: Ventana de inicio Evercalc (Washington State Department of Transportation, 2005).

Evercalc utiliza un enfoque iterativo para cambiar los módulos en una solución elástica, para que coincida con deflexiones teóricas y medidas. Un diagrama de flujo simplificado de este método se muestra en la Figura 2.8 (Washington State Department of Transportation, 2005).

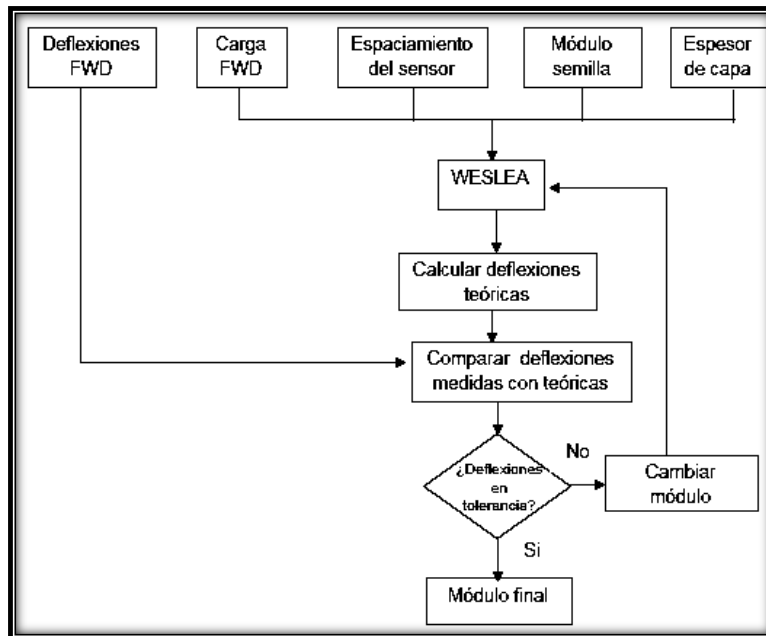


Figura 2.8: Diagrama de flujo, Evercalc (Washington State Department of Transportation, 2005).

El programa Evercalc utiliza WESLEA (programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos), como la solución de la teoría elástica multicapas para calcular las deflexiones así, como también un algoritmo Gauss-Newton para la optimización del cálculo. El programa está basado en las hipótesis de la teoría elástica multicapa que indican lo siguiente:

- Las capas son infinitas en la dirección horizontal
- Las capas tienen un espesor finito
- La capa inferior es semi-infinita en la dirección vertical
- Las capas se componen de materiales homogéneos, isotrópicos, linealmente elásticos, caracterizados por el módulo de elasticidad y la relación de Poisson

Evercalc, utiliza una técnica de cálculo inversa para determinar los módulos elásticos de las capas del pavimento, usando las deflexiones de superficie del pavimento. El programa puede manejar hasta diez sensores y doce golpes por estación. El programa es capaz de evaluar una estructura de pavimento flexible que contiene hasta cinco capas. A partir de una estimación inicial aproximada de

módulos de capa (módulos iniciales), el programa busca iterativamente el módulo "final" para cada capa de pavimento. Las deflexiones calculadas utilizando WESLEA, se comparan con las medidas en cada iteración. Cuando las diferencias entre en las deflexiones calculadas y las medidas con el Deflectómetro, están dentro del error caracterizado por el RMS (Root Mean Square), o los cambios en el módulo caen dentro de la tolerancia permisible, o el número de iteraciones ha alcanzado un límite máximo en el análisis, el programa termina utilizando el conjunto final de módulos; asimismo, se calculan los esfuerzos y deformaciones en la parte inferior de la capa de HMA (Mezcla asfáltica en caliente), a la mitad de las otras capas (Excepto la subrasante) y en la parte superior de la subrasante. Cuando se dispone de datos de deflexión para más de un nivel de carga en un punto dado, se calculan coeficientes de sensibilidad a los esfuerzos para materiales no estabilizados. Opcionalmente, el módulo de capa HMA se normaliza a una condición de laboratorio estándar (Washington State Department of Transportation, 2005).

En cuanto a los módulos iniciales, existen dos opciones para estimarlos. Cuando se está analizando una estructura de pavimento que contiene hasta tres capas, se puede usar un conjunto de ecuaciones de regresión interna. Estas ecuaciones de regresión determinan un conjunto de módulos iniciales a partir de las relaciones entre el módulo de capa, deflexiones de superficie, carga aplicada y espesor de capa. Alternativamente, el usuario puede proporcionar estos valores. Cuando se analiza más de un conjunto de datos de deflexión en una ubicación dada, los módulos finales del conjunto de datos de deflexión anterior se utilizan como módulos iniciales para el siguiente análisis para mejorar el desempeño del programa.

Cuando se cumplen una o más de las siguientes condiciones mostradas en las Ecuaciones 2.1 y 2.2, el programa finaliza el cálculo (Avila & Albarracin, 2015):

1. Tolerancia entre deflexiones (medidas y calculadas):

$$RMS (\%) = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} (100) \quad (2.1)$$

Dónde, d_{ci} y d_{mi} son las deflexiones calculadas y medidas en el i -ésimo sensor y n es el número de sensores. Normalmente se considera adecuada una tolerancia de deflexión del uno por ciento (Washington State Department of Transportation, 2005).

2. Tolerancia de módulo (Ecuación 2.2):

$$\varepsilon_m = \frac{[E(K + 1)i - EK_i]x(100)}{EK_i} \quad (2.2)$$

Dónde, E_k y $E_{(k+1)}$ son los módulos de la i -ésima capa y k -ésima y $(k+1)$ -ésima iteración, respectivamente y m es el número de capas con módulos desconocidos.

Una vez más, se considera adecuada una tolerancia de módulo del uno por ciento.

3. Se ha alcanzado el número máximo de iteraciones. En cada iteración se realiza un mínimo de $(m+1)$ llamadas a WESLEA, donde m es el número de capas con módulos desconocidos. Normalmente un número máximo de diez iteraciones es adecuado.

Para realizar el retrocálculo, el programa requiere un archivo general de datos y un archivo de datos de deflexión. Si se utiliza la opción capa rígida, se calcula primero la profundidad a la capa rígida y luego se realiza el retrocálculo real. El retrocálculo se puede realizar de dos formas (ver Figura 2.9):

- Modo iterativo: En este modo, el retrocálculo se lleva a cabo en el primer plano y el progreso durante cada iteración y las cuencas de deflexión calculadas y medidas al final de la iteración se muestran en la pantalla.
- Modo por lote: En el modo por lote, el retrocálculo se realiza en segundo plano. Los detalles de la iteración se guardan en un archivo de registro con el mismo nombre que el archivo de datos de deflexión con la extensión .LOG.

Si se utiliza la opción de capa rígida, se presenta al usuario un histograma y una tabla de profundidad a capa rígida aparente y con el identificador de estación. El

usuario puede elegir aceptar la profundidad calculada a valores de capa rígida o modificarlo antes de realizar el cálculo posterior.

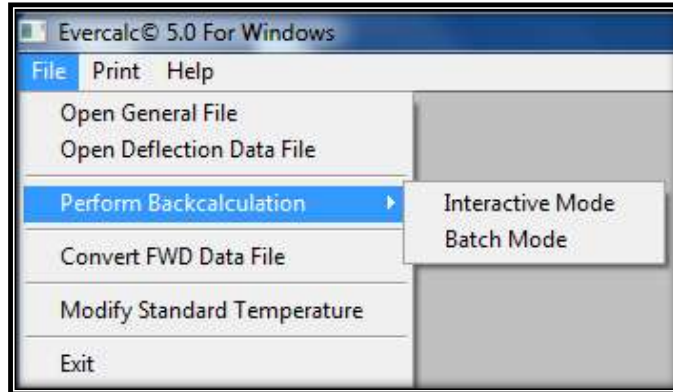


Figura 2.9: Modos de retrocálculo en Evercalc

El primer paso para realizar el proceso de retrocálculo, es el desarrollo del archivo general de datos. El archivo general de datos contiene los datos generales del pavimento y las especificaciones generales del dispositivo de ensayo no destructivo. Una vez que se ha generado el archivo, aparecerá la pantalla como la que se muestra en la Figura 2.10.

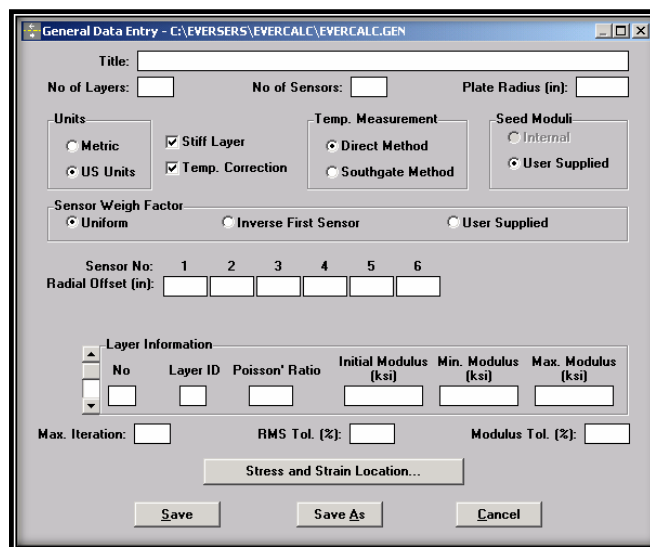


Figura 2.10: Ventana de archivo general de datos (Washington State Department of Transportation, 2005).

Después de crear el archivo general de datos, el usuario debe crear el archivo de datos de deflexión. El archivo de datos de deflexión contiene los datos recogidos del dispositivo de ensayo no destructivo. Existen dos métodos para introducir datos de deflexión. El primer método es a "mano" introduciendo los datos de carga y deflexión. El segundo método consiste en la conversión de un archivo de datos FWD (Dynatest 8,000 versión 20 solamente) en bruto. Una vez que se ha generado el archivo, se mostrará la pantalla que se muestra en la Figura 2.11.

Drop No.	Load(lbf)	1	2	3	4	5	6
1							
2							
3							
4							

Figura 2.11: Ventana de archivo de datos de deflexión (Washington State Department of Transportation, 2005).

Para convertir un archivo FWD sin procesar en un archivo de datos de deflexión, se seleccionará el archivo y luego se procede a convertirlo. El usuario deberá seleccionar el archivo general de datos y el archivo FWD que desea convertir. Aparecerá en la pantalla una ventana como la que se muestra en la Figura 2.12.

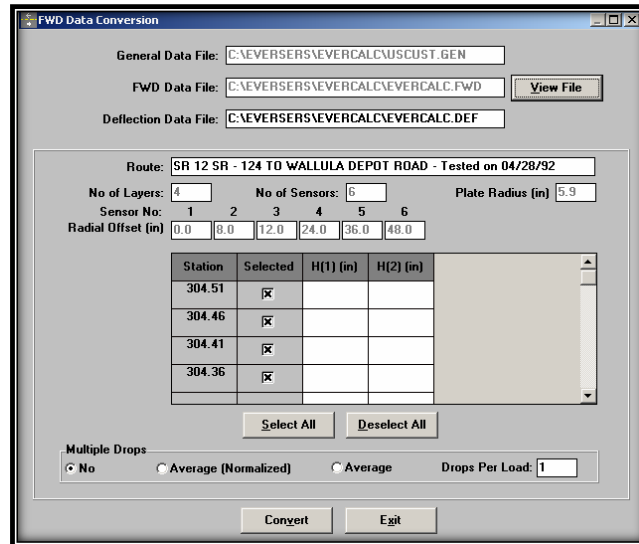


Figura 2.12: Conversión de archivo FWD (Washington State Department of Transportation, 2005).

Los programas descritos anteriormente, son los que se utilizaron para el proceso de retrocálculo de los cuatro casos de estudio mencionados. Si se requiere conocer de manera más detallada el funcionamiento de los programas, se recomienda indagar sobre las teorías base de los mismos y en el manual de operación de cada uno.

En el próximo apartado se abordará la metodología propuesta en este trabajo para llevar a cabo la obtención de los módulos elásticos de las capas de pavimentos existentes a través del cálculo inverso.

2.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Actualmente, no existe una metodología estructurada que sirva como guía para realizar el proceso del retrocálculo, por lo que, siempre se hace a juicio del Ingeniero o de la persona que lleve a cabo el análisis. Es recomendable que la persona encargada de hacer un análisis por retrocálculo sea un ingeniero especialista en pavimentos, sin embargo, en la práctica es común que el analista no sea especialista en el área.

Es por ello, que en este trabajo se propone una metodología a seguir para el proceso del retrocálculo, con la finalidad de que los resultados sean más confiables. También

hay que estar conscientes de que los resultados del proceso de retrocálculo pueden traer consigo un cierto margen de error, debido a que en el proceso se utilizan datos medidos en campo que pudieron no llevar un control de calidad adecuado durante su obtención, entre otros factores. También pueden existir diferencias entre los módulos obtenidos en laboratorio y los obtenidos por medio del retrocálculo, esto se debe a que en laboratorio se tienen condiciones controladas y a que no ha sido posible reproducir de forma precisa las condiciones que existen en el pavimento en servicio.

2.2.1 DETECCIÓN DE DATOS INCONGRUENTES O ATÍPICOS

A través de la experiencia que han dejado los análisis de retrocálculo y en especial el realizado para este trabajo, es necesario hacer una evaluación de los datos de deflexión ya que, de la calidad de datos que tengamos depende la confiabilidad de los resultados del retrocálculo. Hemos descubierto a lo largo de este trabajo, que es necesario crear filtros para detectar los datos atípicos o incongruentes en los valores de deflexión y en sus temperaturas de medición.

Lo más recomendable, debido a la gran cantidad de datos de deflexión que pueden manejarse, es que el proceso de filtración sea automatizado para que rápidamente puedan ser detectados los valores irracionales antes de ser utilizados en el retrocálculo.

En la actualidad existen programas como el CalBack que realizan ese proceso de filtración para detectar los datos de deflexiones y temperaturas de medición atípicos. Al cargar la base de datos en CalBack, se ejecuta de manera automática el filtrado de los datos antes de iniciar el cálculo y obtener los módulos de las capas del pavimento. En la Figura 2.13 se muestra la ventana donde el programa realiza la detección de estos datos atípicos.

Test point#	Drop	Reason	Temp C	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
3	1	Dcr	26.39	50161	377.61	193.15	197.96	127.76	90.03	49.32	36.59
5	1	Dcr	23.10	51263	172.67	96.48	103.84	88.24	69.93	60.29	46.92
13	1	Dcr	23.06	53829	312.64	152.23	154.21	98.48	69.99	37.64	28.88
25	1	Dcr	24.70	53373	296.08	194.32	204.18	173.62	132.08	108.52	77.78
29	1	Dcr	24.68	53067	319.34	198.19	198.30	128.99	87.84	48.64	37.10
77	1	Dcr	22.81	57177	580.09	281.55	285.84	183.87	130.34	70.94	53.51
81	1	Dcr	22.79	54209	415.44	186.47	193.72	126.34	88.20	47.91	35.99
115	1	Dcr	28.40	95987	338.79	278.67	285.07	238.82	166.41	111.34	50.66
121	1	Dcr	28.71	61336	376.39	174.97	184.72	120.03	83.48	46.50	34.07
133	1	Dcr	28.65	60537	359.37	197.74	202.40	131.18	90.72	50.36	37.26
145	1	Dcr	28.58	59540	161.33	92.37	92.91	60.84	42.79	23.53	17.36
163	1	Dcr	28.47	60920	485.89	258.03	258.94	170.67	120.29	65.47	48.88
171	1	Dcr	32.40	64515	217.91	126.09	166.74	148.54	127.21	104.63	80.96

Figura 2.13: Detección de valores atípicos en CalBack (University of California Pavement Research Center, 2008).

El programa detecta valores de deflexión con valor “0”, valores de deflexión “no decrecientes”, valores que exceden la “relación de deflexión” y “temperaturas fuera del rango” permitido.

Sin embargo, no todos los programas para realizar retrocálculo disponibles en el mercado realizan este pre-proceso de la información, como es el caso del Evercalc que es el otro programa que se utilizó para el análisis en este trabajo. Debido a estos, es necesario realizar ese pro-proceso de las deflexiones por separado antes de introducir los datos al programa de retrocálculo.

La automatización de este pre-proceso quizás para los ingenieros de caminos sea un poco complicado sino se tiene la preparación, por la cuestión de la programación, si es el caso lo recomendable es apoyarse de un Ingeniero programador.

Sin embargo, en nuestro caso para este pre-proceso de la información, realizamos una sencilla macro en el programa Excel, la cual nos detecta en todo el conjunto de datos, los valores de deflexión con valor de “cero”, valores “no decrecientes” y temperaturas de medición “fuera de rango”. En la macro, se revisa cada valor de deflexión y temperatura para cada estación de medición, y si se localiza algún dato atípico en las columnas del lado derecho de los datos en la hoja de cálculo, aparecerá en la celda correspondiente a cada dato “Deflexión 0” si es el caso, “Error

Deflexión” si la deflexión no decrece con la distancia en algún geófono, “Error” si la temperatura de medición excede el límite inferior, “Temperatura Fuera de Rango” si la temperatura rebasa el límite superior. Para casos contrarios a los mencionados en las celdas aparecerá la leyenda “ok”, lo cual indicará que los datos están listos para ser introducidos en algún programa de retrocálculo. A continuación, en las Tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se muestran ejemplos de los filtros utilizados para el pre-proceso de la información.

Tabla 2.1: Ejemplo 1 de datos de deflexión

No.	Cadenamiento	Carga [kN]	Área [m ²]	Esfuerzo [kPa]	Deflexiones [micras]							Temperatura [°C]	
					S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Superficie	Aire
1	209+800	49.27	0.07	697	475	224	155	121	84	50	15	36	13
2	209+600	49.83	0.07	705	484	253	152	94	56	40	28	36	14
3	209+400	49.62	0.07	702	478	277	189	133	75	52	32	36	13
4	209+199	49.83	0.07	705	355	212	149	110	71	50	30	36	14
5	209+000	49.76	0.07	704	401	257	182	127	68	46	31	36	15
6	208+799	48.56	0.07	687	442	297	223	172	104	72	39	36	13
7	208+599	48.42	0.07	685	505	311	225	159	79	53	35	36	14
8	208+400	48.63	0.07	688	484	290	217	166	103	73	48	36	14
9	208+196	48.42	0.07	685	496	320	234	170	94	66	43	36	14
10	208+000	47.57	0.07	673	753	405	309	235	137	94	54	36	15

Tabla 2.2: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 1

	Deflexiones (Decreciente)						Deflexión "0"							Temperatura °c	
	s1 y s2	s2 y s3	s3 y s4	s4 y s5	s5 y s6	s6 y s7	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	Superficie	Aire
Revisión Datos	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Tabla 2.3: Ejemplo 2 de datos de deflexión

No.	Cadenamiento	Carga [KN]	Área [m2]	Esfuerzo [kPa]	Deflexiones [micras]							Temperatura [°C]	
					S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Superficie	Aire
23	22+000	58.74	0.07	831	154	102	83	71	51	40	40	37	32
24	23+000	58.46	0.07	827	180	127	105	88	59	37	33	37	32
25	24+000	57.82	0.07	818	97	72	68	62	50	41	27	37	31
26	25+000	58.95	0.07	834	194	82	46	29	18	9	9	37	31
27	26+000	57.11	0.07	808	120	59	40	28	22	15	15	37	31
28	27+002	60.44	0.07	855	206	131	104	89	66	50	37	38	32
29	28+016	60.22	0.07	852	218	147	112	88	63	47	42	37	32
30	31+500	60.72	0.07	859	103	64	48	42	27	14	3	38	31
31	32+500	57.96	0.07	820	96	72	66	56	38	24	24	38	32

Tabla 2.4: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 2

	Deflexiones (Decreciente)						Deflexión "0"							Temperatura °C	
	s1 y s2	s2 y s3	s3 y s4	s4 y s5	s5 y s6	s6 y s7	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	Superficie	Aire
Revisión Datos	ok	ok	ok	ok	ok	error deflexión	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	error deflexión	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	error deflexión	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	error deflexión	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Tabla 2.5: Ejemplo 3 de datos de deflexión

No.	Cadenamiento	Carga [kN]	Área [m ²]	Esfuerzo [kPa]	Deflexiones [micras]							Temperatura [°C]	
					S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	Superficie	Aire
7	168+000	50.17	0.071	709.760	272.7	181.4	155.6	131.3	97.0	73.4	25.3	49.2	74.9
8	168+199	49.71	0.071	703.253	383.8	284.7	242.1	198.7	140.5	104.6	36.9	49.8	33.1
10	168+599	49.37	0.071	698.443	389.1	301.1	260.5	217.3	154.0	110.9	36.4	49.1	35.6
11	168+800	49.37	0.071	698.443	371.7	271.1	238.0	202.1	149.1	111.8	39.4	48.1	77.1
12	168+988	49.94	0.071	706.506	342.0	263.3	227.7	188.3	130.6	92.2	29.1	49.2	46.4
13	169+199	49.83	0.071	704.950	374.9	293.3	255.6	212.6	147.6	104.1	35.1	49.4	37.4
14	169+399	49.48	0.071	699.999	329.6	227.3	198.1	169.2	127.2	99.6	39.9	48.7	64.1
15	169+600	49.48	0.071	699.999	318.3	231.8	200.1	165.7	117.5	88.0	35.5	49.2	48
16	169+791	49.13	0.071	695.047	419.6	304.3	264.6	220.5	157.2	116.2	44.2	49.8	54.2

Tabla 2.6: Revisión de datos de deflexión, Ejemplo 3

	Deflexiones (Decreciente)						Deflexión "0"							Temperatura °C	
	s1 y s2	s2 y s3	s3 y s4	s4 y s5	s5 y s6	s6 y s7	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	Superficie	Aire
Revisión Datos	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	fuera de rango
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	fuera de rango
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	fuera de rango
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Una vez realizado el pre-proceso de los datos de deflexión y temperaturas de medición, el siguiente paso es dividir cada tramo en secciones homogéneas para después poder pasar al retrocálculo. La finalidad de dividir los tramos en secciones homogéneas es que los espesores y los materiales de cada capa sean representativos de la sección y que el módulo obtenido sea lo más confiable posible. En el apartado 2.2.2, se explica de manera detallada el procedimiento empleado para seccionar cada uno de los tramos de estudio.

2.2.2 SECCIONES HOMOGÉNEAS

El criterio que se tomó para dividir los tramos en secciones homogéneas fue utilizando un método propuesto por el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras de Francia (LCPC) en el año de 1981 por Lebas (Lebas et al., 1981) (University of California Pavement Research Center, 2008).

El método utiliza la función mostrada en las Ecuaciones 2.3 y 2.4:

$$g(i) = \frac{n}{i * (n - i)} * \left[\sum_{j=1}^i y_j \right]^2 \quad (2.3)$$

$$y_j = x_j - \bar{x} \quad (2.4)$$

Dónde:

i = es el número de datos menos 1

n = es el número de datos o mediciones

y_j = es el valor de la medición menos la media.

Originalmente la función considera que los datos siguen una distribución normal y cuando se utiliza esta metodología para la división de un tramo en secciones homogéneas se deben de cumplir ciertas condiciones, tales como:

- La sección homogénea debe de tener un mínimo de 10 puntos de medición (deflexiones) para ser considerada como tal
- El riesgo de una división errónea (α) de las secciones homogéneas debe de ser del 2% como máximo

El método original hace uso de la estadística, empleando las Ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7:

$$u = (1 - r) \sqrt{\frac{n^2 - 1}{n - 2}} \quad (2.5)$$

$$r = 0.5 \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_j + 1 - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (2.6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2.7)$$

Dónde:

n = Número de puntos

x_j = Es el valor del en el punto j

Primero se calcula u para el número total de puntos en la sección, después ese valor es comparado con los límites u_α y $u_{1-\alpha}$ de la distribución- t , donde α es el riesgo de división errónea de las secciones homogéneas.

Si $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$, entonces los datos siguen una distribución normal. Si $u > u_{1-\alpha}$, entonces los datos tienen variaciones periódicas o sistemáticas y puede subdividirse donde la función $g(i)$ está en su máximo. Los cálculos se repiten para cada una de las subsecciones. Si $u < u_\alpha$ entonces los datos contienen fluctuaciones rápidas y no se puede realizar la subdivisión.

Se eligió este método, dado que el programa CalBack lo utiliza para realizar la misma acción y quedó comprobado que este método realiza un buen ajuste al seccionar los tramos, sin embargo, a pesar de que el programa lo realiza automáticamente se programó la función en una hoja de cálculo de Excel, con la finalidad de verlo gráficamente y de manera más práctica para después, poder realizar los larguillos de las secciones homogéneas.

La función se programó para los espesores de capa en cada tramo de estudio y el criterio tomado para la división de las secciones homogéneas fue donde la función $g(i)$ para cada capa presentara un cambio de pendiente importante (cuando está en su máximo o tiene fluctuaciones importantes), de esta forma se ubicaron los cambios de pendiente y su cadenamamiento correspondiente para definir cada una de las secciones. En este apartado, solo se muestran gráficamente las secciones homogéneas correspondientes al tramo México-Pachuca como se observa en la Figura 2.14, las secciones correspondientes a los demás tramos de estudio se colocaron en el Anexo A.

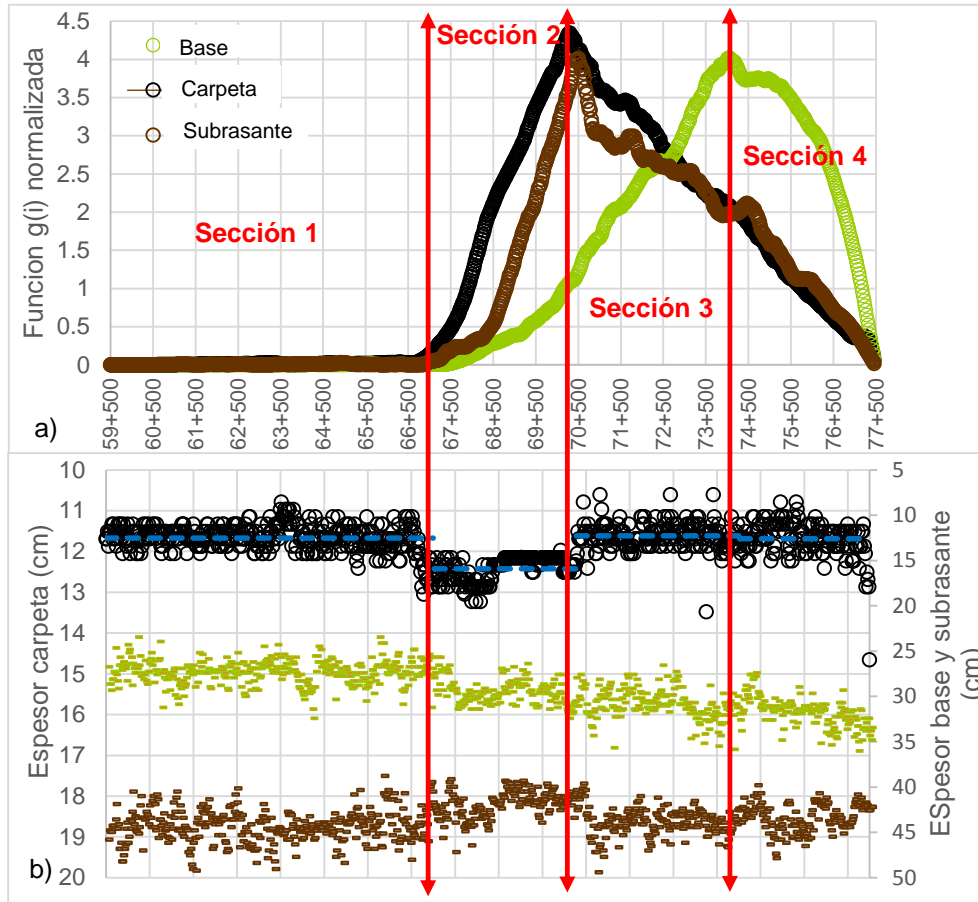


Figura 2.14: Secciones homogéneas, tramo km 59+500 al 77+500, carretera México-Pachuca, a) Función $g(i)$ para los espesores de capa, b) Espesores de capa por sección homogénea

La Figura 2.14a muestra la función $g(i)$ para los espesores de las distintas capas del pavimento, en la cual el eje horizontal contiene el cadenamiento del tramo y en el eje vertical el valor de la función normalizada. En la Figura 2.14b, se grafican los espesores de las distintas capas del pavimento, en centímetros, los cuales fueron medidos con el GPR y confirmados con algunos sondeos realizados en sitio, en las dos graficas el color negro corresponde a la carpeta, el color verde a la base y el café a la subrasante y la línea punteada azul representa el valor promedio del espesor de la carpeta para cada sección homogénea.

Una vez realizado esto, como siguiente paso se realizó el larguillo de secciones homogéneas como se muestra en la Figura 2.15. En el larguillo se fueron colocando las condiciones en orden de importancia de acuerdo con el criterio tomado por el autor de este trabajo.

Primero se muestran los valores que van relacionados directamente con la condición estructural, como lo es la estructura del pavimento (espesores) y las deflexiones. Seguido de esto se colocan las condiciones de superficie, es decir, el agrietamiento (%), el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), La profundidad de rodera (PR), y la macrotextura (MAC).

En este caso se observó que, en el larguillo de secciones homogéneas, cada una de las condiciones cumple con el criterio de una sección homogénea, es decir, que para considerarse como tal sus características deben de ser similares en la longitud de la sección. La finalidad de dividir el tramo en secciones con características similares es poder tener un comportamiento representativo en cada una de ellas y para que los resultados en el análisis por retrocálculo sean más confiables para cada sección de estudio.

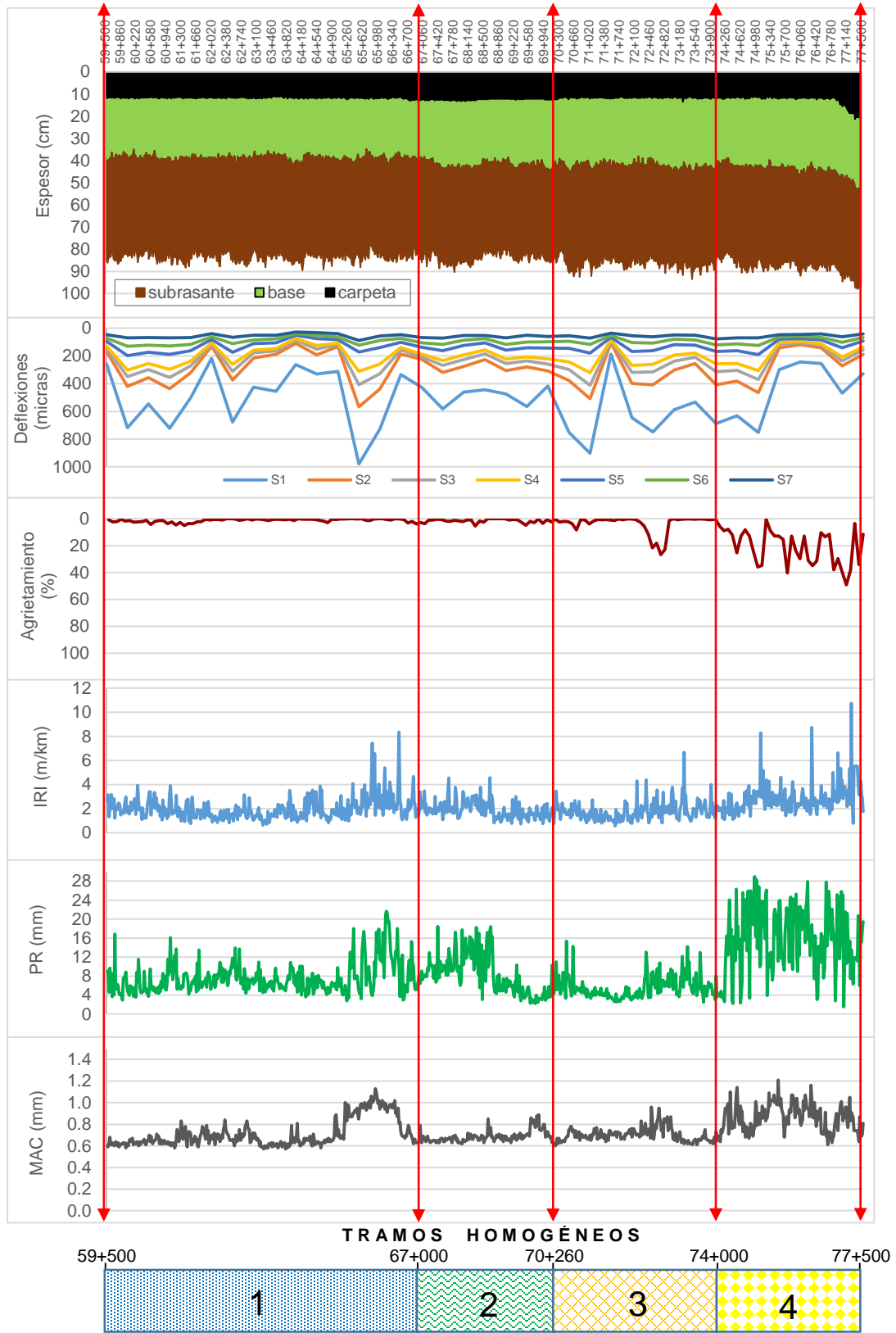


Figura 2.15: Larguillo de secciones homogéneas, tramo México-Pachuca km 59+500 al 77+500

Una vez definidas completamente las secciones homogéneas y antes de pasar al proceso de la obtención de los módulos, se requiere el valor de los espesores promedio de cada una de las capas del pavimento que utilizaremos en el análisis. En nuestro caso obtuvimos los espesores promedio para cada uno de los tramos mediante la programación de una hoja de cálculo de Excel. A continuación en la Figura 2.16, se muestran los espesores promedio de cada uno de los tramos de estudio por sección homogénea.

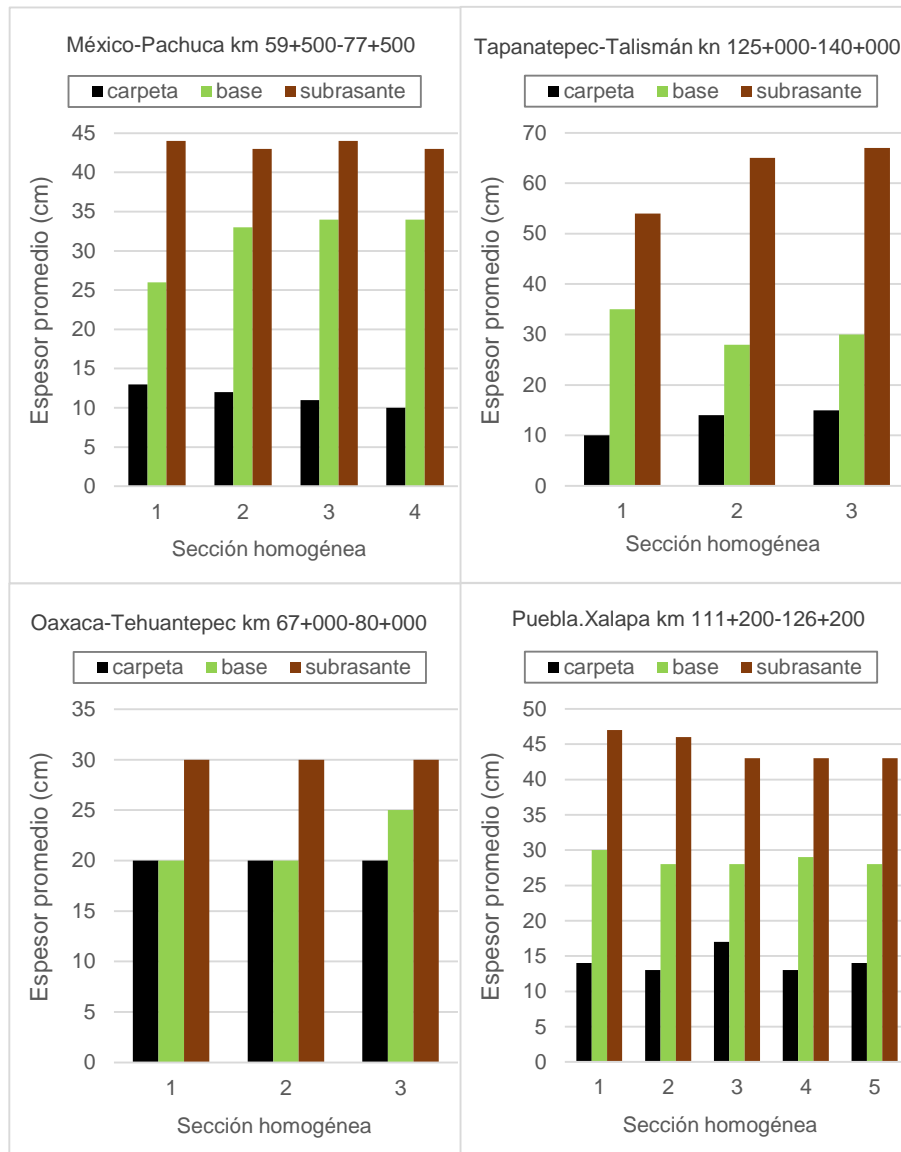


Figura 2.16: Espesores Promedio

2.2.3 OBTENCIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS

Ya definidos todos los datos de entrada, el siguiente paso es realizar el retrocálculo para obtener los módulos de cada una de las capas del pavimento. Una vez iniciado el retrocálculo se recomienda verificar que el ajuste de las cuencas de los valores medidos con los calculados sea lo más cercano posible. Esto lo podemos verificar con el RMS (Root Mean Square) y se recomienda para esto que las diferencias estén entre el 4% y 5% como máximo ya que, entre menor sea el RMS mayor será el ajuste de las cuencas. Cuando este ajuste no sea satisfactorio habrá que verificar que los espesores de las capas sean los adecuados (lo más recomendable es que se realicen sondeos en campo para verificar los espesores). En la Figura 2.17, se muestra la comparación entre los espesores medidos con GPR y los medidos a través de sondeos.

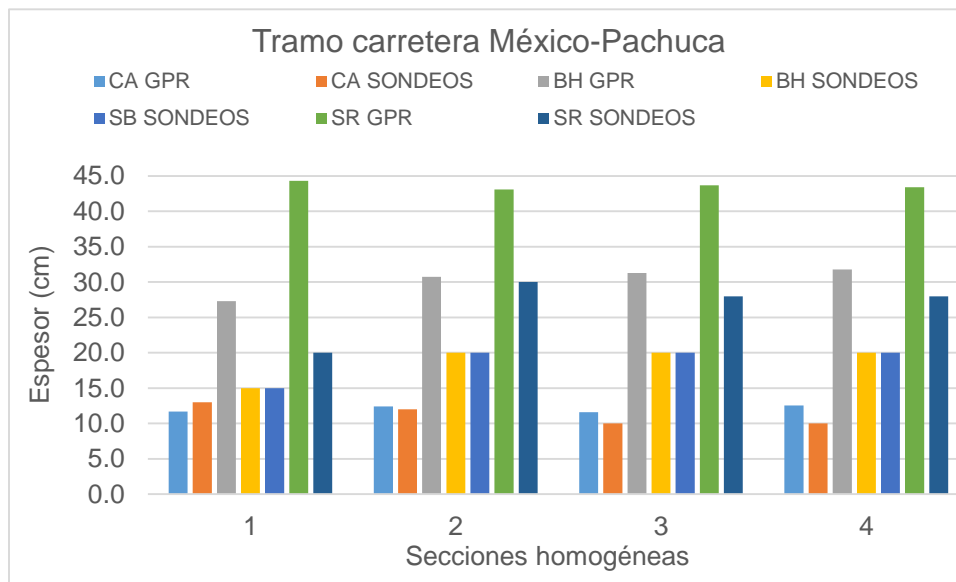


Figura 2.17: Comparación de espesores de capa

Una vez comparados los datos, se obtuvo un valor promedio para el caso de la carpeta asfáltica. Para el caso de la base, observamos que existe gran diferencia entre el valor medido con GPR y el valor en los sondeos. Al revisar los sondeos se observó que se contaba con una capa de subbase, que en cuanto a material tenía características similares al de la base, por lo que, se decidió unir ambas capas granulares y la suma de los espesores fue el espesor final utilizado para la capa de

base, por lo que, la capa de subbase quedo descartada. En cuanto a la capa de subrasante se tomaron los espesores medidos con el GPR, esto debido a que el espesor reportado en los sondeos para esta capa estaba por debajo del valor mínimo especificado en la norma N CMT 1 03/02 de materiales para subrasante de la SCT. Los espesores finales utilizados en el proceso de retrocálculo de este tramo en estudio son los que se muestran en la Figura 2.18.

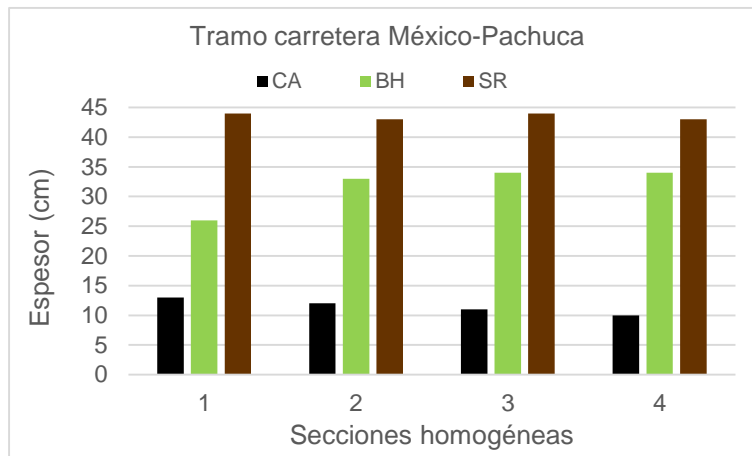


Figura 2.18: Espesores finales utilizados

Si aún, teniendo la certeza de que los espesores son los adecuados no se logra el ajuste, se recomienda subdividir o unir las capas granulares (base y subbase) siempre y cuando los materiales que los conforman sean de características similares como en el caso presentado aquí, o incluso colocar una capa delgada rígida por encima de la subrasante para tratar de lograr un mejor ajuste y que los resultados sean representativos del sitio en estudio. Cabe mencionar, que en el caso de este trabajo no fue necesario colocar la capa rígida por encima de la subrasante, solo se unió la capa de base con la de subbase y con esta configuración se logró el ajuste deseado. Tomando en cuenta los criterios anteriores y los valores típicos de módulos los resultados, se consideran aceptables, es decir, si los módulos obtenidos por retrocálculo se encuentran dentro de un rango de entre el 40% al 70% (rango obtenido en pruebas por diversos autores citados en párrafos anteriores) respecto a los módulos típicos recomendados por el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (ver Tabla 1.4) y que el ajuste de las

cuencas se haga con un RMS dentro del rango propuesto, se consideran aceptables los resultados.

En la Figura 2.19, se muestra un ejemplo donde se verifica que los módulos ajustados a la temperatura de referencia, obtenidos con el software CalBack, para la sección homogénea 4 del Tramo km 59+500 al km 77+500 de la carretera México-Pachuca, se encuentren dentro de los límites máximos del rango propuesto (70% máximo), tomando como referencia un valor promedio de 3,500 MPa del rango típico mostrado en la Tabla 1.4.

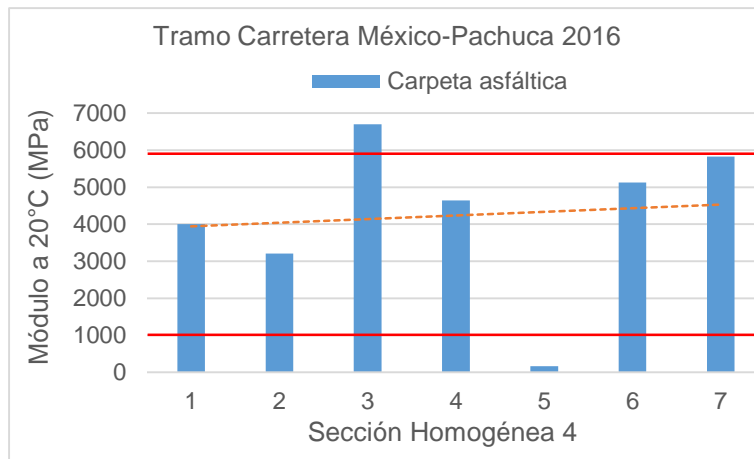


Figura 2.19: Rango de aceptación de los módulos

En la Figura 2.19, los límites superior e inferior están indicados por las líneas continuas de color rojo, que representan los valores de 5,950 MPa y 1,050 MPa correspondientes al 70% superior e inferior respecto al valor medio típico recomendado de 3,500 MPa. También, se observa que los valores 3 y 5 están fuera del rango recomendado. Sin embargo, la línea punteada de color naranja representa la tendencia de los valores, en donde observamos que queda perfectamente dentro de los límites recomendados, por lo que, de acuerdo a estos criterios podemos decir que los resultados son válidos.

El 70% puede representar un valor muy grande, sin embargo, hay que entender la naturaleza del retrocálculo y la forma en cómo se obtienen los resultados en este proceso. Es por ello, que gran parte de la confiabilidad de los resultados del

retrocálculo dependerá de la persona que realice el análisis, ya que deberá tomar en consideración el mayor número de recomendaciones posibles para poder garantizar la aprobación de los resultados.

En la Figura 2.20 se muestra de manera esquemática la metodología propuesta para la obtención de los módulos elásticos de las capas del pavimento, por medio del retrocálculo.

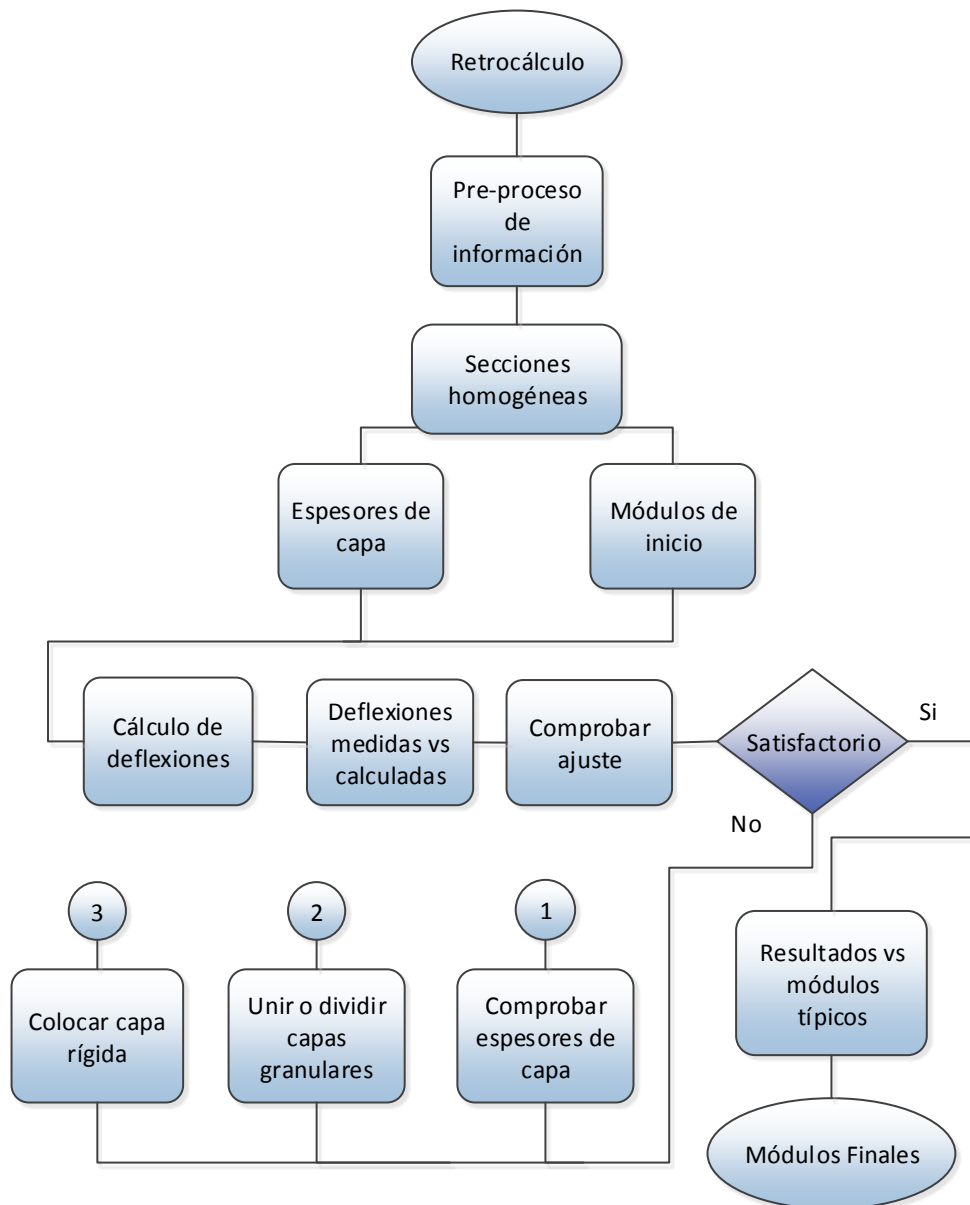


Figura 2.20: Metodología de retrocálculo propuesta

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍAS

PARA EL ANÁLISIS

DE LA VIDA

REMANENTE

3.0 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VIDA REMANENTE

3.1 DEFINICIÓN DE VIDA REMANENTE

La vida útil remanente de un pavimento en servicio se define como el periodo de tiempo en el cual, el pavimento estará funcionalmente y estructuralmente en condición aceptable con solo mantenimiento de rutina. También se le conoce como el tiempo en el cual el pavimento estará en condiciones aceptables para acumular desgaste funcional o estructural en condiciones normales de servicio (Balla, 2010). Comúnmente, este periodo se expresa en años, aunque dependerá del método utilizado para el análisis (Figura 3.1).

La predicción de la vida remanente del pavimento suele utilizarse como indicador para la gestión del mantenimiento futuro de dicho pavimento. Por lo tanto, conocer la vida remanente del pavimento nos puede dar una idea de cuándo y que tipo de acción de conservación se requiere, es decir, si se requiere de un refuerzo estructural, una reconstrucción o únicamente de un tratamiento superficial.

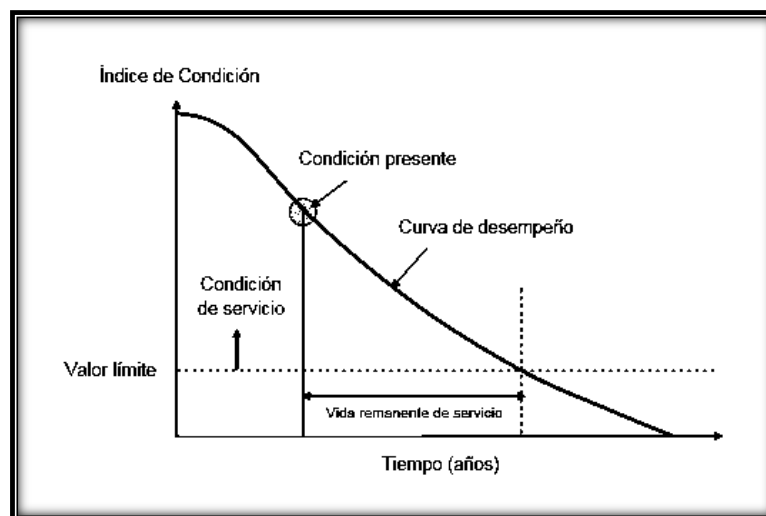


Figura 3.1: Definición gráfica de Vida Remanentes. (Balla, 2010)

En el presente Capítulo revisaremos tres de las metodologías para la obtención de la vida remanente, las cuales son comúnmente utilizadas en México. Los métodos que revisaremos son: Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM, IMT-PAVE y Método del Instituto del Asfalto que es el criterio que utiliza como base (método clásico) el software CalBack.

3.2 MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

El método se basa principalmente en el cálculo de la vida por deformación permanente y en el cálculo de la vida por agrietamiento debido a fatiga. El valor calculado de la deformación unitaria de tensión en la carpeta permite la obtención de la vida previsible por fatiga, empleando un modelo matemático de vida por fatiga desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, de acuerdo con el nivel de confianza elegido para el proyecto (Corro & Prado, 1999).

Este método utiliza el concepto de la AASHTO de calificación o índice de servicio actual para definir la falla funcional del pavimento. Para definir la falla utiliza un criterio objetivo, que establece una deformación máxima tolerable. Debido a que al igual que en la realidad, en los modelos las fallas son progresivas, el método establece un porcentaje de área deteriorada en el momento de la falla.

El modelo considera que el pavimento ha fallado cuando el 20% de la longitud del mismo tiene deformaciones permanentes iguales o mayores de 2.5 cm, medidas con relación al perfil original. Se considera, que en los estudios de campo la falla se establece en términos del Índice de Servicio Actual o de la calificación media de un grupo de usuarios. Define entonces, una fórmula de transformación de deformaciones permanentes a calificaciones, como se muestra a continuación en la Ecuación 3.1.

$$P = 5.0 - 4.6 \log(1 + \Delta_{20\%}) \quad (3.1)$$

Dónde:

P = Índice de servicio actual (escala de 0 a 5)

$(\Delta_{20\%})$ = Deformación permanente mínima en 20% de la longitud más dañada del modelo (percentil de 80% en la curva acumulativa de deformaciones menores que la indicada) (Corro & Prado, 1974).

El modelo de deformación permanente relaciona la resistencia del material con el tránsito de proyecto, es decir, relaciona el VRS_z (crítico) con el número de aplicaciones de carga admisibles. Dicho modelo está en función del número de repeticiones de carga y del nivel de confianza del proyecto y está definido para caminos normales y de altas especificaciones, como se muestra a continuación en las Ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$VRS_{z=0} = 0.1761 X + B_2 \quad (3.2)$$

$$VRS_{z=0} = 0.1761 X + B_1 \quad (3.3)$$

Dónde:

X = Tránsito de proyecto

$$B_2 = 0.4547 + 0.159U$$

$$B_1 = 0.85 + 0.14U$$

U = Coeficiente que depende del nivel de confianza QU

La Ecuación 3.2, corresponde al diseño por deformación permanente en las capas inferiores (subbases y terracerías) para caminos normales, donde al final de su vida útil de proyecto se permiten deformaciones del orden de 2.5 cm en la rodada, y la Ecuación 3.3, corresponde al diseño por deformación permanente en las capas superficiales (base) para caminos de altas especificaciones, donde al final de su vida útil de proyecto se presentaran deformaciones en la rodada del orden de 1.2 cm.

El modelo de comportamiento a fatiga, considera a la fatiga como deformación permanente acumulada, en el supuesto de que la carretera tiene una resistencia relativa uniforme en todas las capas de su estructura y llega a la falla funcional cuando ha soportado el número de cargas estándar especificado para la vida de proyecto. Si la resistencia relativa no es uniforme, la capa con resistencia relativa mínima determina la vida de servicio de la carretera.

La falla por fatiga de una capa en la superficie de la carretera se analiza bajo la hipótesis de que existe una relación lineal entre el logaritmo de la resistencia ($\log \Delta q_s$) y el logaritmo del número acumulado de cargas estándar ($\log \Sigma L$). La carga estándar o eje equivalente se define como la sollicitación de un eje sencillo de 8.2 toneladas y presión de contacto de los neumáticos de 5.8 kg/cm^2 (Corro, Magallanes, & Prado, 1981).

El modelo de deterioro de fatiga se obtuvo a través de la realización de una serie de ensayos en laboratorio, probando los especímenes a tensión indirecta (prueba brasileña) (Corro, Prado, & Rangel, 1998). El modelo está definido en función de un nivel de confianza y del número de repeticiones de carga, y se define para caminos normales y de altas especificaciones, como se muestra a continuación en las Ecuaciones 3.4 y 3.5 (Corro & Prado, 1999).

$$\log \varepsilon = 3.843 - 0.088U - 0.21 \log Nf \quad (3.4)$$

$$\log \varepsilon = 3.78 - 0.088U - 0.21 \log Nf \quad (3.5)$$

Dónde:

$\log \varepsilon$ = Logaritmo de la deformación por tensión admisible

U = coeficiente que depende del nivel de confianza Q_u

Nf = Tránsito de proyecto

La Ecuación 3.4, corresponde a caminos normales y la Ecuación 3.5, a caminos de altas especificaciones.

El criterio de falla de este modelo es muy ambiguo ya que menciona que al final de la vida útil del pavimento, el agrietamiento será de medio a fuerte para el caso de caminos normales y de ligero a medio para caminos de altas especificaciones.

En este método se requieren de ciertos datos para calcular la vida previsible del pavimento como son: espesores de capa, módulos de rigidez, Valor Relativo de Soporte crítico (VRSz), relaciones de Poisson y nivel de confianza. Ya con los datos anteriores se puede calcular la vida previsible del pavimento por deformación permanente acumulada por el tránsito o por fatiga, la cual es expresada en términos de ejes equivalentes de 8.2 toneladas. En el caso de la fatiga se deben calcular las deformaciones unitarias de tensión en la parte inferior de las capas asfálticas (Corro & Prado, 1999).

El análisis realizado para la obtención de la vida remanente aplicando este método, se realizó por medio de la herramienta DISPAV-5, versión 2014, en donde para obtener la vida remanente en años, se hizo una comparación entre el número de repeticiones de carga esperadas en un cierto periodo de diseño y las admisibles por la estructura, para de esa manera expresar los resultados en años.

3.3 MÉTODO IMT-PAVE

La metodología IMT-PAVE se sustenta en cuatro postulados de diseño, los cuales se mencionan a continuación (Garnica & Hernandez, 2013):

- 1.- La sección estructural del pavimento se considera por un conjunto de capas de materiales de cierto espesor, caracterizadas cada una de ellas por un módulo elástico, dinámico o resiliente representativo de las condiciones de operación de la carretera
- 2.- Las cargas que transmiten los vehículos se define por el concepto de espectro de carga representativo de cada tipo de eje presente en la configuración de cada uno de ellos

- 3.- Para cada tipo de deterioro, el agotamiento estructural se presentará cuando el número de repeticiones de carga acumulado iguale al número de repeticiones admisibles
- 4.- Una sección estructural se considera adecuada si la vida útil por fatiga y por deformación permanente es mayor al periodo de diseño, considerando los espectros de carga representativos de las condiciones esperadas de operación de la carretera

Este método de diseño, toma en cuenta la sobrecarga típica que está presente en las carreteras mexicanas. Introduce el concepto de espectro de carga el cual se define como la distribución de la carga de un grupo de ejes durante un periodo de tiempo, es decir, es la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje. Estos espectros se presentan por medio de histogramas de distribución de la carga por eje para cada uno de los cuatro tipos de ejes, que son: sencillo direccional o sencillo, dual, tándem y trídem, en la Figura 3.2 se muestran algunos ejemplos de espectros de carga. El área bajo la curva de un espectro de carga representa un daño potencial hacia la estructura del pavimento (Garnica & Hernandez, 2013).

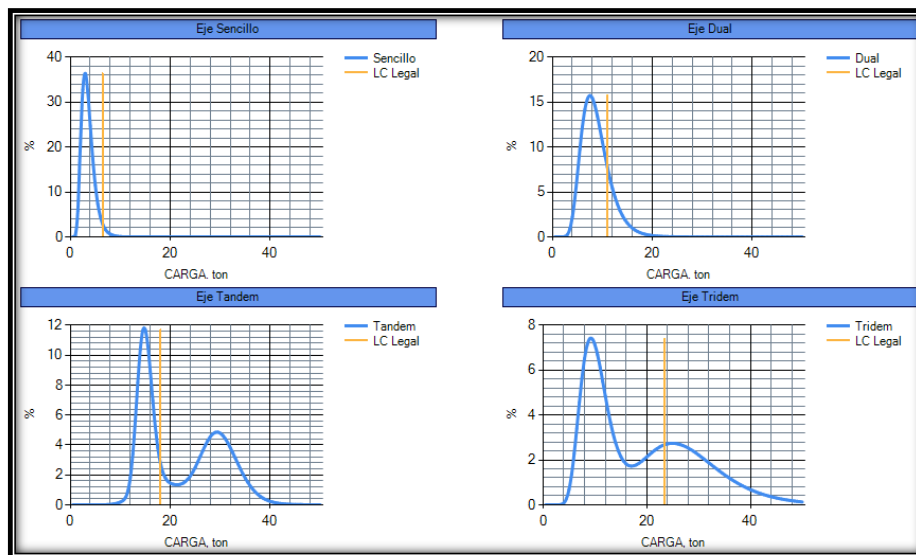


Figura 3.2: Ejemplo de espectros de carga para los diferentes tipos de ejes (Garnica & Hernandez, 2013).

La metodología IMT-PAVE, se basa en la respuesta estructural del pavimento, es decir, calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los dos tipos principales de deterioro que se presentarán. Estos son el agrietamiento por fatiga, definido por las deformaciones unitarias máximas de tensión en la carpeta asfáltica y las deformaciones permanentes máximas unitarias a compresión en la parte superior de las capas de terracería (Garnica & Castellanos, 2013).

Para el cálculo de dicha respuesta y en particular las deformaciones unitarias para dos puntos, se utiliza el método de Odemark (1949), que permite transformar la estructura de un pavimento en una sección homogénea equivalente. También utiliza otras teorías para el análisis de esfuerzos y deformaciones fuera del punto de aplicación de la carga (Para dos, cuatro o seis ruedas) como la de Ahlvin y Ulery (1962), Damy y Casales (1985), y Boussinesq (1885).

Para la obtención de los espectros de daño, utiliza el 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 esperadas 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 3.6 (Garnica & Castellanos, 2013).

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (3.6)$$

El coeficiente de daño D , está asociado a 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 de carga admisible de ese deterioro, y este se debe comparar con el periodo de diseño deseado, debiendo superarlo para que el diseño sea satisfactorio.

Una vez calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se introduce el concepto de vida remanente, el cual es el inverso del daño acumulado en el período de diseño y determinará cuando una sección ha excedido o no el valor

máximo de daño acumulado. El método expresa la vida remanente en años y utiliza dos modelos de deterioro como se mencionó en el primer párrafo de este apartado y los asocia al número de repeticiones admisibles (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

Para el número de repeticiones admisibles para agrietamiento por fatiga, N_f , se utiliza un modelo como el que se muestra en la Ecuación 3.7 (Garnica & Hernández, 2013):

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \quad (3.7)$$

Dónde:

f_1 y f_2 son constantes de regresión (Garnica & Correa, 2004)

ε_t es la deformación unitaria de tensión máxima, en la fibra inferior de la carpeta asfáltica

Para el modelo por deformación permanente de las capas inferiores se establece la Ecuación 3.8 (Garnica & Hernández, 2013):

$$N_f = f_2 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (3.8)$$

Dónde:

f_2 y f_5 son constantes de regresión

ε_c es la deformación unitaria de compresión máxima en la parte superior de las terracerías

El análisis para la obtención de la vida remanente por este método, se realizó haciendo uso de la herramienta IMT-PAVE 3.0. Los resultados obtenidos se muestran y discuten más adelante.

3.4 MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

El método utiliza dos criterios de falla, uno relacionado al agrietamiento por fatiga y el otro a la deformación en la parte superior de la subrasante.

El enfoque para desarrollar modelos de agrietamiento por fatiga, se basó en modelos desarrollados a través de ensayos con vigas en laboratorio, los datos de la prueba de fatiga de laboratorio se expresan como se muestra en la Ecuación 3.9 (NCHRP, 2004a):

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{K_2} \left(\frac{1}{E_{ac}}\right)^{K_3} \quad (3.9)$$

Dónde:

N_f = Número de repeticiones de carga a la falla

ε = Tensión horizontal

E_{ac} = Módulo del concreto asfáltico

K_1 , K_2 y K_3 = Constantes que dependen de las propiedades del material

La ecuación de fatiga del Instituto del Asfalto se basa en modificaciones a los criterios de fatiga de laboratorio de esfuerzo constante, es decir, sobre la base de los resultados de las extensas pruebas de laboratorio se hicieron correlaciones con las observaciones de campo. El enfoque desarrollado por Witczak y Shook es aplicable a pavimentos asfálticos de mayor espesor. El modelo relaciona el número de repeticiones de carga a la falla con la deformación horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico, como se muestra en las Ecuaciones 3.10 y 3.11 (NCHRP, 2004b).

$$N_f = 0.004325 C \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.291} \left(\frac{1}{E}\right)^{0.854} \quad (3.10)$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right) \quad (3.11)$$

Dónde:

N_f = Número de repeticiones de carga a la falla

$C = 10^M$

ϵ_t = Deformación horizontal en la parte inferior de la capa asfáltica

E = Módulo de la capa asfáltica

V_b = Contenido efectivo del ligante en la mezcla

V_a = Vacíos de aire en la mezcla

La novena edición del Manual de Diseño MS-1 del Instituto del Asfalto (1991), utilizó un factor de calibración de campo de 18.4 para ajustar el efecto de las diferencias entre el laboratorio y el campo. Este factor de corrección fue desarrollado para un nivel de agrietamiento del 20% en la rodera (NCHRP, 2004a)

Los criterios de diseño utilizados tanto para materiales asfálticos como para materiales no ligados, pueden ser introducidos en el formato de la Ecuación 3.12 (Montuschi, 2012).

$$\text{Respuesta permisible} = CA \times MN^{c\alpha} \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^{c\beta} \quad (3.12)$$

Dónde:

MN = Es el Número de repeticiones de carga a la falla en millones

E = Es el módulo del material

E_{ref} = Es el módulo de referencia

CA , $c\alpha$, $c\beta$ son constantes

Respuesta permisible: Puede ser la tensión o esfuerzo vertical por compresión en la parte superior de una capa, o la máxima tensión o esfuerzo horizontal en la parte inferior de una capa.

El diseño clásico del método del Instituto del Asfalto, está basado en esfuerzos o tensiones verticales y horizontales. Comúnmente, los esfuerzos son indicados por la letra “z” y las tensiones por la letra “e”, los horizontales son indicados con la letra “h” y los verticales con la “v”.

Para el deterioro estructural (agrietamiento) de una capa de material asfáltico, la respuesta permisible es la resistencia horizontal al esfuerzo o tensión (“zh”, “eh”) en la parte inferior de la capa. Por otro lado el deterioro funcional (deformación o rugosidad) se predice a partir del esfuerzo o tensión de compresión vertical (“zv”, “ev”) en la parte superior de la capa, en este caso de la capa subrasante (Montuschi, 2012).

Si el módulo y la respuesta del pavimento son conocidos entonces, el número permisible de aplicaciones de carga, en millones, se puede encontrar con la Ecuación 3.13 (Montuschi, 2012).

$$MN_p = \left[\frac{\text{respuesta}}{CA} \times \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^{-c\beta} \right]^{\frac{1}{c\alpha}} \quad (3.13)$$

Dónde:

MN_p = Número permisible de aplicaciones de carga

E = Módulo calculado de la capa

E_{ref} = Módulo de referencia

CA , $c\beta$ y $c\alpha$ = Son constantes

El método del instituto del asfalto, para el cálculo del número de ciclos a la falla se muestra en la Ecuación 3.14, en ella está implícito el factor de calibración de 18.4 y una mezcla asfáltica con un 11% de aglutinante y un 5% de vacíos de aire (Montuschi, 2012).

$$N = 0.07958 \times \varepsilon_t^{-3.291} \times E^{-0.854} \quad (3.14)$$

Dónde:

N = Número permisible de ciclos de carga a la falla

E = Módulo de la capa

ε_t = Es la tensión horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico

El criterio del Instituto del Asfalto, para el cálculo de la tensión que genera el agrietamiento del concreto asfáltico en un formato alternativo, es el que se muestra en la Ecuación 3.15 (Montuschi, 2012).

$$\text{Tensión permisible} = 240 \mu\text{strain} \times MN^{-0.304} \times \left(\frac{E}{3000 \text{MPa}} \right)^{-0.259} \quad (3.15)$$

Dónde:

Tensión permisible = Es la tensión de tracción horizontal (“eh”) en la parte inferior de la capa de asfalto

MN = Número de repeticiones a la falla

E = Módulo de la capa

El modelo de deformación permanente del Instituto del Asfalto asume, que la deformación permanente en la capa de rodadura es poco representativa. Por lo tanto, el modelo toma la tensión vertical de compresión en la superficie de la

subrasante debida al número de repeticiones de carga a la falla, como se muestra en la Ecuación 3.16 (Hesham & Tayabji, 1998).

$$N_p = 1.365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_c^{-4.477} \quad (3.16)$$

Dónde:

N_p = Número de repeticiones de carga a la falla por deformación permanente

ε_c = Tensión vertical por compresión

La Ecuación 4.16, define la falla como el desarrollo de una rodera de 13 a 19 mm (0.5 a 0.75 pulgadas). Por lo tanto, se espera que la relación de daño de deformación permanente del 100% correspondería a una rodera de 13 a 19 mm.

En la metodología CalME/CalBack, la compresión es positiva y la tensión es negativa, por lo que, la tensión permisible en este caso debe ser -240 micro deformaciones (μ strain) para la ecuación mostrada en párrafos anteriores.

Los criterios del Instituto del Asfalto, son los criterios utilizados por default para CalME/CalBack, para materiales no ligados correspondiendo a 12.5 mm de rodera o deformación permanente, tal como se muestra en la Ecuación 3.17 (Montuschi, 2012).

$$\text{Tensión permisible} = 482 \mu\text{strain} \times MN^{-0.223} \quad (3.17)$$

Dónde:

Tensión permisible = Deformación vertical (“ ε_v ”)

MN = Número de repeticiones a la falla

Alternativamente, se puede utilizar el criterio de esfuerzo para materiales no ligados. La Ecuación 3.18, se muestra a continuación y se deriva del AASHTO Road Test de J.M. Kirk (Montuschi, 2012).

$$\text{Esfuerzo permisible} = 0.137\text{MPa} \times (MN \times R)^{-0.3067} \times \left(\frac{E}{160\text{MPa}}\right)^{c\beta} \quad (3.18)$$

Dónde:

R = Factor regional igual a 1.5

MN = Número de repeticiones a la falla

E = Módulo del material de la capa

$c\beta$ = Constante igual a 1.16 para $E < 160$ Mpa y 1.0 para $E > 160$ Mpa

Para obtener la respuesta estructural del pavimento y poder aplicar los modelos de deterioro de este método, se hizo uso de una herramienta de licencia libre llamada OpenPave, creada en el año 2006 por Jeremy Lea, estudiante de la Universidad de California en Davis, la cual consiste en una hoja de cálculo que ha sido programada en la plataforma de Excel. Por medio de esta herramienta, obtuvimos las deformaciones y los esfuerzos en el pavimento para después, obtener el número de ciclos a la falla por fatiga y deformación permanente así, de esta manera compararlos con los ciclos de carga generados por el tráfico en un periodo de tiempo determinado y obtener la vida remanente en años. Los resultados obtenidos a través del empleo de esta metodología se muestran y discuten más adelante en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4

CASOS DE

ESTUDIO

4.0 CASOS DE ESTUDIO

Con el propósito de cumplir el objetivo general de este trabajo de investigación, el cual es encontrar una metodología práctica y confiable para el proceso del retrocálculo, basándose en todas las investigaciones y antecedentes del tema. Ya aplicados todos los criterios de selección que se describen en el presente capítulo, se definieron cuatro zonas o tramos finales de estudio en diferentes puntos del país.

Los tramos de estudio finales son los que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Tramos de estudio

Eje Troncal	Carretera	Tramo	Estado	Inicio	Final
Altiplano	México - Pachuca	Lím. Edos. Méx./Hgo.- Pachuca	Hidalgo	59+500	77+500
Puebla - Ciudad Hidalgo	Tapanatepec - Talismán	Lím. Edos. Oax./Chis. - Talismán	Chiapas	125+000	140+000
Puebla - Ciudad Hidalgo	Oaxaca - Tehuantepec	Oaxaca - Tehuantepec	Oaxaca	67+000	80+000
Altiplano	Puebla - Xalapa	Lím. Edos. Pue./Ver.- Xalapa	Veracruz	111+200	126+200

4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO

Se analizaron 15 distintos tramos localizados en diferentes puntos de la República Mexicana, para la selección de estos tramos se tomaron en consideración diversos criterios, los más importantes fueron el clima y la disponibilidad de los datos de auscultación requeridos para el análisis, es decir, se eligieron tramos con la información más completa (deflexiones, espesores de capa, inventario de deterioros, IRI y macrotextura) de las campañas de auscultación realizadas del 2012 al 2016. Después de un análisis detallado de la información proporcionada por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se consideró que solo cuatro tramos de los quince analizados contaban con la información necesaria para realizar el análisis de daño de los pavimentos en estudio. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación de los tramos de estudio seleccionados.

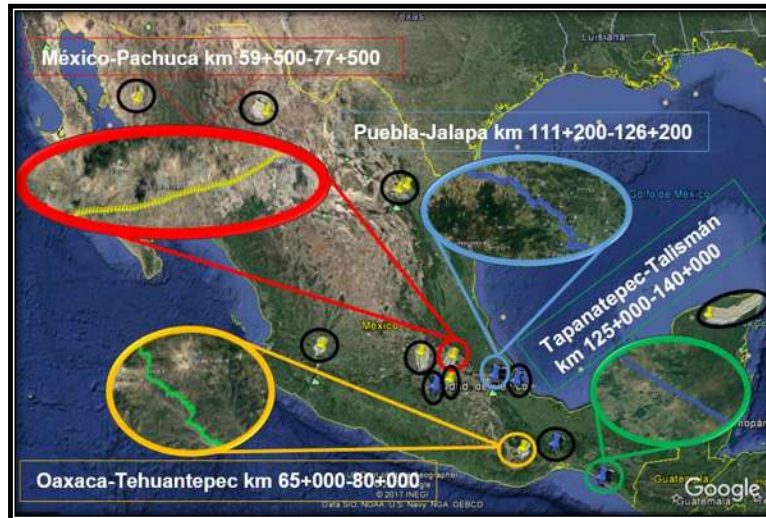


Figura 4.1: Tramos de estudio (Google Earth, 2017).

En el próximo apartado se presenta una breve descripción de los tramos de estudio seleccionados.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO

4.2.1 TRAMO, CARRETERA MÉXICO-PACHUCA

El tramo en estudio tiene una longitud de 18 kilómetros y se localiza del kilómetro 59+500 al kilómetro 77+500 de la carretera México-Pachuca, del eje troncal Altiplano, en el estado de Hidalgo. El tramo se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2: Tramo México-Pachuca (Google Earth, 2017).

Las coordenadas geográficas del tramo son 19.89910 de latitud, -98.92793 de longitud en el kilómetro 59+500 y 20.01861 de latitud, -98.81553 de longitud en el kilómetro 77+500.

De los datos viales de la DGST de la SCT, se tomó el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de los tres años de estudio (2012, 2014 y 2016), los cuales se muestran en la Tabla 4.2. También se calcularon los ejes estándar (ESAL´S) para cada uno de los años de estudio tomando como base el tránsito en el carril de proyecto. Con el propósito de poder estimar tránsitos futuros en ejes estándar también, se calculó la tasa de crecimiento del tránsito, la cual es del 2,9%. La tasa de crecimiento se obtuvo con el método de los mínimos cuadrados, tomando valores de TDPA históricos en el tramo de estudio desde el año 2011 hasta el 2016.

Tabla 4.2: Datos de tránsito, tramo del km 59+500 al 77+500, de la carretera México-Pachuca

Año	TDPA	ESAL´S
2012	20,892	2,999,230.16
2014	22,184	4,053,242.44
2016	22,925	4,798,657.52

El clima predominante en la zona es el semiseco templado. La vegetación predominante es el matorral (INEGI, 2009a).

La temperatura ambiente máxima registrada en la zona es de 37°C y la mínima registrada es de -0.5°C. La precipitación máxima registrada es de 89.9 mm y la mínima es de 0 mm (SMN, 2017).

4.2.2 TRAMO, CARRETERA TAPANATEPEC-TALISMÁN

El siguiente tramo en estudio tiene una longitud de 15 kilómetros y se ubica del kilómetro 125+000 al kilómetro 140+000 de la carretera Tapanatepec-Talismán, del eje troncal Puebla-Ciudad Hidalgo, en el estado de Chiapas. El tramo carretero es mostrado en la Figura 4.3.

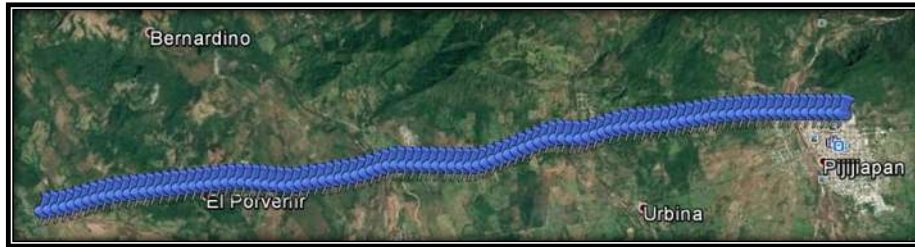


Figura 4.3: Tramo Tapanatepec-Talismán (Google Earth, 2017).

Las coordenadas geográficas del tramo son 15.78495 de latitud, -93.37088 de longitud para el kilómetro de inicio 125+000 y 15.71703 de latitud, -93.24179 de longitud para el kilómetro final 140+000.

Para el cálculo del tránsito futuro en el tramo, se obtuvo de los datos viales de la DGST de la SCT, el TDPA de los años 2014 y 2016, datos que se muestran en la Tabla 4.3, así mismo, se calculó una tasa de crecimiento del tránsito del 4.2%, a través del método de mínimos cuadrados, tomando valores de TDPA históricos en el tramo de estudio desde el año 2011 hasta el año 2016.

Tabla 4.3: Datos de tránsito, tramo km 125+000 al 140+000, de la carretera Tapanatepec-Talismán

Año	TDPA	ESAL´S
2014	4,226	553,797.46
2016	4,272	762,986.14

El clima abundante en la zona es el cálido subhúmedo con lluvias en verano. La vegetación predominante es la selva (INEGI, 2009d).

La temperatura ambiente máxima registrada es de 42.5°C y la mínima registrada es de 10.5°C. La precipitación máxima histórica registrada es de 457.8 mm y la mínima de 0 mm (SMN, 2017).

4.2.3 TRAMO, CARRETERA OAXACA-TEHUANTEPEC

El siguiente tramo de estudio es en la carretera Oaxaca-Tehuantepec, el cual tiene una longitud de 13 kilómetros y se localiza del kilómetro 67+000 al kilómetro 80+000, del eje troncal Puebla-Ciudad Hidalgo, en el estado de Oaxaca. El tramo carretero se muestra a continuación en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Tramo Oaxaca-Tehuantepec (Google Earth, 2017).

Las coordenadas geográficas del tramo son 16.76187 de latitud, -96.34321 de longitud para el kilómetro inicial 67+000 y 16.69026 de latitud, -96.32097 de longitud para el kilómetro de fin 80+000.

El TDPA del tramo en estudio obtenido de los datos viales de la DGST de la SCT, para los años 2012 y 2016 se muestra en la Tabla 4.4. También se calculó una tasa de crecimiento anual del tránsito del 2.1% utilizando el método de los mínimos cuadrados y tomando valores históricos de TDPA desde el año 2011 hasta el año 2016.

Tabla 4.4: Datos de tránsito, tramo km 67+000 al 80+000, de la carretera Oaxaca-Tehuantepec

Año	TDPA	ESAL'S
2012	1,409	366,101.45
2016	1,536	401,182.06

El clima predominante en la zona de estudio es el templado subhúmedo con lluvias en verano. La vegetación predominante es la selva (INEGI, 2009b).

La temperatura ambiente máxima registrada es de 43°C y la mínima es de 1.9°C. La precipitación máxima histórica registrada es de 80 mm y la mínima de 0 mm, de acuerdo con los valores extremos registrados en la estación más cercana (SMN, 2017).

4.2.4 TRAMO, CARRETERA PUEBLA-XALAPA

El último tramo en estudio tiene una longitud de 15 kilómetros. Se ubica del kilómetro 111+200 al kilómetro 126+200, de la carretera Puebla-Jalapa, del eje troncal Altiplano, en el estado de Veracruz. El tramo se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Tramo Puebla-Xalapa (Google Earth, 2017).

Las coordenadas geográficas del tramo son 19.62845 de latitud, -97.17677 de longitud, para el kilómetro inicial 111+200 y 19.61796 de latitud, -97.05753 de longitud para el kilómetro final 126+200.

Con el propósito de poder estimar tránsitos futuros, se obtuvo de los datos viales de la DGST de la SCT, el TDPA de los años 2014 y 2016; de la misma manera con los valores de TDPA históricos en el tramo de los años 2011 al 2016, se calculó una tasa de crecimiento anual del 0.5%, con el método de los mínimos cuadrados. Estos datos se muestran en la Tabla 4.5.

El clima predominante en la zona es el Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano. La vegetación predominante es selva y pastizal (INEGI, 2009c).

Tabla 4.5: Datos de tránsito, tramo km 111+200 al 126+200,
de la carretera Puebla-Xalapa

Año	TDPA	ESAL´S
2014	3,665	1,102,294.70
2016	3,323	926,169.38

La temperatura del ambiente máxima registrada es de 33°C y la mínima registrada es de -5°C. La precipitación máxima de los valores históricos es de 136.3 mm y la mínima registrada es de 0 mm (SMN, 2017).

De los cuatro tramos descritos en este apartado, serán utilizados tanto los datos de deflexión como de espesores de capa para realizar el retrocálculo correspondiente de cada uno, apoyándose en el software CalBack desarrollado en el Centro de Investigación de Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC), y para fines comparativos de los resultados se utilizará otro software llamado Evercalc del Departamento de Transporte del estado de Washington (WSDOT). Este proceso se describió a detalle en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE

RESULTADOS

5.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 MÓDULOS ELÁSTICOS

Una vez realizado el retrocálculo con ambos programas de cómputo y tomando en cuenta todos los aspectos antes mencionados en el capítulo 2, sección 2.2, se obtuvieron los resultados del análisis realizado en este trabajo.

A continuación, se presentan dichos resultados, los cuales corresponden únicamente a una sección homogénea de cada uno de los tramos de estudio. Se presentan solo estos resultados debido a que el procedimiento empleado en el análisis es repetitivo; seleccionando así las secciones que mejor se comportaron en el análisis, es decir, de las cuales se obtuvieron resultados más significativos.

Para el caso del tramo de la carretera México-Pachuca se presentan los resultados de la sección homogénea 4, para el tramo de la carretera Tapanatepec-Talismán, los resultados de la sección homogénea 3, para el tramo de la carretera Oaxaca-Tehuantepec, los resultados de la sección homogénea 1 y finalmente para el tramo de la carretera Puebla-Xalapa se presentan los módulos obtenidos de la sección homogénea número 4. Dichos resultados son los que se muestran a continuación en las Figuras 5.1, 5.2, y 5.3.

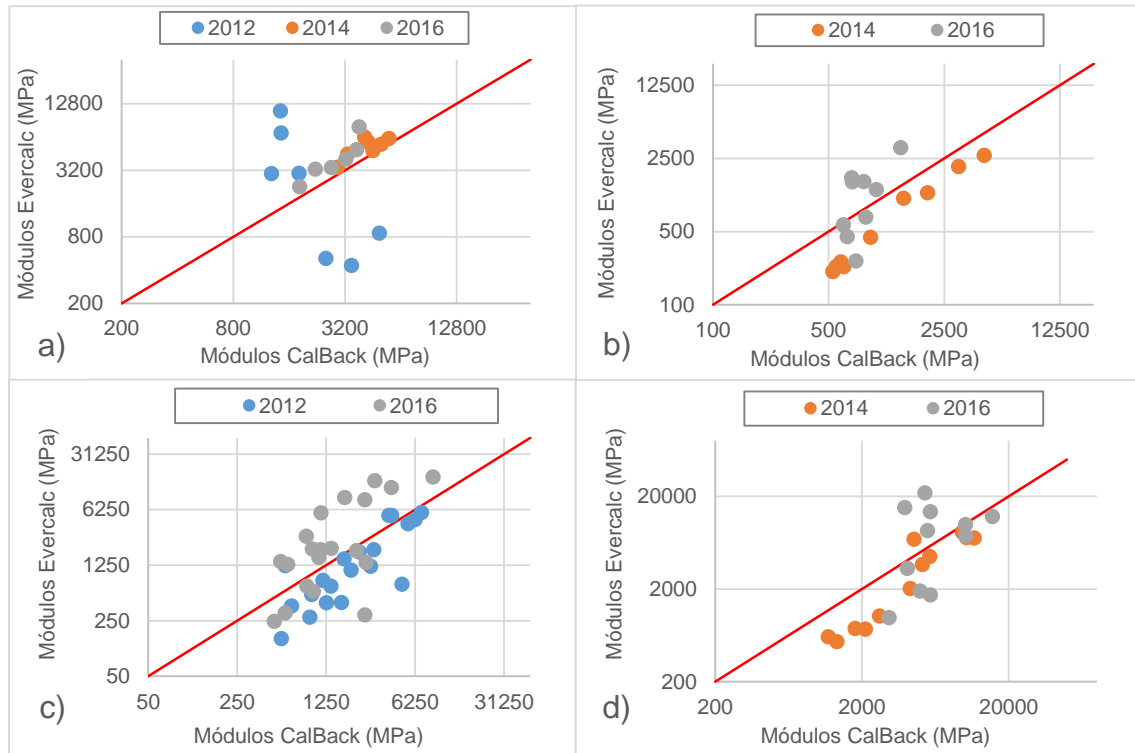


Figura 5.1: Módulos de carpeta, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

En la Figura 5.1 se muestran los resultados de los módulos obtenidos por retrocálculo de la carpeta asfáltica, para cada uno de los cuatro tramos de estudio, haciendo una comparación entre los obtenidos con el programa CalBack y el programa Evercalc, a fin de poder visualizar la diferencia entre los resultados de un programa y otro. Para el caso de la carpeta asfáltica en los tramos que se presentan resultados del año 2012 se aprecia la mayor dispersión. Como posible causa de dicha dispersión, se atribuye a que fue el primer año donde se realizaron este tipo de mediciones y de ahí la SCT ha venido tomando una serie de medidas para mejorar la calidad de los datos de campo.

Para el año 2014 se observa que los valores están por debajo de la línea de igualdad, lo cual significa que el programa CalBack está dando valores de módulos mayores para esta capa.

En el año 2016 los puntos se encuentran más cercanos a la línea de igualdad, lo cual quiere decir que la dispersión o diferencia en los valores del módulo de la carpeta para este año es mínima.

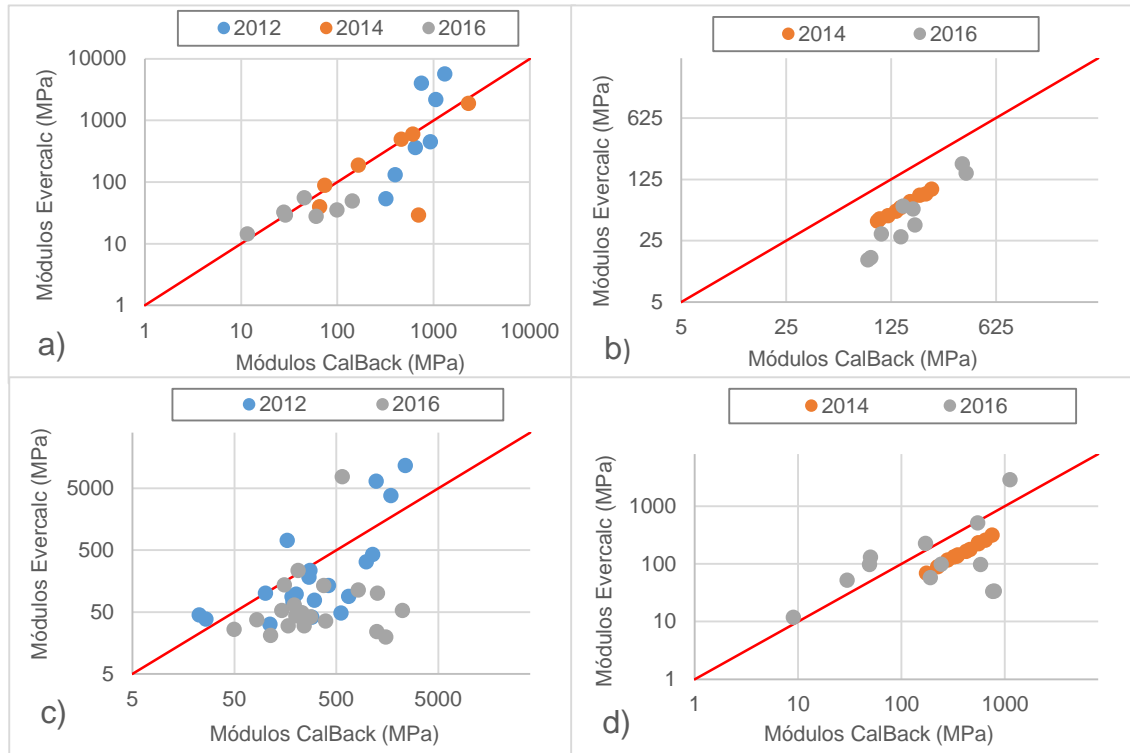


Figura 5.2: Módulos de la capa de base, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

De igual forma que con la carpeta asfáltica se obtuvieron y graficaron los módulos de la capa de base para cada uno de los tramos de estudio. En la Figura 5.2 podemos observar que la mayor parte de los valores de módulo para la capa de base (para todos los años de estudio) se encuentra por debajo de la línea de igualdad marcada con color rojo, esto quiere decir que el software CalBack nos dio valores mayores de módulo para la capa de base. También se observa que para los tramos que tienen datos del año 2012, se aprecia mayor dispersión en los valores de módulo, lo cual se atribuye de igual manera que en el caso de la carpeta asfáltica, a la falta de control de calidad en la auscultación del pavimento. A continuación, en la Figura 5.3 se muestran los resultados para la capa de subrasante.

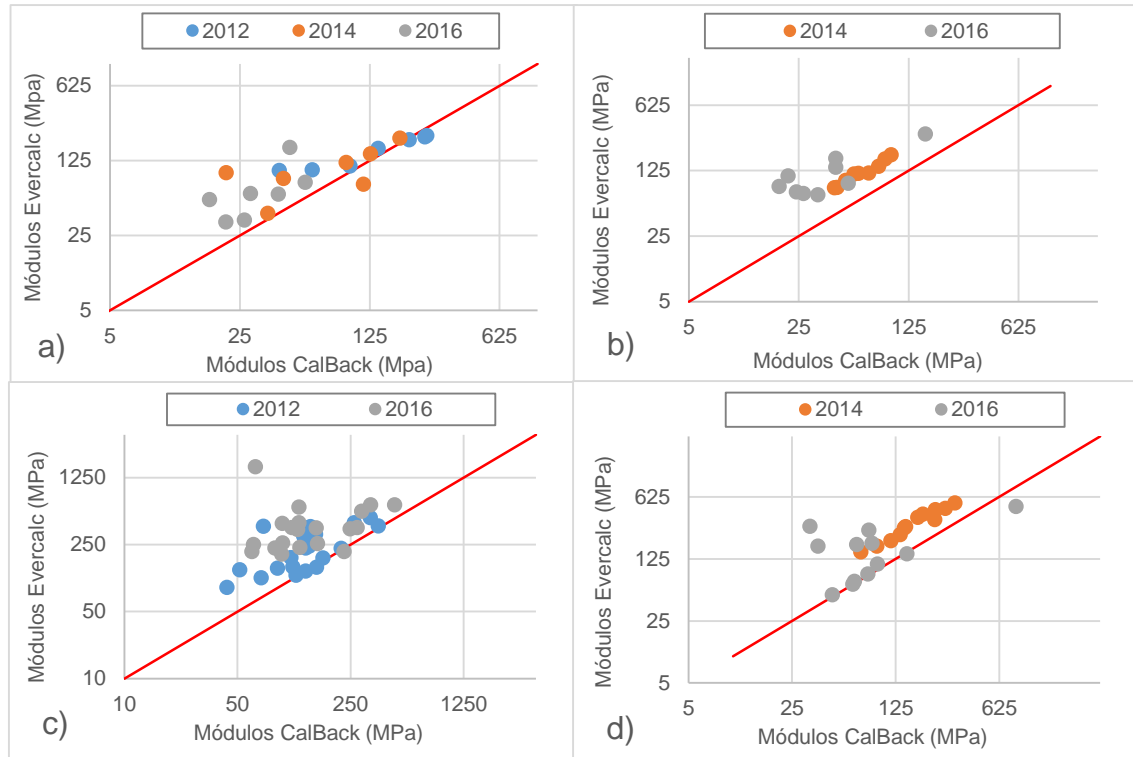


Figura 5.3: Módulos de la capa subrasante, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

En la Figura 5.3 podemos observar que los valores se encuentran por arriba de la línea de igualdad, esto significa que para el caso de esta capa, el programa Evercalc está dando valores mayores de módulo para la capa subrasante. También es importante mencionar que para el caso de esta capa no existe gran dispersión en los resultados obtenidos con ambos programas, aunque la mayoría de los puntos se encuentran por encima de la línea de igualdad existe una diferencia mínima entre los dos programas.

No es preciso decir al cien por ciento por qué, un programa da valores de módulo mayores para una capa que otro. Sin embargo, lo que si podemos argumentar, es que la diferencia observada de manera general en los resultados para todas las capas se debe a que los programas son distintos en su funcionamiento, por ejemplo, el programa CalBack es de más reciente creación, a diferencia de Evercalc que lleva más años en el mercado sin haber sido actualizado. Los parámetros de ajuste de las cuencas de deflexión de CalBack son más versátiles y eficientes y aunque

ambos programas utilizan un enfoque iterativo para encontrar el módulo más adecuado, CalBack tiene ventaja ya que, uno de sus parámetros o motores de búsqueda es el algoritmo genético mediante el cual puede realizar un mayor número de iteraciones en la búsqueda del módulo más adecuado logrando así, un mayor ajuste entre la cuenca de deflexión medida y la calculada.

5.2 ANÁLISIS DE LA VIDA REMANENTE

Por lo general, la vida previsible de un pavimento se expresa en términos de ejes estándar (ESAL'S), tanto para deformación permanente como para fatiga. Las condiciones de tránsito utilizadas para el cálculo de los ejes estándar en este trabajo son las que se mencionan en cada uno de los tramos descritos en el capítulo 4.

En el proceso, para la obtención de la vida remanente es necesario estimar el tránsito futuro para cualquier periodo de tiempo en términos de ejes estándar, esto es para poder calcular en años la vida previsible del pavimento. El procedimiento, para estimar la vida previsible del pavimento en años, consiste en comparar el número de ciclos de carga resistentes en ejes estándar, por la estructura del pavimento actual, para cada una de las metodologías empleadas en este trabajo, con el número de ciclos de carga generados por el tránsito actual en términos de ejes estándar para un periodo de tiempo determinado, es decir, a través de la metodología empleada (AASHTO 1993) para el cálculo de ejes estándar y a partir de unas condiciones de tránsito dadas, se encuentra el número de años en los que, se llegará al número de ciclos resistentes de la estructura del pavimento actual.

Después, de haber obtenido los módulos elásticos de las capas del pavimento a través del retrocálculo, lo siguiente fue hacer una estimación de la vida remanente (en años) del pavimento.

Las tres metodologías para la estimación de la vida remanente utilizadas se aplicaron, haciendo uso de los valores del módulo promedio ajustado a la temperatura de referencia (20°C), obtenidos con el software CalBack. Las metodologías utilizadas para la estimación de la vida remanente son las que se

describen en el capítulo 3, las cuales se aplicaron para cada año base de estudio y para cada una de las secciones homogéneas de los tramos analizados, estimándose para cada uno de ellos la vida previsible por fatiga y deformación permanente en años. En las Figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 se muestran los resultados obtenidos con cada una de las metodologías empleadas. Los resultados de todas las secciones homogéneas de estudio se muestran en el anexo B.

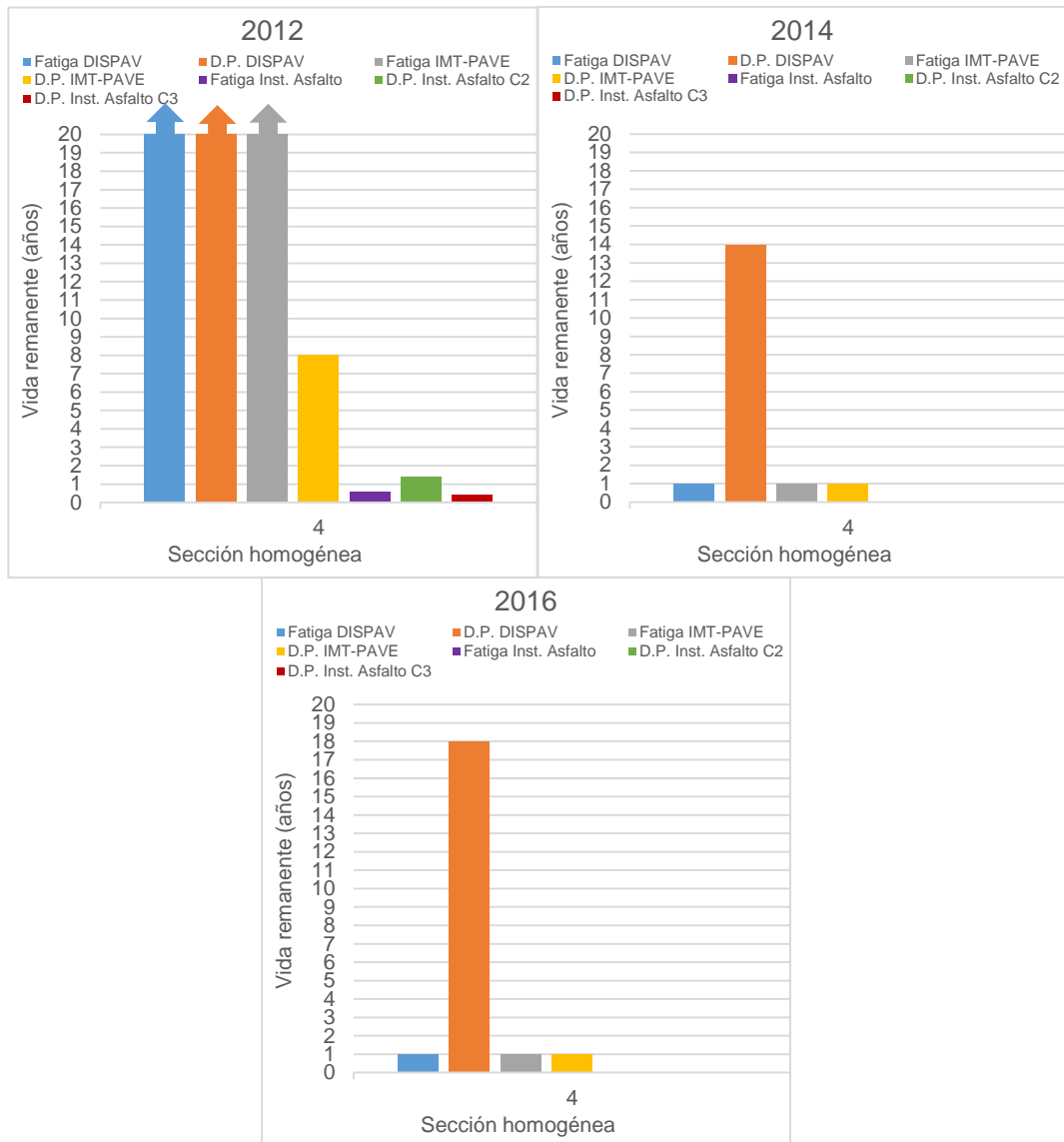


Figura 5.4: Vida remanente del Tramo 59+500 al 77+500 de la carretera México-Pachuca

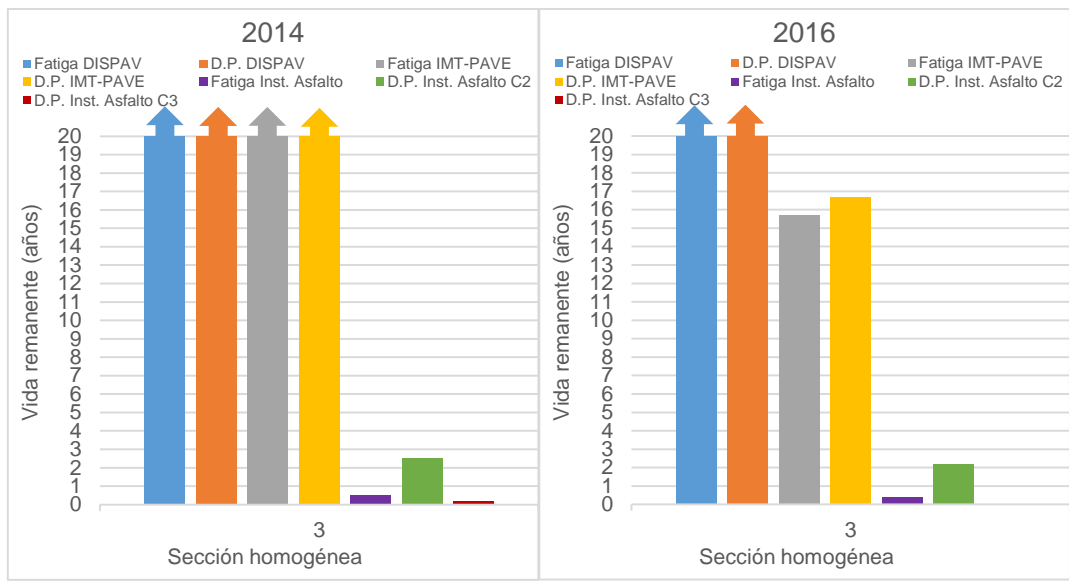


Figura 5.5: Vida remanente del Tramo km 125+000 al 140+000 de la carretera Tapanatepec-Talismán

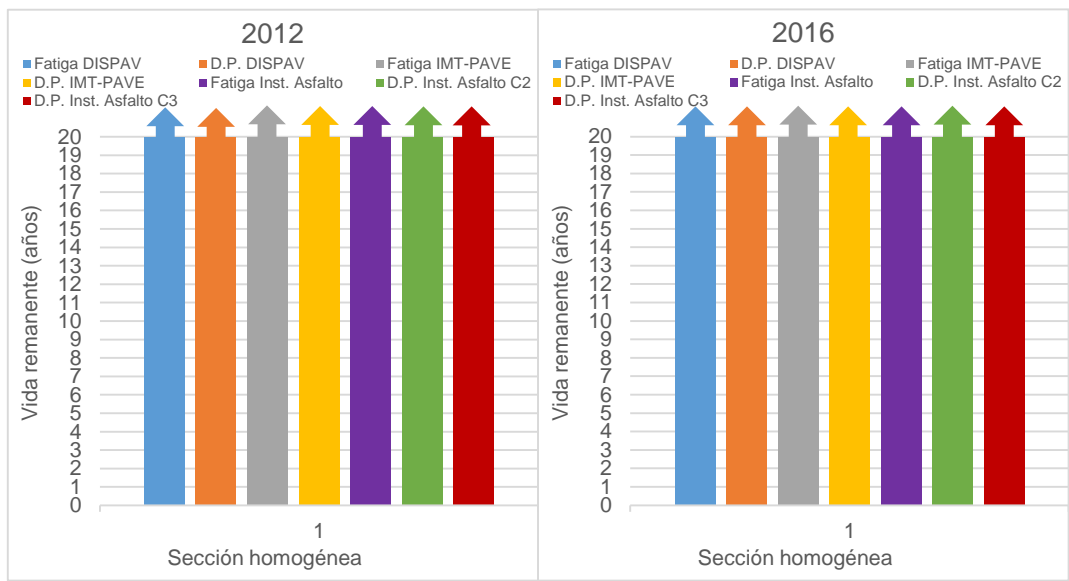


Figura 5.6: Vida remanente Tramo km 67+000 al 80+000 de la carretera Oaxaca-Tehuantepec



Figura 5.7: Vida remanente del Tramo km 111+200 al 126+200 de la carretera Puebla-Xalapa

En los resultados de vida remanente, se observa una variación entre cada uno de los métodos empleados, la cual se explica en los párrafos siguientes.

Podemos observar que, el Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM y el IMT-PAVE dan resultados similares y por lo general nos dan un horizonte de vida remanente mayor a los 20 años, tanto por fatiga en la capa asfáltica como por deformación permanente en las capas granulares; a diferencia del Método del Instituto del Asfalto que nos da horizontes de vida mucho menores. Esta diferencia se atribuye a que son métodos distintos en los cuales, sus modelos han sido desarrollados bajo condiciones distintas.

En cuanto al Método del Instituto de Ingeniería, utiliza un modelo de fatiga en el cual al igual que los otros métodos, relaciona la deformación por tensión con el número de ciclos de carga aplicados. Sin embargo, a pesar de tener la misma forma que muchos modelos de fatiga empleados en otros métodos, una de las desventajas de este modelo es que solo fue obtenido a través de pruebas de tensión indirecta en laboratorio y no fue calibrado con condiciones reales de un pavimento en servicio, por lo que, los resultados obtenidos a través de este modelo pueden ser no muy

precisos. En este método, para el cálculo de la deformación unitaria por tensión en la carpeta se adaptó el programa CHEV4, desarrollado por la compañía CHEVRON. La adaptación se hizo para 5 capas denominándolo ahora como CHEV5.

El otro modelo de deterioro que emplea el método es el de deformación permanente en las capas granulares. A pesar, de que este modelo si fue calibrado a través de múltiples pruebas realizadas en la pista circular del Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería de la UNAM, es distinto a los modelos empleados en los otros métodos, ya que este modelo relaciona de manera empírica la resistencia del material con el número de aplicaciones de carga, es decir, hace una relación entre un parámetro que el autor principal del método, Santiago Corro Caballero (1974), define como VRSz (crítico) y el número de repeticiones de carga a la falla, además, puede tener otra desventaja, que fue calibrado teniendo como capa de rodadura solo un tratamiento superficial, el cual se considera con aporte estructural nulo, por lo que, la calibración no fue hecha tomando en cuenta una carpeta asfáltica por encima de las capas granulares, que a diferencia del tratamiento superficial, si tiene aporte estructural. Cabe mencionar que este método calcula la respuesta (esfuerzos y deformaciones) de las capas granulares del pavimento, a través de la teoría de Boussinesq.

El método IMT-PAVE, desarrollado en los laboratorios del Instituto Mexicano del Transporte, de igual manera, incorpora un modelo de deterioro por fatiga en las capas asfálticas y otro por deformación permanente en las capas granulares. Sin embargo, la desventaja que este método tiene es que ninguno de sus modelos de deterioro integrados en él esta calibrado, ni con ensayos de laboratorio ni con condiciones reales de un pavimento en servicio, por lo que, los resultados que se obtengan a través de él no son del todo confiables. A pesar de esto, tiene una ventaja respecto a los otros dos métodos y desde el punto de vista del autor principal de este trabajo se considera como un gran avance para los métodos de diseño en México, la cual hace referencia al uso de espectros de carga para el cálculo de la respuesta del pavimento. El uso de espectros de carga se asemeja más a la realidad de las cargas que se aplican a un pavimento en servicio, ya que la definición de

espectro de carga nos dice que es la relación, entre el porcentaje de un número total de ejes con un cierto rango de carga. Entonces, se dice que esto se asemeja más a la realidad porque, un mismo tipo de eje no siempre va a tener el mismo peso, por lo que, no siempre causará el mismo daño al pavimento. Al introducir este concepto también, se introduce el de espectro de daño, que se podría entender como la distribución del daño que generan los diferentes pesos de los ejes en el espectro de carga. También, se puede interpretar como el área bajo la curva del espectro de carga. Sin embargo, a pesar de utilizar estos conceptos sus resultados pudieran estar un poco alejados de lo real, esto debido a que al igual que los otros métodos, no contempla la variación del clima y los efectos que pueden tener en la respuesta de un pavimento, ya que la rigidez de las capas en la realidad puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas del entorno.

Además, las teorías empleadas para el cálculo de la respuesta (esfuerzos y deformaciones) del pavimento son distintas a las que emplea el método de la UNAM (1999). En este método se emplean las teorías de Ahlvin y Ulery (1962), Damy y Casales (1985), y Boussinesq (1885) para la obtención de esfuerzos y deformaciones.

Finalmente, el método del Instituto del Asfalto quizás sea el que nos pudiera dar menor error en nuestros resultados. Esto es, debido a que los dos modelos de deterioro que incorpora el método están calibrados a condiciones reales de un pavimento en servicio incluso, este método en su calibración toma en cuenta un cierto desplazamiento de los neumáticos cuando circulan por el pavimento, es decir, que la rueda del vehículo no siempre circulara por el mismo punto. Sin embargo, esta calibración fue hecha para el lugar donde está desarrollado el método y no aplica para condiciones internacionales. Pudiera darse en algunos casos, que las condiciones que tenemos en los pavimentos en México se asemejen a las condiciones con las que se calibraron los modelos de deterioro de este método, pero esto no es posible asegurarlo, por lo que, lo recomendable siempre es calibrar el modelo a la condiciones locales del sitio en estudio.

Por otro lado, cada uno de los métodos analizados toma criterios distintos con respecto a la falla, por ejemplo, el Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en su modelo de deformación permanente considera que el pavimento ha fallado cuando el 20% de la longitud del mismo tiene deformaciones permanentes iguales o mayores de 2.5 cm, medidas con relación al perfil original, o el percentil de 80% en la curva acumulativa de deformaciones menores que la máxima permitida. En cuanto a fatiga, la considera con tres niveles de severidad, como ligera, media y fuerte, sin embargo, esto es muy ambiguo ya que no proporciona una cifra cuantificable.

El IMT-PAVE, a diferencia de los otros dos métodos no establece un criterio de falla para sus modelos, solo argumenta que la sección de pavimento resistirá si, la vida previsible es mayor a la de proyecto.

El Método del Instituto del Asfalto considera como falla estructural en el pavimento cuando se obtenga la relación de daño por deformación permanente del 100% correspondiente a una rodera de 13 a 19 mm, y para fatiga cuando el agrietamiento es superior al 20%, medido en la rodera.

De acuerdo con todo lo anteriormente descrito, los tres métodos analizados utilizan criterios distintos para determinar cuándo un pavimento cumple su vida útil, tanto por fatiga como por deformación permanente. Estos criterios van relacionados directamente con su calibración, por lo que, es de entenderse las diferencias obtenidas en los resultados.

5.3 OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS Y ESTIMACIÓN DEL DAÑO

El daño estructural, para fines de este trabajo lo podemos definir, como la disminución de la rigidez del pavimento con el paso del tiempo, es decir, la disminución de los módulos elásticos de las capas del pavimento, haciendo principal énfasis en la carpeta asfáltica. La siguiente propuesta para estimar el daño en el presente trabajo, es una de las aportaciones que está dejando el desarrollo de esta investigación.

El objetivo de esta propuesta es, tratar de dejar de usar el término de vida remanente y adoptar el concepto de daño ya que, las metodologías actuales con las que se estima la vida remanente son metodologías de diseño para pavimentos de nueva construcción, que se han venido adaptando para introducir el concepto de vida remanente a partir de la resistencia del pavimento, ante la aplicación cargas generadas por el tránsito expresadas en ejes estándar.

Desde el punto de vista del autor de este trabajo, el concepto de daño en función de la rigidez del pavimento y correlacionándolo con el deterioro del mismo, representa de mejor manera lo que le sucede a un pavimento en servicio con el paso del tiempo.

Con la finalidad de estimar el daño presente en las secciones de estudio, una vez realizado el retrocálculo en todos los tramos, lo siguiente fue estimar las curvas maestras de los diferentes años de estudio y para las mismas secciones homogéneas utilizadas en el cálculo de la vida remanente. Las curvas maestras se obtuvieron con el modelo de la Función Sigmoidal que utiliza el software CalBack, mismo modelo que se utiliza en la Guía Empírico Mecanicista (MEPDG). El modelo usado se muestra en la Ecuación 5.1 (Ullidtz, Harvey, & Tsai, 2006).

$$\log(E_i) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(tr))} \quad (5.1)$$

Dónde:

E_i = Es el módulo de la mezcla asfáltica

tr = Es el tiempo reducido en segundos

α , β , y δ = Son constantes relacionadas con la volumetría del material (Leiva, 2013).

Las curvas maestras se fueron ajustando a la distribución media de los módulos calculados y ajustados a la temperatura de referencia (20 °C), obtenidos con el software CalBack, variando las constantes α , β , γ , δ .

En la Figura 5.8 se muestran las Curvas Maestras obtenidas para cada uno de los tramos las cuales fueron obtenidas para un solo tiempo reducido y el valor que se varía es el de la temperatura, que va desde los -10°C hasta los 60°C . En cada uno de los tramos se puede ver claramente la caída de rigidez con el paso del tiempo, es decir, en el año 2014 se observan valores de módulo menores que en año 2012 y por consecuencia en el año 2016 los módulos son menores que en el año 2014, correspondientemente para cada tramo, debido al deterioro estructural presente. En las curvas se observa que los valores mayores corresponden al año 2012 y la distancia que existe entre una curva y otra representa el daño que se va a acumulando en el pavimento con el paso del tiempo.

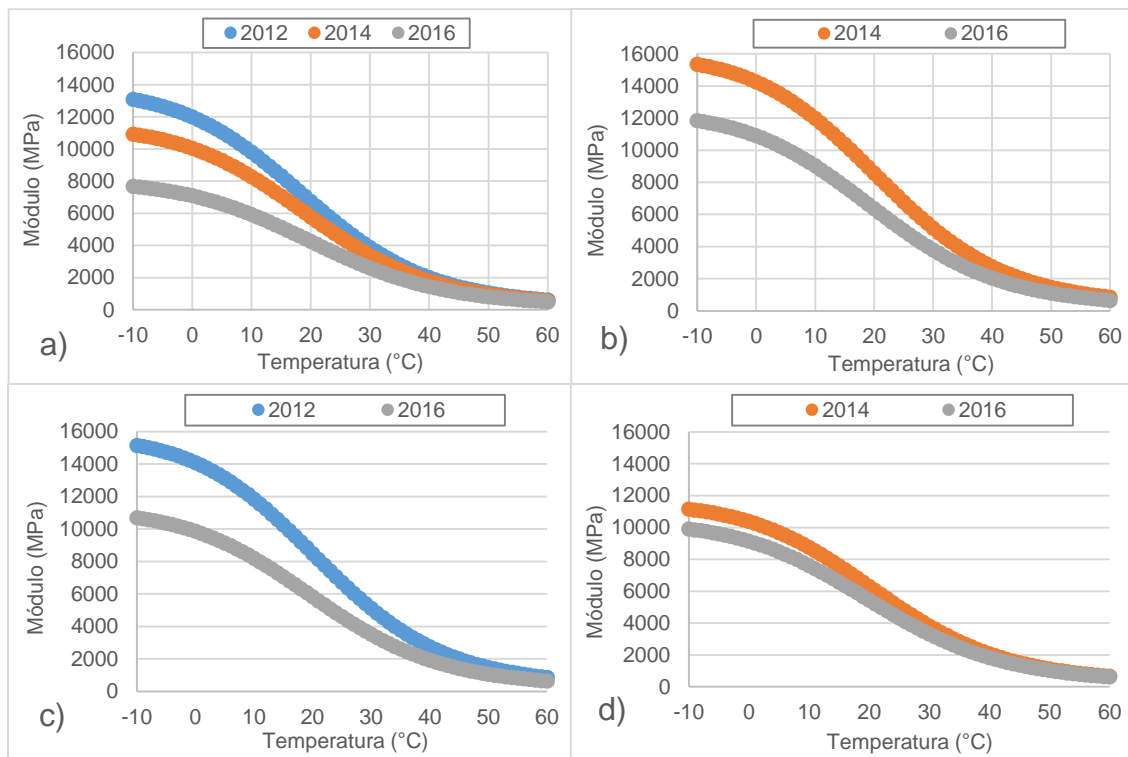


Figura 5.8: Curvas maestras estimadas, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

Una vez obtenidas las Curvas Maestras, se graficaron los valores de módulo obtenidos por retrocálculo, ajustados a la temperatura de referencia de 20°C , para estimar la curva de daño en cada uno de los tramos de estudio. En la Figura 5.9, se muestran las curvas de daño estimadas.

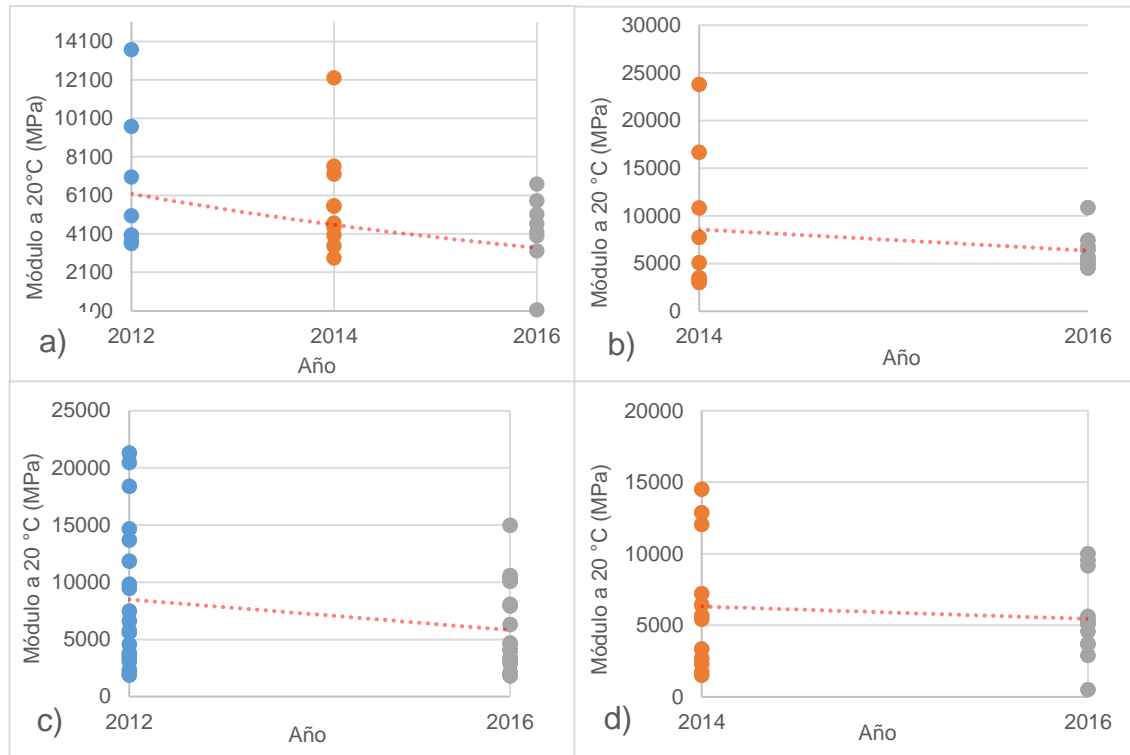


Figura 5.9: Curvas de daño estimadas para la carpeta asfáltica, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

En la Figura 5.9, se observan las curvas de daño estimadas y nuevamente la tendencia del valor del módulo de la carpeta asfáltica es a disminuir con el paso del tiempo, por lo que de igual manera en estos gráficos comprobamos la disminución de la rigidez, debida al daño estructural generado por las cargas vehiculares con el paso del tiempo.

Aunado a todo lo anterior, también, se obtuvo el índice de daño en porcentaje a manera de cuantificación del daño existente. El índice se calculó a partir de una relación entre los módulos promedio de cada uno de los tramos, para los diferentes años de estudio, obtenidos por retrocálculo y ajustados a la temperatura de referencia (20°C). La relación se efectúa entre el módulo del año actual y el módulo del año anterior. La Ecuación 5.2, que describe dicha relación, es la publicada en el reporte FHWA-15-036 de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA). La Ecuación 5.2 es la que se muestra a continuación (L. Von Quintus, Chetana, & Irwin, 2015).

$$DI = 1 - \left(\frac{M_2}{M_1} \right) 100 \quad (5.2)$$

Dónde:

DI = Es el índice de daño en porcentaje

M_2 = Es el módulo del año más actual

M_1 = Es el módulo del año anterior.

De esta manera se estimó el índice de daño que se genera con el paso de un año a otro, de acuerdo, con la disminución de la rigidez para cada uno de los tramos de estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.10.

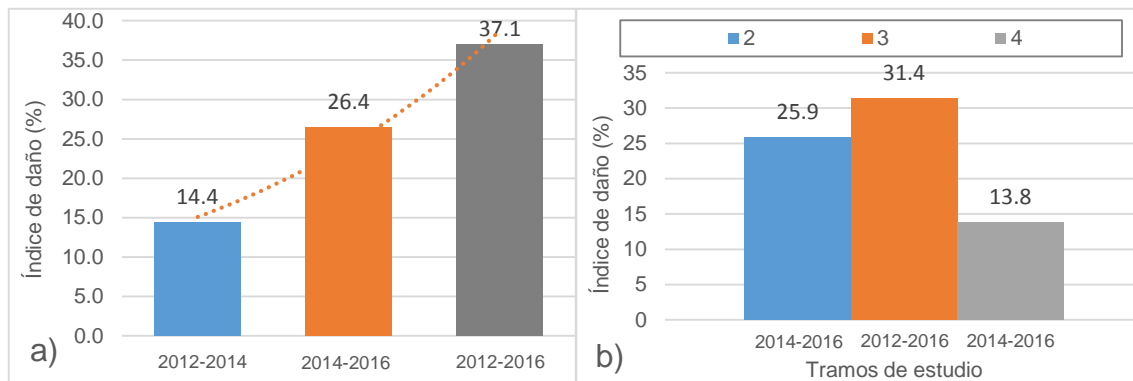


Figura 5.10: Índice de daño estimado, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo 2, 3 y 4

En la Figura 5.10a se muestra en índice de daño correspondiente al tramo México-Pachuca. Se graficó por separado el índice de daño de este tramo dado que se tienen datos de tres años y se pudo estimar el daño del año 2012 al año 2014, del año 2014 al año 2016 y del año 2012 al año 2016, para ver su tendencia. El índice de daño calculado del periodo de 2012 al 2014 es del 14.4% incrementándose a un 26.4% para el siguiente periodo del año 2014 al 2016, y calculando el índice acumulado en los tres años de estudio, este fue de un 37.1%, esto quiere decir que el incremento en el índice de daño es equivalente al 22.1%.

En la Figura 5.10b, aparecen los índices de daño de los tres tramos restantes. El índice de daño del tramo 2 corresponde al tramo Tapanatepec-Talismán con un índice estimado del 25.9%, el tramo 3 corresponde a Oaxaca-Tehuantepec con un índice de daño de 31.4% y el tramo 4 corresponde a Puebla-Xalapa con un índice de daño de 13.8%. Estos tres tramos se graficaron juntos, dado que, solo se tienen datos de dos años y, por lo tanto, solo se podía estimar un índice de daño con la relación propuesta y no pudiendo obtenerse la tendencia como se hizo para el tramo México-Pachuca.

Observando que el valor del índice de daño de 31.4% del tramo Oaxaca-Tehuantepec corresponde a un periodo de estudio de cuatro años al igual, que el 37.1% obtenido del tramo de la carretera México-Pachuca que tiene el mismo periodo de análisis, por lo tanto, si comparamos los índices de daño de ambos tramos se determina que el daño acumulado en el tramo de la carretera Oaxaca-Tehuantepec es menor y por ende el módulo de la carpeta es mayor.

En cuanto a los otros dos tramos, podemos ver que el índice de daño mayor corresponde al tramo de la carretera Tapanatepec-Talismán lo cual está indicando que hubo un mayor daño y que en el periodo de estudio el módulo de la carpeta tuvo mayor disminución. Por el contrario, el índice de daño más bajo corresponde al tramo al tramo de la carretera Puebla-Xalapa, lo cual indica que el daño es menor, por lo tanto, los valores del módulo en la carpeta asfáltica son mayores que los obtenidos en el tramo de la carretera Tapanatepec-Talismán.

De manera conjunta se graficó la evolución del agrietamiento por fatiga en cada uno de los tramos de estudio. Si se relacionan todos los parámetros de daño calculados anteriormente con la evolución del agrietamiento bajo la hipótesis de que si la rigidez del pavimento disminuye el agrietamiento estará presente, ya que, si se presenta disminución en la rigidez del pavimento como consecuencia la fatiga se irá desarrollando de manera progresiva, es decir, el daño en el pavimento se va acumulando con el paso del tiempo. En la Figura 5.11, se muestra el agrietamiento por fatiga de cada uno de los tramos de estudio.

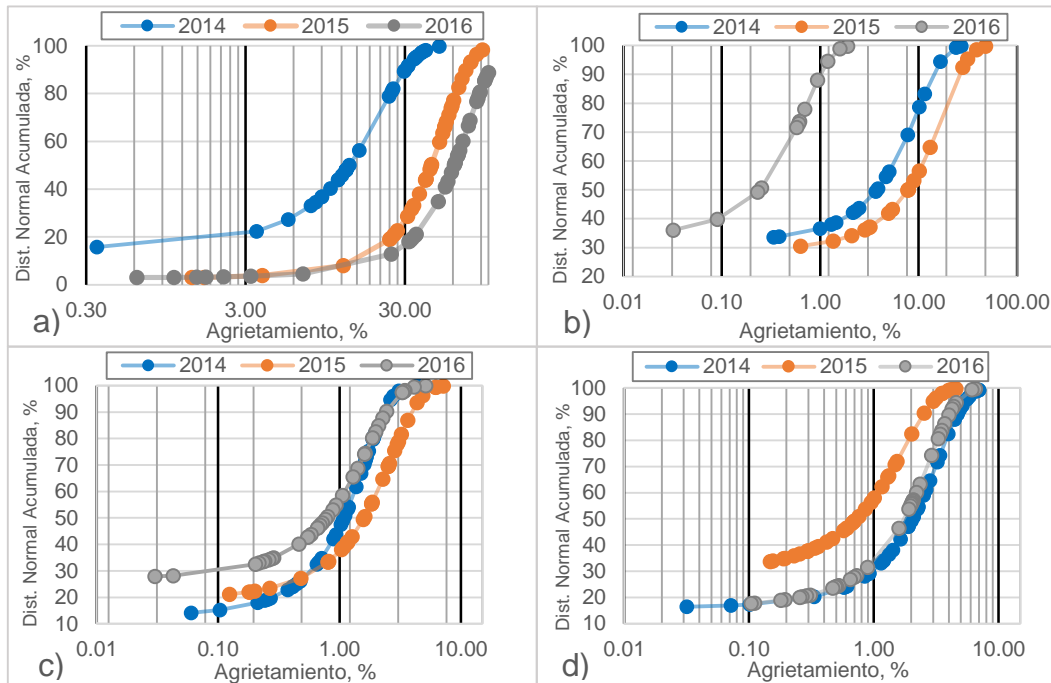


Figura 5.11: Agrietamiento por fatiga, a) Tramo México-Pachuca, b) Tramo Tapanatepec-Talismán, c) Tramo Oaxaca-Tehuantepec, d) Tramo Puebla-Xalapa

En la Figura 5.11a, correspondiente al tramo México-Pachuca, podemos observar que el agrietamiento por fatiga va aumentando con el paso del tiempo, por ejemplo, si se observa el valor del 50% de la distribución del agrietamiento en el eje vertical del gráfico, podemos observar que en el eje horizontal de dicho gráfico, el valor del agrietamiento es mayor de un año a otro, con lo que se comprueba la hipótesis de que el agrietamiento y la rigidez del pavimento tienen cierta relación, es decir, con el paso del tiempo conforme la rigidez del pavimento disminuye el deterioro del pavimento aumenta de manera progresiva. Sin embargo, en las Figuras 5.11b, 5.11c y 5.11d no se cumple la hipótesis planteada, debido a que el aumento del agrietamiento no se da de manera consecutiva, ya que, se observa que en los tres casos el agrietamiento del año 2016, es menor al de los años anteriores.

Una de las posibles causas de este comportamiento es que quizás se le haya aplicado un tratamiento superficial que nos desvirtúa un poco de la realidad, ya que, el agrietamiento sigue existiendo, pero no es visible de manera superficial porque

solo es cubierto por el tratamiento superficial, que impide que el agrietamiento pueda ser visto a la hora de medirlo durante la auscultación.

Con la finalidad de poder entender mejor la relación que tiene la rigidez del pavimento con el daño que se va generando en el mismo con el paso del tiempo, en la Figura 5.12 se muestra de manera gráfica esta relación.

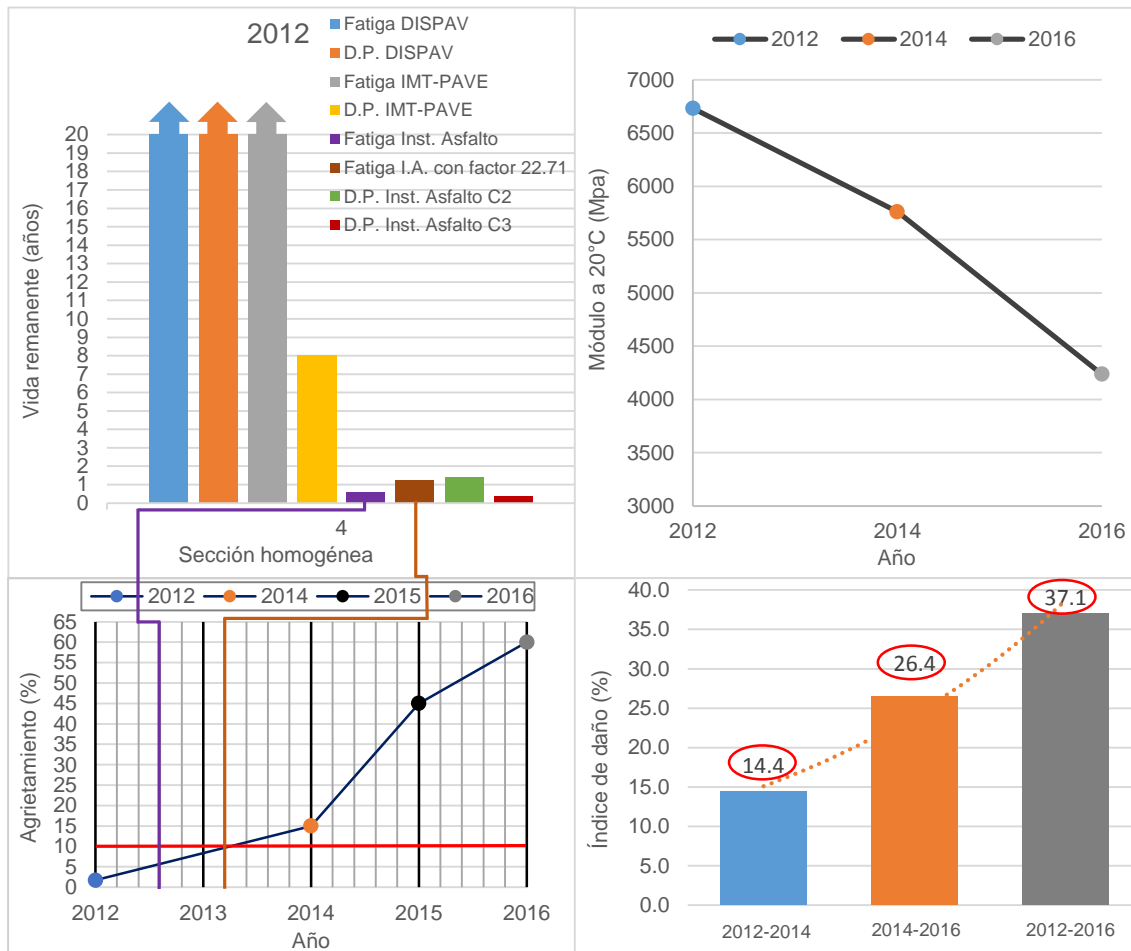


Figura 5.12: Relación vida remanente-daño-agrietamiento

En la Figura 5.12, se relaciona la vida remanente, con el agrietamiento y el daño estimado, para la sección en estudio del tramo de la carretera México-Pachuca. En primera instancia, se relaciona la vida remanente estimada a fatiga para el año 2012, obtenida con la ecuación original del Método del Instituto del Asfalto, con el agrietamiento por fatiga. Los valores que se relacionan en este caso son 0.6 años

de vida remanente, con el 10% de agrietamiento en el carril, el cual equivale al 20% de agrietamiento en la rodera que establece el Instituto del Asfalto. Sin embargo, se observa que el punto donde se cruzan la línea morada (vida remanente igual a 0.6 años) con la línea roja (agrietamiento igual a 10%) no coincide con la línea azul, que corresponde al porcentaje de agrietamiento medido en campo, lo cual quiere decir, que aún no ha cumplido su vida a fatiga y la vida remanente tiene que ser mayor a 0.6 años. Es importante mencionar que el valor del porcentaje de agrietamiento medido para el año 2012 se estimó, haciendo una proyección de regresión del valor del año 2014.

Entonces, se buscó el punto de cruce de los tres valores (agrietamiento límite, agrietamiento medido y vida remanente), el cual indica en este caso que la vida remanente, tomando como referencia el año 2012 tiene que ser aproximadamente de 1.2 años. Es así entonces, que se buscó ajustar la ecuación original para el cálculo del número de repeticiones de carga a la falla por fatiga del Instituto del Asfalto, en donde el objetivo fue encontrar una constante que sustituyera al valor de 18.4 (constante de calibración original) y que al aplicar la ecuación nos diera como resultado un número de repeticiones de carga a la falla igual a las generadas por el tránsito en 1.2 años. Hecho esto, la constante de ajuste encontrada fue de 22.71. En la Figura 55, la línea café representa el valor de la vida remanente calculada con el factor de 22.71.

En este ejemplo, se utilizó el Método del Instituto del Asfalto debido a que, es el método que presenta menor error, es decir, es el método que nos dio valores de vida remanente más cercanos y coherentes con respecto al agrietamiento.

Después, como siguiente paso se relaciona el agrietamiento, con el índice de daño que le corresponde a cada año de estudio y pasando a la gráfica de los módulos ajustados a la temperatura de referencia de 20°C dónde, la diferencia que hay entre los módulos de los diferentes años de estudio, representa el índice de daño calculado en cada periodo.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CONCLUSIONES

Del desarrollo del presente trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- De acuerdo con las estadísticas documentadas de la SCT, las carreteras son el principal modo de transporte de carga y pasajeros. Es por ello, que la evaluación de las condiciones de servicio de una carretera se vuelve de suma importancia, ya que, una de las características que debe de cumplir un camino en servicio, es ser confortable y seguro para los usuarios, además de ser resistente a las condiciones climáticas y a las cargas de los vehículos.
- La técnica del retrocálculo utilizada para el desarrollo de este trabajo, nos permitió entender mejor su comportamiento así, como ciertas consideraciones que hay que tomar al hacer uso de esta técnica, que cada vez es más reconocida a nivel mundial, por la rapidez y bajo costo que demandan los análisis utilizando esta técnica en comparación con otras técnicas de laboratorio que consumen más tiempo y costo.
- Una de la consideraciones que se recomienda tomar en cuenta al emplear el retrocálculo como una herramienta para la obtención de los módulos elásticos de las capas de un pavimento, es realizar una verificación de la calidad de los datos de entrada (datos de auscultación), antes de iniciar el proceso de retrocálculo, es decir, hacer un pre-proceso de los datos de campo obtenidos a través de las campañas de auscultación, específicamente de las deflexiones de superficie obtenidas con Deflectómetro de impacto, ya que, son uno de los insumos principales para llevar a cabo este proceso.
- Es a través del desarrollo de este trabajo que nos dimos cuenta de que en muchos de los casos las deflexiones suelen venir con algunas inconsistencias, las cuales afectan de manera directa la confiabilidad de los resultados, al hacer uso de esta técnica. Es necesario, que las autoridades correspondientes sigan tomando una serie de medidas para la mejora del control de calidad durante la toma de las mediciones en las campañas de auscultación y que de esta manera los datos puedan ser más confiables y

representativos de las condiciones del pavimento en servicio. También nos dimos cuenta de que es incorrecto medir deflexiones en pavimentos que tienen porcentajes de agrietamiento mayores a los que indican que ha llegado al final de su vida útil, ya que, se observaron casos en donde se llegaron a tener valores de agrietamiento del 100% y es esos casos no resulta significativo medir deflexiones.

En cuanto al uso de los programas de cómputo, utilizados para el análisis en este trabajo, se encontraron ciertas diferencias atribuidas tanto en su funcionamiento como en los resultados que arrojan uno y otro.

- Una de las diferencias encontradas es que, el software CalBack es más versátil y de más reciente creación. Evercalc a pesar de ser un programa muy utilizado en muchas investigaciones relacionadas a este tema y con el cual se han obtenido buenos resultados como lo afirman algunos investigadores, es un software con ciertas limitaciones, poco versátil y menos dinámico en comparación con CalBack, ya que los datos de entrada se tienen que generar de manera manual por el usuario, a diferencia de CalBack que maneja bases de datos haciendo esto de manera automática.
- Otra desventaja de Evercalc, es que solo utiliza un modelo de respuesta y un parámetro de búsqueda para el ajuste de las cuencas de deflexión. A pesar de que ambos programas utilizan un enfoque iterativo para encontrar el módulo de la capa del pavimento, que represente la deflexión de superficie medida en campo CalBack, es más dinámico y versátil en este sentido, ya que, en él se pueden elegir tres modelos de respuesta y tres motores o parámetro de búsqueda distintos para el ajuste de las cuenca de deflexión, por esta razón CalBack lleva la ventaja, ya que, utiliza el algoritmo genético que está basado en las redes neuronales, a través del cual se realiza un mayor número de iteraciones logrando así, un mayor ajuste de las cuencas de deflexión.

En cuanto a las metodologías analizadas para la estimación de la vida remanente se concluye lo siguiente:

- En los resultados se observaron diferencias, dando valores de vida en años, menores con el Método del Instituto del Asfalto y de acuerdo a lo observado, este método es el que menor error puede dar en los resultados porque, el criterio de falla por fatiga para este método que es del 20% medido en la rodera, se observó que estaba muy cercano con el valor de agrietamiento medido en los tramos, esto se asume, que es debido a que este método si está calibrado a las condiciones de un pavimento en servicio y aunque esta calibración no es válida de manera internacional en algunos casos, esas condiciones pudieran asemejarse a las que se presentan de manera local en México aunque, lo recomendable es calibrar el modelo a las condiciones locales de un sitio en estudio para que, de este modo los resultados puedan ser lo más representativos posibles.
- En relación con los otros dos métodos se concluye que, el Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM puede considerarse como el mejor ya que al menos el modelo de deformación permanente se calibró a través de diversas pruebas realizadas en la pista circular del Laboratorio de Vías Terrestres de dicho Instituto y en este sentido, pudiera dar resultados más realistas. Sin embargo, tiene ciertas limitaciones en cuanto a las leyes de fatiga que tiene implícitas y a las cargas de tránsito que puede manejar, ya que se quedan cortas en comparación con las que hoy se presentan en muchas carreteras del país.
- En cuanto a la metodología IMT-PAVE, a pesar de que introduce el concepto de espectro de carga y de daño, que nos da una mejor perspectiva de la respuesta del pavimento, dado que teóricamente son las cargas vehiculares reales, y esto se considera como un buen avance para los métodos de diseño en México, sin embargo, ninguno de sus modelos de deterioro está calibrado para condiciones locales de México, por lo que se entiende que solo fue una adaptación de otro método lo cual sería válido si estuviese calibrado para condiciones locales.
- De manera general, ninguno de los métodos anteriores es malo, solo falta considerar ciertas condiciones y variables que en la actualidad se encuentran

presentes de manera frecuente en los pavimentos. Quizás, hace falta continuar con las investigaciones y desarrollar de manera más completa las metodologías para que, sean más representativas de las condiciones de tránsito y de clima para México.

Referente a la evaluación del daño se concluye lo siguiente.

- En la etapa de la evaluación del daño presente en los pavimentos estudiados confirmamos que, el daño es progresivo con el paso del tiempo. Esto, lo probamos inicialmente al ver los resultados en los módulos obtenidos de las capas del pavimento para los tres años de estudio, donde se observó una disminución de estos con el paso del tiempo. Para comprobar esto, se obtuvieron de manera conjunta las Curvas Maestras para la capa asfáltica, con el fin de observar el comportamiento que se tenía, observándose lo mismo, una caída de la rigidez con el paso de un año a otro.
- A la vez, se estimó un índice de daño para todos los tramos estudiados a través, de una relación entre el módulo obtenido por retrocálculo del primer año con el subsecuente observándose que, este índice iba en aumento con el paso del tiempo.
- Aunado a todo esto, se obtuvieron los datos del agrietamiento por fatiga para todos los tramos de estudio, en donde tomamos la distribución media y se observó que, para el caso del tramo de la carretera México-Pachuca este valor va en aumento con el paso del tiempo, por lo que, establecimos una relación de este deterioro del pavimento con la disminución de la rigidez, bajo la hipótesis de que si el deterioro del pavimento es progresivo con el paso del tiempo la rigidez del mismo va disminuyendo.
- Sin embargo, no en todos los tramos se logró ver esta relación, ya que, para los otros tres tramos restantes si se observó disminución en la rigidez de las capas del pavimento, pero no se logró observar para el agrietamiento un aumento, ya que, para el año 2016 el agrietamiento era menor que para el primer año de estudio. Sin embargo, esto no quiere decir que no esté presente el agrietamiento por fatiga, ya que, este tipo de deterioro se genera

en la parte inferior de la capa asfáltica debido a los esfuerzos de tensión generados en esa zona por la aplicación de las cargas vehiculares y de ahí, asciende hacia la superficie. Lo que suponemos, en este caso y lo más probable es que, se haya aplicado un tratamiento superficial con lo cual se cubre parcialmente el agrietamiento, dejando de ser visible en la superficie de la capa, pero esto, no comprueba que no esté presente en el lugar.

- De la relación vida remanente-agrietamiento-daño, nos dimos cuenta de que el Método del Instituto del Asfalto es el que nos da menor error en los resultados, sin embargo, si se quieren obtener resultados más cercanos a lo real utilizando este método, la recomendación es que el método sea calibrado para las condiciones del lugar específico donde se pretenda utilizar. También se observó que no es necesario utilizar el concepto de vida remanente porque, a partir del agrietamiento y del daño, podemos hacer proyecciones a futuro del daño en el pavimento, el cual se ve reflejado de manera directa como agrietamiento.

Finalmente, como futuras líneas de investigación relacionadas a este tema, a fin de complementar este trabajo es:

- Realizar una serie de investigaciones y establecer una relación representativa para México en cuanto a la diferencia que puede existir entre los resultados obtenidos por retrocálculo y los obtenidos en laboratorio, es decir, obtener una serie de muestras de diferentes pavimentos en servicio de las diferentes zonas climáticas del país y ensayarlas en laboratorio esto con la finalidad de poder estandarizar por zona la posible diferencia que puede darse entre los resultados obtenidos por retrocálculo y los obtenidos en laboratorio e incluso encontrar alguna correlación para los resultados y que estos puedan ser validados de una mejor manera.
- Aunado a esto, se requiere realizar una serie de mediciones en campo en diferentes épocas del año o de manera periódica incluso a diferentes horas del día, tanto en la zona sin daño a través de una muestra representativa para laboratorio, para estimar la Curva Maestra sin daño para tenerla como

referencia y en las zonas dañadas del pavimento a través, de un Deflectómetro de impacto, esto con la finalidad de realizar un análisis que nos muestre la variación que puede presentar la respuesta de un pavimento.

- A partir del análisis con las mediciones de manera periódica como se menciona en el párrafo anterior, se estimaría el daño presente en el pavimento en servicio para posteriormente correlacionarlo o poderlo transformar en agrietamiento y de esta manera hacer una predicción más acertada de lo que le sucede al pavimento cuando está en servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avila, E., & Albarracin, F. (2015). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. *Maskana*, 6(1), 149–167. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22288/1/MASKANA6111.pdf>

Axel O. Bohn. (1989). The History of the Falling Weight Deflectometer. By Axel O. Bohn, Civil Engineer, Dr. Tech. Retrieved from http://www.pavement-consultants.com/media/6042/HistoryOfFWD_AxelOBohn.pdf

Balla, C. K. (2010). Prediction of remaining service life of pavements. The University Of Toledo.

Broutin, M. (2010). Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.

Chatti, K., Kutay, M. E., Lajnef, N., Zaabar, I., Varma, S., & Lee, H. S. (2017). Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers, FHWA-HRT-15-063. Washington, DC.

Corro, S., Magallanes, R., & Prado, G. (1981). Instructivo para Diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras (Vol. 444). México, D.F.

Corro, S., & Prado, G. (1974). Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible (Vol. 325). México, D.F.

Corro, S., & Prado, G. (1999). Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. Instituto de Ingeniería UNAM (Vol. CI-8). México, D.F.

- Corro, S., Prado, G., & Rangel, A. (1998). Comportamiento de pavimentos de altas especificaciones en la pista circular del instituto de ingeniería UNAM (Vol. 598). México, D.F.
- Das, A. (2008). Interpretation of Falling Weight Deflectometer data. Kanpur, Indian.
- Garnica, P., & Castellanos, A. (2013). Guía rápida de Usuario IMT-PAVE 3.0.
- Garnica, P., & Correa, A. (2004). Conceptos mecanicistas en pavimentos. Sanfandila, Querétaro. [https://doi.org/Publicación Técnica No 258](https://doi.org/Publicación_Técnica_No_258)
- Garnica, P., & Hernandez, R. (2013). Diseño Estructural De Pavimentos Para condiciones de alto tránsito vehicular. Instituto Mexicano Del Transporte, |4.
- Garnica, P., & Hernández, R. (2013). Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1. Sanfandila, Querétaro.
- GEDAFA, D. S. (2008). Estimation of remaining service life of flexible pavements from surface deflections. KANSAS STATE UNIVERSITY. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Han, H. C. (1973). Application of Layered System Analysis to the Design of Flexible Pavements. Lehigh University.
- Hesham, A., & Tayabji, S. (1998). Mechanistic Evaluation of Test Data From LTPP Flexible Pavement Test Sections, Volume I: Final Report, FHWA-RD-98-012, I, 110.
- INEGI. (2009a). Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Pachuca de Soto, Hidalgo.
- INEGI. (2009b). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, San Pedro Totolapa, Oaxaca, 1–9. Retrieved from

<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/08/08058.pdf>

INEGI. (2009c). Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Xalapa, Veracruz.

INEGI. (2009d). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tonalá , Chiapas.

Irwin, L. H., Ph.D., & P.E. (2002). Backcalculation : An Overview and Perspective. In FWD / Backcalculation Workshop 3 – 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - BCRA 2002 (Vol. 1, p. 22).

L. Von Quintus, H., Chetana, R., & Irwin, L. (2015). Long-Term Pavement Performance Program Determination of In-Place Elastic Layer Modulus: Backcalculation Methodology and Procedures, FHWA-HRT-15-036. Georgetown Pike, McLean.

Leiva, P. (2013). Herramienta de cálculo de la curva maestra de módulo dinámico, 1–29.

Montuschi, A. (2012). Flexible pavement design using Mechanistic-Empirical methods: the Californian approach, 184.

NCHRP. (2004a). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures - Final Report Chapter 2: Design Inputs- Material Characterizations. Illinois.

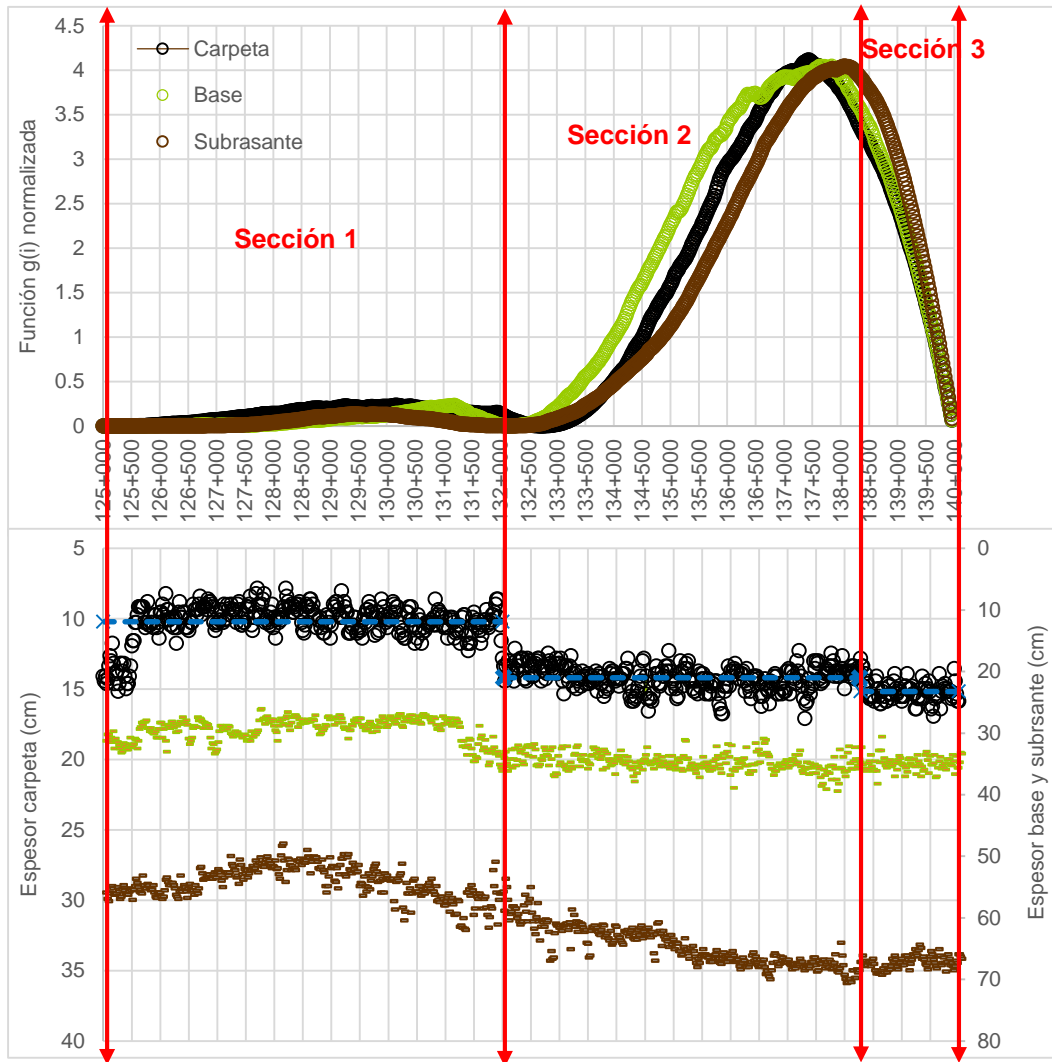
NCHRP. (2004b). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix II-1: Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements. Transportation Research Board of the National Research Council, (February), 311.
<https://doi.org/http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=703699>

- Offei, E., Young, R., Ksaibati, K., & Apronti, D. (2013). EVALUATING BASE WIDENING METHODS FHWA-WY-14/02F. Wyoming. <https://doi.org/C-ITS> Platform
- Richter, C. (1997). Advanced Methods for Using FWD Deflection-Time Data to Predict Pavement Performance. Springfield, 4.
- Rico, A., Téllez, R., & Garnica, P. (1998). Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías De Diseñoy Tendencias. Publicación Técnica, (104), 132.
- Roy, B., Sibaja, D., & Porras, D. (2008). DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN CON BASE EN LA DETERMINACIÓN DE ÍNDICES RED VIAL NACIONAL. San José, Costa Rica.
- SCT, D. G. de P. (2015). Anuario Estadístico Sector Comunicaciones y Transportes. México, D.F.: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT).
- Smith, K. D., Bruinsma, J. E., Wade, M. J., Chatti, K., Vandebossche, J. M., & Yu, H. T. (2017). Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report, FHWA-HRT-16-009 (Vol. 1). Washington, DC.
- Ullidtz, P., Harvey, J., & Tsai, B. (2006). Calibration of CalME models using WesTrack Performance Data.
- University of California Pavement Research Center. (2008). CalBack Manual Version 1.0 September 2008.
- Washington State Department of Transportation. (2005). Everseries Users Guide Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. Washington, DC.
- Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., Z. O. B. (2010). Aspectos importantes

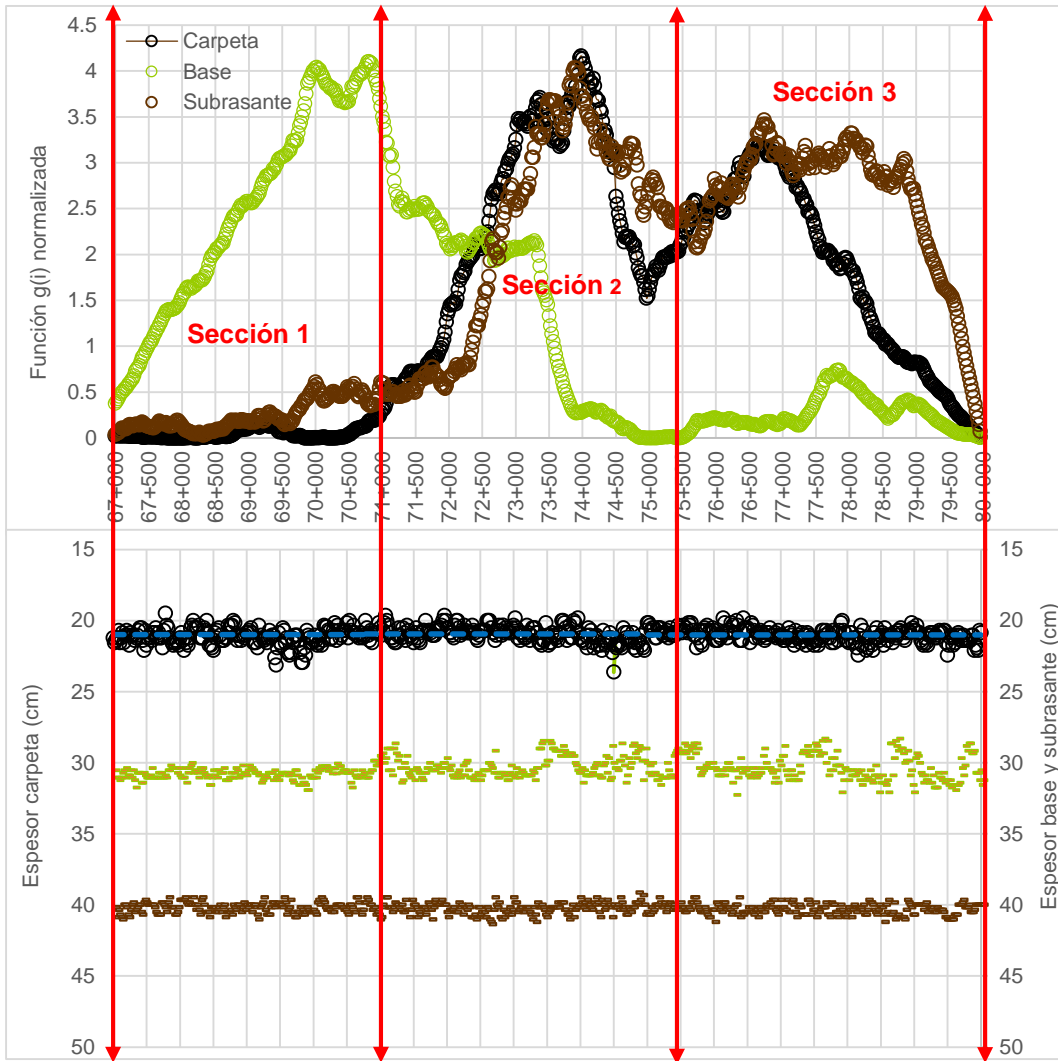
derivados de la utilización del deflectómetro de impacto hwd, aplicados para la rehabilitación o reconstrucción de los pavimentos flexibles. México, D.F.

ANEXO A. SECCIONES HOMOGÉNEAS

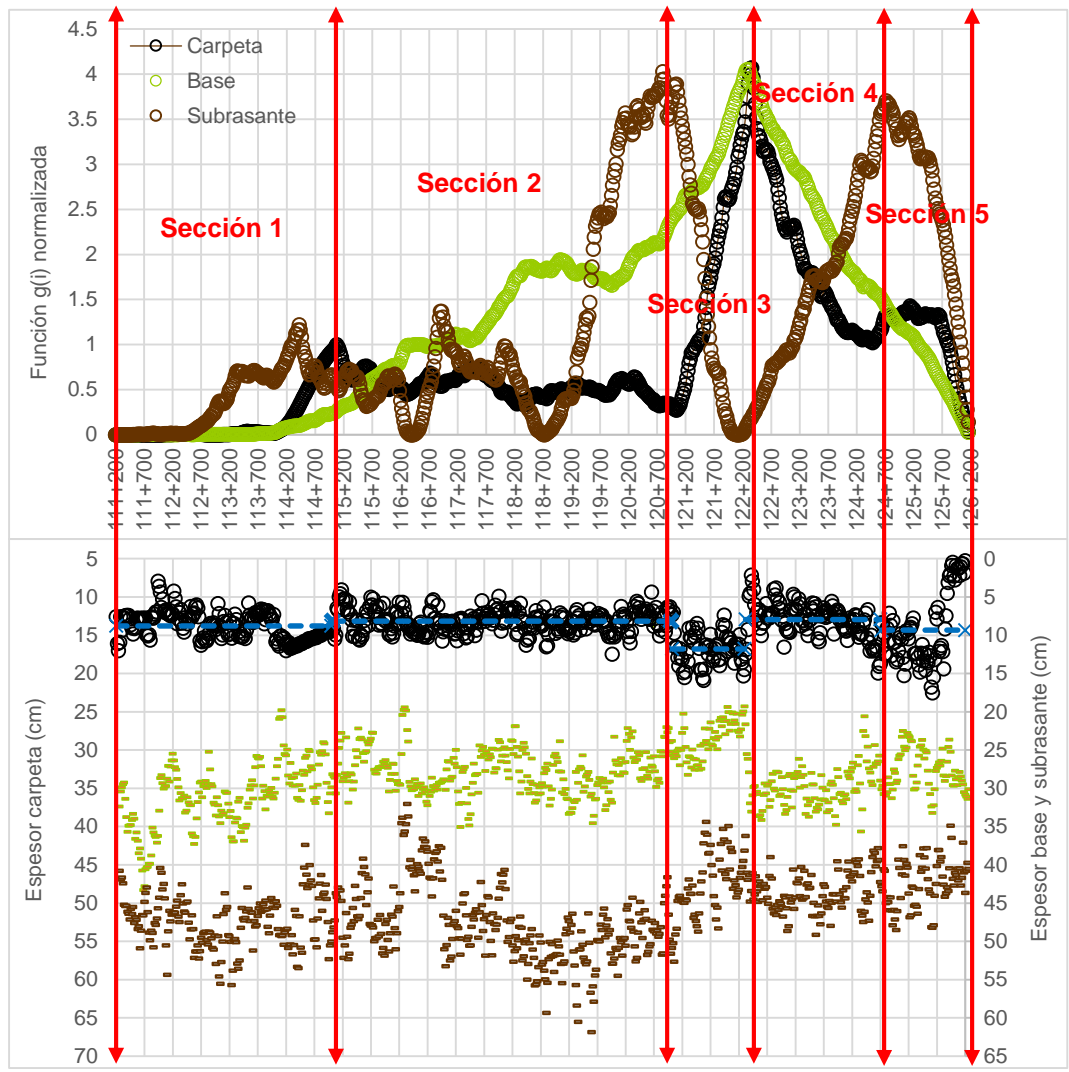
A.1 SECCIONES HOMOGÉNEAS POR LA FUNCIÓN $g(i)$



Función $g(i)$, secciones homogéneas y espesores de capa para el Tramo km 125+000 al 140+000 de la carretera Tapanatepec-Talismán

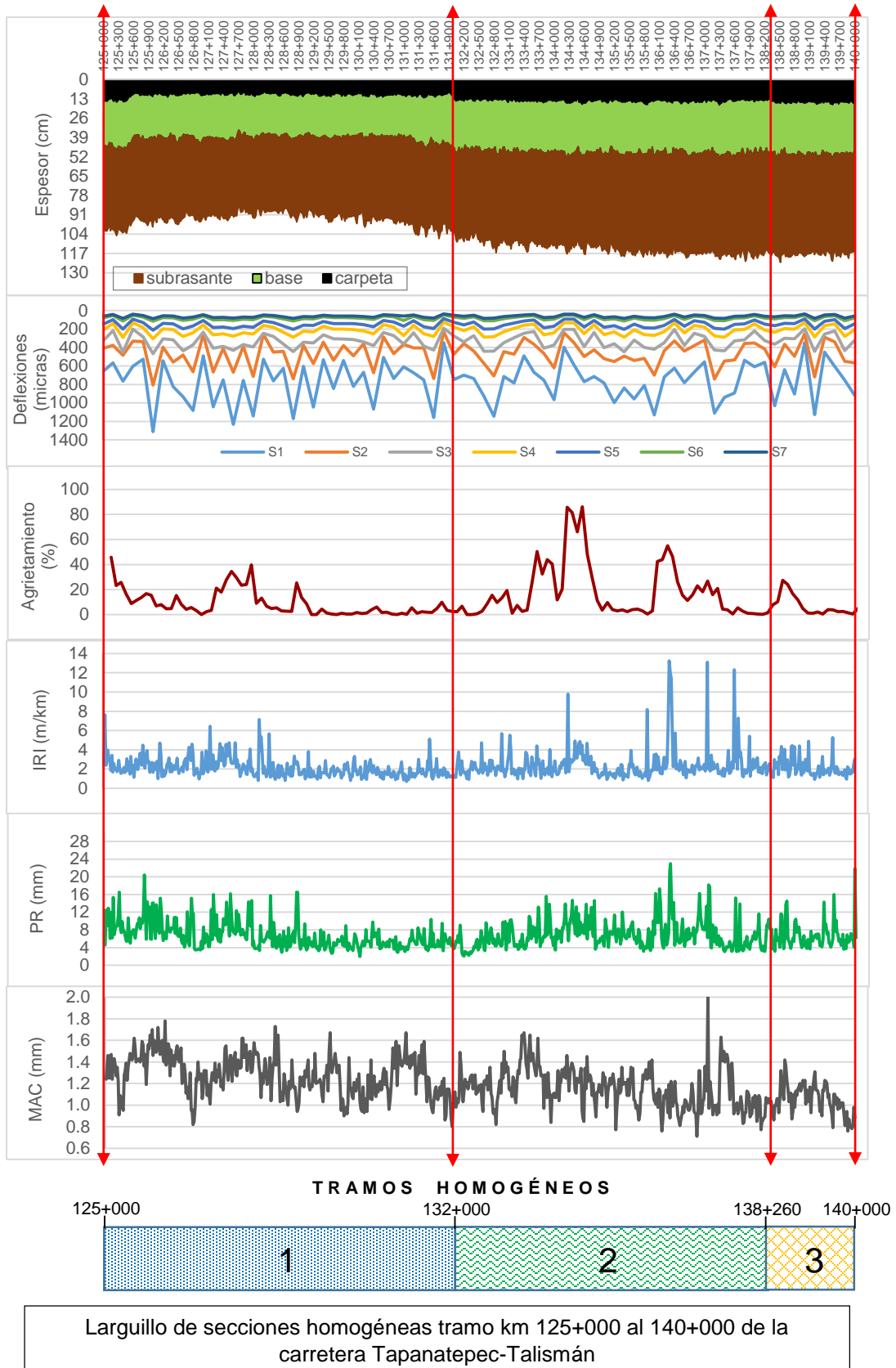


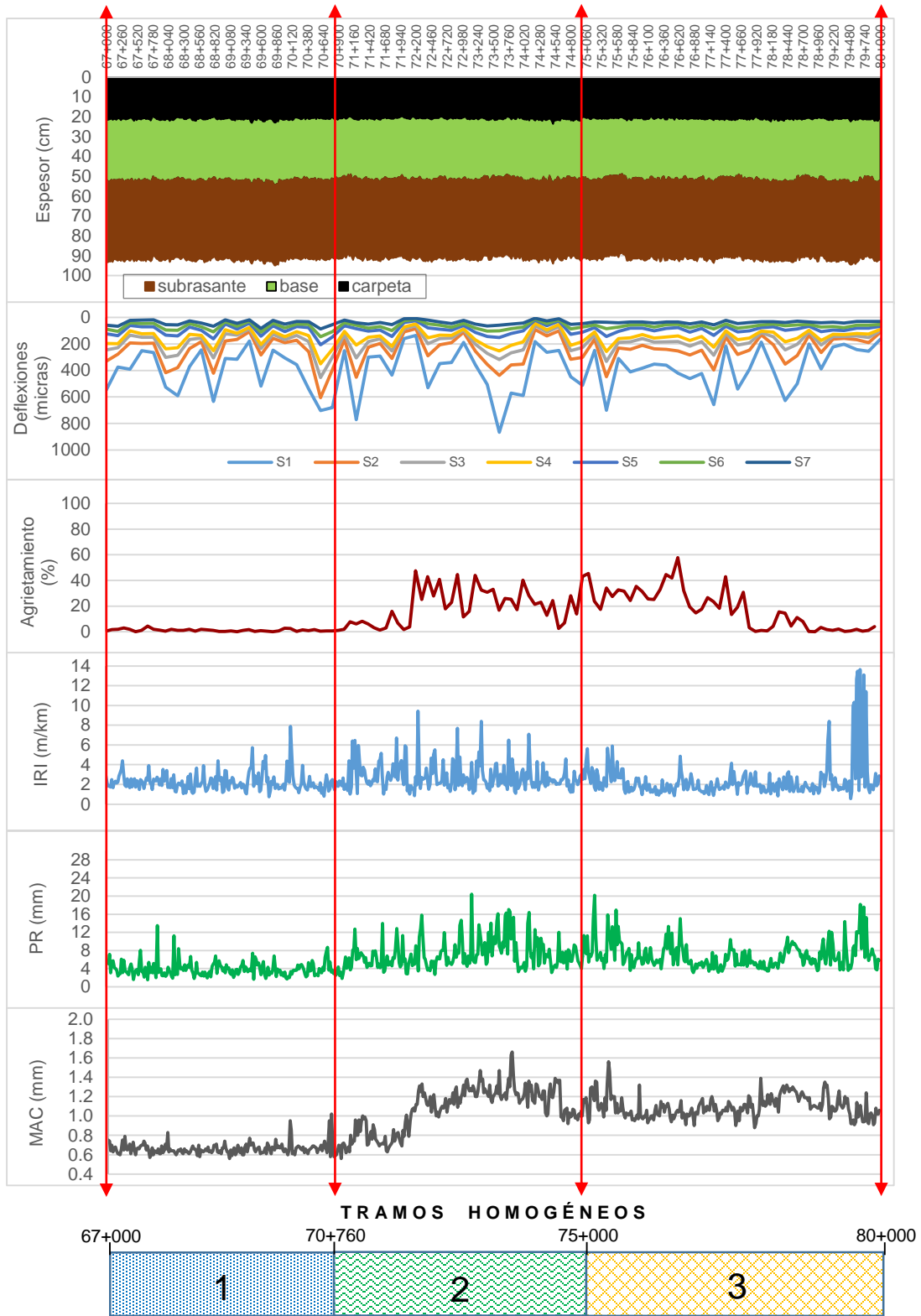
Función $g(i)$, secciones homogéneas y espesores de capa para el Tramo km 67+000 al 80+000 de la carretera Oaxaca-Tehuantepec



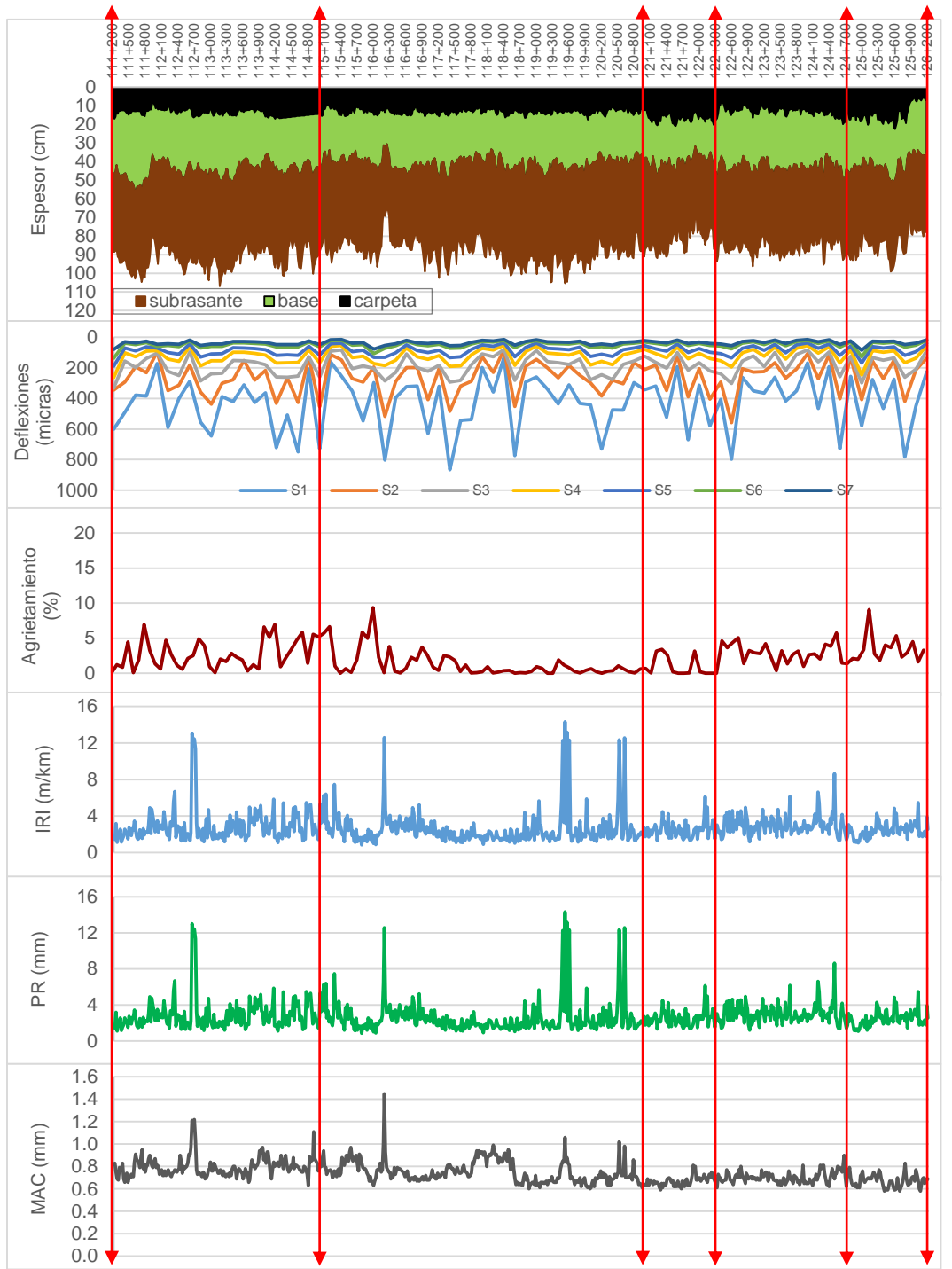
Función g (i), secciones homogéneas y espesores de capa para el Tramo km 111+200 al 126+200 de la carretera Puebla-Xalapa

A.2 LARGUILLOS DE LAS SECCIONES HOMOGÉNEAS

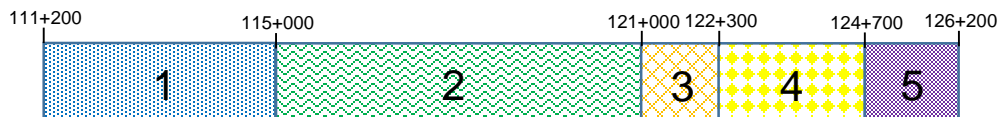




Larguillo de secciones homogéneas tramo km 67+000 al 80+000 de la carretera Oaxaca-Tehuantepec



TRAMOS HOMOGÉNEOS



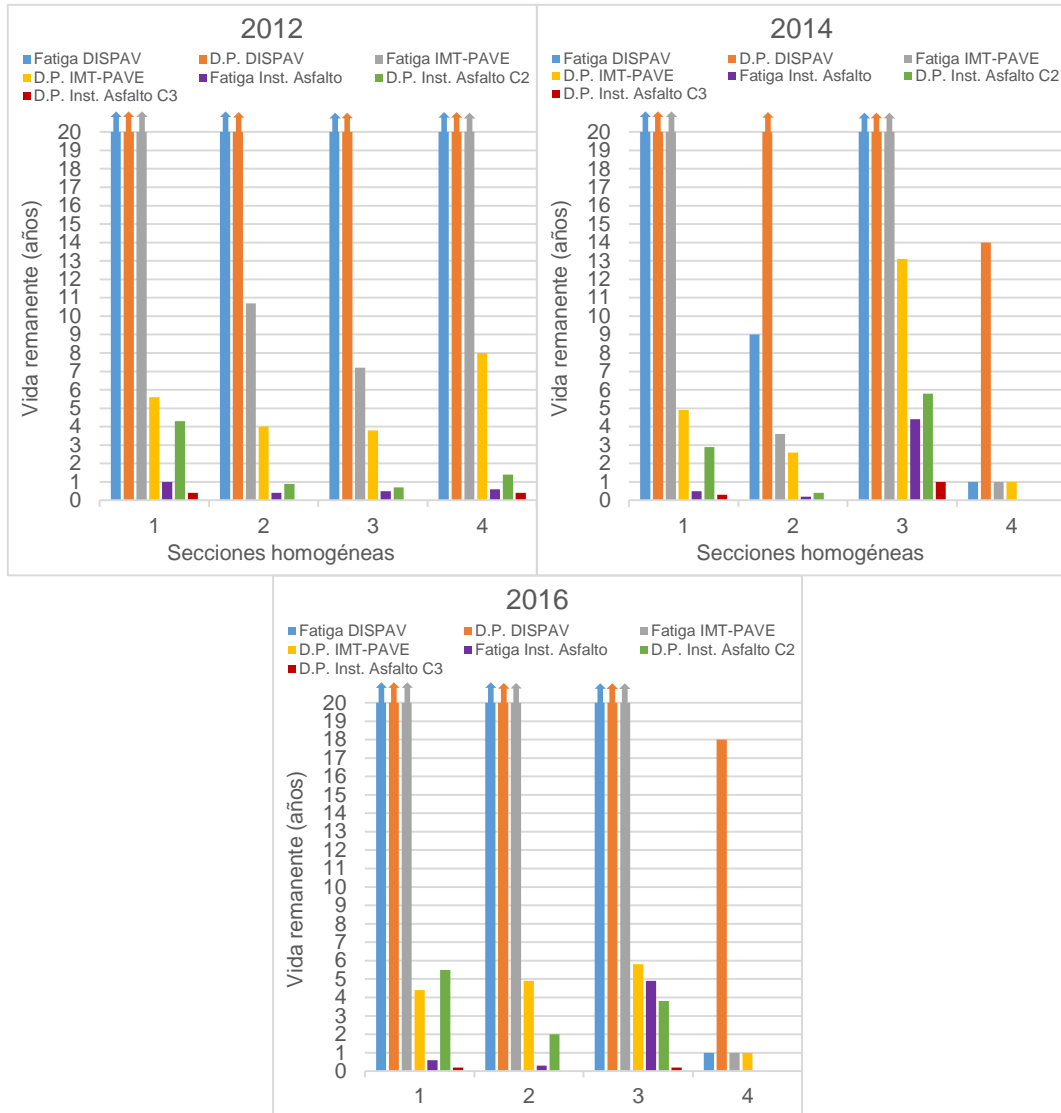
Larguillo de secciones homogéneas tramo km 111+200 al 126+200 de la carretera Puebla-Xalapa

ANEXO B.

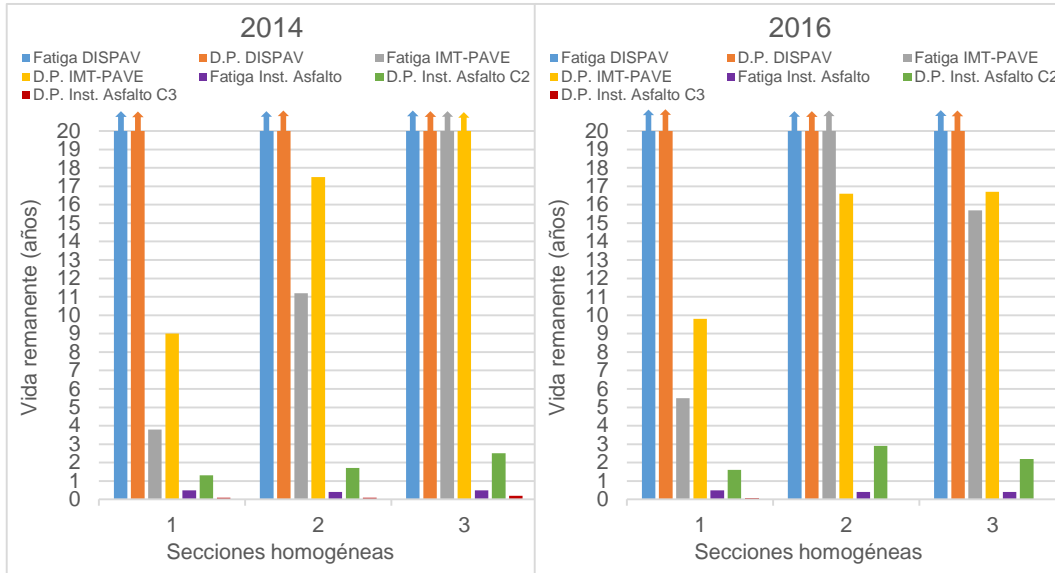
RESULTADOS

VIDA REMANENTE

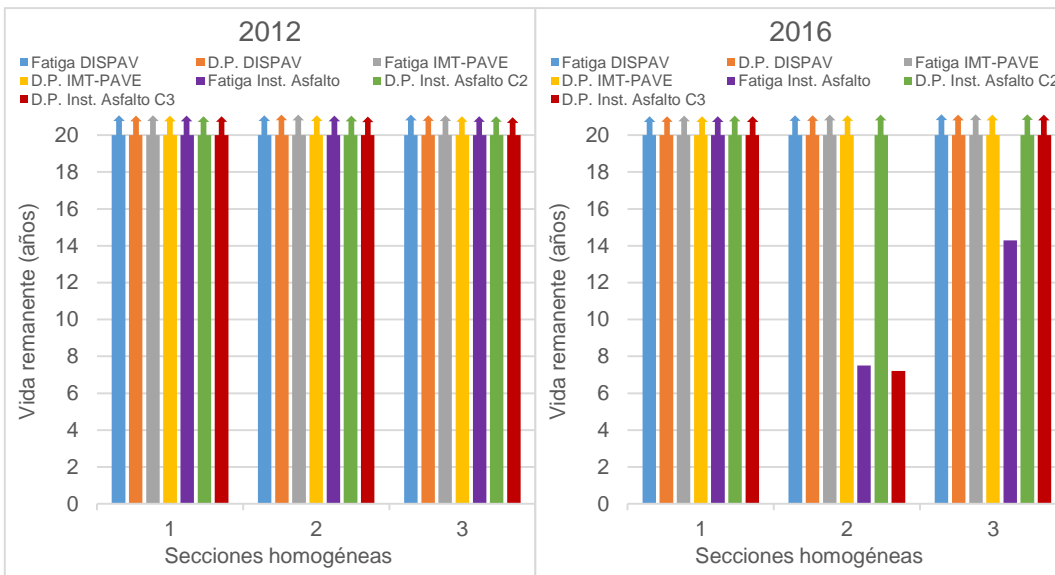
RESULTADOS DE LA VIDA REMANENTE



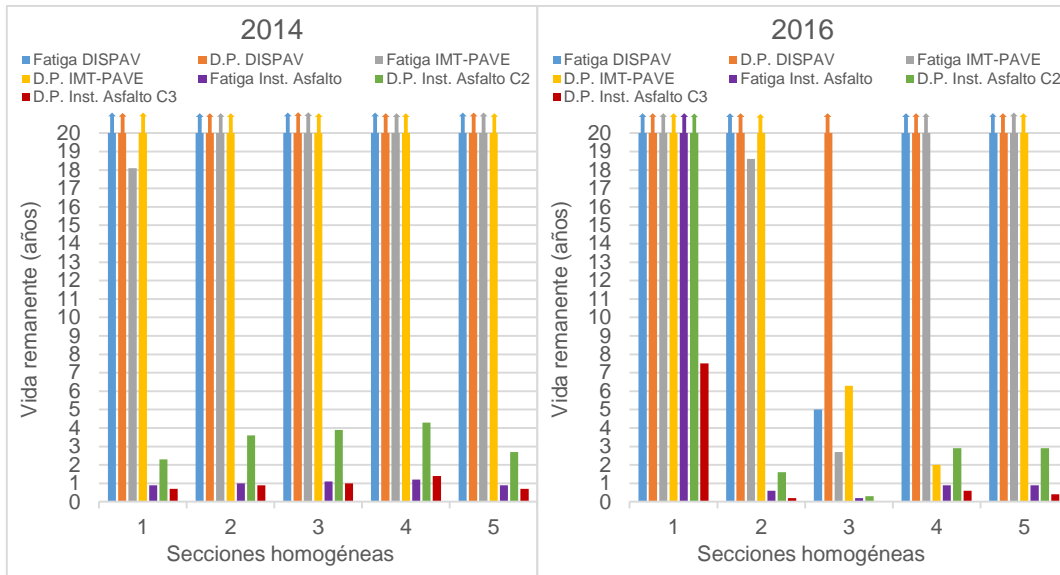
Vida remanente del Tramo 59+500 al 77+500 de la carretera México-Pachuca



Vida remanente del Tramo km 125+000 al 140+000 de la carretera Tapanatepec-Talismán



Vida remanente Tramo km 67+000 al 80+000 de la carretera Oaxaca-Tehuantepec



Vida remanente del Tramo km 111+200 al 126+200 de la carretera Puebla-Xalapa