



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
CAMPUS GUANAJUATO

**“MONOGRAFÍA DE AUSCULTACIÓN DE
PAVIMENTOS Y CASO DE ESTUDIO”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JORGE MARIO ESPINOZA ROMO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JULIO CÉSAR LEAL VACA

CODIRECTOR DE TESIS:

ING. OMAR SERRANO TORRES

GUANAJUATO, GTO.

SEPTIEMBRE 2018



Dedicatorias

A mi madre, quien me enseñó lo que es tener fortaleza y el verdadero significado de ser valiente, quien se preocupó por mí cuando estuve ausente y que siempre estuvo ahí para mí cuando necesitaba un consejo, porque cuando las cosas se complicaron nunca bajó los brazos e hizo que yo tampoco me rindiera.

A mi padre, por lo que forjó en mí cuando yo era pequeño, por siempre haberme inculcado el valor de trabajo, y por enseñarme a levantarme siempre que caí, gracias a su enorme apoyo puedo culminar mis estudios universitarios. Los amo a ambos.

A mi hermana, quien es para mí un ejemplo a seguir, siempre que lo necesité, estuvo ahí para escucharme y bríndame su compañía, sin duda es una de las personas más significativas en mi vida.

A mi director y codirector, quienes creyeron en mí y en mi proyecto desde un inicio, y que estuvieron conmigo a lo largo de todo este proceso hasta este punto en el que culmina, y a mis profesores en general, por toda su dedicación y empeño al transmitir sus conocimientos y valores.

A mis amigos, con quien compartí cinco años que no cambiaría por nada, gracias por todo el apoyo brindado, aprendí mucho de ustedes y se los agradezco.



Índice General

1.	Resumen.....	1
2.	Introducción	2
3.	Objetivos	4
4.	Hipótesis	5
5.	Justificación	6
6.	Definición del problema.	9
7.	Marco teórico.....	12
7.1.	Descripción introductoria.....	12
7.2.	Clasificación de los pavimentos.....	12
7.3.	Funciones de cada capa.....	14
7.4.	Clasificación de las carreteras.....	18
8.	Generalidades de la conservación y auscultación carretera.....	21
8.1.	Definiciones.....	21
8.2.	Clasificación de la conservación carretera.....	21
8.2.1.	Conservación Rutinaria de Tramos.....	22
8.2.2.	Conservación Periódica.....	23
8.2.3.	Reconstrucción de Tramos.....	24
8.2.4.	Reconstrucción de Puentes.....	24
8.2.5.	Señalamiento.....	25
8.2.6.	Atención de Puntos de Conflicto.....	25
8.2.7.	Mantenimiento Integral.....	25
8.2.8.	Auscultación Carretera.....	26
9.	Indicadores obtenidos de la auscultación carretera.....	29
9.1.	Índice de Servicio Actual (ISA).....	29
9.2.	Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	31
9.2.1.	Equipos para medición del IRI.....	34
9.3.	Profundidad de rodera.....	35
9.3.1.	Equipos para medición de roderas.....	38
9.4.	Textura del pavimento.....	40
9.5.	Coefficiente de fricción	41
9.5.1.	Equipos de medición.....	44
9.6.	Deflexiones.....	49
9.6.1.	Equipos de medición.....	58
9.6.2.	Características de los deflectómetros de impacto.....	63
10.	Descripción de los equipos utilizados en la medición del caso de estudio.....	66
10.1.	Equipo para medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	66



10.2. Equipo para medición de profundidad de rodera (PR).....	70
10.3. Equipo automatizado de inspección visual del deterioro superficial	72
10.4. Equipo para medición continua de espesores con radar de penetración superficial	74
10.4.1. Características básicas de los sistemas GPR.....	74
10.4.2. Antena aérea.....	75
10.4.3. Procesador principal.....	76
10.4.4. Odómetro electrónico de alta precisión (DMI)	76
10.4.5. Computadora portátil	77
10.4.6. Programas de cómputo.....	77
10.4.7. Metodología para la obtención de espesores continuos	79
10.4.8. Equipo para la medición continua de los espesores del pavimento	79
10.5. Equipo para medición del coeficiente de fricción (CF).	81
10.5.1. Tanque de almacenamiento de agua	83
10.5.2. Neumático de prueba.....	83
10.5.3. Control electrónico y sistema de procesamiento.....	84
10.6. Equipo para medición de desplazamientos verticales	85
11. Presentación de resultados del caso de estudio “Autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas del km 48+000 al 310+000”	88
11.1. Ubicación	88
11.2. Tipos de evaluación.....	89
11.3. Normativa.....	90
11.4. Depuración y tratamiento de los datos.	91
11.4.1. Puentes	92
11.4.2. Reductores de velocidad.	92
11.4.3. Tramos de concreto hidráulico.....	93
11.4.4. Cruce de vías Férreas.	93
11.4.5. Obras de drenaje.....	94
11.4.6. Rebases/desviaciones del vehículo de medición.....	95
11.4.7. Deterioro superficial.....	96
11.4.8. Casetas.....	96
11.4.9. Sondeos.	96
11.4.10. Deflexiones	96
11.5. Resultados.	98
11.5.1. Evaluación superficial.....	98
11.5.2. Evaluación estructural.	107
12. Caso de estudio y discusión de un tramo en la Autopista Pátzcuaro – Lázaro Cárdenas.	117
12.1. Evaluación superficial.....	118
12.1.1. Índice de Regularidad Internacional (IRI).	118



12.1.2. Profundidad de Rodera (PR).....	122
12.1.3. Coeficiente de fricción (CF)	126
12.2. Evaluación estructural	129
12.2.1. Estudio de geotecnia, sondeos.....	129
12.2.2. Espesores continuos determinados con GPR	131
12.2.3. Deflexiones	132
13. Recomendaciones generales para la conservación	135
14. Matriz guía de acciones de conservación.....	136
14.1. Uso del programa	136
14.2. Resultados.	138
14.3. Ejemplo y consideraciones especiales.....	138
14.4. Consideraciones sobre los costos de las acciones de conservación.	140
14.4.1. Concepto y descripción para la matriz de pavimento flexible (asfáltico). ...	141
14.4.2. Concepto y descripción para la matriz de pavimento rígido (concreto hidráulico)	142
15. Conclusiones	144
16. Referencias.....	148



Índice de Tablas

Tabla 1. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual	30
Tabla 2. Intervalos de IRI para clasificación de los tramos.	90
Tabla 3. Intervalos de Profundidad de Roderas para la clasificación de los tramos.	90
Tabla 4. Rangos del coeficiente de fricción para la clasificación de los tramos.....	91
Tabla 5. Intervalos de la Profundidad de Macro Textura para la clasificación de los tramos.....	91
Tabla 6. Rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius.	91
Tabla 7. Relación de Incidencias encontradas en las mediciones y el parámetro al que afecta.	97
Tabla 8. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro del IRI.	99
Tabla 9. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro de PR.	102
Tabla 10. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro de CF.	105
Tabla 11. Resultados de los sondeos.	107
Tabla 12. Zonificación por tramos homogéneos con respecto al parámetro IRI	119
Tabla 13. Zonificación por tramos homogéneos con respecto al parámetro PR.....	123
Tabla 14. Zonificación por tramos homogéneos para el parámetro de CF	127
Tabla 15 Resultados de la evaluación superficial.	145
Tabla 16 Resultados de la evaluación estructural.	145



Índice de Figuras

Figura 1. Localización del puerto Lázaro Cárdenas.....	6
Figura 2. Hinterland del puerto Lázaro Cárdenas.	7
Figura 3. Comportamiento típico de un pavimento rígido.....	13
Figura 4. Comportamiento típico de un pavimento flexible.	13
Figura 5. Composición de la red nacional de carreteras.	19
Figura 6. Composición Tipo de camino y red a la que pertenece.	19
Figura 7. Principales características geométricas de las carreteras.....	20
Figura 8. Ciclo de etapas para atender la conservación de carreteras.	26
Figura 9. Procedimiento para auscultar una red de carreteras.	29
Figura 10. Representación del Quarter - Car Model.....	32
Figura 11. Escala de valores del IRI y características de los pavimentos.....	33
Figura 12. Roderas por falla de la subrasante.	37
Figura 13. Roderas por falla asfalto.	37
Figura 14. Comportamiento del coeficiente de fricción con respecto al deslizamiento del neumático.....	42
Figura 15. Clasificación de los equipos según la medición del coeficiente de fricción....	48
Figura 16. Ejemplo de posicionamiento de plato de carga y sensores para ensayo de deflexiones.....	63
Figura 17. Estructuras de pavimento típicas con base en el cuenco de deflexiones medido.....	63
Figura 18. Localización típica del DMI.	67
Figura 19. Parte posterior del vehículo de medición ARAN.	68
Figura 20. Localización de los Láseres y acelerómetros en la parte frontal del vehículo.	69
Figura 21. Ejemplo de barra frontal montada al frente del equipo y simulación de láser.	69
Figura 22. Perfilómetro láser Dynatest (RSP).....	71
Figura 23. DMI ubicado en la llanta inferior izquierda del vehículo de medición.	72
Figura 24. Cámara panorámica montada en la parte frontal superior del vehículo ARAN.....	73
Figura 25. Cámaras monocromáticas montadas en la parte posterior del vehículo ARAN.....	74
Figura 26. Antena de geo-radar montada en la parte posterior de una camioneta tipo “Van”	80
Figura 27. Ventana del software durante el proceso de las imágenes de Geo-radar.....	81
Figura 28. Mu-meter y equipo de remolque.....	82
Figura 29. Medidor de fricción Mu-Meter.....	83
Figura 30. Equipo de cómputo con software del Mu-Meter.	84



Figura 31. Captura de pantalla del software.....	85
Figura 32. Cuenco de deformación producido por el equipo FWD.....	87
Figura 33. Localización y ruta del tramo evaluado.....	89
Figura 34 Vista desde el software del GPR de la medición de un puente.	92
Figura 35. Cambio de pavimento rígido a pavimento flexible visto desde el software del GPR.....	93
Figura 36. Vista de una alcantarilla desde el software del GPR.....	95
Figura 37. Gráfica del IRI para el carril derecho.	98
Figura 38. Gráfica del IRI para el carril izquierdo.....	98
Figura 39. Gráfica de PR para el carril derecho.....	101
Figura 40. Gráfica de PR para el carril izquierdo.	102
Figura 41. Gráfica del Coeficiente de fricción para ambos carriles.....	104
Figura 42 Resumen de evaluación superficial para cada parámetro.	107
Figura 43 Estratigrafía del pavimento con base en los sondeos.....	109
Figura 44. Sondeo realizado en el km 65+000.....	110
Figura 45. Sondeo realizado en el km 115+000.....	111
Figura 46. Sondeo realizado en el km 300+000.....	112
Figura 47 Gráfica de espesores continuos para el carril derecho.....	112
Figura 48 Gráfica de espesores continuos para el carril izquierdo.	113
Figura 49 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril derecho.....	114
Figura 50 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril izquierdo.	115
Figura 51 Resumen del porcentaje de aceptación y rechazo para el valor de deflexiones, carril derecho.	116
Figura 52 Resumen del porcentaje de aceptación y rechazo para el valor de deflexiones, carril izquierdo.....	116
Figura 53 Gráfica de valores de IRI y zonificación por tramos para el carril derecho. ..	118
Figura 54 Gráfica de valores de IRI y zonificación por tramos para el carril izquierdo. 118	
Figura 55. Vista del km 56+220. Agrietamiento severo en ambas rodadas.....	120
Figura 56. Vista del km 56+260. Agrietamiento severo en ambas rodadas, bombeo de finos en la rodada derecha.....	121
Figura 57. Vista del km 60+500. Caseta de cobro.....	121
Figura 58 Gráfica de valores de PR y zonificación por tramos para el carril derecho. ..	122
Figura 59 Gráfica de valores de PR y zonificación por tramos para el carril izquierdo. 122	
Figura 60 Vista del km 56+830.....	124
Figura 61 Cadenamiento 57+900.....	124
Figura 62. Vista del 59+120.....	125
Figura 63. Vista del km 59+700.....	125
Figura 64. Vista del km 60+300. Caseta de cobro.	126



Figura 65 Gráfica de valores del coeficiente de fricción para ambos carriles	127
Figura 66 Vista del km 63+000.....	128
Figura 67 Vista del km 64+500.....	128
Figura 68 Vista del km 65+500.....	129
Figura 69 Representación estratigráfica del pavimento obtenida mediante sondeos.....	130
Figura 70 Gráfica de espesores continuos determinados con GPR para el carril derecho.	131
Figura 71 Gráfica de espesores continuos determinados con GPR para el carril izquierdo.	131
Figura 72. Vista del puente ubicado en el km 96+065.....	132
Figura 73 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril derecho.....	132
Figura 74 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril izquierdo.	133



1. Resumen

En el presente trabajo, se encuentran los resultados de auscultación de la autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas del km 48+000 al 310+000, los parámetros evaluados son Índice de Regularidad Internacional (IRI), Profundidad de Roderas (PR), Coeficiente de Fricción (CF), Deflexiones, Espesores del pavimento determinados mediante sondeos y por radar de penetración terrestre (GPR), y, por último, levantamiento de deterioro superficial.

Para cada uno de los parámetros se realizó una investigación de su respectiva teoría para así, posteriormente, poder realizar una interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

También, se incluye la presentación y breve explicación de cómo funcionan los equipos que realizaron las mediciones de dichos índices.

Además, se realiza un análisis más a fondo de un tramo de estudio, donde se interpreta a detalle cada parámetro, la explicación de las posibles razones de los resultados obtenidos y la propuesta de recomendaciones generales para el tramo analizado.

Por último, se presenta una matriz guía para la toma de decisiones de las acciones de conservación carretera.



2. Introducción

Las carreteras tienen como función principal, ofrecer de manera rápida, cómoda y segura, el transporte de personas y de bienes, este objetivo se ve mermado por un mal estado de la carretera por la cual se transita, existiendo pues, la necesidad de tener una conciencia sobre la conservación carretera y el mantenimiento de la misma.

En la actualidad es de suma importancia ofrecer una red carretera en óptimas condiciones, debido al aporte económico y social que esto representa, trayendo consigo un beneficio sustancial al usuario (y a las zonas geográficas que ésta conecta). Los deterioros y fallas que una carretera presenta, usualmente se traducen en pérdidas de tiempo en los recorridos y pueden originar accidentes con pérdidas humanas y materiales.

Uno de los aspectos fundamentales para decidir si una carretera es candidata a una conservación, o a qué tipo de conservación, es la auscultación en general, dicha herramienta provee varios índices y parámetros que son útiles para la toma de decisión de la conservación carretera.

Para este trabajo, se realizó la auscultación de la autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas del km 48+000 al 310+200 y se recabaron índices tales como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), Profundidad de Roderas (PR), Coeficiente de Fricción (CF), Deflexiones, Espesores del pavimento determinados mediante sondeos, y por radar de penetración terrestre (GPR), levantamiento de deterioro superficial, así como también se realizó una propuesta de zonas homogéneas y se eligió una zona de estudio para abundar en el estudio de los índices recabados.



Si se toma en cuenta que las carreteras son el factor principal que propicia el desarrollo social, económico y cultural de los habitantes de México, resulta imprescindible que a estas obras viales se les destinen recursos para asegurar que sus niveles de servicio y de seguridad sean elevados y aceptables, así como tratar de prevenir que los fenómenos naturales no provoquen incrementos considerables en sus costos de operación. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015)

Dado que existe la falta de recursos económicos destinados a este rubro, y más aún, con los altos costos de construcción de una carretera, nos lleva a pensar que el mantenimiento y mejoramiento de las vías existentes puede ser la solución a la constante problemática, además, es necesario crear una cultura y conciencia social en cuanto al cuidado y preservación de la red carretera mexicana, para brindar un buen funcionamiento y comodidad a los usuarios de las vías, quienes finalmente son los beneficiarios de este servicio.



3. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo presentar la metodología práctica para elaborar el diagnóstico que se obtiene de las condiciones del pavimento a partir de los resultados obtenidos de la evaluación superficial y estructural, además de dar las recomendaciones generales para los trabajos de conservación necesarios para mantener los estándares aceptables de desempeño requeridos, y haciendo uso de una matriz, poder elegir acciones de conservación. Adicionalmente, se presenta una descripción de los parámetros evaluados en una carretera, así como de los equipos utilizados para realizar dichas mediciones, y de su funcionamiento. Los trabajos realizados para el presente proyecto se describen a continuación:

- 1) Evaluación superficial del pavimento: Medición del Índice de Regularidad Superficial (IRI), la Profundidad de Rodera (PR), el Coeficiente de Fricción (CF), en cada uno de los carriles de circulación, y se realizó un levantamiento de deterioro superficial.
- 2) Evaluación estructural del pavimento: Estratigrafía del pavimento obtenida mediante la ejecución de sondeos (calas), medición de los desplazamientos verticales en el pavimento (deflexiones), medición continua de los espesores de las capas del pavimento mediante un georadar de penetración superficial.



4. Hipótesis

Mediante el análisis teórico y con datos prácticos de una auscultación carretera, es posible establecer una matriz que relacione los parámetros físicos y acciones de conservación para que sirva como guía base en la planeación de la administración carretera.



5. Justificación

El Puerto industrial y comercial Lázaro Cárdenas es un acceso marítimo internacional líder en el Pacífico mexicano. La inmejorable posición del Puerto Lázaro Cárdenas permite participar en las cadenas del transporte marítimo internacional más desarrolladas. En esta zona, conocida como Delta de Balsas, se desarrolla una gran actividad portuaria, comercial e industrial, que dispone además de un atractivo puerto turístico a sólo 45 minutos, el de Ixtapa-Zihuatanejo, puertos que conforman un complemento ideal para los negocios y el descanso. (Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V., 2017)



Figura 1. Localización del puerto Lázaro Cárdenas.

Fuente: API Lázaro Cárdenas.

La micro zona del delta del Balsas, a donde es perteneciente el puerto de Lázaro Cárdenas, está enclavada, a su vez, en una región fuertemente económica, conformada por los estados de Michoacán, Guerrero, Querétaro, México, Distrito Federal y Morelos. En ella se asienta el 33 por ciento de la población total del país y participa con el 42 por ciento del Producto Interno Bruto en el ámbito nacional y con el 49 por ciento de la industria



manufacturera. La región cuenta con 31 mil 581 kilómetros de carreteras y 36 mil 576 kilómetros de vías férreas. (Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V., 2017).

El hinterland del Puerto de Lázaro Cárdenas, se circunscribe a través de conexiones ferroviarias y carreteras a los Estados de Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí, Morelos, Puebla, Veracruz, Tamaulipas, Distrito Federal, Querétaro, Edo. de México, Guerrero, Guanajuato y Nuevo León, área que abarca más de 60 millones de habitantes del país y genera más del 60% del PIB. Estados que en los que se localizan la mayoría de las plantas de producción del país y de mayor demanda de productos de consumo interno. El Foreland del Puerto Lázaro Cárdenas, se circunscribe a la Costa Oeste de Norte América con Estados Unidos y Canadá, con Centro América con Guatemala, El Salvador, Ecuador, Colombia, Panamá; en Sur América con Chile, Argentina, Perú y con la Cuenca del Pacífico Oriental, como Japón, Malasia, Filipinas, Singapur, Taiwán, Corea, Rusia, China, Taiwán, Indonesia, Tailandia, Pakistán, Nueva Zelanda, Sudáfrica, entre otras. (Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V., 2013).



Figura 2. Hinterland del puerto Lázaro Cárdenas.
Fuente: API Lázaro Cárdenas.



En el año 2014, siguiendo la tendencia de los últimos años, el movimiento más alto de carga marítima contenerizada se registró en los puertos del Pacífico de México, debido principalmente a los grandes volúmenes de carga contenerizada que se manejó en los puertos de Manzanillo y Lázaro Cárdenas. En este año, se manejaron por este litoral más de 26 millones de toneladas, que equivalen al 64.9% del total nacional. El puerto de Lázaro Cárdenas, en conjunto con el de Manzanillo, manejaron 2.1 millones de contenedores, que equivalen al 99% del movimiento en su litoral. El promedio de carga en estos puertos varía entre 7 y 9 toneladas por contenedor cargado. (Instituto Mexicano del Transporte, 2015).

Debido a las estadísticas analizadas y al plan de desarrollo que dicho puerto tiene, resulta lógico pensar que las carreteras que conectan a este puerto, como lo es la autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas tendrán una demanda creciente debido al significativo movimiento de mercancías del puerto, por lo que es importante saber en qué estado está la carretera y proporcionar un mantenimiento adecuado para reducir los costos de operación.

La autopista de análisis, además de la importancia hacia el puerto, también es fuertemente utilizada como vía hacia las zonas de recreación como Ixtapa.

Estas son algunas de las razones por las que se eligió este tramo carretero, tan importante para para el estado de Michoacán como para el país mismo. Como se describe anteriormente, dicho puerto representa un acceso marítimo a una gran actividad portuaria y de suma importancia económica.



6. Definición del problema.

Durante la operación de las carreteras, en ellas inciden diversos factores que afectan su desempeño y paulatinamente van disminuyendo los niveles de servicio para los que fueron proyectadas. Los factores principales son: el tipo de vehículos y su peso, el número de vehículos que transitan por una carretera en un periodo determinado, ocasionando deterioros, deformaciones y agrietamientos en la superficie de rodadura, los fenómenos meteorológicos, como la precipitación pluvial, la radiación solar y el viento, entre otros. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015).

En nuestro país, el transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, y por esta razón, es necesario que dicho transporte opere con base a parámetros de eficiencia.

El movimiento por carretera es clave en la distribución de mercancías a las diversas regiones del país, dada la extensa cobertura alcanzada por dicha red. En el 2015, se registró un 86% del movimiento total de las cargas que se mueven por el territorio y el 98% del movimiento de pasajeros Cabe aclarar que estas cifras no incluyen el movimiento de pasajeros en vehículos propios. (Instituto Mexicano del Transporte, 2015). Además, como se menciona en la parte introductoria del presente trabajo, permite desarrollar los aspectos comercial, social e industrial del país.

La información que se requiere para preparar un programa de conservación es sólo una parte de toda la información que se puede medir en un camino, por lo que se debe "tamizar" constantemente para obtener sólo aquellos datos que realmente influyan en las decisiones para el



mantenimiento de la red o para la elaboración de un proyecto detallado de rehabilitación de un tramo específico. (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998).

Existe un indicador denominado “costo de operación” de una carretera, éste representa la suma total de los gastos que efectúan los usuarios al transitarla, como son el consumo de combustibles, la depreciación de los vehículos, el desgaste de neumáticos, el costo del tiempo de los usuarios, etc.

Resulta evidente que cuando una carretera presenta deterioros y fallas, el costo de su operación se incrementa notablemente, ocasionando pérdidas económicas, problemas sociales, molestias, quejas, pérdida de tiempo entre otros.

La Conservación de Carreteras tiene como propósito preservarlas en buenas condiciones de operación, para que los costos de operación se mantengan en niveles aceptables y no se presenten incrementos notables que afecten el tiempo y la economía de los usuarios.

Se han realizado estudios para conocer cuáles son los factores de un camino que influyen de manera directa en los costos de operación de los vehículos, principalmente de los de carga, y según el Instituto Mexicano del Transporte, uno de los principales factores es el estado superficial de la vialidad. Los principales costos de operación son los siguientes:

- Combustibles.
- Lubricantes.
- Llantas.
- Reparación y refacciones.
- Costos del operador.



- Depreciación y reposición de vehículos.
- Intereses.
- Seguros.
- Tiempo de transporte de las mercancías.

La influencia de las condiciones del camino en los costos de operación de los vehículos es significativa. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera bien conservada, recta, en terreno plano y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. La presencia de baches o deficiencias en la superficie; de pendientes o grados de curvatura no adecuados, así como de otros vehículos afecta las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes. (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998).



7. Marco teórico.

7.1. Descripción introductoria.

Una carretera puede ser definida como una vía terrestre de transporte de uso público, construida con la finalidad de proveer una ruta para la circulación de vehículos automóviles.

Un pavimento puede definirse como “Capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendida(s) entre el nivel superior de las terracerías (subrasante) y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial” (Valenzuela Rodríguez, 1993)

“Un pavimento es aquella estructura conformada por una o varias capas de material terreo tratado, en la cual puede realizarse un tránsito de vehículos rápido, cómodo y seguro, ofreciendo una superficie de rodamiento capaz de soportar cargas de vehículos, del intemperismo y de cualquier otro agente perjudicial”. (Martínez Rivera, 2018).

7.2. Clasificación de los pavimentos.

La clasificación de los pavimentos, habitual e históricamente es la de “pavimentos Flexibles” y “Pavimentos rígidos”. Sin embargo, los pavimentos se diferencian en términos de las capas que lo conforman y de los materiales por los cuales están constituidos, además de la resistencia que cada uno presenta a la flexión.



De un modo bastante somero y práctico, un pavimento rígido es aquel cuyo elemento resistente fundamental es una losa de concreto hidráulico, en cualquier otro caso que no se cumpla dicha condición, se considera pavimento flexible.

Pavimentos flexibles. Aquellos en los cuales la superficie de rodadura es una capa delgada conformada por una mezcla de un agregado pétreo y un aglutinante asfáltico.

(Saucedo Vidal, 2010) Menciona que un pavimento rígido es aquel cuyo elemento fundamental es una losa de concreto hidráulico, (dicha losa tiene una alta resistencia a la flexión), y en ésta se distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas.

Además de los esfuerzos que tiene que resistir por el tránsito vehicular, este tipo de pavimentos se ven afectados en gran parte por los esfuerzos de contracción y dilatación que presenta la losa de concreto debido a cambios de temperatura.

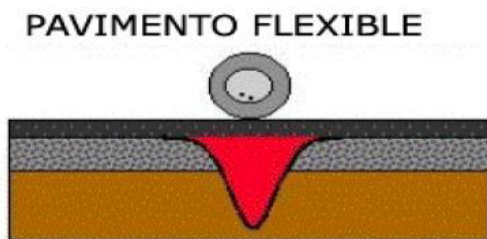


Figura 4. Comportamiento típico de un pavimento flexible.

Fuente: Saucedo, Artemio. Facultad de Ingeniería, UNAM.



Figura 3. Comportamiento típico de un pavimento rígido.

Fuente: Saucedo, Artemio. Facultad de Ingeniería, UNAM



Dejando de lado la clasificación “clásica” ya mencionada, actualmente se está implementando un pavimento mixto o semirrígido, el cual consiste en un pavimento flexible a cuya base se le ha dado una rigidez alta por la adición de cemento o asfalto.

En general, un pavimento está formado por diversas capas de mejor calidad y mayor costo cuanto más cercanas se encuentran a la superficie de rodamiento, esto es, principalmente, por la mayor intensidad de esfuerzos que le son transmitidos.

Todos los pavimentos son diseñados con la finalidad de cumplir con:

- Soportar y transmitir las cargas que se presentan con el paso de los vehículos.
- Ser lo suficientemente impermeable.
- Soportar el desgaste por el tráfico y el clima.
- Mantener una superficie cómoda y segura (antiderrapante) para el rodamiento de los vehículos.
- Mantener un grado de flexibilidad para cubrir los asentamientos que presenten las capas inferiores (base o subbase). (Gutiérrez Graf, 2004)

7.3. Funciones de cada capa.

Cada capa en la estructura del pavimento tiene una función en específico, las cuales son descritas a continuación:

- **Cuerpo de Terraplén:** Se puede definir como la franja de terreno que es afectada por la construcción del camino. Ayuda a dar el nivel necesario para llegar a la



rasante, en esta capa se forman taludes, bordos, bermas y es aquí donde se alojan las obras de drenaje.

- Subyacente: Se considera como una plantilla o transición entre el cuerpo de terraplén y la subrasante, al igual que las capas superiores, su función es recibir y resistir las cargas de tránsito transmitidas por las capas superiores y transmitir las de manera adecuada y aminorada al terreno natural.
- Subrasante. Aportación de la ingeniería civil mexicana. La función principal es la de recibir y resistir las cargas de tránsito transmitidas por las capas superiores y transmitir las de manera adecuada y aminorada a las capas inferiores, además, evita que se contaminen las capas del pavimento cuando el cuerpo de terraplén o terreno natural tienen material fino o arcilloso. Evitan que sean absorbidas las capas superiores cuando se tienen pedraplenes, entonces se podría decir que sirve como cimentación al pavimento.

En el caso de pavimentos flexibles:

- Subbase. Para muchos autores e incluso constructores, la función de esta capa es de carácter económico, ya que se trata de llegar al espesor requerido del pavimento con el material más barato posible. Todo el espesor se podría construir con un material de alta calidad, como el usado en la base, pero se prefiere hacer dicha capa más delgada y sustituirse en parte por una subbase de menor calidad, aun cuando esto traiga consigo un aumento en el espesor total del pavimento, ya que cuanto menor es la calidad del material colocado mayor será el espesor necesario. Su función principal es recibir los esfuerzos de las capas superiores y



los transmitirlos de manera aminorada a las capas inferiores. La subbase también se coloca para absorber deformaciones perjudiciales en las capas inferiores, (ya que las capas inferiores tienen una calidad menor, son más susceptibles a cambios volumétricos ocasionados por el contacto con el agua), al absorber las deformaciones, evita que ese comportamiento perjudicial se vea reflejado en la superficie del pavimento. Además, previene la migración de finos a las capas superiores y drena el agua que se infiltre a través de las superiores.

- Base hidráulica. Consiste en proporcionar un elemento resistente que absorba y transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada y aminorada. En muchos casos también debe drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por los acotamientos del pavimento, así como impedir la ascensión capilar. Previene la migración de finos a las capas superiores.
- Base estabilizada con cemento o asfalto: Puede o no estar como capa, es empleada cuando la base hidráulica no cumple con las especificaciones de la norma por lo que se le adiciona material estabilizador (cemento o asfalto) para mejorar su comportamiento mecánico e hidráulico. Como función estructural, ayuda a la carpeta asfáltica a soportar los esfuerzos y transmitirlos a las capas inferiores.
- Riego de liga o impregnación. No tiene aporte estructural, su función principal es dar adherencia entre la base y la carpeta asfáltica.
- Carpeta asfáltica: La función estructural consiste en resistir, absorber y distribuir los esfuerzos ocasionados por el tránsito. Adicionalmente proporciona una capa de rodadura uniforme y constante, adecuada para el paso de los vehículos, ya que



esta capa es la que está en contacto directo con el tránsito. Es una capa impermeable, cuenta con una pendiente transversal para desalojar el agua llamada bombeo, es de un color contrastante para proveer reflexión luminosa, y para el señalamiento horizontal. Debe resistir los efectos abrasivos del tráfico hasta donde sea posible.

- Riego de Sello: No tiene función estructural, su principal función es la de impermeabilizar la carpeta asfáltica. Las funciones como parte de conservación son restituir la rugosidad, sellar grietas y volver a impermeabilizar el pavimento.

Para el caso de pavimentos rígidos

- Subbase: Las funciones son análogas a la misma en un pavimento flexible y sirve también para proporcionar una superficie uniforme que de un apoyo a la losa y facilite su colado, protege también a la losa de cambios volumétricos en la subrasante, que, de no ser así, inducirían esfuerzos adicionales en la losa de concreto. En este caso, la subbase no tiene ninguna función estructural, ya que la losa es suficiente para soportar las cargas.
- Losa de concreto hidráulico. Las funciones son las mismas que la carpeta para un pavimento flexible.



7.4. Clasificación de las carreteras.

La clasificación debe atender a su función, que está modulada por las actividades sociales, económicas y políticas que se satisfacen y potencian por la existencia de las carreteras. Las redes se articulan a través de sus nodos, constituidos por poblaciones, entronques e intersecciones. De esta manera, de acuerdo con su alcance espacial, se definen tres jerarquías de redes: nacional, regional y local. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos, 2016).

1. Red Nacional. Está constituida por las carreteras que permiten la movilidad rápida y eficiente de altos volúmenes de tránsito entre regiones del país. Las carreteras que la constituyen conectan poblaciones con alta actividad económica, pero no pasan directamente por los centros de las poblaciones, sino que se accede a ellos por carreteras de la red regional y vías suburbanas que se conectan a través de entronques; por lo que el control de acceso en esta red es total. En los segmentos de esta red circulan los vehículos con los pesos y dimensiones máximas permitidas, sin ninguna restricción.
2. Red Regional. Está constituida por carreteras que sirven al transporte al interior de las regiones; algunas de ellas son el vínculo con la Red Nacional a la que se conectan con entronques; pero cuando se conectan entre sí o con la red local puede ser a través de intersecciones; por lo que el control de acceso puede ser total o parcial. Usualmente conectan ciudades de población media con volúmenes de tránsito de altos a medios y los trayectos no son de tan largo alcance, como en la red nacional. Los segmentos de



esta red permiten la circulación de todos los vehículos, aunque con ciertas restricciones.

- Red Local. Está constituida por carreteras que sirven al transporte al interior de las localidades de las regiones. Comunican las poblaciones medianas o pequeñas entre sí o con propiedades colindantes, por lo que los volúmenes de tránsito son relativamente bajos a medios y no tienen control de acceso. Por su naturaleza, en los segmentos de esta red no suelen circular los vehículos de mayores dimensiones, por lo que deben restringirse.



Figura 5. Composición de la red nacional de carreteras.

Fuente: Manual de proyecto Geométrico, SCT-2016.

<i>Tipo de Camino.</i>			<i>Red a la que pertenece.</i>		
Camino	Característica	Control de Accesos	Eje de Transporte	Primaria	Secundaria
ET4-A4	Carretera de cuota (Autopista)	Total	✓		
ET2-A2		Total	✓		
A4	Autopista/carretera libre	Parcial		✓	
A2		Parcial		✓	✓
B2	Carretera libre	Sin control de accesos		✓	✓
C					✓
D			Camino rural		

Figura 6. Composición Tipo de camino y red a la que pertenece.

Fuente: Manual de Proyecto Geométrico, SCT-2016.



El tipo de carretera debe seleccionarse dentro de los que se establezcan en la normativa y de aquí la importancia de contar con una buena clasificación de carreteras.

Para que la selección de carretera sea adecuada, debe considerarse fundamentalmente la función de la carretera, el servicio que debe prestar y la demanda esperada.

Una vez decidido el tipo de carretera, la segunda decisión es sobre la velocidad de proyecto. La selección de este parámetro dependerá del nivel que se quiera de los atributos deseables.

Una vez seleccionada la velocidad de proyecto, los componentes del proyecto geométrico quedan definidos, al menos en su dimensionamiento.

CONCEPTO	UNIDAD	TIPO DE CARRETERA																									
		E y A					B					C					D										
		VEHICULO DE PROYECTO																									
		T3-S2-R4 de 31.00 m					T3-S2-R4 de 28.50 m					T3-S3 de 18.50 m					C3 YB3 de 12.50 m										
NIVEL DE SERVICIO ESPERADO EN EL HORIZONTE DE PROYECTO	NS	B										C															
TERRENO	MONTANOSO	[Color-coded cells]																									
	LOMERIO	[Color-coded cells]																									
	PLANO	[Color-coded cells]																									
VELOCIDAD DE PROYECTO	Kmh	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110	40	50	60	70	80	90	100	30	40	50	60	70		
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA	m	108	137	167	201	238	62	83	108	137	167	201	238	44	62	83	108	137	167	201	30	44	62	83	108		
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE REBASE	m	455	520	585	650	715	325	390	455	520	585	650	715	260	325	390	455	520	585	650	195	260	325	390	455		
GRADO MAXIMO DE CURVATURA	°	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	17	11	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	30	17	11	7.5	5.5	4.25	3.25	60	30	17	11	7.5		
CURVAS VERTICALE	K	CRESTA	m%	20	31	43	57	72	8	14	20	31	43	57	72	4	8	14	20	31	43	57	3	4	8	14	20
		COLUMPIC	m%	20	25	31	37	43	10	15	20	25	31	37	43	7	10	15	20	25	31	37	4	7	10	15	20
	S	LONGITUD MINIMA	m	40	50	50	60	60	30	40	40	50	50	60	60	30	30	40	40	50	50	60	20	30	30	40	40
PENDIENTE GOBERNADORA	%	4	3		-			5		4			-		6		5			-		8		6		-	
PENDIENTE MAXIMA	%	6	5		4			7		6			4		8		7			5		12		9		6	
LONGITUD CRITICA	m	APLICAR LAS TABLAS DE LA RELACION PESO/POTENCIA DEL VEHICULO DE PROYECTO.																									

Figura 7. Principales características geométricas de las carreteras.

Fuente: Manual de Proyecto Geométrico, SCT-2016.



8. Generalidades de la conservación y auscultación carretera.

8.1. Definiciones.

Para poder tener un concepto claro acerca de la conservación carretera, es necesario definir ciertos términos que pueden resultar confusos y dar pie a malas interpretaciones.

- Conservación: Preservar una cosa en buen estado o en una situación óptima para evitar su degradación.
- Rehabilitación: Conjunto de técnicas y métodos que sirven para recuperar una función.
- Reconstrucción: Reparación o nueva construcción de una cosa destruida, deteriorada o dañada.

Por lo tanto, al mencionar el término “conservación”, se hace referencia a las acciones que se hacen para conservar cualquier elemento del camino en buen estado o en una situación óptima para evitar su degradación (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015).

8.2. Clasificación de la conservación carretera.

Según la SCT, se mencionan los siguientes tipos de conservación:

- Conservación rutinaria de tramos.
- Conservación rutinaria de puentes.
- Conservación periódica.
- Reconstrucción de tramos.



- Reconstrucción de puentes.
- Señalamiento.
- Atención a puntos de conflicto.
- Mantenimiento integral.

8.2.1. Conservación Rutinaria de Tramos.

En este Subprograma se realizan las labores que tienen como fin conservar en buenas condiciones la superficie de rodadura, las zonas laterales, las obras de drenaje y subdrenaje, el cercado, los cortes, terraplenes y todos los elementos del camino dentro de la franja del derecho de vía.

Los trabajos que se ejecutan son, entre otros:

- En la superficie de rodadura: bacheo, relleno de grietas, renivelaciones aisladas, riegos de sello aislados, riegos asfálticos de protección, retiro de obstáculos, rastreos y/o recargues en caminos revestidos o en terracerías.
- En las zonas laterales: limpieza de cunetas, desazolve de alcantarillas, deshierbe, retiro o pepena de basura, reparación o reposición del cercado, recargue de taludes, rastreo del derecho de vía, etc.

Esta actividad se realiza por Administración Directa o por contrato:

- Conservación por Administración Directa: La conservación de carreteras se remonta a varias décadas atrás; inicialmente se hacía la conservación con los propios medios con que contaban las dependencias: mano de obra, equipo y maquinaria, bancos de



material propios, asfalto de la paraestatal, oficinas, instalaciones, vehículos autopropulsados, etc. A este tipo de modalidad se le llamó Conservación por Administración Directa.

- **Conservación por Contrato:** A inicios de la década de los 90's se empezó a incursionar en la conservación rutinaria contratada. Con ayuda de empresas particulares se ejecutaban los trabajos de conservación, utilizando al personal de la Dependencia para enseñar a las empresas que incursionaban en esta modalidad, luego incorporando a los viejos camineros jubilados, o los que en su momento fueron incorporándose al programa de retiro voluntario y luego en los albores del año 2000 con la gran mayoría que se liquidó, formando empresas privadas con amplia experiencia. A esta modalidad se le llamó Conservación por Contrato.

Además, se han implementado en algunas Dependencias contratos plurianuales o multianuales, de modo que siempre esté atendido este subprograma para garantizar el objetivo principal de la conservación.

8.2.2. Conservación Periódica.

Se denomina conservación periódica a todas las obras de rehabilitación que en forma periódica o eventual son necesarias para que en un camino ofrezca las condiciones adecuadas de servicio.

Las actividades principales que constituyen la conservación periódica son: recuperación de pavimentos, renivelación, tratamientos superficiales, bacheo profundo, reconstrucción de



terraplenes, rehabilitación de bases, reconstrucción de carpetas, riegos de sello, restitución de señalamiento horizontal y obras de prevención de derrumbes.

8.2.3. Reconstrucción de Tramos.

Esta actividad es la más completa y costosa, ya que rehabilita parcial o totalmente la estructura de los pavimentos, comprendiendo la recuperación de una parte de la estructura, previo tratamiento de estabilización con adición de pétreos, productos asfálticos, cemento Portland u otros aditivos, tratamiento de la capa descubierta, tendido de la parte recuperada y de la carpeta asfáltica, restitución o reparación de obras menores de drenaje dañadas, instalación de sistemas de subdrenaje y otros.

8.2.4. Reconstrucción de Puentes.

Se llevan a cabo actividades como el reforzamiento de superestructura y/o subestructura, protecciones contra socavación, recimentaciones, sustituciones de superestructura y adecuación de puentes angostos a los anchos de calzada existentes o para mejorar su capacidad hidráulica; los cuales en cada tipo de trabajo a realizarse tienen un costo diferente por las características geométricas y de materiales propias de cada estructura y del sitio donde se encuentran, con la finalidad de mejorar su parámetro de calidad de no satisfactorio a bueno y adecuando su estado físico a las cargas y condiciones del entorno, de tal manera que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios.



8.2.5. Señalamiento.

Se contemplan tanto el señalamiento vertical como el horizontal y dispositivos de seguridad tales como: botones, defensa o barrera metálica, terminales de amortiguamiento de impacto disipadoras de energía, barreras centrales, vallas antideslumbrantes, etc. Se ha implementado como un subprograma independiente por la importancia que tiene la Seguridad Vial, máxime que la Organización de las Naciones Unidas declaró éste como el Decenio de la Seguridad, como una meta en todos los países integrantes de la Organización.

8.2.6. Atención de Puntos de Conflicto

Un punto de conflicto es el sitio o tramo carretero donde ocurren 4 accidentes o más por año, en promedio, considerando que las circunstancias generadoras de los accidentes son el entorno, el conductor, el vehículo y el camino, de tal manera que la SCT se ha dado a la tarea de llevar a cabo el Programa Nacional de Atención de Puntos de Conflicto, con la finalidad de reducir los índices de accidentalidad en las carreteras federales libres de peaje, por lo que es necesario realizar trabajos que incrementen la seguridad vial a los usuarios.

8.2.7. Mantenimiento Integral.

Los trabajos que se desarrollan son: Reconstrucción de Tramos y Puentes, la Conservación Periódica y la Conservación Rutinaria en tramos y puentes; todos ellos en un sólo rubro “Mantenimiento Integral”, programando los trabajos para tres años.



Para atender de manera adecuada la conservación de carreteras en operación, es necesario aplicar un ciclo de acciones como el que se muestra a continuación. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015).



Figura 8. Ciclo de etapas para atender la conservación de carreteras.

Fuente: “Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014.

8.2.8. Auscultación Carretera.

La auscultación de pavimentos es aplicable a una red de carreteras a cargo de una Dependencia, para que se determinen las inversiones requeridas para conservarla en buen estado de operación, se definan las prioridades de atención y se realice la programación de los trabajos por ejecutar. La auscultación se realiza con equipos de tecnología reciente de alto rendimiento (que funciona a velocidades de operación) para obtener diversa información sobre las condiciones de servicio y estructurales de los pavimentos.

La evaluación de un pavimento se aplica a un tramo específico de una carretera y tiene como objetivo determinar las condiciones de servicio, de capacidad estructural y de calidad de



materiales, mediante equipo especializado y diversos procedimientos, a fin de determinar su estado de servicio o de funcionamiento. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015).

La auscultación de una red de carreteras en operación tiene como objetivo fundamental medir sus condiciones de servicio actuales (en términos del estado de conservación), de los elementos siguientes:

- Pavimento
- Seguridad vial
- Obras de drenaje
- Derecho de vía
- Señalamiento
- Cortes y taludes
- Estructuras

Es importante señalar que un gran porcentaje de la red de carreteras en México fue construida entre las décadas de los setenta y los noventa del siglo pasado, con materiales cuya calidad estaba definida por especificaciones que ahora son obsoletas, lo que da como resultado ante los actuales niveles de tránsito y de camiones pesados que circulan por esta red con muchos años de servicio, que se requiera de grandes inversiones económicas para efectuar su rehabilitación o reconstrucción, utilizando mejores materiales y aplicando nuevas técnicas.

Por lo tanto, será necesario continuar aplicando el equipo de auscultación, los procedimientos de evaluación y las técnicas de rehabilitación de pavimentos, que actualmente se



disponen en nuestro país, complementando y adoptando tecnologías innovadoras. Es conveniente mencionar que los países de mayor desarrollo tecnológico están aplicando tecnologías que permiten evaluar a nivel de diseño de mezclas, el desempeño y durabilidad de los materiales, probados bajo niveles de esfuerzos más apegados a las condiciones reales en que trabajarán en las carreteras, lo que les permite asegurar mejores comportamientos y niveles de servicio, con la consecuente disminución de los costos de operación.

Varios artículos, publicaciones técnicas y conferencistas reconocidos mencionan atinadamente que gran parte de la red carretera del país tiene una antigüedad de más de cincuenta años, y a lo largo de dichos años, las características del autotransporte han sufrido cambios sustanciales e innovaciones tecnológicas importantes, de manera que las características de un gran número de carreteras han dejado de responder a los requerimientos del transporte que circula por ellas. Un ejemplo de estos cambios puede verse en las toneladas de peso bruto vehicular, la cual pasó de 35 a 80 toneladas y de 6 a 9 ejes.

Por otra parte, el vehículo de proyecto de mayor longitud pasó de 15 a 31 metros, esto sin contar la multiplicación del parque vehicular. Esta situación explica el deterioro de la red y a su vez las necesidades de mantenimiento, rehabilitación y de modernización.

Para determinar las acciones de mantenimiento es necesario auscultar la red de carreteras para conocer sus condiciones actuales. Debido a sus características y a la gran cantidad de datos por recolectar y analizar, es necesario utilizar equipos de alto rendimiento para asegurar que se ausculte de manera eficiente, en el menor tiempo posible y se cuente con datos vigentes.



Por la longitud de la red, el equipo de alto rendimiento asegura que la medición de los tramos ocurra en un periodo menor que el que se genera con métodos tradicionales y por tanto que todas carreteras cuenten con información vigente respecto de los parámetros medidos.

Los datos obtenidos durante la auscultación sirven para calificar y evaluar las características de la red en términos de sus condiciones superficiales, estructurales y de seguridad vial. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, 2015).

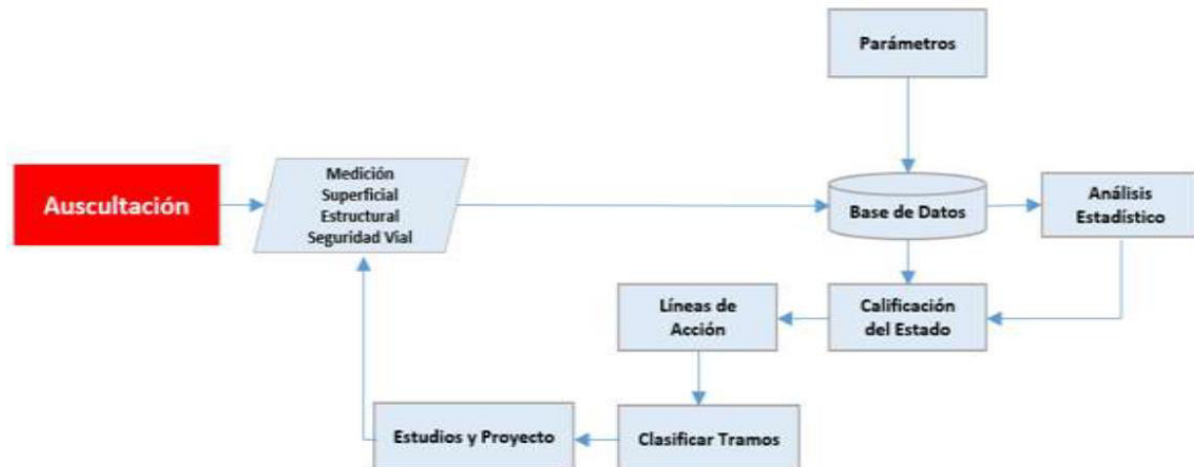


Figura 9. Procedimiento para auscultar una red de carreteras.

Fuente: Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México, 2014.

9. Indicadores obtenidos de la auscultación carretera

9.1. Índice de Servicio Actual (ISA).

Para evaluar la calidad de las carreteras en nuestro país, durante muchos años se utilizó el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of State Highway Officials (AASHO), el cual toma en cuenta un parámetro denominado Present Serviceability Index (PSI), mejor conocido en México como Índice de Servicio Actual (ISA). El índice o nivel de servicio actual consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación y lo realiza un grupo o panel de evaluadores. Cada evaluador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5,



correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie perfecta, respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores.

Este método ayudó a estimar (de una manera subjetiva) las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en nuestro país, con rapidez y sin interrumpir el flujo de vehículos. Este método tuvo gran difusión, debido también a que no se contaba con equipos de alto rendimiento para medición de la regularidad en la superficie de rodamiento.

Tabla 1. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual

ISA	Condición del camino
5	Muy Bueno
4	Bueno
3	Regular
2	Malo
1	Pésimo

Dentro del estudio del Banco Mundial para el establecimiento del Índice Internacional de regularidad, se realizó la estimación de la evaluación subjetiva con el método AASHTO y el cálculo del Índice de Regularidad Internacional, y se observó que existen amplias diferencias entre los valores de regularidad de los grupos de evaluadores de los diferentes países, así como con los resultados de los equipos de medición.

El Banco Mundial recomienda que no se utilice la calificación del panel de evaluadores (ISA) para la obtención o correlación del Índice Internacional de regularidad, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es sentido (ISA), el otro es medido (IRI). (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998).



En conclusión, el IRI es actualmente el índice que se usa para la evaluación de la condición que una carretera ofrece.

9.2. Índice de Regularidad Internacional (IRI).

El Índice de Regularidad Internacional, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la regularidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino. El Índice Internacional de regularidad tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y está basado en un modelo llamado "Golden Car" descrito en el reporte 228 del NCHRP. (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998).

La regularidad superficial es un fenómeno que depende primordialmente del perfil longitudinal de la superficie de la carretera, pero también depende de las características mecánicas de los vehículos y la velocidad de circulación de éstos. (Sánchez S. & De Solminihaç T., 1989).

El cálculo matemático del IRI está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc.

En la siguiente ilustración, se muestra el modelo "cuarto de coche". (National Cooperative Highway Research Program Report 228, 1980).

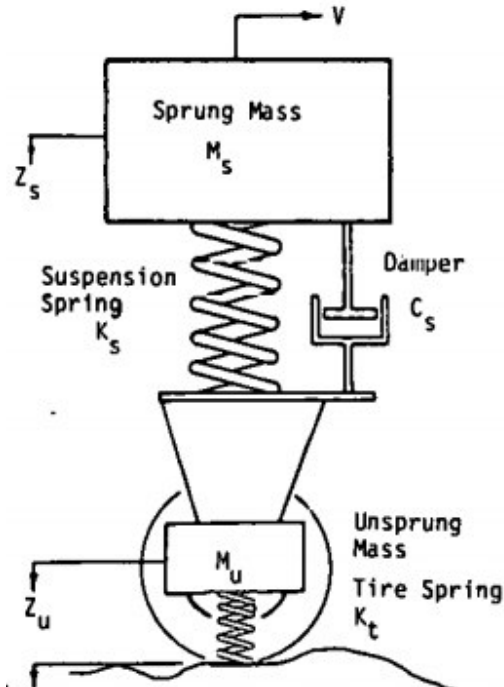


Figura 10. Representación del Quarter - Car Model.
Fuente: NCHRP

Al avanzar, pues, el modelo por una carretera a una velocidad constante de 80 km/h e ir siguiendo sus irregularidades, las masas se mueven verticalmente, y para una combinación estándar de valores de las constantes de los muelles, masas y amortiguador (dados por tablas), el movimiento vertical relativo acumulado de la masa superior (que simula el asiento del conductor), al recorrer el modelo una longitud determinada de carretera, es lo que se conoce como IRI.

Por lo tanto, hemos llegado a la conclusión de que el IRI no es más que el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del conductor del vehículo a lo largo de una distancia dada.

Un tramo carretero con alto IRI se debe principalmente a dos causas: la primera, al procedimiento constructivo, y la segunda al daño producido a la carretera misma por el tránsito vehicular.



En ocasiones, dichas irregularidades son una combinación de ambas; así, por ejemplo, las diferentes capas que constituyen un pavimento suelen presentar afectaciones debidas a asentamientos o acomodos de los materiales que las constituyen, y son función de las cargas que circulan sobre el pavimento. También pueden tener su origen en un deficiente proceso constructivo. (Orozco y Orozco, y otros, 2004).

Es importante mencionar que el rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km, donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente, los cuales sí influyen. (Arriaga Patiño, Garnica Anguas, & Rico Rodríguez, 1998).

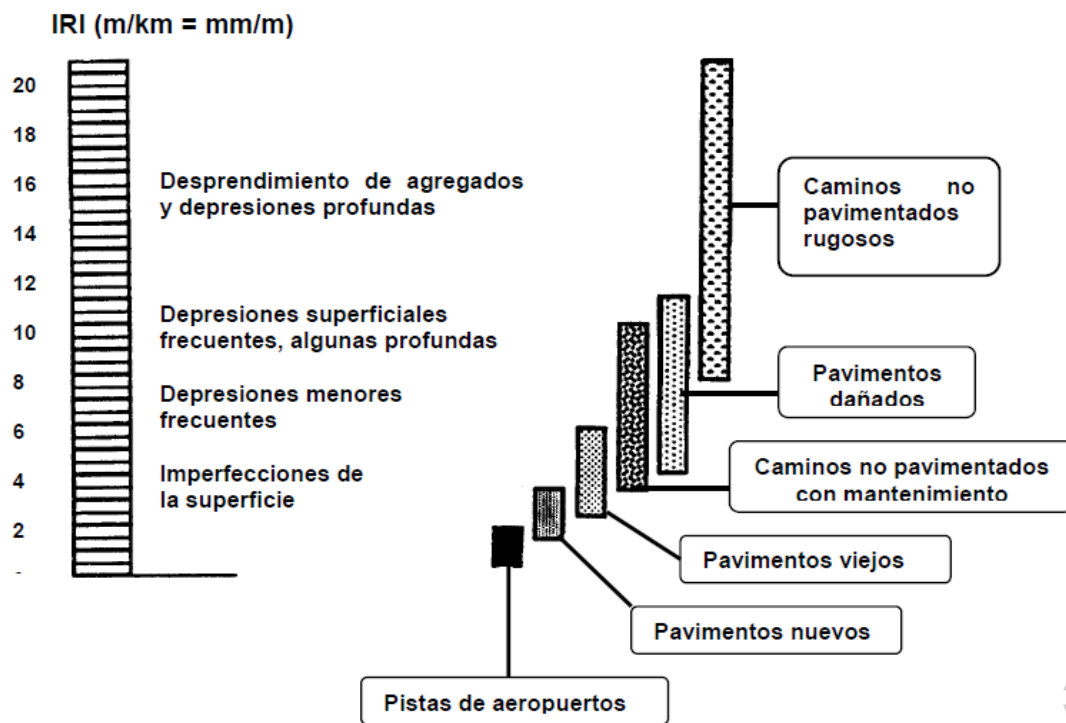


Figura 11. Escala de valores del IRI y características de los pavimentos.

Fuente: Índice Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de México.



A manera de comparativa, en los Estados Unidos, la Federal Highway Administration ha reportado que los rangos típicos del IRI evaluados en diferentes tramos de carreteras están entre 0.8 a 4.7 m/Km. Los tramos de pavimentos con valores menores de 2.4 m/km. (150 in/mi) son considerados como superficies en buen estado y confortables, mientras que los valores de 4.7 m/Km o más, son considerados como rugosos y no confortables. (National Research Council, 1994).

En México la SCT ha establecido un valor de aceptación del IRI aplicable a la etapa de auscultación de pavimentos, el cual debe ser menor de 2.5 m/km. Cuando los pavimentos tienen valores de IRI por arriba de este valor, se considera que requieren alguna acción de conservación para mejorar este indicador.

9.2.1. Equipos para medición del IRI.

Como es de esperarse, a lo largo de la historia se han utilizado varios equipos para la medición de dicho índice, los cuales, hoy en día resultan ser obsoletos para la medición, por esa razón, no se abordarán a esos equipos y directamente se enunciarán los equipos que hoy por hoy son de los más usados y eficientes, en capítulos posteriores se realiza especial énfasis en el equipo con el que se recabaron los datos de la autopista de la cual se realizó la auscultación.

Actualmente, se utilizan equipos tales como el perfilógrafo longitudinal, ya sea de la magnitud de 3 o 7 m y que, mediante un sistema gráfico o computarizado, determina la magnitud de las irregularidades en el punto medio del perfilógrafo, respecto a los dos extremos. También se utilizan otros, como el analizador dinámico del perfil longitudinal (APL, equipo francés), el analizador de la regularidad superficial (ARS, equipo español) y el Mays Ride Meter (equipo



americano), que se usa actualmente en el país, así como el Analizador Automático de Caminos (ARAN). Todos ellos se caracterizan por desplazarse a velocidades de operación de los demás vehículos en las carreteras, no interfiriendo con el flujo vehicular; las velocidades de operación van desde los 20 hasta los 80 km/h. Algunos tienen la característica de ser equipos “Multifunción” lo que permite medir otros índices al mismo tiempo.

9.3. Profundidad de rodera.

Las roderas son los surcos o huellas que se presentan en la superficie de una carretera pavimentada y que son el resultado de la densificación o movimiento lateral de los materiales que la constituyen por efectos del tránsito. En el sentido estricto, es la deformación vertical permanente del pavimento que se refleja en el perfil transversal y que se presenta como un surco longitudinal a lo largo del camino bajo las huellas de rodamiento. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016).

Las roderas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento. (Padilla Rodríguez).

La profundidad de rodera es definida como la distancia máxima respecto a la superficie plana del pavimento de la profundidad máxima perpendicular del surco generado por las deformaciones del pavimento en una ubicación específica. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016).



La presencia de roderas en un pavimento afecta no sólo la condición estructural y superficial del pavimento, sino que también, en niveles extremos, afecta su condición funcional dificultando las condiciones de manejo y la seguridad de los usuarios, debido a que las roderas, al ser una depresión en el pavimento, favorece la acumulación de agua en la superficie del camino pudiendo causar el fenómeno de hidroplaneo (aquaplaning) en condiciones de circulación bajo lluvia, lo que compromete la seguridad de los usuarios ya que con éste fenómeno se pierde la fricción que hay entre la llanta y el pavimento.

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente, porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de roderas: roderas por fallas en la subrasante y roderas por fallas en la capa de asfalto. (Padilla Rodríguez).

Las deformaciones permanentes se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento.

Las roderas por fallas en la subrasante son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí.

También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.



Las roderas por falla en la capa de asfalto se producen debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas, podría entenderse como una mezcla asfáltica débil, la cual va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.

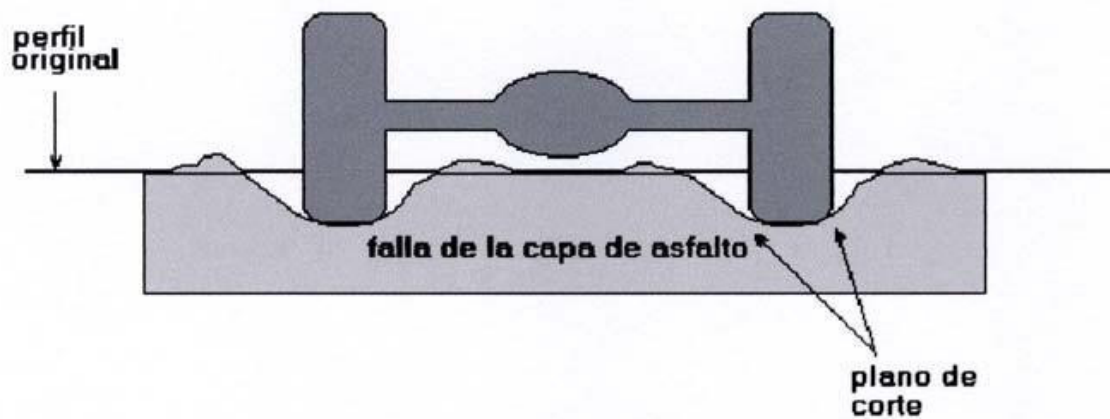


Figura 12. Roderas por falla de la subrasante.
Fuente: Padilla Rodríguez.

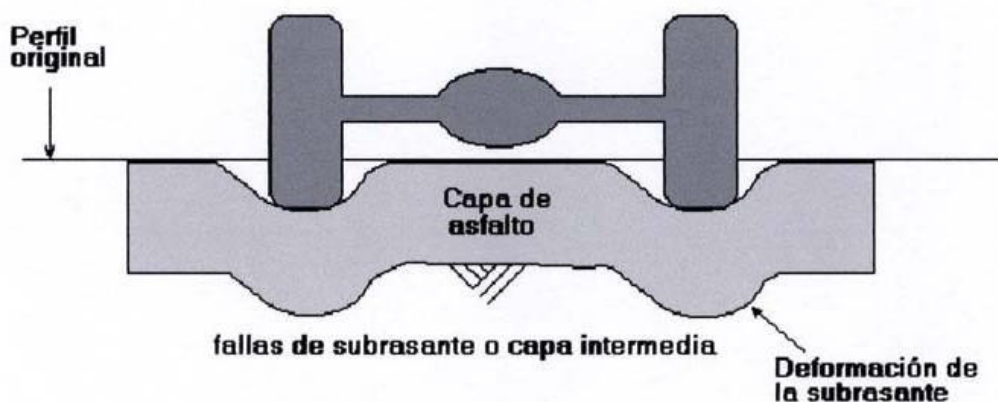


Figura 13. Roderas por falla asfalto.
Fuente: Padilla Rodríguez.



Las roderas son causadas básicamente por flujo plástico, a mayor profundidad, existe una mayor resistencia al flujo plástico y también a mayor profundidad se reducen los niveles de tensión. La deformación plástica en una capa de pavimento, puede verse incrementada en la medida en que dicha capa es de menor espesor.

9.3.1. Equipos para medición de roderas.

Existen diversos equipos para la evaluación de la Profundidad de Roderas, los cuales han sido sufriendo cambios significativos a lo largo del tiempo, y los cuales se clasifican en función del tipo y precisión de las mediciones efectuadas. Según (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016) los equipos se clasificarán de acuerdo con las categorías que se describen a continuación.

9.3.1.1. Equipos de bajo rendimiento.

Son dispositivos que se caracterizan por llevar a cabo las mediciones por métodos puntuales, es decir haciendo la medición sobre la sección específica que se quiera evaluar. En el caso de la medición de la Profundidad de Roderas, los equipos de bajo rendimiento se consideran siempre como dispositivos de referencia. Esto es, equipos que se operan manualmente y que tienen como propósito principal la validación de otros métodos para la medición de la Profundidad de Roderas mediante la determinación de niveles de referencia en un número limitado de sitios de prueba. De este modo, permiten la calibración de los equipos de alto rendimiento. Solo se considerará como equipo de bajo rendimiento aquél que utiliza la regla y la regla graduada.



9.3.1.2. Equipos de alto rendimiento.

Los equipos de alto rendimiento han sido diseñados para realizar mediciones a velocidades comparables con la velocidad de operación de las carreteras. Su principal objetivo consiste en determinar la Profundidad de Roderas de los pavimentos a nivel de red, con la ventaja adicional de que minimizan las afectaciones al tránsito. Los equipos de alto rendimiento son:

Equipo Óptico Láser. Estos equipos funcionan con un sistema de escaneo láser dual que van montado en los costados de un vehículo para determinar una serie de perfiles transversales de la superficie de rodadura de un pavimento. Utilizan dos dispositivos sincronizados para medir el perfil transversal en la parte posterior del vehículo, en una franja de aproximadamente cuatro (4) metros de ancho, pudiendo configurarse la distancia a la cual se obtendrá cada perfil transversal, o usar la máxima capacidad de obtención de datos que dependerá de la velocidad de recorrido y de la frecuencia de muestreo. Estos equipos incluyen sensores de aceleración, desplazamiento y distancia recorrida, que sirven para referenciar linealmente cada medición u obtener también la pendiente transversal del tramo medido.

El Perfilómetro de Alto Rendimiento. Este dispositivo cuenta con emisores láser tipo barrido o escáner por medición de fase para determinar el perfil transversal de un pavimento. El dispositivo emite un láser sobre un espejo poligonal giratorio de seis caras haciendo que cada rayo emitido alcance la superficie del pavimento para así medir el perfil transversal, dada la velocidad de giro del espejo se pueden emitir aproximadamente mil puntos sobre la superficie y tener una alta densidad de elevaciones medidas.



9.4. Textura del pavimento

Según (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017), la textura del pavimento se refiere a las irregularidades de la superficie de un pavimento con respecto a una superficie plana con longitudes de onda menores a 500 milímetros. Dentro de este rango, la textura del pavimento se divide en:

- **Microtextura:** Corresponde a la textura superficial propia de la superficie de los agregados pétreos, las cuales pueden presentar características de tipo áspero o pulido. La microtextura es un factor determinante de la fricción de los pavimentos.
- **Macrotextura:** Se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. En este caso, las propiedades de la macrotextura serán dadas por el tipo de mezcla que existe en la superficie.
- **Megatextura:** Corresponde a irregularidades de tipo medio, relacionadas con la construcción y también a diversos tipos de fallas, degradaciones o reparaciones. Este tipo de irregularidades aumenta la resistencia al rodamiento y el nivel de ruido con frecuencias bajas.

La fricción o resistencia al deslizamiento en los pavimentos es la fuerza que se opone al movimiento relativo instantáneo entre las llantas de un vehículo y la superficie del pavimento. Esta fuerza, depende primordialmente de la microtextura.

La microtextura proporciona la adhesión necesaria entre los neumáticos y la superficie a través de las asperezas de las partículas individuales del agregado pétreo.



En condiciones húmedas la microtextura domina la fricción a bajas velocidades ya que penetra la capa delgada de agua que se forma entre la superficie y el neumático y entra en contacto con éste, sin embargo, cuando los vehículos circulan a velocidades altas, la macrotextura adquiere un papel esencial ya que proporciona los mecanismos para desalojar el agua de la superficie y evitar que se pierda el contacto entre la microtextura y el neumático, pérdida que se conoce como hidroplaneo.

No obstante, aún a velocidades altas, la microtextura permanece como el factor más importante de la fricción, ya que una microtextura inadecuada siempre se traducirá en una fricción deficiente, independientemente del nivel de macrotextura existente.

9.5. Coeficiente de fricción

La fricción se identifica a través de un coeficiente adimensional denominado coeficiente de fricción, que se define como la fuerza tangencial que se desarrolla entre la banda de rodadura del neumático y la superficie del pavimento. Esta fuerza se mide en relación con la carga vertical debida al peso del vehículo. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017).

El coeficiente de fricción se determina de manera indirecta, empleando equipos con uno o más neumáticos de prueba o con un mecanismo deslizante. Dependiendo de la dirección en la que se lleve a cabo la medición, se puede determinar un coeficiente de fricción longitudinal o uno transversal. El primero, se utiliza para determinar la fricción del pavimento en la dirección principal del tránsito, mientras que el coeficiente transversal permite evaluar los efectos debidos a los cambios de dirección del vehículo, como los inducidos por el alineamiento horizontal de la carretera.



Otra variable fundamental vinculada a la fricción es la velocidad de deslizamiento, la cual se define como la velocidad de la banda de rodadura del neumático relativa a la superficie del pavimento.

Esta velocidad da lugar al concepto de relación de deslizamiento, que se obtiene dividiendo la velocidad de deslizamiento entre la velocidad del vehículo (expresada en porcentaje). Una rueda que gira libremente tiene una velocidad y una relación de deslizamiento de cero, mientras que una rueda totalmente bloqueada tiene una velocidad de deslizamiento igual a la velocidad del vehículo, y una relación de deslizamiento igual a la unidad.

El máximo valor de la fricción se presenta normalmente cuando la relación de deslizamiento alcanza valores entre 10 y 20%.

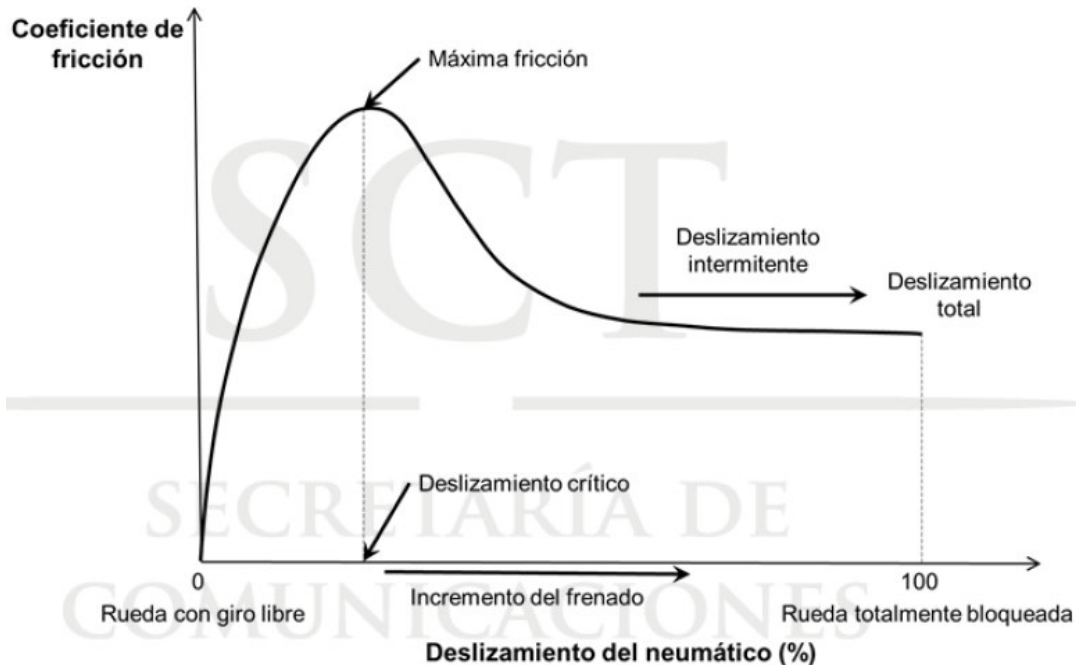


Figura 14. Comportamiento del coeficiente de fricción con respecto al deslizamiento del neumático.

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017)



La velocidad y la relación de deslizamiento son útiles para representar las distintas condiciones de frenado a las que puede estar sujeto un vehículo, como las que se presentan cuando el vehículo está equipado con frenos antibloqueo (ruedas parcialmente bloqueadas), cuando no dispone de estos dispositivos (ruedas totalmente bloqueadas) o cuando, durante el frenado, se presenta una componente transversal de la velocidad, como sucede al circular sobre curvas.

En lo que respecta a la fricción o resistencia al deslizamiento del pavimento, se considera la condición más desfavorable aquella en la que el pavimento se encuentra mojado. Su medida y estudio es fundamental, sobre todo en caminos de elevada intensidad de tránsito. (Orozco y Orozco, y otros, 2004)

La fricción se determina en forma indirecta midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una llanta especial. También se puede considerar de forma indirecta, al medir la textura del pavimento.

El valor del coeficiente de fricción para pavimento mojado depende de una serie de factores; algunos inherentes a la carretera, como el estado de la superficie de rodamiento, drenaje, etc.; mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de las llantas), o de la naturaleza (lluvia, nieve, hielo sobre la carpeta, etc.).

El coeficiente de fricción está en función de la velocidad y cantidad de agua que exista sobre el pavimento, además del tipo y del estado de la carpeta.



Al igual que otras características superficiales, los valores del coeficiente de fricción de un pavimento evolucionan con el tiempo, como consecuencia del pulido de la superficie por la acción repetida de las llantas de los vehículos.

Esta acción será más o menos intensa dependiendo del tipo de agregado utilizado. Así, por ejemplo, para agregados calizos el problema cobra indiscutible importancia, lo que quizá no sea tan marcado cuando se utilizan agregados de origen volcánico. Por tanto, es necesario determinar periódicamente de manera indirecta la resistencia al deslizamiento mediante equipos que determinen el coeficiente de fricción.

Entre las acciones más comunes a recomendar para mejorar la fricción, se incluyen:

Para el caso de carreteras de la red federal, la aplicación de un tratamiento superficial mediante carpeta de un riego, con material pétreo y emulsión de liga. Para el caso de autopistas, se sugiere una microcarpeta.

Para el caso de autopistas con pavimento rígido de concreto hidráulico se recomienda el ranurado longitudinal mediante una fresadora, con de 0.5 de ancho y 0.5 de profundidad, a cada centímetro para un drenaje superficial eficiente y no permitir la acumulación de láminas de agua.

9.5.1. Equipos de medición

Existen diversos equipos para la determinación del Coeficiente de Fricción (CF), los cuales se clasifican en función de la tecnología y el procedimiento de medición empleados (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017).



9.5.1.1. *Equipo de bajo rendimiento*

Comprenden dispositivos con los que las mediciones se llevan a cabo en forma estática o estacionaria, y que producen un valor puntual del CF. Dentro de esta categoría únicamente se considera el equipo conocido como Péndulo Británico.

La operación de este dispositivo se basa en la liberación del brazo del péndulo desde una altura definida, de modo que una zapata de hule colocada en el extremo inferior del péndulo se deslice una cierta distancia sobre la superficie de prueba. Cuando se libera el brazo, su energía potencial se convierte gradualmente en energía cinética, la cual alcanza su máximo cuando la zapata toca la superficie. Conforme la zapata se desliza, la energía cinética del brazo se reduce en proporción al nivel fricción existente y, una vez que la zapata pierde contacto con la superficie, la energía cinética remanente se almacena progresivamente como energía potencial, permitiendo al brazo elevarse hasta alcanzar una determinada altura. La diferencia entre la altura original del brazo y la que alcanza al concluir la prueba es una medida de la energía cinética perdida y, por lo tanto, es también una medida de la fricción del pavimento.

9.5.1.2. *Equipo de alto rendimiento*

Reciben esta denominación porque permiten realizar las mediciones en forma dinámica, a velocidades comparables con la velocidad de operación de las carreteras y tienen la ventaja adicional de que minimizan las afectaciones al tránsito.

En lo que concierne al CF, existen tres grupos de equipos de alto rendimiento: de rueda oblicua, de rueda parcialmente bloqueada y de rueda bloqueada. Los equipos de rueda



parcialmente bloqueada se clasifican, a su vez, en equipos con relación de deslizamiento fija y equipos con relación de deslizamiento variable.

Todos los equipos de alto rendimiento cuentan con un sistema de aspersión para la formación de una película de agua sobre la superficie de rodadura, el cual se abastecerá a intervalos regulares dependiendo de la capacidad del equipo para almacenar el líquido.

9.5.1.3. Equipos de rueda oblicua

Los equipos de rueda oblicua miden la fricción lateral o fuerza de viraje perpendicular a la dirección del desplazamiento. Para ello utilizan una o dos ruedas de ensayo, cuyo plano vertical está orientado según un ángulo denominado ángulo de esviaje. Las ruedas giran libremente, y van instaladas en un vehículo que normalmente circula a una velocidad de setenta y cinco (65) kilómetros por hora. Durante la medición, se registra la fuerza lateral, la carga de los neumáticos, la distancia recorrida y la velocidad del vehículo. De manera general, los datos se recopilan a intervalos de veinticinco a ciento veinticinco (25 a 125) milímetros, y se agregan con un espaciamiento de un (1) metro.

Entre los equipos de rueda oblicua más comunes figura el Mu Meter, el cual utiliza dos ruedas orientadas hacia los extremos del carril con un ángulo de esviaje de siete punto cinco (7.5) grados.

9.5.1.4. Equipos de rueda parcialmente bloqueada.

Los equipos de rueda parcialmente bloqueada miden la fricción de una rueda sujeta a determinados niveles de la relación de deslizamiento, la cual puede ser fija o variable.



Cuando la relación de deslizamiento es fija, usualmente se ubica en niveles de diez (10) a veinte (20) por ciento, lo cual se logra inhibiendo la rotación del neumático mediante un mecanismo de cadena o banda, o de un sistema de frenado hidráulico. La carga aplicada sobre la rueda y la resistencia al deslizamiento se obtienen empleando transductores de fuerza o dispositivos para la medición de la presión y el torque. Tanto la velocidad de operación del vehículo de prueba como los parámetros de adquisición de datos son similares a los indicados para los equipos de rueda oblicua.

Un ejemplo de los equipos con rueda parcialmente bloqueada y relación de deslizamiento fija es el Griptester.

Los equipos con relación de deslizamiento variable determinan la fricción como una función del nivel de bloqueo aplicado, de cero (0) a cien (100) por ciento. Al inicio de la prueba la rueda se deja girar libremente y, conforme avanza el proceso de medición, la velocidad de rotación se va reduciendo gradualmente, al tiempo que se registran la distancia recorrida, la velocidad angular del neumático, la carga aplicada a la rueda y la resistencia al deslizamiento. Para la adquisición de datos, se utilizan intervalos de dos punto cinco (2.5) milímetros o menores.

Un ejemplo de los equipos con rueda parcialmente bloqueada y relación de desplazamiento variable es el denominado Norsemeter.

La operación de estos equipos se basa en una rueda de ensayo con un sistema de frenado que la bloquea completamente durante el proceso de medición. La rueda va montada en un remolque que es arrastrado por el vehículo de medición a una velocidad que normalmente se fija



en setenta y cinco (65) kilómetros por hora. Se mide la fuerza de arrastre de uno (1) a tres (3) segundos después de que la rueda se ha bloqueado completamente, registrando el promedio de las mediciones, las cuales pueden repetirse una vez que la rueda vuelve a girar libremente.

El equipo Pavement Friction Tester (Equipo de ensayo de la fricción del pavimento) constituye un ejemplo de los equipos de rueda bloqueada.

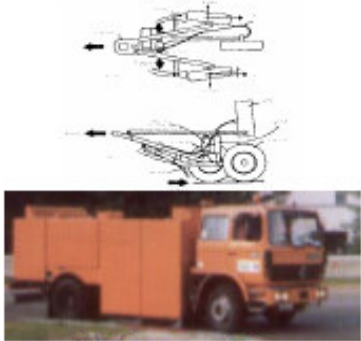



Para Fricción	Descripción	Ejemplos:
<ul style="list-style-type: none"> Con ruedas oblicuas, en inglés se usa el término <i>Side Force</i>. 	<p>La rueda se mantiene formando un ángulo respecto al sentido del movimiento, sin aplicar ninguna otra condición de frenado. Se mide el esfuerzo lateral, perpendicular al plano de rotación.</p>	 <p>Nombres comerciales : Mu-Meter / SCRIM</p>
<ul style="list-style-type: none"> Con una rueda parcialmente bloqueada, en inglés se usa el término <i>Fixed Slip</i> 	<p>Deslizamiento fijo. La rueda gira parcialmente bloqueada en la dirección de la trayectoria del vehículo.</p>	 <p>Nombre comercial : Griptester</p>
	<p>Deslizamiento variable.</p>	 <p>Nombre comercial : Norsemeter</p>
<ul style="list-style-type: none"> Con una rueda bloqueada, en inglés se usa el término <i>Locked Wheel</i> 	<p>La velocidad relativa entre el neumático y el pavimento es igual a la del vehículo. El bloqueo es del 100% y mide la fricción máxima.</p>	 <p>Nombre comercial : Surface Friction Tester</p>

Figura 15. Clasificación de los equipos según la medición del coeficiente de fricción.

Fuente: (López Valdés & Garnica Anguas, 2002).



9.6. Deflexiones

En cuanto a deflectometría en pavimentos, es importante su comprensión y análisis ya que proporciona una medida de la evaluación de la capacidad estructural de dicho pavimento.

La deflexión es el valor del desplazamiento en la superficie del pavimento al aplicarle una carga. (Artigas Contreras).

Según (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017), la Deflexión es la medida de deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga. Es función tanto del tipo y estado del pavimento como del método y equipo de medición, así como de la temperatura y humedad presentes en el pavimento. Su medición se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

Capacidad estructural queda definida como la facultad que tiene el pavimento para soportar las cargas de tránsito que pasan por él durante el periodo de vida de diseño establecido.

La evaluación de la capacidad estructural en pavimentos se realiza utilizando predominantemente métodos no destructivos, los cuales consisten en aplicar una carga bajo condiciones dinámicas, estáticas, por impacto, etc., cuyos resultados ayudan a determinar en cada estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la solicitud o carga inducida, y así poder definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares.

A nivel mundial se cuenta con una gran cantidad de equipos para determinar deflexiones en campo, sin embargo, los de mayor uso son los deflectómetros de impacto. Estos equipos aplican una carga al pavimento por medio de un impacto y determinan una cuenca de



deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento. Dicho arreglo se establece en función del tipo de pavimento que se intenta evaluar y del fin que se persiga con la evaluación.

Es importante destacar que, así como hay diversos equipos para medir deflexiones, es aún mayor el número de procedimientos para el análisis y procesamiento de los datos provenientes de tales equipos. Dichos programas realizan sus cálculos mediante herramientas matemáticas diversas, y consideraciones en los modelos que utilizan igualmente variados, lo cual podría llegar a interpretarse como un problema para una revisión con un método o software diferente al cual se realizó la medición.

La medición de las deflexiones se utiliza ampliamente para conocer la capacidad estructural de los pavimentos en campo, y dentro de la tecnología de pavimentos, particularmente en la evaluación estructural de los mismos, existen diversas metodologías y equipos para tales propósitos. (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004).

La literatura especializada en pavimentos proporciona información acerca de la medición de deflexiones en pavimentos localizadas directamente en el punto de aplicación de la carga o alejadas de él, a partir de una carga estática conocida, de una vibratoria o de una por impulso. Las deflexiones se miden con transductores que determinan el movimiento vertical de la superficie de un pavimento ante un impacto. Actualmente, existen diversos procedimientos para la medición de deflexiones en pavimentos de concreto asfáltico, en concreto hidráulico, e incluso en una combinación de ellos.



Los ensayos realizados que por su naturaleza no causan daños a la estructura del pavimento se denominan no destructivos NDT (Non Destructive Test), y pueden aplicarse éste tipo de pruebas a pavimentos nuevos y en operación.

Dichos ensayos de deflexiones proporcionan información que se utiliza para la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de estas deflexiones pueden emplearse a su vez en las siguientes características de los pavimentos.

- Módulo de elasticidad de cada capa.
- Rigidez combinada de los sistemas de pavimentos.
- Eficiencia en la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de concreto hidráulico.
- Módulos de reacción de la subrasante.
- Espesor efectivo, número estructural o valor de soporte del suelo.
- Capacidad de carga o capacidad estructural del pavimento.
- Análisis y diseño de rehabilitación estructural.
- Vida remanente.
- Espesores de refuerzo.
- Módulos de elasticidad estacionales.
- Niveles de esfuerzo.
- Control de calidad.

Dichos parámetros pueden utilizarse en el análisis y diseño de la rehabilitación y reconstrucción de pavimentos rígidos y flexibles; valoración de la capacidad estructural, incluyendo la eficiencia de las juntas en pavimentos de concreto hidráulico; detección de



oquedades en pavimentos de concreto hidráulico; y/o para fines de inventario estructural de la red. (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004).

Por otro lado, es necesario tomar en cuenta los factores que en mayor medida influyen a los resultados obtenidos y la manera en que se deben considerar, varios autores, coinciden en que los factores que afectan son los enunciados en la siguiente lista, y deben ser considerados cuidadosamente cuando se realizan ensayos no destructivos. (Artigas Contreras), (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017), (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004).

- Temperatura.
- Humedad.
- Condiciones del pavimento/rigidez y espesor del pavimento.
- Soporte del suelo de cimentación.
- Esfuerzo o carga aplicada.

A continuación, se harán algunos comentarios al respecto.

Temperatura

Los materiales para pavimentos son susceptibles a los cambios térmicos, éste comportamiento provocaría que, dependiendo de la temperatura del pavimento, para iguales condiciones de carga, se tendrán diferentes valores de deflexión.

El factor temperatura es una de las condiciones climáticas que afectan considerablemente la magnitud medida en campo de las deflexiones. Como ya se sabe, el comportamiento del



asfalto es variable y dependiente de la temperatura, las altas temperaturas producen el reblandecimiento de la carpeta asfáltica e incrementan las deflexiones, comportamiento contrario a bajas temperaturas.

En el caso de pavimentos de concreto hidráulico, la temperatura en forma de cambios globales del gradiente térmico representa una influencia muy importante en las deflexiones medidas cerca de las juntas o grietas. Las temperaturas altas provocan expansión en las losas, y por ende un acercamiento entre ellas; así, se incrementa la eficiencia de la transferencia de carga, y por consiguiente las deflexiones son menores. (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004).

El alabeo de las losas, debido a los gradientes de temperatura suele causar variaciones importantes en las deflexiones medidas, especialmente si se evalúan en la noche o en la mañana, cuando la cara superior de la losa está más fría que la inferior, ya que generarán deflexiones mayores en las esquinas y en las orillas que las que se realizan por la tarde, cuando la cara superior de la losa está mucho más caliente que la inferior.

La época del año ejerce una influencia muy significativa en las mediciones de la magnitud de las deflexiones. En regiones frías se pueden diferenciar cuatro periodos diferentes, que según (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004) son los que se mencionan e influyen de la manera descrita:

El de congelamiento, que se presenta en invierno, provoca que el pavimento esté más rígido.



El de primavera, o sea, cuando se presenta el deshielo y existe agua libre en la estructura del pavimento, lo cual incrementa considerablemente la magnitud de las deflexiones medidas.

El periodo de incremento rápido de la rigidez se presenta a principios de verano, cuando el exceso de agua libre disminuye en la estructura del pavimento y la deflexión se ve disminuida de manera considerable. Por su parte, el de rigidización continúa, aunque más lentamente.

Por último, a finales de verano y la época de otoño, los niveles de las deflexiones se reducen en función del decremento del agua libre en la estructura del pavimento.

En regiones que no experimentan congelamiento ni deshielo, como lo es el caso de la zona centro del país, las deflexiones generalmente presentan una curva senoidal, correspondiendo la máxima deflexión en la época de lluvias, donde el contenido de agua libre es mayor en la estructura del pavimento. En regiones secas, el periodo de deflexión máxima puede ser en el verano, cuando la superficie del asfalto se reblandece debido a la intensa radiación solar.

Para comparar e interpretar las mediciones de la deflexión deben considerarse tanto la hora del día como la época del año en que se realizan. Generalmente, las deflexiones se correlacionan con una temperatura estándar, por ejemplo, 21 °C para un periodo de condiciones críticas, basado en procedimientos desarrollados localmente.

En el caso de los pavimentos flexibles se han desarrollado métodos para corregir la deflexión máxima, los cuales se definen como normalización de deflexiones. Éstos se utilizan para transformar el valor de deflexión obtenido en determinadas condiciones de carga y temperatura a un valor normalizado.



Generalmente, la temperatura que se toma como referencia es 21°C y el ajuste se realiza multiplicando la deflexión medida a cualquier temperatura por un factor de corrección CT. (Cálculo mecánico de pavimentos a partir de ensayos no destructivos).

Humedad

Además de lo ya mencionado, la humedad afecta las mediciones de las deflexiones debido a su influencia en las capas inferiores del pavimento. Por lo que se recomienda realizar las mediciones en la época de estiaje.

En la publicación (Cálculo mecánico de pavimentos a partir de ensayos no destructivos), se menciona que, en los pavimentos existen dos tipos de materiales cuyo módulo de elasticidad, y por tanto su capacidad estructural, varían con el clima existente en la carretera.

Por lo tanto, capas de mezcla asfáltica presentan un comportamiento estructural mejor cuando están secas que cuando están húmedas, siendo la variación función del tipo de capa granular y de la cantidad de humedad o agua, existente.

El agua puede acceder al pavimento, o mejor dicho a sus capas inferiores, principalmente de tres formas diferentes:

- El agua procedente de las lluvias que se filtra a través del pavimento y del terreno.
- El agua que asciende por capilaridad procedente de las capas freáticas.
- El agua que accede lateralmente procedente de aguas subterráneas.

El problema se complica gravemente al no poder medir la causa directa del problema, es decir el grado de humedad de las capas granulares, al contrario de lo que pasa con la



temperatura, donde sí se puede medir la temperatura de forma rápida y directa, aunque sea la superficial. Ante ésta imposibilidad, aquí se tiene que recurrir a medir otro parámetro que nos pueda facilitar, indirectamente, la humedad del suelo.

El parámetro elegido es el agua caída en los días anteriores. Se supone que en función de dicha agua caída se puede deducir, de forma suficientemente aproximada, el grado de humedad de las capas inferiores del pavimento.

Condiciones del pavimento

Es evidente que las condiciones en que se encuentre el pavimento influyen en la magnitud de las deflexiones medidas. Para pavimentos asfálticos, las deflexiones obtenidas en áreas con agrietamientos y roderas serán mayores que las que se consigan en áreas libres de deterioros. En los de concreto hidráulico, las oquedades bajo las losas de concreto provocarán incrementos en las deflexiones; a su vez, la ausencia de deterioros de los dispositivos de transferencia de carga afectará a la deflexión medida en ambos lados de las juntas.

Las deflexiones obtenidas cerca de una alcantarilla suelen ser mucho mayores; y para secciones en corte y en balcón se presentan diferencias considerables en las deflexiones. Es importante considerar tales condiciones cuando se obtienen deflexiones en un tramo carretero, y más aún cuando se seleccionan las zonas de evaluación.

Esfuerzo y Carga



El esfuerzo aplicado por el equipo de medición no es constante para todas las mediciones. El valor de deflexión determinado es función del esfuerzo aplicado. Por lo tanto, se requiere una normalización de los valores medidos en campo a un esfuerzo base.

La magnitud y duración de la carga influye considerablemente en las deflexiones de los pavimentos. Es recomendable que el equipo que se utiliza en pruebas no destructivas sea capaz de aplicar una carga al pavimento, similar a la carga actual de diseño. Desafortunadamente, no todos los equipos comerciales que efectúan ensayos no destructivos pueden simular la carga de diseño, algunos lo hacen con la magnitud de la carga, pero no con su duración o frecuencia. Generalmente, se acepta al deflectómetro de impacto FWD (Fallig Weight Deflectometer) como el mejor equipo hasta ahora, para simular la magnitud y duración de las cargas actuales que circulan por los caminos.

Las propiedades no lineales o su sensibilidad al nivel de esfuerzos, de la mayoría de los materiales que conforman las capas de los pavimentos hacen que las deflexiones medidas sean proporcionales a las cargas aplicadas. Los resultados de prueba se tienen que extrapolar para cargas excesivas. Debido a que las extrapolaciones frecuentemente inducen errores significativos, los especialistas se inclinan por el uso de los equipos para ensayos no destructivos, dado que generan cargas similares a las que aplican los vehículos pesados.

Ubicación del ensayo.

Como un factor que puede ser fácilmente controlado, y que por eso no es considerado en la lista antes mencionada, se encuentra la localización del ensayo, se puede asegurar que la



ubicación y estado superficial del pavimento, como se menciona líneas arriba, puede producir grandes variaciones en los valores de la deflexión.

Como ya se mencionó en el apartado de “Condiciones del pavimento”, para la misma sección tipo, las deflexiones medidas en las zonas más deterioradas suelen ser más altas que las que presentan un buen estado.

Las deflexiones medidas en la rodada externa son mayores que las de la rodada interna y que las medidas entre las dos bandas de rodadura.

Resulta obvio que los cambios en la composición de la superficie de rodadura y en la estructura del pavimento afectan a las deflexiones.

9.6.1. Equipos de medición.

Los equipos más comunes para determinar la capacidad estructural de los pavimentos son, según (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004):

- Equipo discontinuo de medición. Opera con el principio de brazo de palanca simple (viga Benkelman)
- Equipo estático semicontinuo. Actúa con el principio de doble brazo de palanca (deflectógrafo Lacroix)
- Equipo dinámico de aplicación de carga. Utiliza un generador de fuerza dinámica, el cual puede ser una masa giratoria o un mecanismo actuador servohidráulicamente controlado (Dynalect, Road Rater)



- Equipo de impacto. Crea un impulso de carga sobre el pavimento, dejando caer una masa a partir de alturas variables sobre un sistema de resortes o caucho. Conocido generalmente como Fallig Weight Deflectómetro, FWD (Dynatest, Kuab, Jills)

Como se puede ver, existen diversos equipos para la determinación de las deflexiones en el pavimento, como una clasificación adicional a la ya expuesta, se puede realizar en función de la posición de medición, el tipo y número de sensores y la forma de aplicación de la carga. Para los efectos de la normatividad mexicana (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017), los equipos se agrupan según el rendimiento del proceso de medición.

9.6.1.1. Equipos de bajo rendimiento (Equipos estáticos)

Se trata de la primera generación de equipos, los cuales miden la deflexión en un punto y bajo una carga fija o en movimiento muy lento. Para su uso generalmente se necesita de un vehículo lastrado para lograr la sollicitación de la prueba.

En estos equipos, las mediciones se hacen en forma estática o estacionaria, produciendo un valor puntual de la deflexión. Dentro de esta categoría únicamente se considera el equipo conocido como Viga Benkelman.

9.6.1.2. Equipos de Alto Rendimiento

Reciben esta denominación porque permiten realizar las mediciones con un mayor rendimiento que los equipos de medición estática. En lo que se refiere a la medición de deflexiones, para efectos de la normatividad mexicana se consideran dos grupos de equipos de alto rendimiento: los equipos de medición dinámica y los equipos de impacto.



9.6.1.2.1. *Equipos de medición dinámica o vibratoria*

En los equipos de medición dinámica las cargas son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática, por lo tanto, estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el pavimento.

La frecuencia y magnitud de carga pueden ser controladas por el operador. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias preestablecidas del centro de aplicación. Existirán al menos cinco sensores con una resolución de dos micrómetros para medir satisfactoriamente.

9.6.1.2.2. *Equipos de Impacto*

Esta clase de equipos envían un impulso de carga sobre el pavimento, mediante una masa que cae desde diferentes alturas sobre un sistema de absorción de impacto hecho de hule altamente resistente. Se pueden generar diferentes cargas de impacto, variando el peso y la altura de caída. La fuerza resultante se transmite al pavimento a través de un plato circular y esta fuerza no cambia entre repeticiones de golpes en más del tres por ciento.

La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias preestablecidas del centro de aplicación. Existirán al menos siete sensores para medir satisfactoriamente la cuenca de deflexiones con una resolución de dos micrómetros.



Cuenca de deflexiones: Es la deformación elástica de la superficie de un pavimento medida a distancias variables con respecto al punto de aplicación de la carga. Las mediciones en los distintos sensores determinan la forma de la cuenca de deflexiones que puede usarse para estimar las propiedades de los materiales de una estructura de pavimento. También sirve para la identificación de secciones que son estructuralmente uniformes, así como de aquellas secciones débiles y/o deterioradas. Mediante el uso de la cuenca se puede calcular la capacidad estructural de un pavimento para prever sus necesidades de refuerzo.

Ya que el caso de estudio se realizó con deflectómetros de impacto, son a éstos equipos a los cuales se abunda en la descripción.

El Deflectómetro de Impacto (FWD) es un equipo que aplica una carga de impacto a la superficie del pavimento, determinando los desplazamientos verticales (cuenca de deflexiones) producidas en él. Se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. Puede ser utilizado en pavimentos de asfalto, concreto o una composición de ambos, o bien, sobre cualquier capa de un pavimento en construcción.

El pulso de carga generado permite simular con buena aproximación el efecto del paso de una carga vehicular sobre el pavimento.

A través del análisis de este cuenco se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y su suelo de cimentación, así como el módulo resiliente, siendo estos parámetros muy importantes para definir la condición de la estructura a lo largo de un proyecto. Lo anterior es fundamental para evaluar actividades relacionadas con la rehabilitación y control de calidad.



La característica principal de la deflectometría de impacto es la realización de un ensayo no destructivo, rápido y económico, que permite evaluar in situ, entre otros índices, la capacidad estructural del pavimento existente.

Además, presenta una gran ventaja la velocidad de los ensayos, ya que, en condiciones normales, el equipo puede recabar aproximadamente 150 puntos de ensayos por día, tomando en cuenta que depende de los tiempos de traslado, la densidad del tránsito y sin considerar fallas eventuales del equipo.

El tiempo estándar que toma hacer una medición con 2 impactos de 50 kN es aproximadamente de 35 segundos.

Como afirma (Artigas Contreras), existen 3 tipos de ensayo con el equipo FWD, los cuales son:

1. Ensayo base. Sirve para evaluar la capacidad estructural del pavimento, también puede ser utilizado para evaluar base y subrasante.
2. Ensayo de junta. Utilizada para evaluar la capacidad de transferencia de carga en las juntas de pavimentos hidráulicos, así como para evaluar si existen huecos debajo de la superficie de rodamiento.
3. Ensayo de esquina. Tiene por objeto evaluar la condición estructural de las esquinas de una losa en un pavimento hidráulico, ya que estas zonas es la que más solicitaciones a tensión presenta.

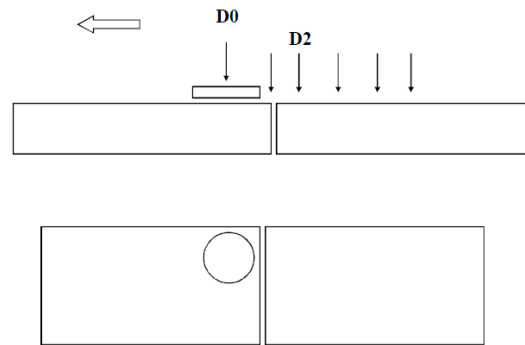


Figura 16. Ejemplo de posicionamiento de plato de carga y sensores para ensayo de deflexiones.
Fuente: (Artigas Contreras).

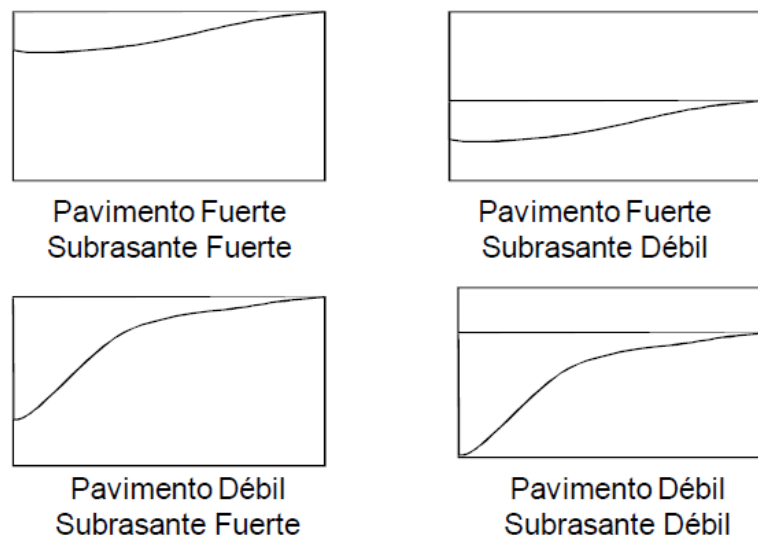


Figura 17. Estructuras de pavimento típicas con base en el cuenco de deflexiones medido.
Fuente: (Artigas Contreras).

9.6.2. Características de los deflectómetros de impacto.

Según (Pérez Salazar, Garnica Anguas, Gómez López, & Martínez Peña, 2004), las principales características son:

9.6.2.1. Sistema de instrumentación

Durante su operación debe soportar temperaturas de entre -10 y 50 °C; tolerar humedad relativamente alta, lluvia o niebla; y otras condiciones adversas tales como polvo, golpes, o



vibraciones que se pueden presentar normalmente en campo. Los instrumentos no deben estar expuestos a los elementos (dentro del vehículo) y deben ser capaces de operar en un rango de temperatura de entre 5 y 40 °C.

9.6.2.2. *Dispositivo generador de impacto*

El dispositivo generador de impacto debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía. El dispositivo generador de impacto tiene que ser capaz de levantar una o varias masas predeterminadas, y soltarlas en caída libre. La onda generada por el impacto de la masa, y transmitida al pavimento. La onda debe tener aproximadamente la forma haversine y aplicarse con una amplitud de pico a pico de 50 kN. La duración del impulso de fuerza habrá de permanecer entre 20 y 60 ms, o un tiempo de incremento de la carga de 0 a 30 ms. Es importante que el sistema de guía presente una fricción despreciable y diseñada de tal manera que las masas caigan perpendiculares a la superficie del pavimento.

9.6.2.3. *Placa de carga*

La placa de carga debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. Los diámetros más comunes de las placas son de 300 y 450 mm de diámetro para realizar mediciones sobre autopistas y aeropistas, respectivamente. La placa será capaz de permitir mediciones de deflexión en los pavimentos, al centro de la placa.

9.6.2.4. *Transductor de deflexión*

Debe ser capaz de medir el desplazamiento vertical máximo, y estar montado de tal manera que minimice la rotación angular con respecto a su plano de medición en el movimiento



máximo esperado. El número y espaciamiento de los sensores es opcional, y dependerá de los propósitos de la prueba y de las características de cada capa del pavimento. El espaciamiento adecuado entre sensores es de 300 mm. Los sensores pueden ser de varios tipos: transductores de desplazamiento, de velocidad, o de aceleración (acelerómetros).

Antes de utilizar el deflectómetro de impacto es necesario realizar la calibración de los diferentes transductores que forman parte del equipo de medición.

Para finalizar el tema de deflectometría en pavimentos, es pertinente hacer un resumen acerca de los temas tratados.

La medición de las deflexiones se utiliza ampliamente para evaluar la capacidad estructural de los pavimentos en campo y dentro de la tecnología en pavimentos.

Los ensayos no destructivos de deflexiones proporcionan información acerca de la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de dichas deflexiones también son aplicables para determinar características de pavimentos tales como el módulo de elasticidad de cada capa; rigidez combinada de los sistemas de pavimentos; eficiencia en la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de concreto hidráulico; módulos de reacción de la subrasante; espesor efectivo; número estructural, o valor de soporte del suelo; capacidad de carga, o capacidad de soporte del pavimento, entre otros.

Se destacan varios de los factores que afectan los resultados de las pruebas no destructivas en la determinación de deflexiones, las cuales deben tomarse en cuenta para eliminar o minimizar su efecto, o bien considerarlos en la interpretación de los resultados. Dichos factores son entre otros, la magnitud y duración de la carga; las propiedades no lineales de los materiales



que conforman los pavimentos; la temperatura y humedad; condición en la que se encuentre el pavimento. Uno de los factores que afectan en gran medida, la magnitud de las deflexiones medidas es la temperatura. Por otro lado, es indispensable considerar los cambios estacionales en el comportamiento de los pavimentos, particularmente en su cambio de rigidez; lo anterior enfatizando las variaciones de humedad en las capas del pavimento, sobre todo en las subrasantes con materiales finos.

10. Descripción de los equipos utilizados en la medición del caso de estudio.

Es importante mencionar que los equipos utilizados son equipos “multifunción” por lo que un equipo es capaz de realizar mediciones de IRI, Profundidad de Rodera y Levantamiento de deterioro superficial en un mismo viaje de medición, sin embargo, para efectos explicativos, se realizará la distinción de cada parámetro y cada equipo.

10.1. Equipo para medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

El Analizador Automático de Caminos, Automatic Road Analyzer (ARAN) es un equipo multifunción, y uno de los principales parámetros que mide directamente es el Índice Internacional de Regularidad.

Por sus características, el ARAN no requiere de dispositivos de seguridad especiales como vehículos escolta, bandereros, etc. Puesto que la unidad cuenta con luces estroboscópicas color ámbar y señales reflejantes fijadas en la puerta trasera, las cuales informan a los usuarios del camino del trabajo en proceso.



Dentro del equipamiento del ARAN se encuentra un sistema de medición de distancias, sistema de medición de rugosidad y ahuellamiento, registro de coordenadas GPS, sistema de reporte fotográfico del tramo evaluado entre otros.

El sistema de medición de distancias (DMI) le permite referenciar todas las mediciones realizadas con respecto a un punto fijo, dicho sistema registra cierto número de pulsos por cada vuelta que gira la rueda del vehículo, con una precisión de aproximadamente 0.02%.

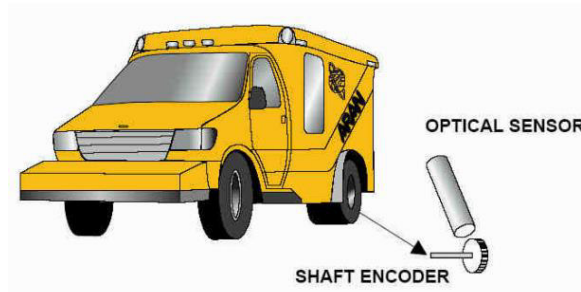


Figura 18. Localización típica del DMI.

Fuente: (Societa Italiana Progetto Manutenzione. Siproma Argentina S.A. de C.V.).

Con el fin de enlazar la información obtenida de las mediciones y las respectivas coordenadas geográficas, el equipo cuenta con un receptor de posicionamiento global satelital (GPS) que registra automáticamente las coordenadas X, Y, Z del vehículo en todo momento, y dicho sistema trabaja en forma coordinada con el resto de los sistemas equipados en el ARAN.

En esencia, las mediciones del ARAN se realizan en las dos rodadas (izquierda y derecha) de cada uno de los carriles de circulación. En ambas rodadas se miden en forma precisa dos perfiles longitudinales para los cuales se puede calcular, en tiempo real, el IRI a los intervalos de distancia especificados por el operador.



Por la precisión de los dispositivos empleados y el sesgo máximo de las mediciones, el equipo ARAN cumple con todas las especificaciones de la Clase 1 de acuerdo a la Norma ASTM E 950-98.



Figura 19. Parte posterior del vehículo de medición ARAN.

El sistema de medición en su conjunto está formado por tres emisores láser y sus correspondientes fotocaptadores en la parte frontal de la camioneta Crafter, dos son utilizados para obtener el IRI y uno para la textura.

La función del sistema láser es medir dos perfiles longitudinales continuos y así calcular el valor de IRI. Por otro lado, los datos de la textura que son medidos con el tercer láser ubicado en la parte frontal, son una medida importante para el drenaje y la resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento.



Figura 20. Localización de los Láseres y acelerómetros en la parte frontal del vehículo.
Fuente: (Societa Italiana Progetto Manutenzione. Siproma Argentina S.A. de C.V.).

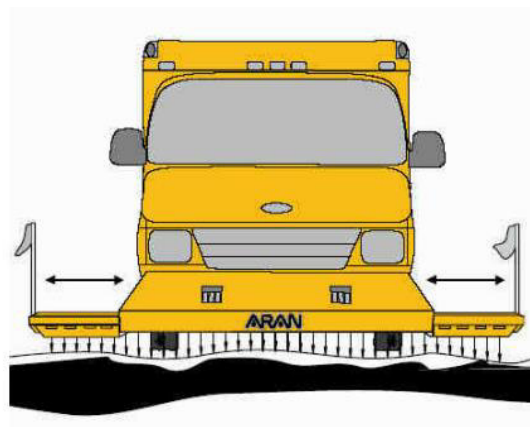


Figura 21. Ejemplo de barra frontal montada al frente del equipo y simulación de láser.
Fuente: (Societa Italiana Progetto Manutenzione. Siproma Argentina S.A. de C.V.).

A partir del perfil longitudinal se calcula en tiempo real el IRI. El modelo físico utilizado es el del Banco Mundial, también conocido como de “un cuarto de automóvil”.

Durante el recorrido los tres sensores delanteros y los dos “scanner” traseros toman lecturas precisas a intervalos de distancia especificados por el usuario; esta información es enviada a varias computadoras instaladas dentro de la camioneta para ser almacenada y procesada posteriormente.



10.2. Equipo para medición de profundidad de rodera (PR)

El perfilómetro láser Dynatest RSP Mk III L11.2G es un sistema avanzado de medición que cuenta con once sensores laser que permiten obtener un perfil transversal de la superficie de rodamiento a altas velocidades de operación (hasta 110 km/hr).

Por sus características, el perfilómetro láser no requiere de dispositivos de seguridad especiales como vehículos de escolta, bandereros, etc. Sin embargo, el vehículo de prueba cuenta con una “torreta” de luz ámbar y dos señales reflejantes fijadas en las puertas traseras, las cuales informan a los demás conductores de las mediciones realizadas.

Por medio de una serie de sensores láser centrales y dos sensores angulados colocados en los extremos de la barra de medición se logra abarcar la anchura completa de un carril de circulación, de tal manera que se puede medir la profundidad de rodera en las dos rodadas y se puede obtener una sección transversal aproximada de la superficie de rodamiento.

El sistema láser está formado por once emisores láser y sus correspondientes fotocaptadores. Dichos láseres se encuentran alojados en una barra de aluminio, la cual está montada en la defensa delantera de una camioneta tipo “van”.



Figura 22. Perfilómetro láser Dynatest (RSP).

La función del sistema láser es medir dos perfiles longitudinales continuos y obtener otros tres puntos de referencia de la sección transversal del carril de circulación.

Durante el recorrido los once sensores toman lecturas precisas a cada 10 cm (o el intervalo de distancia especificado por el usuario); esta información es enviada a un procesador y a una computadora portátil, instalados ambos dentro del vehículo de prueba. Por la precisión de los dispositivos empleados y el sesgo máximo de las mediciones, este perfilómetro cumple con todas las especificaciones de la Clase 1 de acuerdo a la Norma ASTM E950-98.

El equipo está provisto de un dispositivo óptico que permite medir con alta precisión la distancia recorrida y la velocidad de circulación. En la rueda izquierda del eje posterior del vehículo está instalado un transductor óptico de distancias (DMI por sus siglas en inglés de *Distance Measurement Instrument*), el cual sirve para medir estos dos parámetros. Al igual que en el caso del sistema láser y los dos acelerómetros, la información obtenida es enviada a un procesador y posteriormente a la computadora portátil.

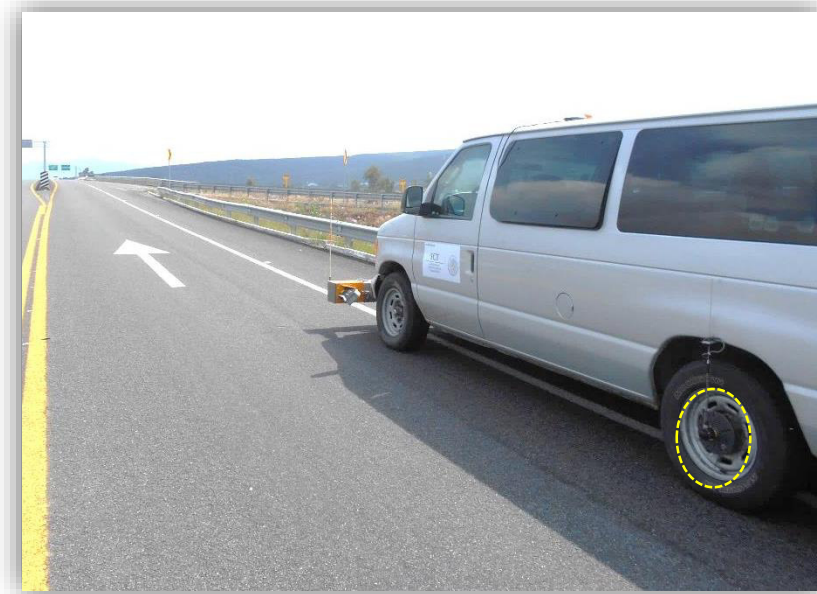


Figura 23. DMI ubicado en la llanta inferior izquierda del vehículo de medición.

Con el fin de enlazar la información obtenida por el perfilómetro láser con las respectivas coordenadas geográficas, el vehículo de prueba dispone de un equipo GPS. Al respecto, este equipo es del tipo diferencial y permite obtener una alta precisión en las coordenadas geográficas mediante los satélites denominados WAAS o, mejor aún, con una corrección en tiempo real proporcionada a través de un satélite por una empresa privada, mediante el pago de una suscripción anual.

Toda la información del GPS también es almacenada directa y automáticamente en los archivos con los resultados de la medición de la profundidad de rodera. El GPS es de suma utilidad también para la medición de rampas, pendientes y grado de curvatura.

10.3. Equipo automatizado de inspección visual del deterioro superficial

El registro detallado de los deterioros y fallas superficiales presentes en un pavimento constituye una de las actividades más importantes para planear el mantenimiento de una red vial



y para proteger el valor de las inversiones realizadas. En lo que respecta al equipo de inspección visual, el ARAN cuenta con una cámara de video panorámica de alta definición provista de un gran angular, montada sobre la cabina en la parte frontal del vehículo, mediante la cual puede tomar imágenes digitales de la ruta y del pavimento para toda el área estudiada. Las imágenes captadas permiten realizar salidas a terreno virtuales y además pueden ser utilizadas para el análisis del deterioro y llevar un inventario digital del derecho de vía, incluyendo el señalamiento vertical.



Figura 24. Cámara panorámica montada en la parte frontal superior del vehículo ARAN.

Para la inspección del deterioro superficial del pavimento, el equipo cuenta con dos cámaras de video digitales monocromáticas en la parte posterior del vehículo (ver figura 25), complementadas con dos luces estroboscópicas de gran intensidad para lograr así la captación de imágenes digitales del pavimento en cualquier condición de iluminación y en toda el área evaluada. La altura y resolución de las cámaras cumplen con los requisitos de cobertura del ancho de la pista y la visibilidad mínima del ancho de las grietas.



Figura 25. Cámaras monocromáticas montadas en la parte posterior del vehículo ARAN.

10.4. Equipo para medición continua de espesores con radar de penetración superficial

A continuación, se describen algunas de las características y partes que componen un radar de penetración superficial o también denominado GPR, por sus siglas en inglés (ground penetrating radar).

10.4.1. Características básicas de los sistemas GPR

La recolección de datos con los equipos GPR se hace a través de pares de antenas de radar, una de las cuales transmite pulsos cortos de ondas electromagnéticas hacia el pavimento. A medida que esta energía viaja hacia abajo en la estructura del pavimento, se generan ecos en las interfaces de materiales con propiedades diferentes. El tiempo de llegada y la fuerza de estos ecos, detectados por la otra antena receptora, se utilizan para calcular el espesor de las capas del pavimento y otras propiedades.

En general, el radar de penetración superficial ha sido utilizado para la medición continua de los espesores del pavimento. Mediante análisis más detallados, pero de menor precisión, en



algunos casos se han detectado zonas con problemas especiales (humedad excesiva, oquedades, baja compactación, etc.). Por tal motivo, se debe poner énfasis en que la aplicación más exacta y comprobada de los sistemas GPR corresponde a la medición de espesores.

Una antena de GPR abarca una franja continua de 15 cm en cada inspección. Sin embargo, los resultados obtenidos corresponden realmente a un perfil que se genera a partir de las mediciones en esta franja relativamente angosta. El equipo puede ser movido lateralmente en el mecanismo de sujeción para inspeccionar diferentes franjas en recorridos sucesivos. En los sitios en que se presentan dudas sobre la interpretación de los resultados, se pueden tomar mediciones estacionarias, para las cuales se requiere detener o desviar el tránsito.

Actualmente no es factible considerar que con la utilización del GPR se pueden eliminar completamente los sondeos o las “calas”, a menos que se tengan datos históricos confiables de la estructura del pavimento. En general, con estos equipos se puede aumentar el espaciamiento entre las “calas”, pero éstas son un elemento indispensable, en ausencia de información histórica confiable, para validar los resultados obtenidos del proceso de los datos del radar de penetración superficial.

10.4.2. Antena aérea

La antena del equipo GPR funciona a una frecuencia de 1 GHz y ha sido optimizada por la empresa GSSI para la evaluación de espesores de pavimentos a altas velocidades. Esta antena fue sometida a una serie completa de pruebas antes de su entrega, por lo que cumple con las especificaciones pertinentes.

Los materiales del mecanismo de sujeción de la antena son de materiales especiales, con



los que se evita cualquier interferencia en la operación del equipo GPR.

Se dispone de una placa de aluminio, con la que se efectúa la calibración de la antena y se genera un archivo, a partir del cual se realizan automáticamente las correcciones por variación de altura de la antena durante el recorrido de recolección de datos.

La antena toma lecturas según los intervalos especificados por el usuario. Para ellos, se seleccionó un valor adecuado en función de la velocidad de circulación del vehículo de medición y las características generales del pavimento de la carretera evaluada en el estudio.

10.4.3. Procesador principal

El control básico del equipo GPR se realiza a través de un procesador central alojado en un gabinete metálico (SIRveyor) y de una computadora portátil. En este gabinete se encuentran todos los componentes necesarios para el manejo de hasta dos antenas de radar; en total se dispone de hasta cuatro canales para la transferencia de datos. La alimentación de energía eléctrica a la computadora también se hace a través de la unidad “SIRveyor”, al igual que las conexiones con las antenas y el odómetro electrónico. La comunicación con la computadora portátil se realiza por medio de un puerto tipo “Ethernet”.

10.4.4. Odómetro electrónico de alta precisión (DMI)

En este tipo de evaluación es indispensable contar con información exacta sobre la distancia o cadenamiento al que corresponde cada dato del radar de penetración. Para tal efecto, en el equipo propuesto se incluye un odómetro electrónico de alta precisión (DMI, por las siglas en inglés de “*distance measurement instrument*”). Este dispositivo se conecta a un sensor del



vehículo de medición. Al igual que en el caso de otros componentes del sistema GPR, la información obtenida del odómetro es enviada a la computadora central.

10.4.5. Computadora portátil

El almacenamiento y el proceso de la información obtenida por el sistema GPR se realizan directamente en la computadora principal que se encuentra instalada en el vehículo de prueba. Asimismo, a través del puerto de serie de esta computadora portátil se efectúa la comunicación con el equipo GPS.

La computadora tiene un disco duro de alta capacidad para almacenar los datos generados por el radar para una longitud razonable de km-carril. De igual manera, se dispone de una unidad para grabación de datos en discos compactos y unidad de disco duro externo de 120 Gb, con la cual se pueden transferir datos del disco duro de la computadora y generar respaldos de la información.

Toda la información numérica, gráfica y de imágenes puede ser consultada en el monitor de la computadora portátil, tipo LCD. Entre esta información se incluyen las imágenes de radar a medida que éstas van siendo generadas por el equipo GPR.

10.4.6. Programas de cómputo

El programa para configurar y controlar la operación del sistema GPR está cargado en la computadora portátil y se tiene acceso al mismo a través de un icono.

Para el proceso básico de las imágenes de radar se dispone del programa de cómputo denominado “RADAN for Windows NT”, con el fin de poder analizar las imágenes de radar en



dos computadoras diferentes y así poder lograr una rápida capacidad de respuesta para este tipo de aplicaciones. Las imágenes de radar se pueden manipular de diversas formas con este programa, el cual también permite aplicar una serie de filtros y correcciones, según se requiera.

En cuanto a la interpretación de espesores, se utilizará el módulo de “RADAN” denominado “Road Structure Assessment” (RSA), el cual permite estimar el espesor de las principales capas del pavimento y algunas de sus características físicas. Existe una opción de cálculo automatizado de espesores, pero generalmente se requieren ciertos ajustes con la opción de interpretación interactiva.

Como primer paso del proceso de interpretación, es la identificación de puntos de reflexión, en la cual también se elimina cualquier ruido. Asimismo, se utiliza el archivo de calibración generado con la placa de aluminio para calcular de una manera muy precisa la velocidad de propagación de la señal a través del pavimento.

Los resultados pueden ser examinados visualmente y a mayor detalle con la opción de interpretación interactiva, con la cual se realiza cualquier ajuste mediante una serie de herramientas muy útiles disponibles en el módulo RSA. Los archivos con los espesores y otros datos pueden ser exportados fácilmente a muchos programas de cómputo comerciales, tales como “Excel”.

En el módulo RSA también existe una opción para ajustar las velocidades de propagación del radar, en función de los datos disponibles de la estructura del pavimento (inventario histórico, sondeos y/o “calas”).



10.4.7. Metodología para la obtención de espesores continuos

Es conveniente destacar que se utilizó un equipo GPR de la empresa líder en el mundo en el desarrollo de radares de penetración superficial para diferentes aplicaciones de ingeniería civil y de otras disciplinas. Con este equipo instalado en el vehículo de medición, se hizo el recorrido de los diferentes carriles de circulación de la carretera en estudio. El intervalo de distancia fue de 5.0 metros para lo cual se prepararon gráficas con la variación de los espesores de las principales capas del pavimento. Los espesores se midieron originalmente en la parte central del carril de baja velocidad.

Por otra parte, en la interpretación de espesores a partir de los datos recolectados con un equipo GPR, se recomienda confirmar la interpretación con información histórica de la estructura del pavimento y/o con “calas” o sondeos. Esta información es crítica para la validación de los espesores estimados con el equipo GPR. Al respecto, se realizaron sondeos simplificados para identificar la estructura del pavimento actual.

10.4.8. Equipo para la medición continua de los espesores del pavimento

Como ya ha sido mencionado, una antena de GPR abarca una franja con un ancho continuo de 15 cm en cada inspección. Sin embargo, los resultados obtenidos corresponden realmente a un perfil que se genera a partir de las mediciones en esta franja relativamente angosta. El equipo puede ser movido lateralmente en el mecanismo de sujeción para inspeccionar diferentes franjas en recorridos sucesivos. En los sitios en que se presentan dudas sobre la interpretación de los resultados, se pueden tomar mediciones estacionarias, para las cuales se requiere detener o desviar el tránsito.



Figura 26. Antena de geo-radar montada en la parte posterior de una camioneta tipo “Van”

En general, en lo que concierne a la evaluación de pavimentos, las principales aplicaciones de los sistemas GPR son las siguientes:

- División del pavimento en tramos homogéneos, desde el punto de vista de la variación de las imágenes de radar.
- Medición continua del espesor de las principales capas del pavimento, hasta una profundidad de un metro (1.0 m), en casos ideales. El espesor mínimo detectable para cualquier capa es de 5.0 cm y la precisión del cálculo de espesores disminuye con la profundidad del pavimento
- Selección de sitios para la realización de sondeos o de “calas”, principalmente para despejar dudas sobre problemas puntuales del pavimento.
- Detección de instalaciones subterráneas.
- Generación de insumos básicos para el cálculo de espesores de estrategias de rehabilitación y reconstrucción de los pavimentos en servicio.



- Identificación, aunque con mayor incertidumbre, de zonas con problemas aislados en el pavimento (oquedades, alta humedad, etc.).

En cuanto a los rendimientos del radar de penetración, no se puede establecer un intervalo típico de valores, dado que cada caso analizado puede requerir algunas variantes en las actividades de interpretación. Normalmente se requiere un esfuerzo mucho mayor en la interpretación de resultados que en la recolección de datos.

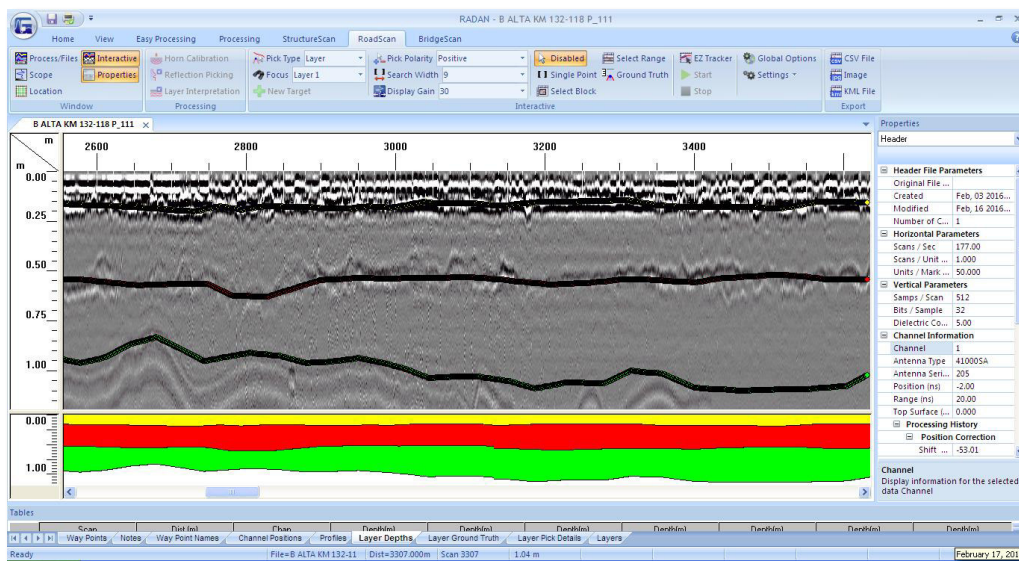


Figura 27. Ventana del software durante el proceso de las imágenes de Geo-radar

10.5. Equipo para medición del coeficiente de fricción (CF).

El equipo utilizado es el Mu Meter Mk6 Friction Tester (Mu-Meter); este equipo está diseñado específicamente para la medición del coeficiente de fricción tanto en aeropuertos como en carreteras. El equipo consiste en un pequeño remolque de tres ruedas, que cuenta con sistemas electrónicos para realizar mediciones junto con un ordenador. El equipo es remolcado por un vehículo tipo Pick Up.



En lo que respecta a la fricción, o resistencia al deslizamiento del pavimento, es considerada la condición más desfavorable aquella en la que el pavimento se encuentra mojado. La fricción se determina de forma indirecta midiendo el coeficiente de fricción entre el pavimento artificialmente mojado y una llanta especial.

El valor del coeficiente de fricción depende de una serie de factores, algunos inherentes al pavimento, mientras que otros son responsabilidad de las condiciones climáticas (lluvia, nieve, hielo sobre la carpeta, etc.). La medida de la fricción está en función de la velocidad y cantidad de agua que exista sobre el pavimento. Es por ello, que las mediciones se realizan considerando dos velocidades diferentes de operación: de 65 km/h a 95 km/h.



Figura 28. Mu-meter y equipo de remolque.

Bajos valores del coeficiente de fricción en un pavimento pueden ser causados por contaminantes tales como: agua, hielo o nieve y por la erosión o el desprendimiento de la textura superficial de la carpeta asfáltica o de concreto hidráulico, causados por la circulación y el frenado de las aeronaves, en caso de aeropistas.



El Mu-Meter puede monitorear las zonas donde la fricción del pavimento es baja; guardando la información de la medición de una pista de forma continua, al mismo tiempo que va almacenando información importante respecto al nombre del tramo evaluado, fecha en que se realizaron las mediciones y la velocidad a la que se efectúa la prueba.

10.5.1. Tanque de almacenamiento de agua

El vehículo cuenta con un tanque de almacenamiento de agua de 900 litros.



Figura 29. Medidor de fricción Mu-Meter.

10.5.2. Neumático de prueba

El vehículo cuenta con un sistema óptico que mide las velocidades y la distancia conocido por sus siglas en inglés como DMI (Distance Measurement Instrument); además cuenta con una bomba que proporciona un tirante de agua constante. La salida del agua es del tipo



ASTM para un flujo laminar, de ancho y tirante constante en el total de la huella del neumático de prueba para cualquier velocidad a la que se realice el ensayo.

El equipo presenta un transductor de fuerza para ambas llantas, que permite que el coeficiente de fricción sea medido instantáneamente al realizar la prueba. Para la realización de la prueba, los neumáticos de ensaye cumplen de acuerdo con la normativa ASTM E1551, (International ASTM).

10.5.3. Control electrónico y sistema de procesamiento

El equipo Mu Meter cuenta con un sistema que almacena la información que envía el equipo de medición. Una vez almacenado, la información es acondicionada, procesada, registra, impresa y visualizada mediante pantallas acondicionadas por el sistema electrónico.

El sistema electrónico se compone de cuatro elementos: odómetros, procesador, celda de carga y una unidad central de control en el remolque, que junto a los neumáticos y el propio remolque, son calibrados para determinar el coeficiente de fricción en el pavimento.



Figura 30. Equipo de cómputo con software del Mu-Meter.



Figura 31. Captura de pantalla del software.

10.6. Equipo para medición de desplazamientos verticales

Un Deflectómetro FWD (Falling Weight Deflectometer) es un equipo no destructivo usado para determinar los parámetros esfuerzo-deformación de los pavimentos y subrasantes. Un plato transmisor de carga especialmente diseñado, es colocado sobre la superficie del pavimento y un pulso determinado de carga se aplica al plato. El pulso de esta carga está generado por el impacto de un peso al caer. El pulso de la carga fue diseñado para producir un desplazamiento vertical (deflexión) que simula la deformación producida por una rueda transitando a velocidad y carga normal.

El desplazamiento de la estructura se mide durante el tiempo de duración de la carga quedando registrado el valor máximo de dicho desplazamiento. Cuando los desplazamientos verticales (deflexiones) se comparan con los desplazamientos de otras secciones, se puede estimar la capacidad del pavimento medido para soportar su carga de trabajo.



Los componentes importantes del equipo FWD son la unidad que genera la carga, el transductor de la carga máxima, los sensores de desplazamiento, y los transductores de distancia y temperatura.

Los instrumentos de grabación y control incluyendo una computadora personal se instalan en un vehículo de remolque. El FWD se opera normalmente desde el asiento del conductor del vehículo de remolque.

El conocimiento sobre la condición estructural del pavimento es esencial para poder tomar decisiones apropiadas sobre mantenimiento y rehabilitación. La medición de los desplazamientos verticales ofrece varias ventajas sobre la medición destructiva. Primero, la medición de los desplazamientos se realiza sobre el mismo pavimento, midiendo la respuesta real de éste a una carga determinada. Segundo, las mediciones de desplazamiento son relativamente rápidas y económicas, permitiendo la medición de una cantidad más grande de puntos. La medición no destructiva determina el estado estructural sin dañar el pavimento.

En los pavimentos flexibles se miden a través de la caída de un peso desde una altura específica que corresponde a la carga simulada. Durante el impacto, la forma de la cuenca de deformación queda medida y registrada. La forma de la cuenca de deformación se usa posteriormente con programas de análisis de estructuras de varias capas para determinar la resistencia tanto de la estructura total del firme como de cada una de las capas

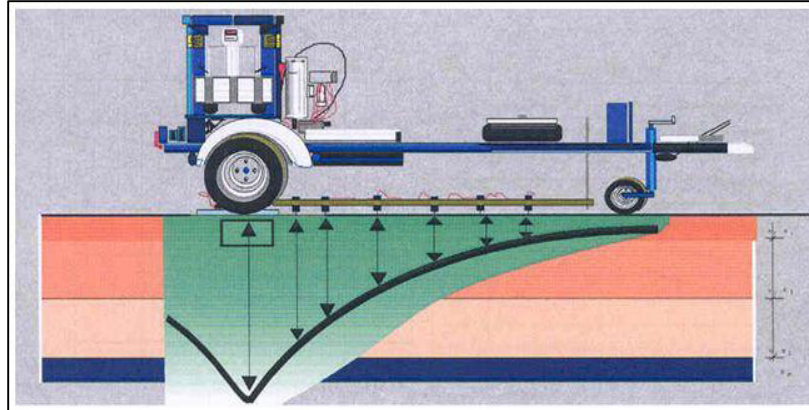


Figura 32. Cuenca de deformación producido por el equipo FWD.

La figura anterior muestra la cuenca de deformación producida en el pavimento tras el impacto de la carga, dicha deformación se mide en cada sensor simultáneamente.



11. Presentación de resultados del caso de estudio “Autopista Pátzcuaro-Lázaro Cárdenas del km 48+000 al 310+000”

Gracias a la oportunidad brindada por parte de la empresa Evaluación Integral de Obras Civiles S.A. de C.V., más específicamente, con el coordinador de proyectos, Ing. Omar Serrano Torres, se recabaron los datos antes mencionados, los cuales son: Índice de Regularidad Internacional (IRI), Profundidad de Roderas (PR), Coeficiente de Fricción (CF), Deflexiones, Espesores del pavimento determinados mediante sondeos y por radar de penetración terrestre (GPR).

Con los datos de esos índices se emite una conclusión del tramo evaluado.

11.1. Ubicación

La carretera cuenta con dos carriles de circulación que para efectos del presente estudio se denominó carril derecho al sentido ascendente del kilometraje (Morelia-Pátzcuaro-Uruapan-L. Cárdenas) y al sentido descendente del kilometraje se le denominó carril izquierdo (L. Cárdenas –Uruapan- Pátzcuaro-Morelia).

La medición para el carril derecho inició en el km 48+000 con las siguientes coordenadas, Latitud: 19.53038 Longitud: -101.56140 y terminó en el km 310+00 con coordenadas Latitud: 17.97358 y Longitud: -102.19366.

Para el carril izquierdo se tiene el inicio en las coordenadas Latitud: 19.52908 y Longitud: -101.56278, estas correspondientes al km 48+000, y terminando de igual manera en el km 310+000 con coordenadas Latitud: 17.97296 y Longitud: -102.19369.



A continuación, se presenta un croquis y se resalta con color rojo la ruta seguida para la medición. (Figura 34).

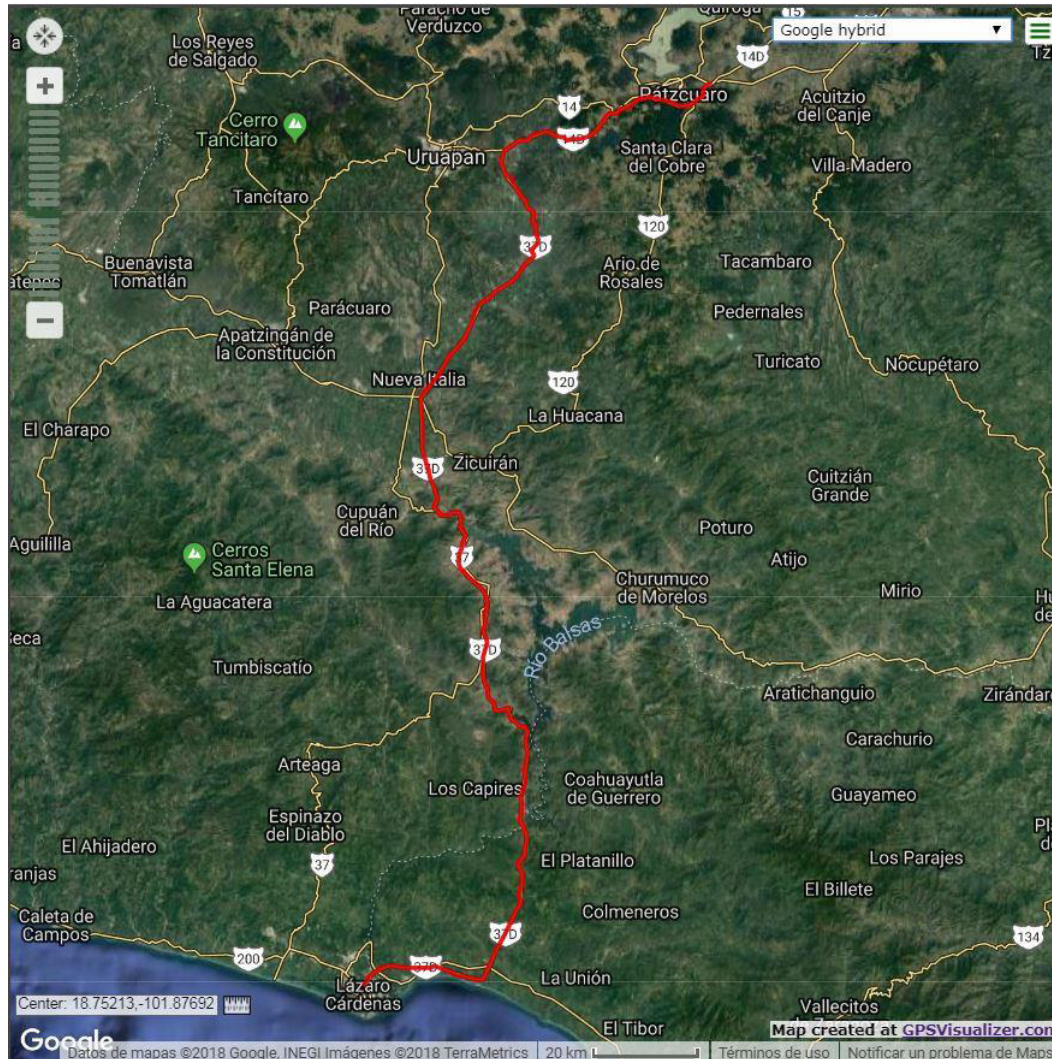


Figura 33. Localización y ruta del tramo evaluado.

11.2. Tipos de evaluación.

Aunque ya se ha mencionado, es importante hacer hincapié en el hecho de que existen 2 tipos de evaluaciones posibles del pavimento, las cuales son evaluación superficial y evaluación estructural.



Para el caso de estudio presentado, con respecto a la evaluación superficial se cuenta con: Índice de Regularidad Internacional (IRI), Profundidad de Rodera (PR), Coeficiente de Fricción (CF) así como levantamiento de deterioro superficial.

En cuanto a evaluación estructural se tiene el perfil estratigráfico del pavimento, el cual se obtuvo por medio de sondeos, y en complemento fue determinado por medio del georradar de penetración terrestre (GPR), así como también se cuenta con datos de deformaciones verticales en el pavimento (deflexiones).

11.3. Normativa.

La normativa utilizada para la evaluación es la propuesta por la SCT y que actualmente está vigente.

Tabla 2. Intervalos de IRI para clasificación de los tramos.

Estado	Intervalos de IRI	
	Autopistas de Cuota y Corredores Carreteros	Red Básica Libre y Red Secundaria
Bueno	< 1.8	< 2.5
Aceptable	1.8 a 2.5	2.5 a 3.5
No Satisfactorio	> 2.5	> 3.5

La tabla 2, pertenece a la normativa N-CSV-CAR-1-03-004/16

Tabla 3. Intervalos de Profundidad de Roderas para la clasificación de los tramos.

Estado	Intervalos de PR (mm)	
	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica Libre y Red Secundaria
Bueno	< 5	< 7
Regular	5.1 a 8	7.1 a 9
Malo	> 8	> 9

La tabla 3 pertenece a la normativa N-CSV-CAR-1-03-009/16



Tabla 4. Rangos del coeficiente de fricción para la clasificación de los tramos

Condición	Autopistas, Corredores Carreteros, Red Básica Libre y Red Secundaria
No aceptable (pulido)	0 a 0.40
Aceptable	0.41 a 0.60
Bueno	0.61 a 0.90
No aceptable (áspero)	> 0.90

La tabla 4 pertenece a la normativa N-CSV-CAR-1-03-007/17

Tabla 5. Intervalos de la Profundidad de Macro Textura para la clasificación de los tramos.

Estado	Intervalos de la PMT (mm)	
	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica Libre y Red Secundaria
Bueno	> 0.90	> 0.80
Regular	0.75 a 0.90	0.65 a 0.80
Malo	< 0.75	< 0.65

La tabla 5 pertenece a la normativa N-CSV-CAR-1-03-006/16

Tabla 6. Rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros a 700 Kilopascasles y 20 grados Celsius.

Condición estructural	Rangos de valores representativos de deflexiones (mm)	
	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica Libre y Red Secundaria
Buena	0 a 0.40	0 a 0.50
Regular	---	> 0.50 y <= 0.80
Malo	> 0.4	> 0.80

La tabla 6 pertenece a la normativa N-CSV-CAR-1-03-010/17

11.4. Depuración y tratamiento de los datos.

Ya que a lo largo del proceso de medición existen diferentes incidencias que pueden influir en el proceso de recolección de los datos, estas deben ser detectadas y debidamente interpretadas antes de realizar la entrega de resultados y reporte final.



11.4.1. Puentes

Para la medición de espesores con GPR, deben eliminarse los datos en caso de existir un puente, ya que el equipo detecta la profundidad de la trabe y después registra un vacío.

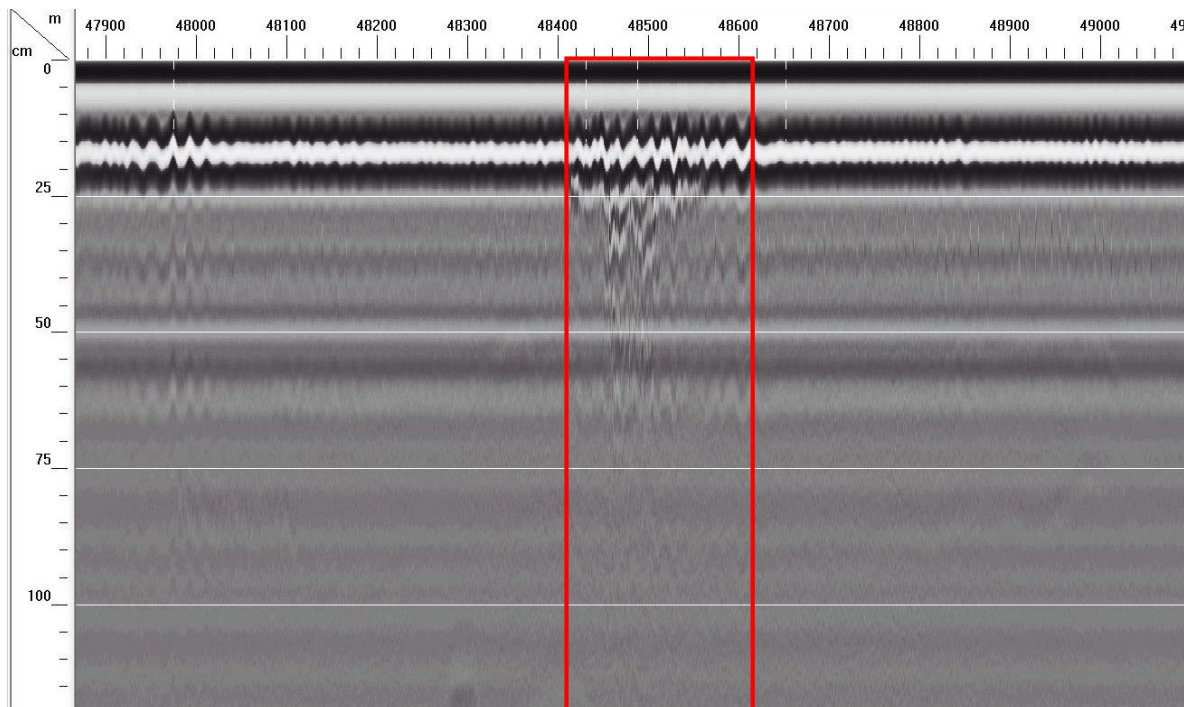


Figura 34 Vista desde el software del GPR de la medición de un puente.

11.4.2. Reductores de velocidad.

Como ya se mencionó, el IRI puede ser descrito como el movimiento de la suspensión del vehículo con respecto a una masa fija, que es el asiento del conductor, entonces, al pasar por un reductor de velocidad, se genera un movimiento súbito, lo que ocasiona que el valor de la diferencia de masas varíe de forma considerable, esto sin mencionar que las mediciones del IRI deben realizarse a una velocidad constante, como lo estipula la norma, entonces, al haber un reductor de velocidad en el tramo de medición, se obliga al vehículo a frenar, luego, el vehículo de prueba tarda unos segundos en retomar la velocidad de medición, y esto ocasiona que los



datos recolectados en este tramo se consideren no representativos, es por eso que deben ser identificados y eliminados.

De manera muy similar y por las mismas razones, deben ser eliminados también de los datos del coeficiente de fricción.

Usualmente no es común que se encuentren reductores de velocidad en autopistas, sin embargo, sí lo es cuando se realizan mediciones en tramos carreteros que cruzan zonas urbanas.

11.4.3. Tramos de concreto hidráulico.

Cuando la carretera presenta pavimento tanto asfáltico como hidráulico, en la parte del pavimento rígido deben eliminarse los datos de la profundidad de rodera, ya que en este tipo de pavimentos usualmente no se mide dicho parámetro.

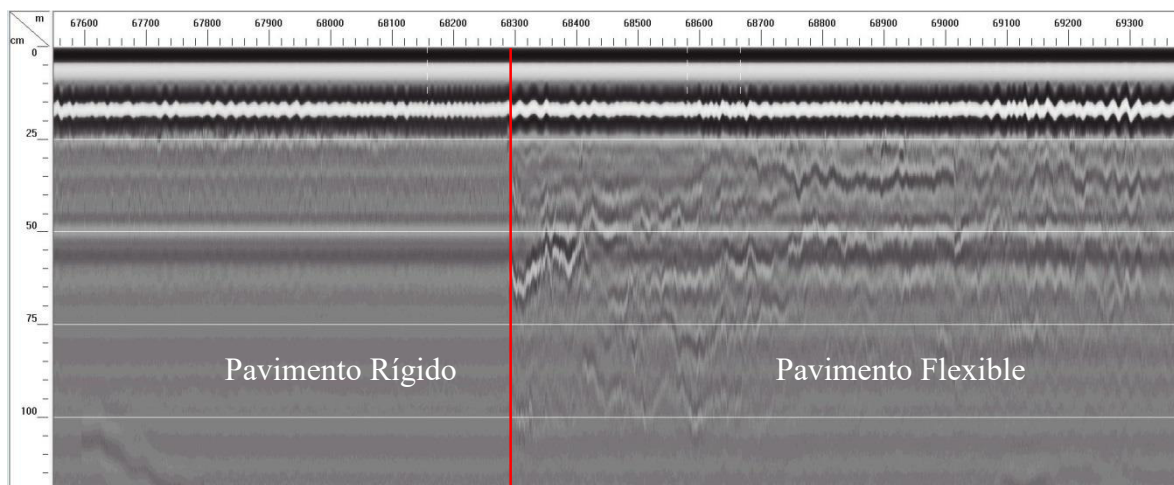


Figura 35. Cambio de pavimento rígido a pavimento flexible visto desde el software del GPR.

11.4.4. Cruce de vías Férreas.

Para cuando exista cruce de vías, es necesario eliminar IRI, PR, CF, debido a que el vehículo de medición es obligado a hacer alto total, y los datos registrados no serían



representativos, de igual manera, al cruzar por la vía podría presentarse un movimiento brusco en la suspensión de vehículo, lo que afectaría los valores de IRI.

Para los datos de PR, suelen ser muy altos en estos cruces debido a que los láseres registran profundidades incorrectas.

De igual forma, para el coeficiente de fricción hay que reducir la velocidad y los datos que toma el “Mu meter” no son correctos debido a que no están conforme a la velocidad de medición que especifica la norma

Así mismo, deben ser eliminados los datos del GPR ya que detectará el espesor de las capas que conforman la vía férrea, y no el pavimento como tal.

11.4.5. Obras de drenaje.

Las obras de drenaje solo es necesario quitarlas de los datos del Radar de Penetración Terrestre GPR, ya que cuando existe una obra de drenaje alojada en alguna de las capas del pavimento, será un cambio en la imagen del GPR el cual detectará como vacío, por lo cual estos datos no deben ser reportados.

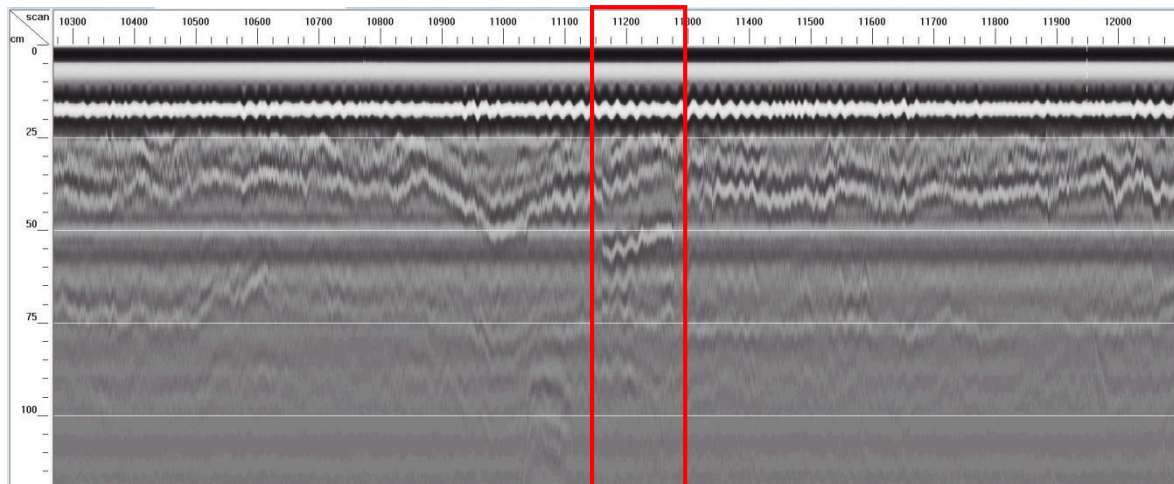


Figura 36. Vista de una alcantarilla desde el software del GPR

11.4.6. Rebases/desviaciones del vehículo de medición

Como ya ha sido mencionado, el vehículo debe obedecer la velocidad que marca la norma para poder realizar las mediciones, en caso de que hubiera tránsito lento delante, los operadores suelen rebasar, y con esta acción, modifican la velocidad, y más aún, cambian de carril, todos los datos recolectados al tiempo que va en el carril que no es el cual debería medirse deben ser eliminados por obvias razones.

Es importante mencionar que para la obtención de espesores continuos pueden dejarse los datos, ya que es muy poco probable que haya un cambio en la estructura del pavimento de un carril a otro.

Lo que se considera desviación el vehículo es cuando éste se orilla al acotamiento para dejar el flujo de tránsito libre a una mayor velocidad, sin embargo, al hacer esto, reduce su velocidad, y como ya fue expuesto, estos datos no son representativos y deben ser eliminados.



11.4.7. Deterioro superficial.

En todos los casos, cuando hay un deterioro superficial de la capa de rodamiento del pavimento considerable, los datos usualmente son muy elevados, sin embargo, cuando se da este caso, y la razón es deterioro superficial, se toman las observaciones correspondientes, sin embargo, dichos datos no se eliminan, sino que se correlacionan con el levantamiento de deterioro.

11.4.8. Casetas.

En las casetas de cobro, se conjuntan la mayoría de las afectaciones ya mencionadas, y ningún índice puede medirse estáticamente con la utilización de estos equipos, y aquí es un alto total obligado.

11.4.9. Sondeos.

En cuanto a la realización de sondeos, no hay como tal una incidencia que no permita la realización de estos, sin embargo, es importante que la persona que dicta donde se realizarán los sondeos tome en cuenta de no ubicarlos en puentes, ni en curvas tanto horizontales como curvas verticales, para así dar seguridad a la brigada que realizará los trabajos en campo.

11.4.10. Deflexiones

No es recomendable realizar la prueba del deformómetro de impacto en puentes ni en obras de drenaje, ya que en dichos puntos la estructura del pavimento no obedece al resto del tramo, y, por ende, el cuenco de deflexiones no será representativo.



A manera de resumen, se presenta una tabla (Tabla 7) donde se expone lo antes descrito.

Tabla 7. Relación de Incidencias encontradas en las mediciones y el parámetro al que afecta.

Incidencia	Parámetro			
	IRI	PR	CF	GPR
Puentes	X			X
Reductores de velocidad	X			
Tramo de concreto hidráulico		X		
Obras de drenaje				X
Rebase/Desviación	X	X	X	X
Casetas	X	X	X	X



11.5. Resultados.

11.5.1. Evaluación superficial

11.5.1.1. Índice de Regularidad Internacional (IRI).

11.5.1.1.1. Carril derecho.

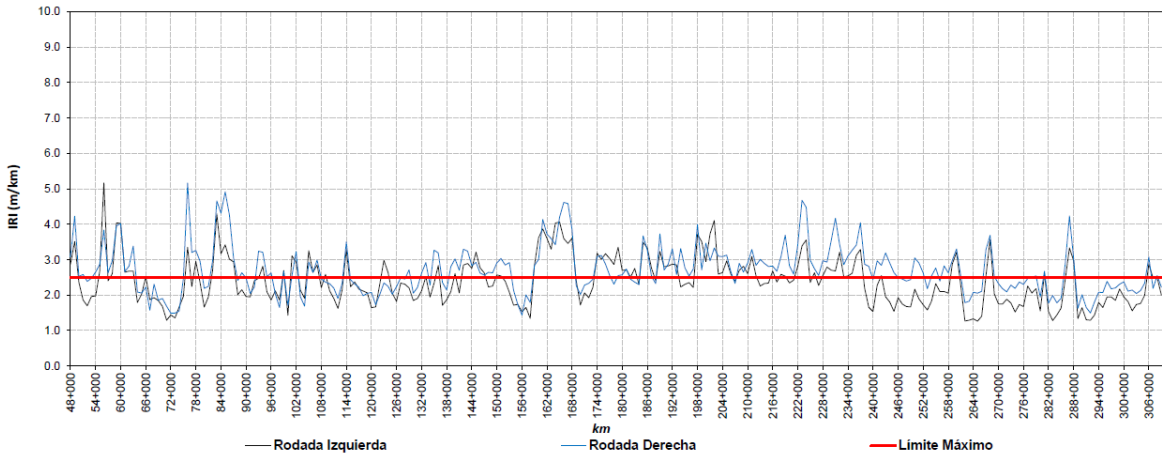


Figura 37. Gráfica del IRI para el carril derecho.

11.5.1.1.2. Carril Izquierdo

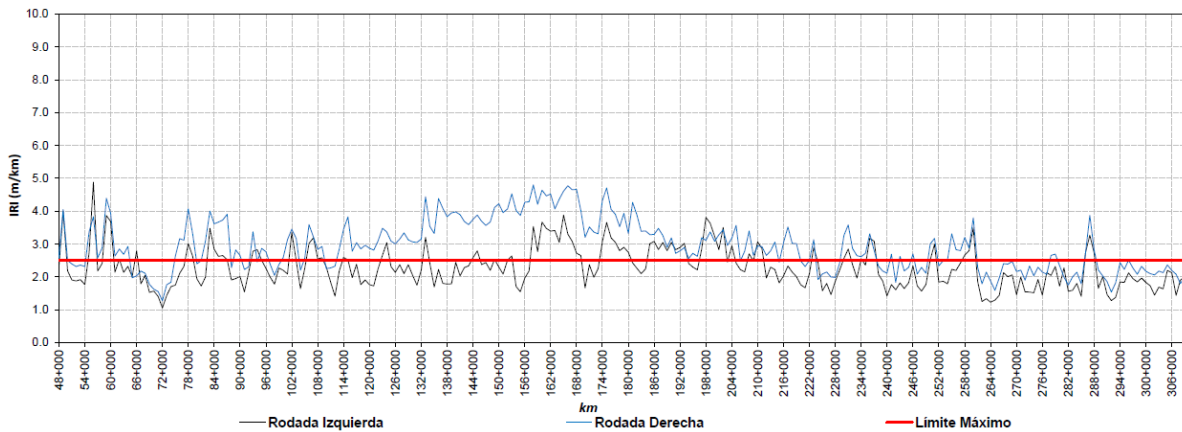


Figura 38. Gráfica del IRI para el carril izquierdo.



Respecto a los valores de IRI medidos en la autopista, se puede apreciar que en algunos casos se presentan valores por encima del límite de aceptación de 2.5 m/km. En las siguientes tablas se muestran los promedios de ambas rodadas para cada una de las zonas que presentan un comportamiento similar.

Cabe mencionar que las zonas que se enlistan a continuación, se obtuvieron a partir del método “Diferencias Acumuladas”, esto con la finalidad de obtener una mejor delimitación de dichas zonas, y gracias a esto, se eliminan los posibles errores de apreciación que comúnmente se cometen al estudiar los resultados obtenidos, y más aún, cuando los tramos analizados son de una longitud considerablemente grande.

Tabla 8. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro del IRI.

Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud	IRI	Del km	Al km	Longitud	IRI
48+000	50+000	2+000	3.43	48+000	55+000	7+000	2.46
50+000	55+000	5+000	2.25	55+000	65+000	10+000	3.05
55+000	64+000	9+000	3.23	65+000	76+000	11+000	1.81
64+000	76+000	12+000	1.84	76+000	80+000	4+000	2.97
76+000	80+000	4+000	3.19	80+000	82+000	2+000	2.14
80+000	82+000	2+000	2.01	82+000	88+000	6+000	3.18
82+000	88+000	6+000	3.64	88+000	93+000	5+000	2.18
88+000	93+000	5+000	2.23	93+000	97+000	4+000	2.73
93+000	95+000	2+000	2.94	97+000	101+000	4+000	2.20
95+000	101+000	6+000	2.11	101+000	104+000	3+000	2.95
101+000	103+000	2+000	2.95	104+000	106+000	2+000	2.17
103+000	105+000	2+000	1.93	106+000	110+000	4+000	2.99
105+000	108+000	3+000	2.89	110+000	113+000	3+000	2.00
108+000	135+000	27+000	2.25	113+000	118+000	5+000	2.76
135+000	137+000	2+000	2.91	118+000	122+000	4+000	2.33
137+000	142+000	5+000	2.34	122+000	206+000	84+000	3.14
142+000	148+000	6+000	2.88	206+000	208+000	2+000	2.41
148+000	150+000	2+000	2.44	208+000	220+000	12+000	2.64
150+000	153+000	3+000	2.72	220+000	230+000	10+000	2.14
153+000	159+000	6+000	1.84	230+000	238+000	8+000	2.79
159+000	169+000	10+000	3.70	238+000	250+000	12+000	2.03
169+000	174+000	5+000	2.17	250+000	252+000	2+000	2.92
174+000	196+000	22+000	2.83	252+000	255+000	3+000	2.14



Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud	IRI	Del km	Al km	Longitud	IRI
196+000	198+000	2+000	2.46	255+000	261+000	6+000	2.88
198+000	239+000	41+000	2.97	261+000	286+000	25+000	1.92
239+000	241+000	2+000	2.11	286+000	290+000	4+000	3.03
241+000	244+000	3+000	2.63	290+000	310+000	20+000	1.94
244+000	259+000	15+000	2.25				
259+000	261+000	2+000	3.10				
261+000	267+000	6+000	1.77				
267+000	269+000	2+000	3.27				
269+000	286+000	17+000	2.02				
286+000	289+000	3+000	3.15				
289+000	310+000	21+000	2.00				

11.5.1.2. Interpretación y análisis de los resultados.

Para el carril derecho, el valor medio máximo es de 4.50 m/km y se encuentra del kilómetro 56+000 al 57+000, Sin embargo, la zona con mayor longitud y con IRI no aceptable, se encuentra del km 198+000 al km 239+000 con un valor de 2.97 m/km.

El valor medio mínimo es de 1.39 m/km localizado del kilómetro 292+000 al 293+000, la zona con mayor longitud y valores permisibles de IRI se encuentra del kilómetro 108+000 al 135+000 con un valor de 2.25 m/km.

El valor promedio de todo el carril es de 2.55 m/km, el cual supera al límite permitido.

Para el carril izquierdo, el valor medio máximo es de 4.36 m/km y se encuentra del kilómetro 56+000 al 57+000, Sin embargo, la zona con mayor longitud y con IRI no aceptable, se encuentra del km 122+000 al 206+000, con un valor de 3.14 m/km.



El valor medio mínimo es de 1.16 m/km localizado del kilómetro 72+000 al 73+000, la zona con mayor longitud y valores permisibles de IRI se encuentra del kilómetro 261+000 al 286+000 con un valor de 1.92 m/km

El valor promedio de todo el carril es de 2.61 m/km, el cual supera al límite permitido.

En el Anexo A se pueden consultar con más detalle los resultados expuestos.

11.5.1.3. Profundidad de Rodera (PR).

11.5.1.3.1. Carril Derecho.

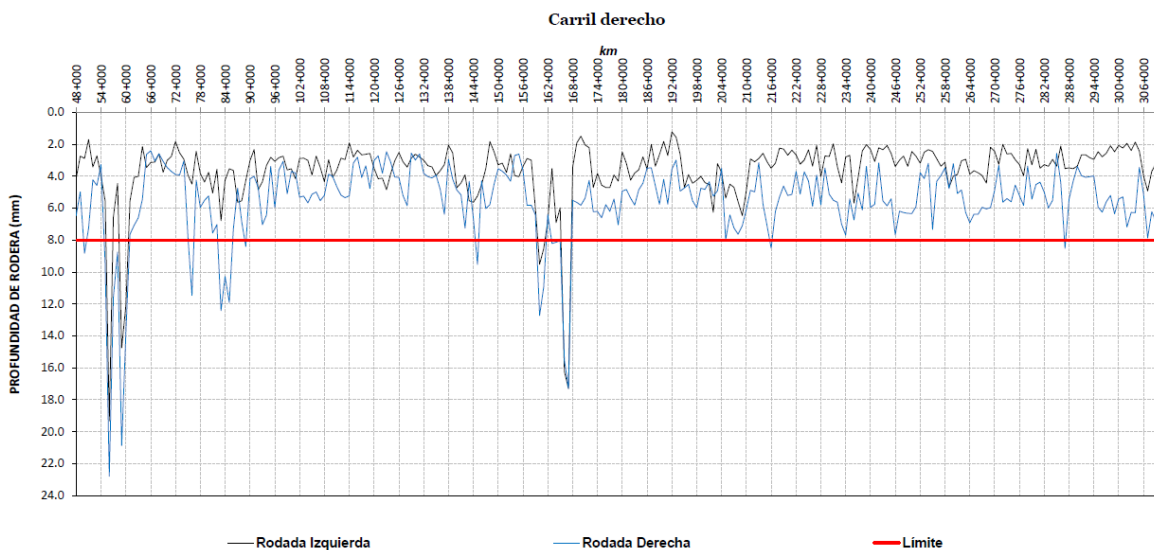


Figura 39. Gráfica de PR para el carril derecho.



11.5.1.3.2. Carril Izquierdo

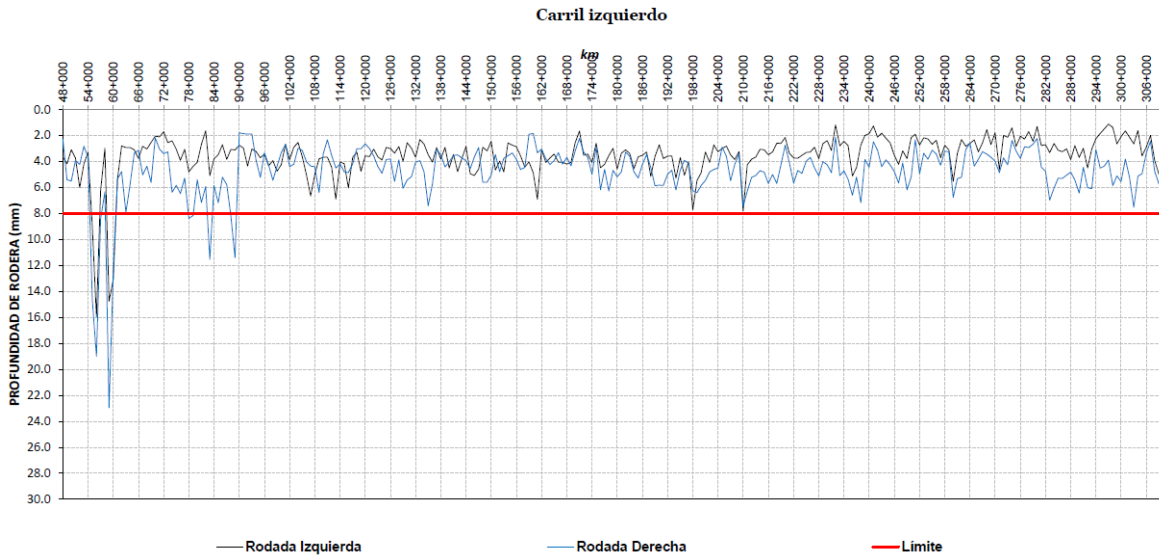


Figura 40. Gráfica de PR para el carril izquierdo.

Respecto a los valores de PR medidos en la autopista, se puede apreciar que sólo en algunos casos aislados se presentan valores por encima del límite de aceptación de 8mm. De igual manera, en las siguientes tablas se muestran los promedios de ambas rodadas para cada una de las zonas que presentan un comportamiento similar.

De la misma manera, las zonas que se enlistan a continuación, se obtuvieron a partir del método “Diferencias Acumuladas”, esto con la finalidad de obtener una mejor delimitación de dichas zonas, y gracias a esto, eliminar los posibles errores de apreciación que comúnmente se cometen al estudiar los resultados obtenidos, y más aún, cuando los tramos analizados son de una longitud considerablemente grande.

Tabla 9. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro de PR.

Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud	PR	Del km	Al km	Longitud	PR
48+000	56+000	8+000	4.77	48+000	55+000	7+000	4.00
56+000	61+000	5+000	13.49	55+000	57+000	2+000	14.66



61+000	160+000	99+000	4.25	57+000	59+000	2+000	6.01
160+000	162+000	2+000	10.43	59+000	61+000	2+000	15.77
162+000	166+000	4+000	6.76	61+000	310+000	249+000	3.93
166+000	168+000	2+000	16.59				
168+000	310+000	142+000	4.26				

11.5.1.4. Interpretación y análisis de los resultados.

Para el carril derecho, el valor medio máximo es de 21.05 mm y se encuentra del kilómetro 56+000 al 57+000, Sin embargo, la zona con mayor longitud y con PR no aceptable, se encuentra del tan solo del km 56+000 al 61+000 con un valor de 13.49 mm.

El valor medio mínimo es de 2.28 mm localizado del kilómetro 193+000+000 al 194+000+000, la zona con mayor longitud y valores permisibles de IRI se encuentra del kilómetro 168+000 al 310+000 con un valor de 4.26 mm.

El valor promedio de todo el carril es de 4.63 mm, el cual cumple con el límite permitido.

Para el carril izquierdo, el valor medio máximo es de 18.86 mm y se encuentra del kilómetro 59+000 al 60+000, Sin embargo, existen 2 zonas con longitud igual, y para ambas zonas no se cumple con la norma, dichas zonas son del km 55+000 al 57+00 con un valor de 14.66 mm, y la segunda zona se encuentra del km 59+000 al 61+000, con un valor de 15.77 mm, ésta última podría tener más importancia debido a que el valor de la profundidad de rodera es mayor con respecto a la zona que presenta la misma longitud.



El valor medio mínimo es de 1.65 mm, localizado del kilómetro 232+000 al 233+000, la zona con mayor longitud y valores permisibles de PR se encuentra del kilómetro 61+000 al 310+000 con un valor de 3.93 mm.

El valor promedio de todo el carril es de 4.12 mm, el cual cumple con el límite especificado.

En el Anexo B se pueden consultar con más detalle los resultados expuestos.

11.5.1.5. Coeficiente de Fricción. (CF)

11.5.1.5.1. Ambos carriles

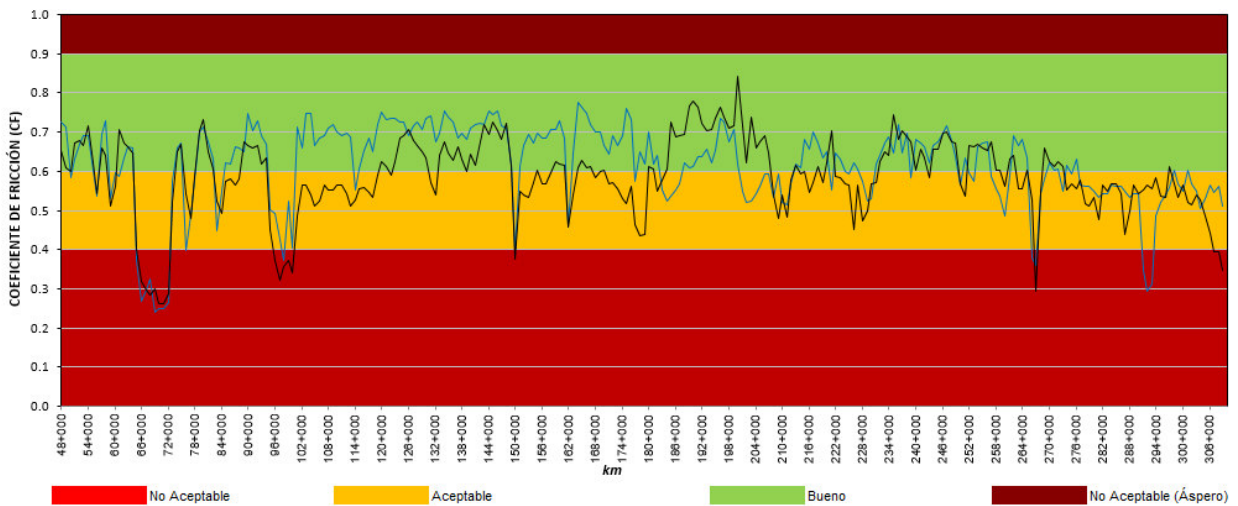


Figura 41. Gráfica del Coeficiente de fricción para ambos carriles.

Respecto a los valores de CF medido, se puede apreciar que en su mayoría se tienen valores en el rango de “aceptables”, algunos otros en “bueno” y ciertos picos en “No aceptable” por condición de pulido, no se encontraron valores que no cumplieran por un CF alto, lo que ocasionaría un pavimento muy áspero. En las siguientes tablas se muestran los



promedios de ambas rodadas para cada una de las zonas que presentan un comportamiento similar.

Al igual que se realizó con el IRI y la PR, las zonas que se enlistan a continuación, se obtuvieron a partir del método “Diferencias Acumuladas”, esto con la finalidad de obtener una mejor delimitación de dichas zonas, y gracias a esto, se eliminan los posibles errores de apreciación que comúnmente se cometen al estudiar los resultados obtenidos, y más aún, cuando los tramos analizados son de una longitud considerablemente grande.

Tabla 10. Zonificación de tramos homogéneos con respecto al parámetro de CF.

Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud	CF	Del km	Al km	Longitud	CF
48+000	65+000	17+000	0.64	48+000	65+000	17+000	0.64
65+000	73+000	8+000	0.28	65+000	73+000	8+000	0.30
73+000	266+000	193+000	0.65	73+000	96+000	23+000	0.60
266+000	268+000	2+000	0.37	96+000	101+000	5+000	0.35
268+000	291+000	23+000	0.57	101+000	307+000	206+000	0.60
291+000	294+000	3+000	0.32	307+000	310+000	3+000	0.38
294+000	310+000	16+000	0.55				

11.5.1.6. Interpretación y análisis de los resultados.

Respecto a los valores de CF, se reportaron valores que en su mayoría cumplen con el rango de “aceptables”, algunos otros en “bueno” y ciertos puntos aislados en “No aceptable” por condición de pulido,

Para el carril derecho, la zona con mayor longitud y con CF no aceptable se encuentra del km 65+000 al 73+000 con un valor de 0.28.

La zona con mayor longitud y valores “Aceptables” de CF se encuentra del kilómetro 268+000 al 291+000 con un valor de 0.57.



La zona con mayor longitud y valores “Bueno” se encuentra del kilómetro 73+000 al 266+000 con un valor de 0.65.

El valor promedio de todo el carril es de 0.62, clasificando como “bueno”.

Para el carril izquierdo, la zona con mayor longitud y con CF no aceptable se encuentra del km 65+000 al 73+000 con un valor de 0.30, muy similar al carril derecho.

La zona con mayor longitud de valores “Aceptables” de CF se encuentra del kilómetro 101+000 al 307+000 con un valor de 0.6.

La zona con mayor longitud y valores “Bueno” es la única zona del carril izquierdo, y se encuentra del kilómetro 48+000 al 65+000 con un valor de 0.64.

El valor promedio de todo el carril es de 0.59, clasificando como “Aceptable”.

En el Anexo C se pueden consultar con más detalle los resultados expuestos.

A manera de resumen, se realizó la siguiente gráfica, la cual presenta una comparativa del parámetro medido y el porcentaje de aceptación o rechazo.

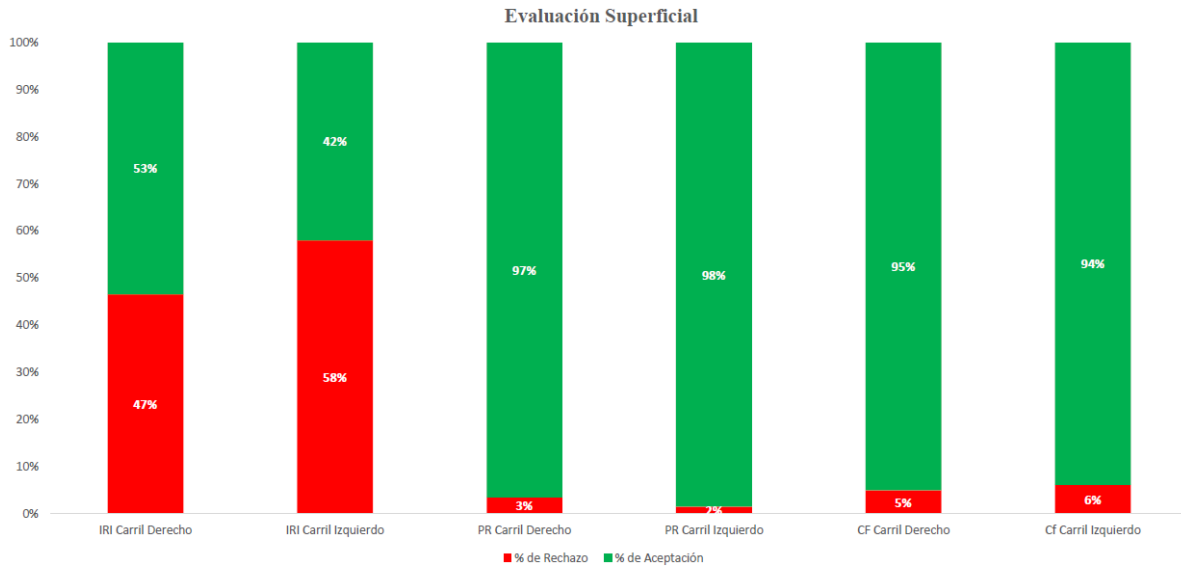


Figura 42 Resumen de evaluación superficial para cada parámetro.

11.5.2. Evaluación estructural.

11.5.2.1. Estudio de geotecnia, sondeos

El objetivo de este estudio es determinar los espesores y tipos de materiales que conforman cada una de las capas del pavimento actual, mediante la perforación al pavimento, además, con ello es posible determinar la calidad de estos materiales en laboratorio.

Se realizaron un total de 53 sondeos en la autopista Pátzcuaro – Lázaro Cárdenas, 26 para el sentido 1 (carril derecho) y 27 para el sentido 2 (carril izquierdo) dichos sondeos fueron realizados “a tresbolillo”, los espesores se reportan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Resultados de los sondeos.

Ubicación (km)	Capas y espesores del pavimento (cm)			
	Carpeta Asfáltica	Base Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante
50+000	13		25	50
55+000	15		30	50
60+000	15		25	50
65+000	15		20	30



Ubicación (km)	Capas y espesores del pavimento (cm)			
	Carpeta Asfáltica	Base Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante
70+000	15		25	50
75+000	15		20	60
80+000	12		20	35
85+000	14		25	55
90+000	15		25	30
95+000	10		20	30
100+000	10	15		20
105+000	5	10		30
110+000	5	15		30
115+000	8	20		30
120+000	8	20		30
125+000	7	20		30
130+000	7	20		30
135+000	5	15		30
140+000	12		25	55
145+000	12		25	60
150+000	12		30	50
155+000	5		30	55
160+000	7		30	55
165+000	12		25	60
170+000	12		25	60
175+000	12		30	55
180+000	7		30	55
185+000	12		25	60
190+000	12		25	60
195+000	7		30	55
200+000	12		30	55
205+000	12		30	55
210+000	8		25	60
215+000	9		30	55
220+000	12		30	55
225+000	12		30	55
230+000	8		25	60
235+000	11		30	55
240+000	8		30	55
245+000	11		30	55
250+000	8		25	60
255+000	8		30	55



Ubicación (km)	Capas y espesores del pavimento (cm)			
	Carpeta Asfáltica	Base Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante
260+000	8		30	55
265+000	11		30	55
270+000	12		25	60
275+000	12		30	55
280+000	12		30	55
285+000	11		30	55
290+000	12		25	60
295+000	20		30	
300+000	17		30	
305+000	12		40	40
310+000	14		30	50

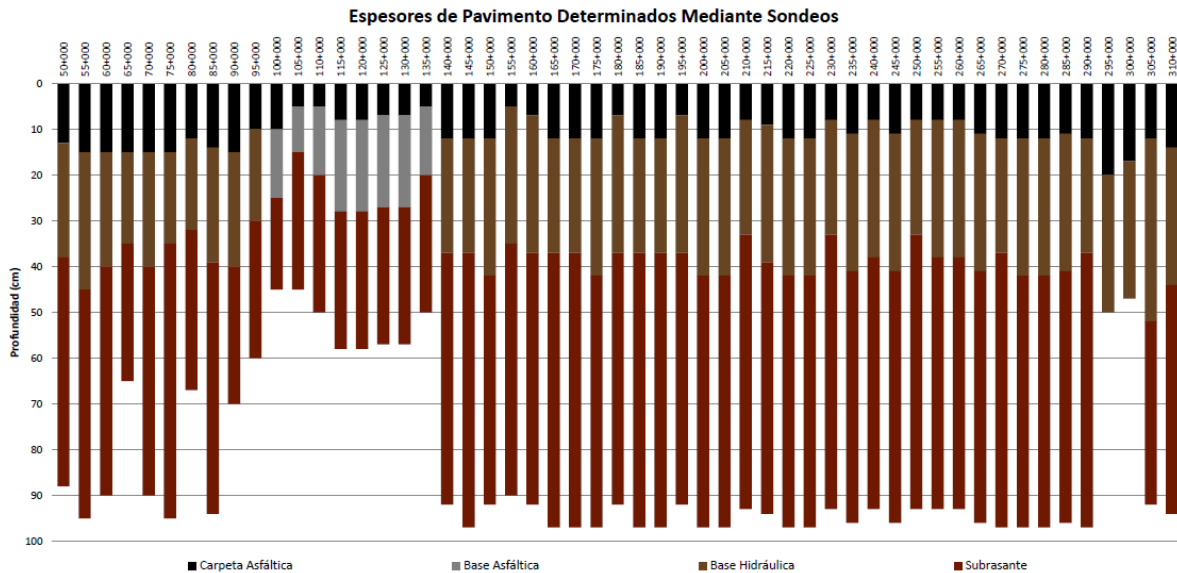


Figura 43 Estratigrafía del pavimento con base en los sondeos.

11.5.2.2. Interpretación y análisis de los resultados.

La estructura que presenta el pavimento, de acuerdo con los resultados de los sondeos, se conforma de la siguiente manera: una carpeta asfáltica de espesor mínimo de 5 cm y máximo de 20 cm, apoyada del kilómetro 100+000 al 135+000 sobre una base estabilizada con asfalto con espesor mínimo de 10 cm y máximo de 20 cm, en los tramos



que no tiene base asfáltica, la carpeta se apoya sobre una base hidráulica con espesor mínimo de 20 cm y máximo de 40 cm, y finalmente, todas las zonas reportaron subrasante con espesor mínimo de 20 y máximo de 60 cm

La base hidráulica se describe en la mayoría de los sondeos como arena limosa con gravas, color café oscuro y una plasticidad media-baja, Tamaño máximo del agregado de 1 ½ pulgadas.

Por otro lado, la subrasante se describe como arena con grava, de color gris, plasticidad baja/sin plasticidad y con un tamaño máximo del agregado de 2 pulgadas.

La capa identificada como terraplén se describe como arena color rojizo-café con plasticidad baja/sin plasticidad.



Figura 44. Sondeo realizado en el km 65+000



Figura 45. Sondeo realizado en el km 115+000

En el kilómetro 115+000 es uno de los cadenamientos donde se encontró base estabilizada con asfalto, en la (Fig. 45) aparece señalada con la flecha color rojo, mientras que la carpeta asfáltica es señalada con una flecha color amarillo.

En los sondeos realizados en el km 295+000 y el km 300+000 se reportó estrato firme (boleos) cuyo espesor no fue obtenido.



Figura 46. Sondeo realizado en el km 300+000

Puede consultarse la fotografía de la muestra obtenida, así como las coordenadas exactas de cada sondeo en el Anexo D.

11.5.2.3. Estudio de geotecnia, espesores continuos determinados con GPR

Como ya se mencionó, una de las principales ventajas que se tiene con un radar de penetración terrestre es que permite determinar con exactitud dónde se encuentran los cambios de la estructura del pavimento, así como la profundidad de las capas.

11.5.2.3.1. Carril derecho

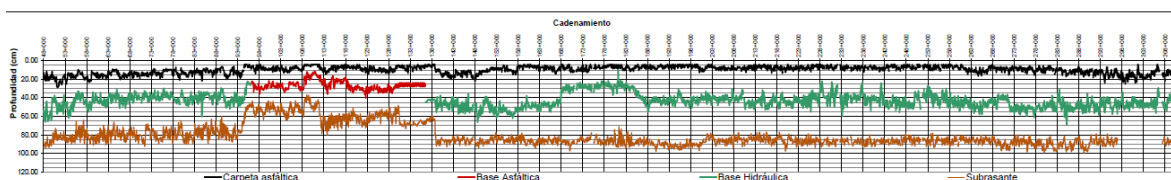


Figura 47 Gráfica de espesores continuos para el carril derecho.



11.5.2.3.2. Carril izquierdo

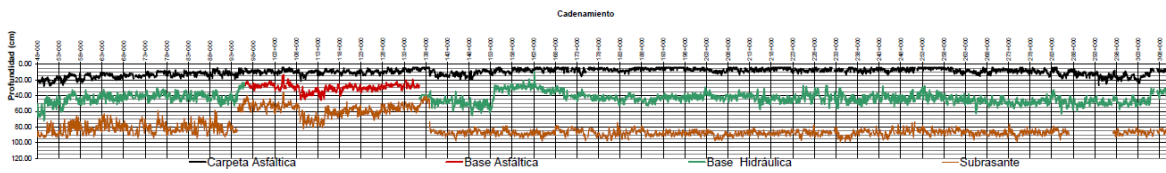


Figura 48 Gráfica de espesores continuos para el carril izquierdo.

11.5.2.4. Interpretación y análisis de los resultados.

Para el carril derecho, de acuerdo con los resultados, se observa que el pavimento se conforma de una carpeta asfáltica con espesor promedio de 9.85 cm, apoyada del kilómetro 96+000 al 136+500 sobre una base asfáltica con espesor promedio de 18.35 cm, en los tramos donde no hay base negra se encuentra una base hidráulica con espesor promedio de 33.08 cm, finalmente se encuentra una capa de subrasante con 40.96 cm de espesor promedio.

Para el carril izquierdo se encontró que el pavimento se conforma de una carpeta asfáltica con espesor promedio de 9.80 cm, apoyada del kilómetro 96+000 al 136+340 sobre una base asfáltica con espesor promedio de 20.22 cm, en los tramos donde no hay base negra se encuentra una base hidráulica con espesor promedio de 33.41 cm, finalmente se encuentra una capa de subrasante con 40.80 cm de espesor promedio.

Para consultar con mayor detalle los resultados obtenidos con el radar de penetración terrestre, así como sus respectivas gráficas, se recomienda acudir al Anexo E



11.5.2.5. Deflexiones

Los resultados de la medición de las deflexiones permiten analizar el tramo evaluado conforme a su capacidad estructural.

Se trazó una línea roja la cual indica el límite establecido por la normativa de la SCT actualmente vigente, esto para facilitar el análisis visual de los resultados, ya que se encuentran graficados los 7 sensores del equipo FWD.

La autopista Pátzcuaro – Lázaro Cárdenas presenta los resultados de las deflexiones medidas se presentan a continuación:

11.5.2.5.1. Carril Derecho

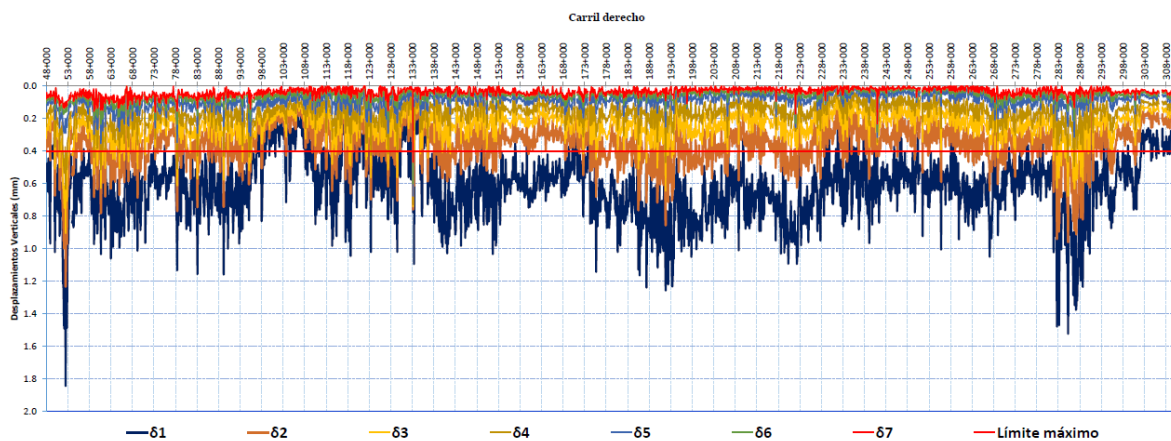


Figura 49 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril derecho.



11.5.2.5.2. Carril izquierdo

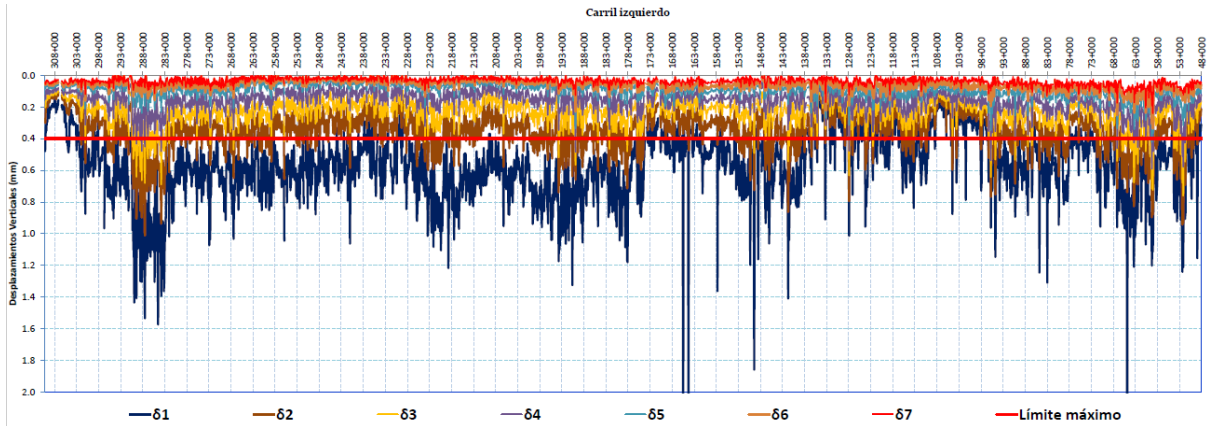


Figura 50 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril izquierdo.

11.5.2.6. Interpretación y análisis de los resultados.

Para el carril derecho, el promedio general es de 0.613 mm, valor que supera el límite establecido por la normativa mexicana para autopistas y corredores carreteros.

El valor mínimo es de 0.069 mm

El valor máximo es de 1.842 mm

Para el carril izquierdo, el promedio general es de 0.567 mm, valor que supera el límite establecido por la normativa mexicana para autopistas y corredores carreteros.

El valor mínimo es de 0.068 mm

El valor máximo es de 2.743 mm

Como puede notarse, para el carril izquierdo en el km 165+000 se reportó un valor de deformación vertical mayor a 2 mm, al igual que en el km 65+000. Estos valores se



deben a que el plato de carga se localizó justo por encima de un agrietamiento en la carpeta asfáltica, sin embargo, no se cuentan con fotos del golpe dado en ningún cadenamiento.

Para consular con los detalles de los resultados obtenidos, se recomienda acudir al Anexo F.

De la misma manera que se realizó en la evaluación superficial, a manera de resumen se generaron los siguientes gráficos.

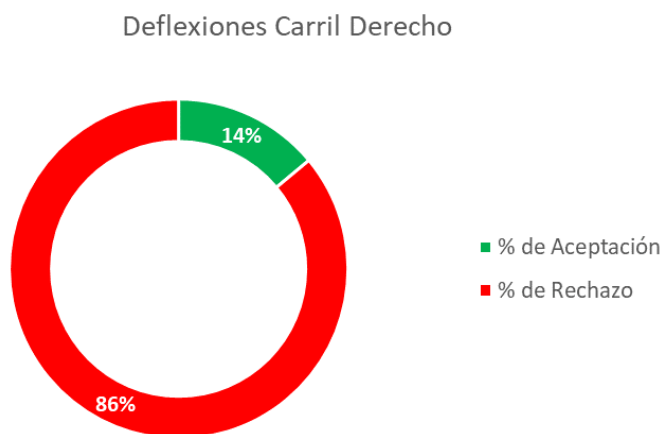


Figura 51 Resumen del porcentaje de aceptación y rechazo para el valor de deflexiones, carril derecho.

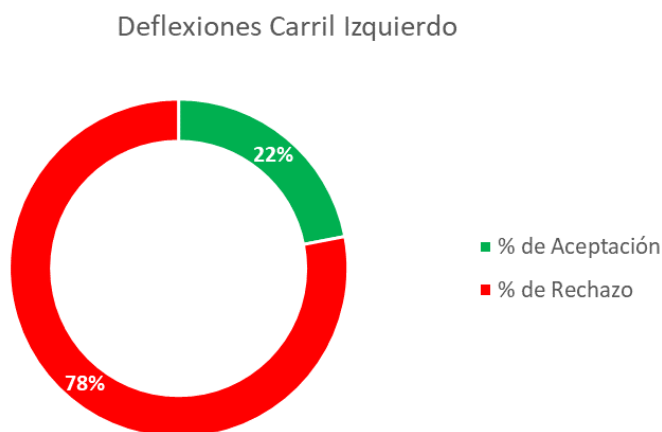


Figura 52 Resumen del porcentaje de aceptación y rechazo para el valor de deflexiones, carril izquierdo.



12. Caso de estudio y discusión de un tramo en la Autopista Pátzcuaro – Lázaro Cárdenas.

Ya que la longitud del tramo analizado es considerablemente grande, se ha elegido un tramo de estudio lo más representativo posible a todo el tramo, en el cual se incluyen cambios de estratos en el pavimento, puentes, casetas y diferentes comportamientos estructurales, esto con la finalidad de presentar, analizar e interpretar los datos obtenidos más a fondo para cada índice.

Para la evaluación superficial, el tramo de estudio comprende del kilómetro 56+000 al 66+000 para ambos carriles, se eligió dicho tramo ya que es aquí donde se presentan los valores máximos, de IRI y PR, por lo que resulta interesante analizar con mayor detalle la razón de estos valores elevados.

Para la evaluación estructural, el tramo analizado se encuentra acotado del kilómetro 90+000 al 105+000, ya que aquí se localizó un cambio en las capas del pavimento



12.1. Evaluación superficial

12.1.1. Índice de Regularidad Internacional (IRI).

12.1.1.1. Carril derecho.

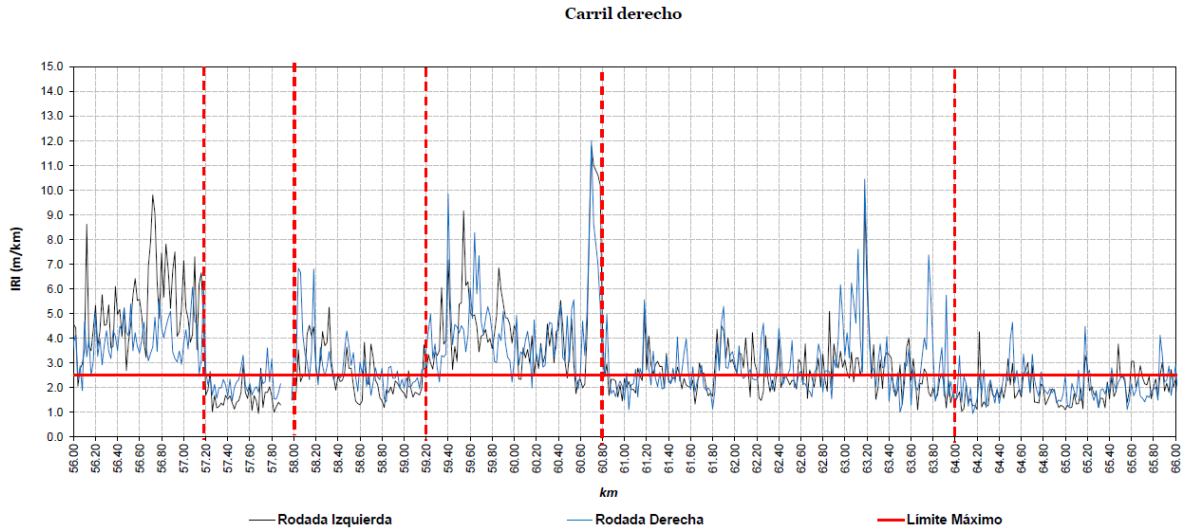


Figura 53 Gráfica de valores de IRI y zonificación por tramos para el carril derecho.

12.1.1.2. Carril Izquierdo

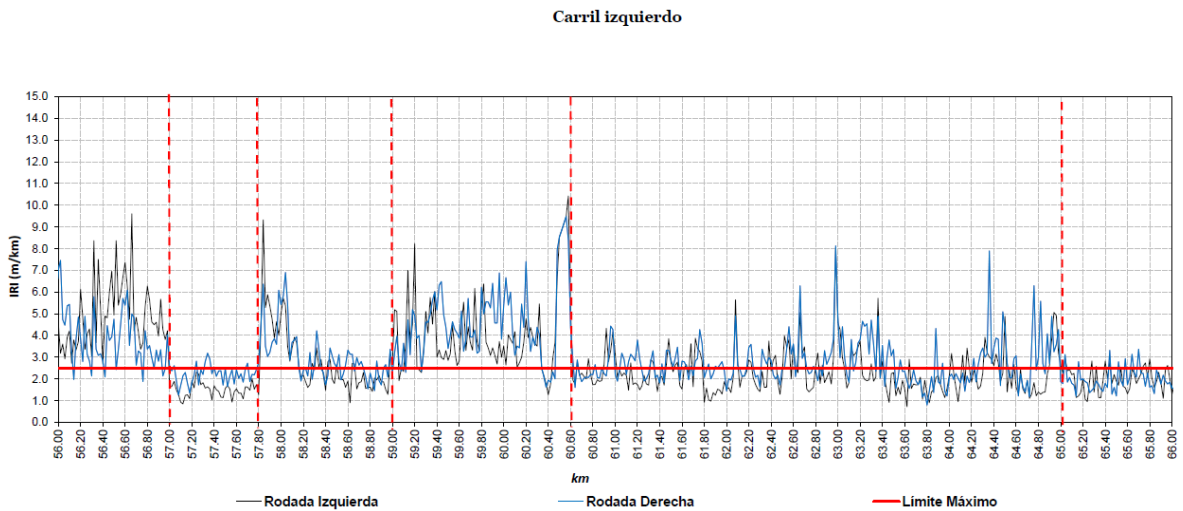


Figura 54 Gráfica de valores de IRI y zonificación por tramos para el carril izquierdo.



12.1.1.3. Interpretación y análisis de los resultados.

Respecto a los valores de IRI, con un análisis de 10 kilómetros resulta más fácil apreciar en qué zonas se presentan valores aceptables o no de dicho índice, recordando que el límite es de 2.5 m/km. En las siguientes tablas se muestran los promedios de ambas rodadas para cada una de las zonas que presentan un comportamiento similar.

Para fines prácticos, se colocaron líneas rojas discontinuas para ejemplificar la zona que se ha seleccionado. (Figuras 53 y 54).

Tabla 12. Zonificación por tramos homogéneos con respecto al parámetro IRI

Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud (m)	IRI	Del km	Al km	Longitud (m)	IRI
56+000	57+200	1200	4.52	56+000	57+000	1000	4.36
57+200	58+000	800	1.87	57+000	57+800	800	1.85
58+000	60+800	2800	3.69	57+800	59+000	1200	2.95
60+800	64+000	3200	2.79	59+000	60+600	1600	4.32
64+000	66+000	2000	2.00	60+600	65+000	4400	2.53

Para el carril derecho, el valor medio máximo es de 4.52 m/km y se encuentra acotado del kilómetro 56+000 al 57+200.

El valor medio mínimo es de 1.87 m/km localizado del kilómetro 57+200 al 58+000.

Para el carril izquierdo, el valor medio máximo es de 4.36 m/km y se encuentra del kilómetro 56+000 al 57+000.

El valor medio mínimo es de 1.85 m/km localizado del kilómetro 57+000 al 57+800.



Ambos carriles tienen un comportamiento similar, del 56+000 al 57+200 cuentan con valores no aceptables, luego, una zona de 800 metros con valores aceptables, después, vuelven a registrarse datos elevados, resulta importante mencionar que, en ambos carriles, en el km 60+500 se tiene un “pico” en la gráfica.



Figura 55. Vista del km 56+220. Agrietamiento severo en ambas rodadas.

De igual manera, una de las causas posibles de que se hayan reportado valores altos puede deberse al estado superficial de la carretera, el cual puede verse ya deteriorado. (Figura 55 y 56).



Figura 56. Vista del km 56+260. Agrietamiento severo en ambas rodadas, bombeo de finos en la rodada derecha.

Como ya fue mencionado, ambos carriles presentan un valor muy elevado en el km 60+500. En la figura 57 se muestra dónde es ese punto.



Figura 57. Vista del km 60+500. Caseta de cobro

Esta es la razón del porqué se debe tener una depuración de los datos, para fines de la explicación, no se eliminaron los datos de esta caseta de cobro, haciendo así que en la



gráfica aparecieran datos elevados, por lo tanto, se concluye que los valores elevados en la gráfica de ambos carriles en este punto son debidos al cruce de la caseta de cobro.

12.1.2. Profundidad de Rodera (PR).

12.1.2.1. Carril Derecho.

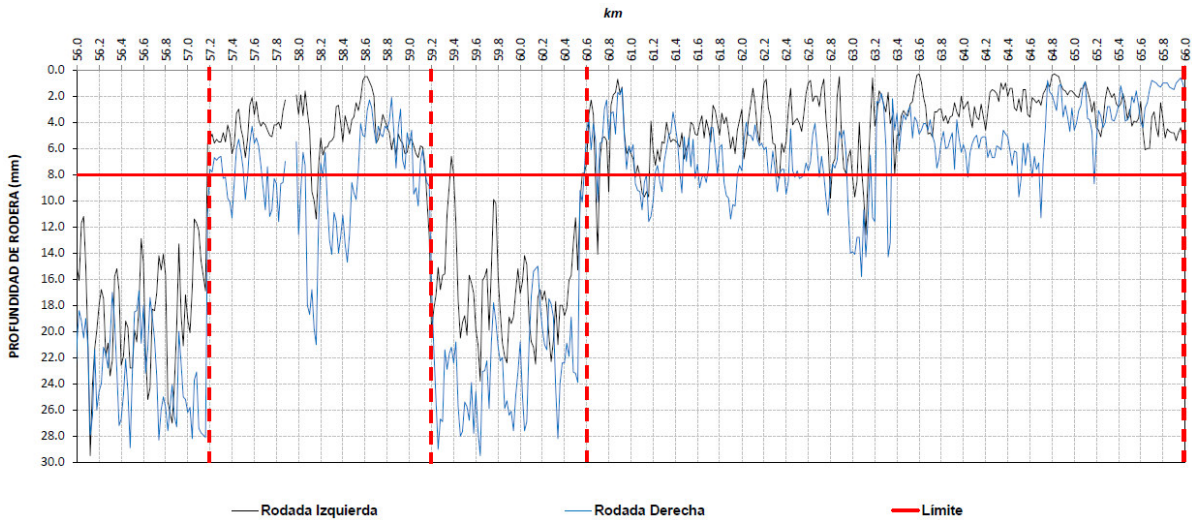


Figura 58 Gráfica de valores de PR y zonificación por tramos para el carril derecho.

12.1.2.2. Carril Izquierdo

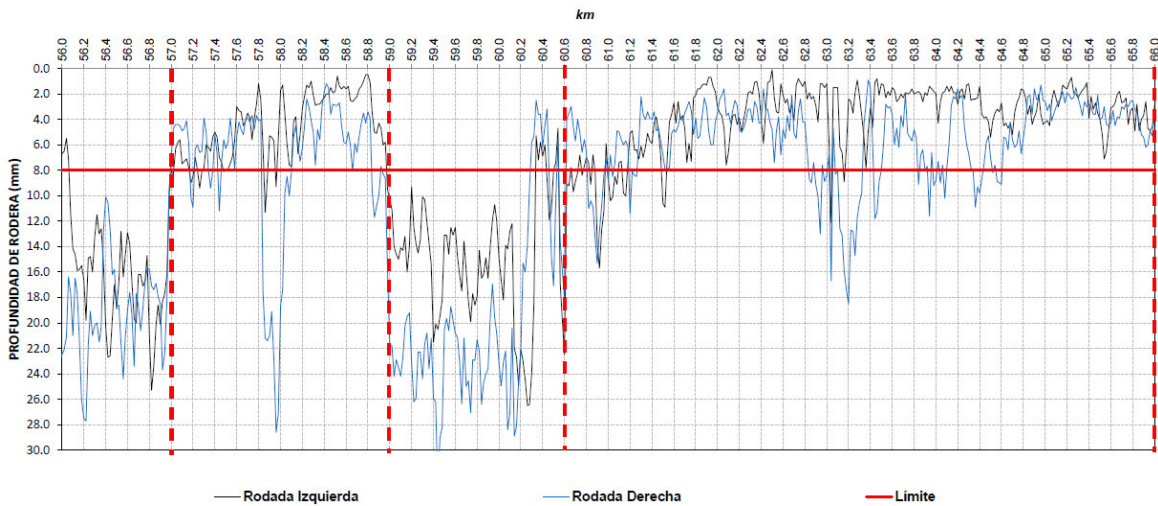


Figura 59 Gráfica de valores de PR y zonificación por tramos para el carril izquierdo.



Como se observó cuando se presentaron los datos del km 48+000 al 310+000, sólo algunos casos aislados presentaban valores por encima del límite de aceptación, con un análisis más acotado del tramo se podrá revisar con más precisión estas zonas. De la misma manera, se dibujaron líneas verticales intermitentes para delimitar los tramos.

Tabla 13. Zonificación por tramos homogéneos con respecto al parámetro PR

Carril derecho				Carril izquierdo			
Del km	Al km	Longitud	PR	Del km	Al km	Longitud	PR
56+000	57+200	1+200	20.82	56+000	57+000	1+000	17.47
57+200	59+200	2+000	6.51	57+000	59+000	2+000	6.01
59+200	60+600	1+400	19.54	59+000	60+600	1+600	17.58
60+600	66+000	5+400	4.85	60+600	66+000	5+400	4.71

Para el carril derecho, el valor medio máximo es de 20.82 mm y se encuentra del cadenamiento 56+000 al 57+200.

El valor medio mínimo es de 4.85 mm localizado del cadenamiento 60+600 al 66+000.

Para el carril izquierdo, el valor medio máximo es de 17.58 mm y se encuentra del cadenamiento 59 al 60+600

El valor medio mínimo es de 4.71 mm localizado del cadenamiento 60+600 al 66+000.

En el caso de la Profundidad de Rodera, los tramos que son necesarios analizar con más detalle son del cadenamiento 56+000 al 57+000 para ambos carriles, después, se tiene una zona de aceptación exceptuando un valor muy elevado en el km cadenamiento 57+900, y posteriormente se vuelven a elevar los valores del 59+000 al 60+600. Para finalizar se tiene un comportamiento cerca del límite.



Figura 60 Vista del km 56+830.

En la (Fig. 60 y 61) se puede apreciar una deformación del pavimento.



Figura 61 Cadenamiento 57+900



Figura 62. Vista del 59+120

Se aprecian deformaciones en el pavimento aún más notorias. (Fig. 62 y 63)



Figura 63. Vista del km 59+700

Como se sabe, las cargas con velocidades bajas y tiempos largos son más críticas para un pavimento, por lo que las roderas en esa zona pueden ser debido a que en el km 60+400 hay una caseta de cobro, y debido al tránsito lento que el proceso de cobro genera,



puede que el pavimento en esta zona se encuentre sometido a esfuerzos mayores que las zonas anteriores y posteriores a este punto, lo que se traduce en mayores deformaciones en la superficie de rodamiento.



Figura 64. Vista del km 60+300. Caseta de cobro.

12.1.3. Coeficiente de fricción (CF)

Para este índice, la sección del tramo de análisis se aumentó hasta el km 73+000 ya que de esta manera se abarcan todos los casos de fricción en el pavimento.



12.1.3.1. *Ambos carriles*

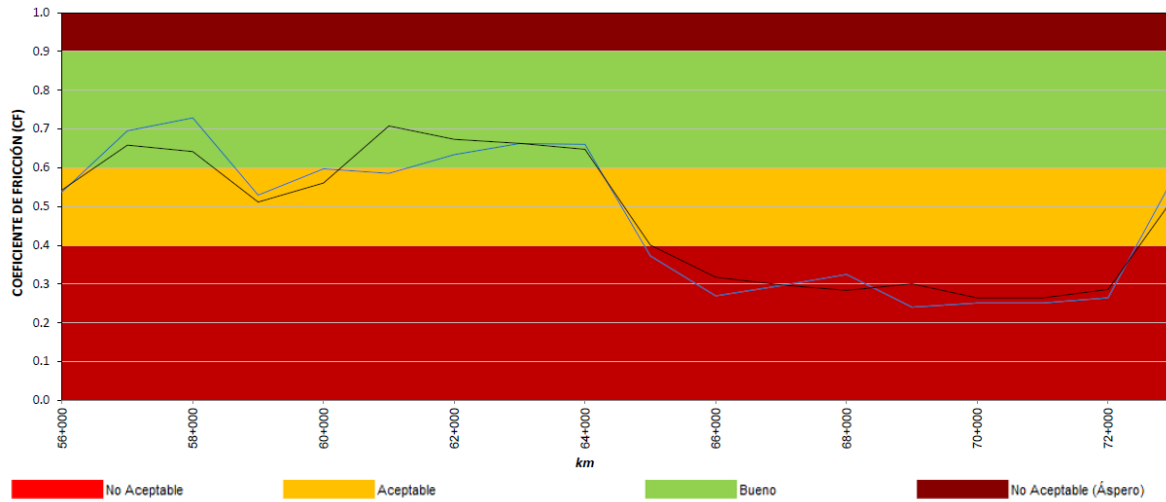


Figura 65 Gráfica de valores del coeficiente de fricción para ambos carriles

En las siguientes tablas se muestran los promedios de ambas rodadas para cada una de las zonas que presentan un comportamiento similar.

Tabla 14. Zonificación por tramos homogéneos para el parámetro de CF

Ambos carriles			
Del km	Al km	Longitud	CF
56+000	64+000	8+000	0.62
64+000	65+000	1+000	0.60
65+000	73+000	8+000	0.29

Al observar la gráfica (Figura 62) el valor del coeficiente de fricción se ve drásticamente reducido a partir del km 65+000.



Figura 66 Vista del km 63+000

Según los datos recolectados, en esta zona se tiene un valor “Bueno” de Coeficiente de fricción, y concuerda con lo observado en la imagen (Fig. 66)



Figura 67 Vista del km 64+500

La textura del pavimento se nota un poco más desgastada y erosionada, los datos registran un valor que clasifica como “aceptable”.



Figura 68 Vista del km 65+500

Se aprecia desgastada o “pulida” la superficie del pavimento.

Los resultados del coeficiente de fricción dependen en gran medida de qué tan abierta está la textura superficial y de la microtextura del agregado, por lo que se puede intuir que el resultado del CF es una combinación de ambos factores,

Un agregado pétreo calizo es más vulnerable al pulimiento de la superficie y por lo tanto arrojaría un coeficiente de fricción bajo, en cambio, un agregado de origen ígneo, como un basalto, no es susceptible al pulimiento y brinda una microtextura adecuada para un coeficiente de fricción aceptable.

12.2. Evaluación estructural

12.2.1. Estudio de geotecnia, sondeos

Como ya fue mencionado, se acotó justo en el tramo donde el pavimento presenta un cambio en su estructura.

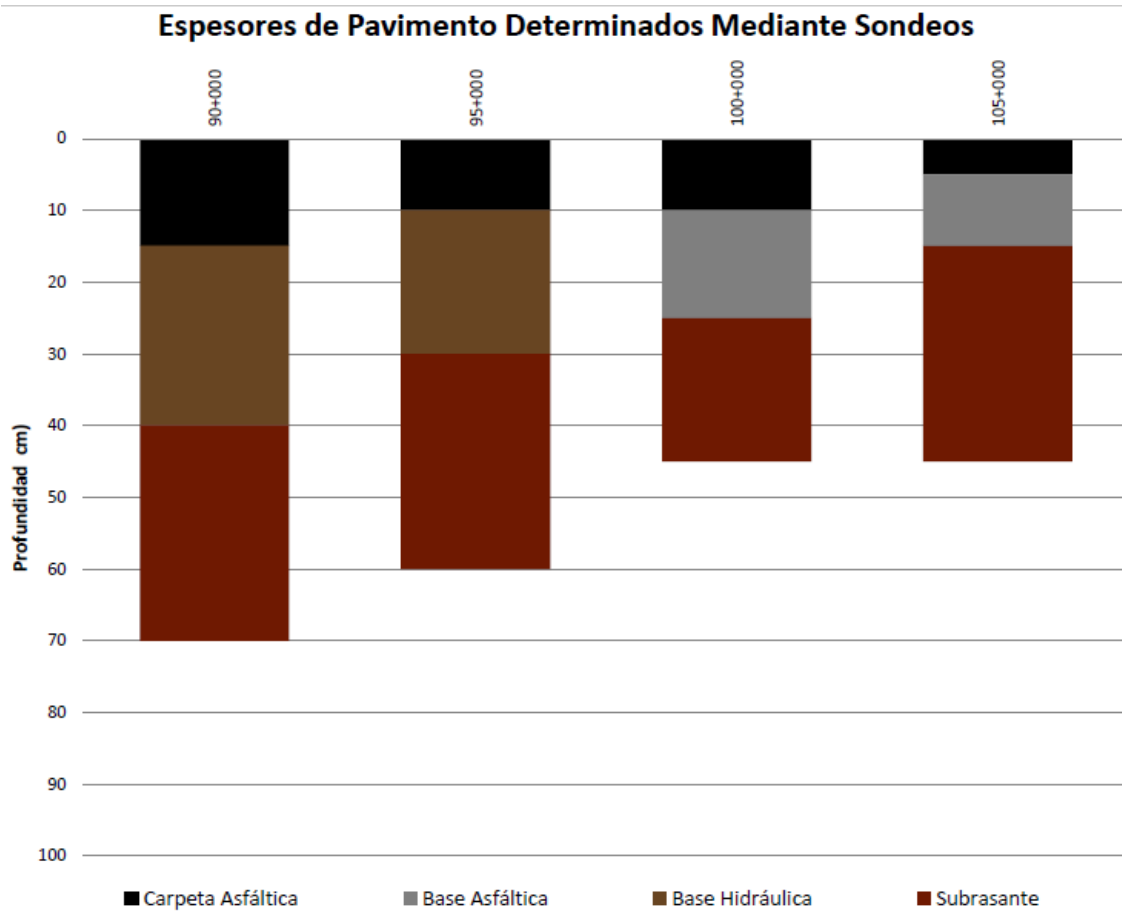


Figura 69 Representación estratigráfica del pavimento obtenida mediante sondeos.

Para saber dónde se encuentra exactamente el cambio de base hidráulica a base asfáltica, es necesario analizar los resultados del radar de penetración terrestre.

Asimismo, la descripción del suelo encontrado ya fue expuesta.



12.2.2. Espesores continuos determinados con GPR

12.2.2.1. Carril derecho

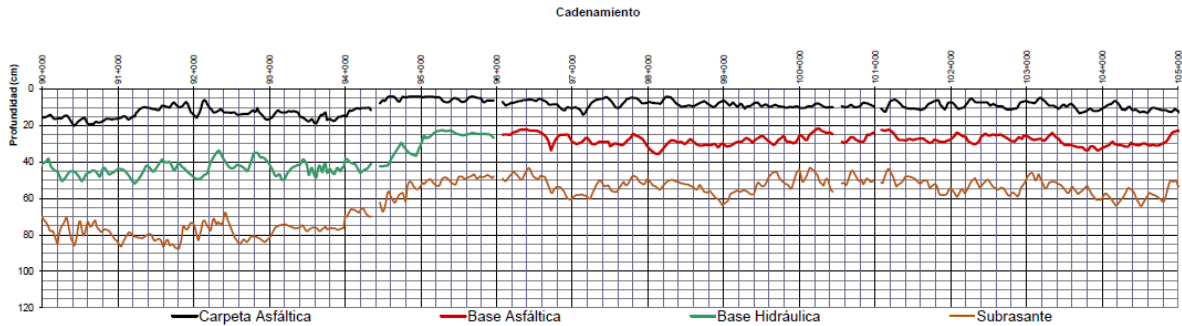


Figura 70 Gráfica de espesores continuos determinados con GPR para el carril derecho.

De acuerdo con los resultados, se observa que el cambio se produce en el km 96+000

12.2.2.2. Carril izquierdo

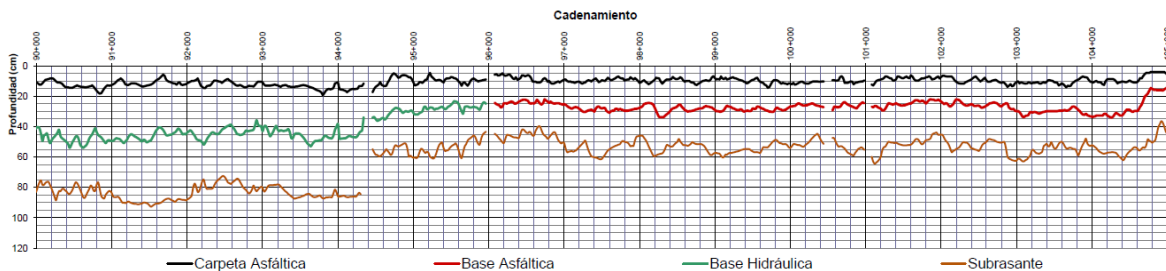


Figura 71 Gráfica de espesores continuos determinados con GPR para el carril izquierdo.

Para el carril izquierdo, se tiene el cambio de base hidráulica a base asfáltica en el mismo punto que el carril derecho.

Es necesario mencionar que justo en el km 96+000 existe un puente, por lo que este es el punto donde se hace el cambio, del km 46+000 hasta el km 96+000, se tiene la estructura de Carpeta, Base hidráulica y subrasante, luego después del puente, presenta Carpeta, Base asfáltica y subrasante.



Figura 72. Vista del puente ubicado en el km 96+065

12.2.3. Deflexiones

12.2.3.1. Carril Derecho

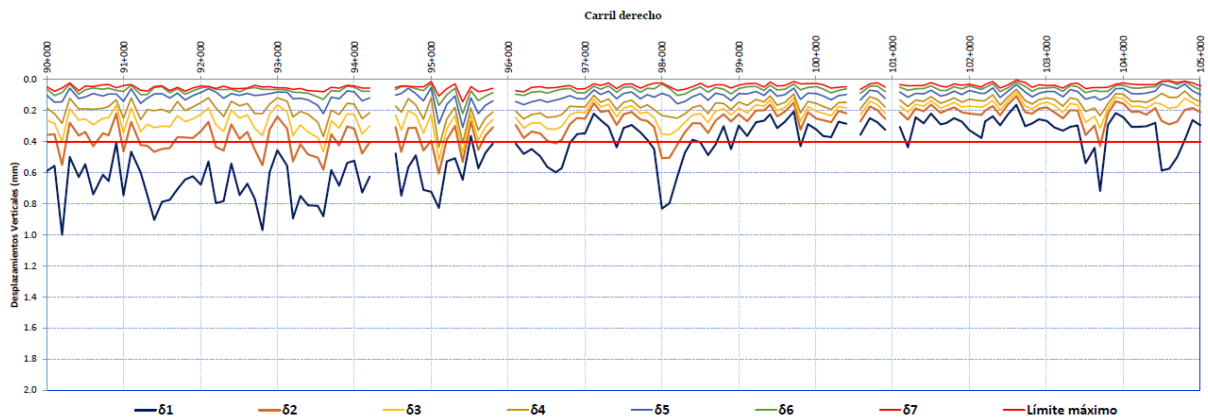


Figura 73 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril derecho.

Para el carril derecho del tramo de análisis, el promedio general es de 0.475 mm, valor que supera el límite establecido por la normativa mexicana para autopistas y corredores carreteros.



Es importante notar cómo las deflexiones son más bajas donde se reporta la base estabilizada con asfalto, el promedio del valor de la deflexión del km 90+000 al 96+000 es de 0.652 mm, mientras que el tramo del 96+000 al 105+000 es de 0.360 mm. Como es de esperarse, el tramo que presenta dicha base estabilizada tiene un mejor comportamiento estructural.

Las zonas que no tienen valor de deflexiones es debido a que se registró alguna incidencia.

12.2.3.2. Carril izquierdo

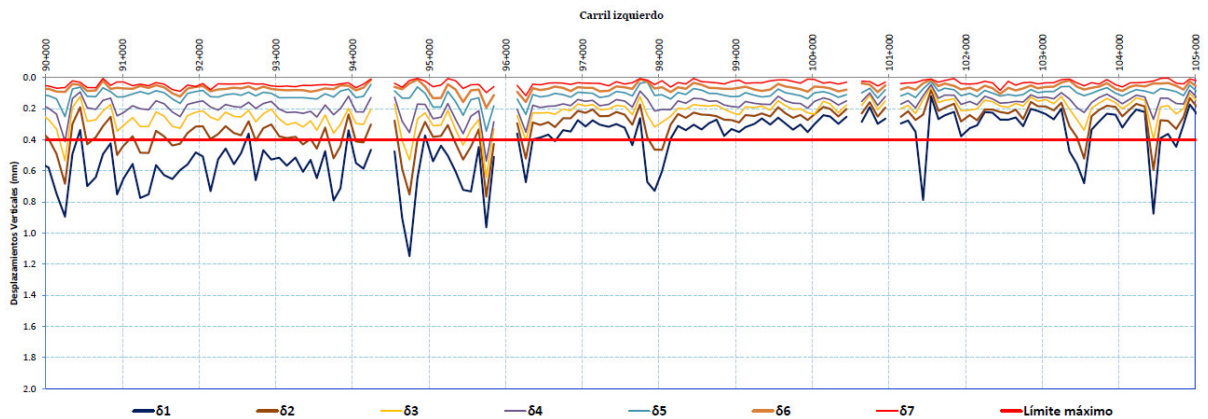


Figura 74 Gráfica del desplazamiento vertical medido en el carril izquierdo.

Para el carril izquierdo del tramo de análisis, el promedio general es de 0.438 mm, de igual forma, este valor que supera el límite establecido por la normativa propuesta por la SCT para autopistas y corredores carreteros.

De la misma manera que el carril derecho, es notorio el cambio en el valor de deflexiones donde se reporta la base estabilizada con asfalto, el promedio del valor de la deflexión del km 90+000 al 96+000 es de 0.593 mm, mientras que el tramo del 96+000 al 105+000 es de 0.335 mm.





13. Recomendaciones generales para la conservación

Para los tramos que presentan valores elevados del IRI y de la PR, se recomienda para su corrección, un fresado superficial con corrección del perfil y colocación de una nueva carpeta asfáltica. De esta manera, se verán mejorados los valores de dichos parámetros.

Con respecto a las zonas que reportan un coeficiente de fricción fuera de los rangos de aceptación, se propone un tratamiento superficial, como puede ser la aplicación de riegos de sello o la colocación de una microcarpeta

Es importante mencionar que para las zonas que presentan un desgaste ligero a nivel de carpeta, como lo pueden ser grietas menores a 3mm, indentación, entre otros desgastes superficiales, se recomienda como acción de conservación un bacheo superficial, en el cual se de atención a estos deterioros.

El bacheo profundo será necesario cuando el deterioro ya ha causado estragos en las capas inferiores a la carpeta asfáltica, como lo puede ser un agrietamiento tipo piel de cocodrilo con bombeo de finos.

La reconstrucción total del pavimento es la opción cuando se presenta una falla generalizada tanto superficial como estructural y los ejes equivalentes requeridos no podrán ser soportados por la estructura existente. (Serrano Torres, 2018).



14. Matriz guía de acciones de conservación.

Durante la realización del presente trabajo, se destacó la ausencia de algún instrumento capaz de determinar las acciones necesarias aplicables después de una auscultación carretera, las guías existentes son enfocadas al ingeniero civil, o en su caso, al personal familiarizado con el lenguaje y los procedimientos sin embargo, uno de los objetivos principales de la creación de la matriz es que sea de fácil entendimiento y sencilla aplicación ya que, los encargados de la toma de decisiones en su mayoría son profesionistas que no se encuentran muy relacionados con el tema.

Resulta sumamente importante mencionar que el uso de la matriz es meramente académico, requiere de criterio y experiencia del usuario, es, por ahora, puramente de carácter orientativo al usuario y está sujeta a discusión.

La matriz creada es una guía para la planeación de la conservación carretera, una herramienta útil y funcional para la toma de decisiones rápidas la cual ayuda a obtener un panorama general de la inversión inicial en cuanto a costo y tiempo de una determinada alternativa seleccionada.

Para que el programa funcione correctamente, el libro de Excel y la carpeta nombrada “Información” deben estar juntas en una misma carpeta, y el archivo debe estar habilitado para macros.


14.1. Uso del programa

Al abrir el archivo, la pestaña Presentación cuenta con una breve introducción a la conservación carretera, el usuario debe hacer clic en el botón “Iniciar” el cual ejecutará el macro correspondiente.



Se abrirá una ventana emergente la cual consta de 3 pestañas, la primera pestaña es la caratula, esta es la bienvenida al usuario.

La siguiente pestaña “Condiciones”, cuenta con 9 preguntas y sus correspondientes cuadros de respuesta.

Si el usuario tiene duda sobre algún parámetro, puede hacer clic en el botón de información  para que sea re-direccionado a una muy breve descripción del parámetro al cual se hace referencia.

Es importante mencionar que la profundidad de rodera (PR) no es medida en pavimentos de concreto hidráulico (rígidos), por lo que, para esta pregunta, siempre debe considerarse que sí cumple con dicho parámetro.

Habiendo respondido las preguntas, el botón “comenzar” transporta al usuario a la siguiente pestaña, la única pregunta en esta ventana debe ser respondida para luego hacer clic en el botón “aceptar”, el cual ejecutará el macro correspondiente para mostrar los resultados.

La opción “por parámetros” presentará los resultados conforme a las acciones que corrigen el mayor número de parámetros posibles. La opción “por economía” mostrará los resultados en orden de la acción que resulta más costosa, e irá descendiendo hasta la más económica.



14.2. Resultados.

La parte superior de la hoja de resultados muestra las respuestas que el usuario eligió para cada pregunta.

En la parte central se presentan las acciones de conservación, se marca con una “X” los parámetros que corrige dicha acción.

A un costado, se puede ver el precio, la durabilidad, la definición y las observaciones de cada acción de conservación.

14.3. Ejemplo y consideraciones especiales

Las abreviaciones de los parámetros utilizadas en la pestaña de resultados son:

- IRI. Índice de Regularidad Internacional.
- PR. Profundidad de Rodera.
- CF. Coeficiente de fricción
- PMT. Profundidad de macrotextura
- DEF. Deflexiones.
- DET SUP. Deterioro superficial.
- DET INF. Deterioro en las capas inferiores del pavimento.
- + VIDA. Aumento en la capacidad estructural del pavimento, como consecuencia, aumenta o prolonga la vida remanente.



Para el siguiente caso hipotético:

RESPUESTAS DEL USUARIO	
PARAMETRO	CONDICIÓN
¿El pavimento es Rígido (Concreto Hidráulico) o Flexible (Asfalto)?	Rígido
¿Cumple con el Índice de Irregularidad Internacional?	SI
¿Cumple con la Profundidad de Rodera?	SI
¿Cumple con el Coeficiente de Fricción?	SI
¿Cumple con la Profundidad de Macro Textura?	SI
¿Cumple con las Deformaciones Verticales (Deflexiones)?	NO
¿Presenta deterioros del tipo superficial	SI
¿Presenta deterioros del tipo profundo	SI
¿Tiene una vida remanente mayor a 5 años?	NO

Se tiene las siguientes acciones (se eligió el criterio “por parámetros”):

	Parámetro que corrige						
	IRI	PR	CF	PMT	DEF	DET SUP	DET INF + VIDA
14							
15							
16							
17	Acción de conservación						
18							
19	X	X	X	X	X	X	X
20							
21							
22	X	X	X	X	X	X	X
23							
24							
25	X	X	X	X	X		X
26							
27							
28	X	X	X	X	X		X
29							
30							
31	X	X	X		X		

En este caso, el Rubblizing corregirá las deflexiones, el deterioro superficial y profundo del pavimento, adicionalmente, dará un aporte estructural, lo cual conlleva a un aumento en la vida remanente del pavimento, sin embargo, esta técnica también corrige el IRI y el coeficiente de fricción y la profundidad de macrotextura, Se muestra en color rojo los parámetros que se tiene que corregir (los cuales el usuario especificó que no cumplen) y



en negro quedan aquellos parámetros que también se verán afectados si se elige cierta acción, pero que no necesitan corrección.

Es importante que el usuario tome en cuenta que cuando 2 acciones corrigen los mismos parámetros, (como lo es el ejemplo anterior con el Rubblizing y la reconstrucción del pavimento) se da prioridad a la acción con menor costo.

14.4. Consideraciones sobre los costos de las acciones de conservación.

Se muestran a continuación las descripciones de las acciones de conservación que fueron consideradas para asignarles su respectivo precio.



14.4.1. Concepto y descripción para la matriz de pavimento flexible (asfáltico).

Concepto	Descripción	Unidad	Precio
Sellado de fisuras	Sellado de grietas aisladas en carpeta asfáltica con mortero asfáltico hasta de 1 centímetro de abertura, para cualquier profundidad. P.U.O.T.	m	\$ 78.25
Riego de sello	Capa de rodadura de dos riegos con emulsión de rompimiento rápido, con material de bancos que elija el contratista y acarreos P.U.O.T.	m ³	\$ 65.32
Relleno de grietas	Sellado de grietas aisladas en carpeta asfáltica con cemento asfáltico hasta de 1 centímetro de abertura, para cualquier profundidad. P.U.O.T.	m	\$ 73.16
Riego asfáltico	Capa de rodadura de mortero de cemento asfáltico AC-20 con material de bancos que elija el contratista, incluyendo acarreos. P.U.O.T.	m ³	\$ 1,968.93
Renivelaciones locales con mezcla asfáltica	Renivelaciones locales en pavimentos asfálticos. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,752.29
Bacheo superficial aislado	Bacheo superficial aislado con mezcla asfáltica en caliente. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,272.01
Bacheo profundo	Bacheo profundo aislado. Reposición de la carpeta asfáltica, con mezcla asfáltica en caliente. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,272.01
Fresado superficial y reciclado de carpeta	Fresado de la superficie de rodadura en pavimentos asfálticos. P.U.O.T.	m ³	\$ 110.32
Colocación de sobrecarpeta asfáltica (> 5 cm)	Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de banco que elija el contratista incluyendo	m ³	\$ 2,752.00
Mezcla Asfáltica tipo SMA	Capa de rodadura de granulometría discontinua tipo SMA. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,655.29
Colocación de microcarpeta tipo CASAA	Capa de rodadura de granulometría discontinua tipo CASAA. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,810.72
Slurry Seal y Microaglomerado		m ³	\$ 74.94
Recuperación en frío con emulsión asfáltica	Recuperación en frío de pavimento asfáltico conforme a lo indicado en el proyecto. P.U.O.T.	m ³	\$ 1,588.78
Reconstrucción del pavimento	La reconstrucción del pavimento contempla construcción de subbase y base hidráulica, base estabilizada con asfalto y carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa, todas con sus respectivas especificaciones.	m ³	\$ 2,248.17



14.4.2. Concepto y descripción para la matriz de pavimento rígido (concreto hidráulico)

Concepto	Descripción	Unidad	Precio
Sellado de fisuras	Sellado de grietas aisladas en carpeta asfáltica con mortero asfáltico hasta de 1 centímetro de abertura, para cualquier profundidad. P.U.O.T.	m	\$ 78.25
Renivelaciones locales con mezcla asfáltica	Renivelaciones locales de la superficie de rodamiento. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,752.00
Reparación de desconchaduras en	Reparación de desconchaduras en losas de concreto hidráulico. P.U.O.T.	m ³	\$ 73.43
Sustitución total o parcial de losas de concreto hidráulico.	Reposición total o parcial de losas de concreto hidráulico. P.U.O.T.	m ³	\$ 4,496.83
Colocación de sobrecarpeta asfáltica (> 5 cm)	Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de banco que elija el contratista incluyendo	m ³	\$ 2,752.00
Colocación de microcarpeta tipo CASAA	Capa de rodadura de granulometría discontinua tipo CASAA. P.U.O.T.	m ³	\$ 2,810.72
Trituración/Pulverización del concreto (rubblizing)	Microfracturación del concreto con máquina especializada y recapado de 23 cm de espesor.	m ²	\$ 664.83
Reconstrucción del pavimento	La reconstrucción del pavimento contempla construcción de subbase, base estabilizada con cemento y colocación del concreto hidráulico como capa de rodadura, todas con sus respectivas especificaciones.	m ³	\$ 4,567.71

Los precios de todos los conceptos (con excepción del rubblizing y el Slurry seal) fueron obtenidos del tabulador de precios proporcionado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publicado en el 2016. El costo de la micro-fracturación del concreto hidráulico (Rubblizing) fue obtenido de un artículo de revista especializada. (Thenoux, González, & González, 2004), por otro lado, el precio del Slurry seal fue proporcionado por una empresa constructora la cual prefirió que su nombre no fuese publicado.

Los precios mostrados en la matriz no fueron afectados por el factor de interciudad ya que ese factor era aplicable para el año 2016, sin embargo, dado que son precios de 2 años atrás, fueron afectados por la tasa de inflación en México para la cual se consideró un periodo de junio de 2016 a julio de 2018, arrojando una inflación de 11.85%, y un promedio de inflación mensual de 0.45%. Para el precio de rubblizing, se consideró un periodo de diciembre del 2014 a julio del 2018 arrojando una inflación del 14.59% y un



promedio de inflación mensual de 0.32%. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

Para el concepto de reconstrucción del pavimento, se considera una estructura “típica” para cada tipo de pavimento, sin embargo, el costo sufrirá variaciones conforme a la estructura que el proyectista especifique.

Es importante mencionar que puede existir una variación significativa del precio obtenido entre lo que se obtuvo del tabulador y lo que puede llegar a costar considerando los costos indirectos (precio unitario).



15. Conclusiones

Conservación carretera queda definida como: Preservar una carretera en buen estado o en una situación óptima para evitar su degradación. Mientas que auscultación de pavimentos se define como el procedimiento por el cual se evalúa en qué condiciones se encuentra una infraestructura, cuando está en uso o en condiciones de estarlo, y sin interferir demasiado con los usuarios normales de la infraestructura.

Ya que la infraestructura carretera es una parte fundamental para el desarrollo y funcionamiento de la economía de un país, es de suma importancia ofrecer una red carretera en óptimas condiciones, debido al aporte económico y social que esto representa, trayendo consigo un beneficio sustancial al usuario (y a las zonas geográficas que ésta conecta). Pavimentos deteriorados y en malas condiciones se traducen a grandes rasgos en pérdidas, tanto humanas como materiales. Es por eso que la conservación carretera resulta ser tan importante.

La auscultación de pavimentos resulta pues, una poderosa herramienta ya que permite contar con información sobre el estado en que se encuentra el pavimento en el momento de la realización de las pruebas, y con esto, da la posibilidad de tomar decisiones con un adecuado fundamento y con un grado de certidumbre relativamente elevado.

Los parámetros auscultados y evaluados en el presente trabajo fueron: índice de regularidad internacional (IRI por sus siglas en inglés), profundidad de rodera, coeficiente de fricción, deformaciones verticales (deflexiones). Es importante mencionar que, adicionalmente, se realizaron sondeos para determinar la estratigrafía del pavimento, y dicho estudio se complementa con la determinación de espesores mediante el radar de



penetración terrestre (GPR), asimismo, se realizó un inventario de deterioro superficial, el cual es determinante para la toma de decisiones con respecto al tratamiento de conservación al que se someterá el pavimento.

La evaluación superficial queda resumida en la siguiente tabla.

Tabla 15 Resultados de la evaluación superficial.

	Longitud de aceptación (km)	Longitud de rechazo (km)	Porcentaje de aceptación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
IRI Carril Derecho	140	122	53%	47%
IRI Carril Izquierdo	110	152	42%	58%
PR Carril Derecho	253	9	97%	3%
PR Carril Izquierdo	258	4	98%	2%
CF Carril Derecho	249	13	95%	5%
CF Carril Izquierdo	246	16	94%	6%

Por otro lado, la evaluación estructural queda resumida en la siguiente tabla.

Tabla 16 Resultados de la evaluación estructural.

	Golpes en rango de aceptación.	Golpes en rango de rechazo.	Porcentaje de aceptación (%)	Porcentaje de rechazo (%)
DEF Carril Derecho	361	2223	11%	86%
DEF Carril Izquierdo	568	2016	22%	78%

Con base en los resultados, se concluye que el pavimento no presenta ningún parámetro que cumpla cabalmente con la normativa, por lo que es necesario realizar trabajos de conservación para corregir dichos parámetros, destacando la corrección del Índice de Regularidad Superficial y el aumento de su capacidad estructural.

Durante la realización del presente trabajo, se destacó la ausencia de algún instrumento capaz de determinar las acciones necesarias aplicables después de una



auscultación carretera, las guías existentes son enfocadas al ingeniero civil, o en su caso, al personal familiarizado con el lenguaje y los procedimientos, sin embargo, uno de los objetivos principales de la creación de la matriz es que sea de fácil entendimiento y sencilla aplicación ya que, los encargados de la toma de decisiones en su mayoría son profesionistas que no se encuentran muy relacionados con el tema.

Es importante mencionar que la matriz generada contempla parámetros que no fueron medidos en el presente trabajo, (profundidad de macrotextura y vida remanente del pavimento), sin embargo, la inclusión de dichos parámetros fortalece la matriz y abarca más posibilidades de combinaciones de resultados, lo que se traduce en una herramienta más útil.

Asimismo, resulta pertinente mencionar que la matriz es perfectible, la intención es seguir desarrollándola, y, como ya se mencionó, que sea de utilidad para el personal encargado de la toma de decisiones en este ámbito, se contempla la inclusión de nuevas técnicas de conservación si es que surgieran, y con miras a generar un programa más sofisticado, o aplicación para teléfono móvil, para que el usuario tenga más facilidad para su uso.

Para este caso, se propuso una matriz direccional de costos y de afectaciones al usuario, pero este comportamiento puede ser modificado con los llamados “tratamientos de espera” los cuales corrigen parámetros con inversiones relativamente bajas, pero por periodos cortos de tiempo, lo que los hace recurrentes y, con el paso del tiempo, tal vez más costosos que una única inversión inicial elevada.





16. Referencias

Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V. (14 de Enero de 2013).

Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas: <http://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/hinterland-y-foreland>

Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V. (5 de Junio de 2017).

Recuperado el 20 de Marzo de 2018, de Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas: <http://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/ubicacion>

Arriaga Patiño, M. C., Garnica Anguas, P., & Rico Rodríguez, A. (1998). Índice

Internacional de Rugosidad en la Red Carretera de México. Sanfandila, Querétaro, México. Obtenido de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>

Artigas Contreras, R. (s.f.). Deflectometría.

Cálculo mecánico de pavimentos a partir de ensayos no destructivos. (s.f.). Sevilla , España.

Gutiérrez Graf, F. (2004). *Rediseño geométrico del distribuidor vial de la UDLA-P en la*

ruta Quetzalcóatl. Puebla, Cholula, México. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gutierrez_g_f/capitulo4.pdf

Hernández Michaca, J. L., Sánchez Granados, V. M., Castillo Chaires, I., Hernández

Damián, S. A., & Téllez Guitiérrez , R. (2001). Impacto Ambiental de Proyectos



Carreteros. Efectos por la Construcción y Conservación de Superficies de Rodamiento: I. Pavimentos Flexibles. Querétaro, Sanfandila, México. Recuperado el 2 de Abril de 2018, de www.imt.mx

Instituto Mexicano del Transporte. (2015). Manual Estadístico del Sector Transporte 2015. Sanfandila, Querétaro, México. Recuperado el 1 de Abril de 2018, de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2015.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Calculadora de Inflación*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/indiceprecios/CalculadoraInflacion.aspx>

International ASTM. (s.f.). ASTM E1551-16 Standard Specification for a Size 4.00-8 Smooth Tread Friction Test Tire. Pensilvania, Montgomery, Estados Unidos de América. doi:10.1520/E1551-16

International, A. (2018). ASTM E950 / E950M-09(2018), Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference. West Conshohocken, Pennsylvania. doi:10.1520/E0950_E0950M-09R18

Laboratorio de Control de Calidad en Fundaciones. (s.f.). Procedimiento para Medida de Deflexiones en Pavimentos Mediante el Deflectómetro de Impacto (FWD). Uruguay.



López Valdés, D. B., & Garnica Anguas, P. (2002). Consideraciones para la Aplicación del Índice de Fricción Internacional en Carreteras de México. Querétaro, Sanfandila, México. Recuperado el 16 de Abril de 2018

Martínez Rivera, L. (24 de 01 de 2018). Guanajuato, México.

National Cooperative Highway Research Program Report 228. (Diciembre de 1980). Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems. Idaho, Estados Unidos de América. Obtenido de http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_228.pdf

National Research Council. (1994). Manual for Profile Measurement: Operational field guidelines.

Orozco y Orozco, J. M., Téllez Guitiérrez , R., Solorio, M. R., Pérez Salazar, A., Sánchez Loo, M. A., & Torras Ortíz, S. (2004). Sistema de Evaluación de Pavimentos Versión 2.0. (2.0). Sanfandila, Querétaro. Recuperado el 27 de 03 de 2018

Padilla Rodríguez, A. (s.f.). Deformaciones Plásticas en Capas de Rodadura de Pavimentos Asfálticos.

Parra Moreno, S. (21 de 02 de 2018). Guanajuato, México.

Pérez Salazar, A., Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Martínez Peña, G. E. (2004). Uso y Calibración de Deflectómetros de Impacto en la Evaluación Estructural de Pavimentos. Querétaro, Sanfandila, México. Recuperado el 16 de Abril de 2018, de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt252.pdf>



Sánchez S., I., & De Solminihac T., H. (Enero-Junio de 1989). El IRI: Un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 1-2.

Saucedo Vidal, A. (Agosto de 2010). Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México. D.F., México.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2016). *Determinación de profundidad de roderas*. Recuperado el 04 de Abril de 2018

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). Determinación del Coeficiente de Fricción (CF).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). Evaluación de Pavimentos, Determinación de las Deflexiones en un Pavimento (DEF). México. Recuperado el 16 de Abril de 2018, de <http://normas.imt.mx/normativa/N-CSV-CAR-1-03-010-17.pdf>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos. (6 de Enero de 2015). Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014. D.F., Delegación Benito Juárez, México. Recuperado el 6 de Marzo de 2018, de <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos. (2016). Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras. D.F., México. Recuperado el 28 de Marzo de 2018



Serrano Torres, O. (29 de Agosto de 2018). Recomendaciones generales para la conservación carretera. (J. M. Espinoza Romo, Entrevistador)

Societa Italiana Progetto Manutenzione. Siproma Argentina S.A. de C.V. (s.f.). Evaluación de Estado de Degradación Superficial de Pavimentos con Equipos de Alto Rendimiento. Buenos Aires, Argentina. Recuperado el Julio de 2018, de <http://www.siproma.com.ar/folletos/Evaluacion%20Superficial%20-%20equipo%20ARAN.pdf>

Thenoux, G., González, Á., & González, M. (Diciembre de 2004). Estudio, diseño y evaluación económica de la técnica de trituración/pulverización (Rubblizing) en pavimentos de hormigón mediante vibración resonante. *Ingeniería de Construcción*, XIX(3), 149-156. Recuperado el Septiembre de 2018, de <http://www.ing.puc.cl/rtc>

Valenzuela Rodríguez, J. (1993). *Actualización de coeficientes de daño para el diseño de pavimentos flexibles*. México: Universidad de Sonora .Departamento de Ingeniería Civil y Minas. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2944/Capitulo2.pdf>