

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de la Autopista Escuintla - Puerto Quetzal, ruta  
centroamericana CA-09 Sur, mediante ensayos no destructivos  
y recomendaciones para su futura intervención**

Trabajo de graduación presentado por María Isabel Joaquín Buezo para  
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020



**Análisis de la Autopista Escuintla - Puerto Quetzal, ruta  
centroamericana CA-09 Sur, mediante ensayos no destructivos  
y recomendaciones para su futura intervención**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Análisis de la Autopista Escuintla - Puerto Quetzal, ruta  
centroamericana CA-09 Sur, mediante ensayos no destructivos  
y recomendaciones para su futura intervención**


Trabajo de graduación presentado por María Isabel Joaquín Buezo para  
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020




Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Hugo Enrique Pallais Beteta

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Luis Rodrigoandres Morales Ortega

Fecha de aprobación: Guatemala, 07 de diciembre de 2020.



La evaluación superficial, funcional y estructural de los pavimentos permite conocer a profundidad las características físicas del mismo, así como su desempeño como estructura. Poder analizar las deficiencias y las causas del deterioro de este permite proveer propuestas certeras con respecto a la rehabilitación de los proyectos. Una adecuada rehabilitación o intervención luego se traduce a tramos de carretera que cumplen correctamente con su vida útil. Además, el uso de tecnología, como algunos ensayos no destructivos, también permiten realizar monitoreos constantes de manera rápida y fácil. Estos le podrían proporcionar un control integral de red vial a las instituciones competentes del país, proporcionando un análisis de las prioridades en los proyectos y un mejor manejo de los recursos económicos disponibles para el mantenimiento de la red. Complementando la necesidad de mantener los recursos es necesario conocer aquellos procedimientos de restauración que permiten realizar procesos con menor impacto ambiental y económico.

El objetivo principal de esta tesis es realizar un análisis de la prefactibilidad de la rehabilitación de la autopista Escuintla - Puerto Quetzal. La prefactibilidad como tal consiste en una investigación sobre los factores que influyen en el deterioro del proyecto, así como la evaluación de la estructura mediante ensayos no destructivos para la determinación de sus características y la extensión del daño que presenta. Esto permite a estudiantes e ingenieros interesados en el tema conocer de qué manera la información proporcionada por distintos equipos de tecnología se analiza de forma conjunta para definir el estado de de un pavimento. Basados en la información recopilada, y unido a una investigación previa acerca de los procedimientos de rehabilitación en pavimentos de hormigón, se logra establecer las intervenciones necesarias para solucionar los problemas que presenta el tramo.

Los datos de las mediciones realizadas son propiedad de la empresa SERPIN, a quien se le agradece su disponibilidad y su abierta disposición para permitir analizar a mayor profundidad esta información. También se agradece especialmente al Ing. Rodrigo Rubio, quien no solo ha sido de gran ayuda en la elaboración de este trabajo de graduación, sino que también ha sido un gran mentor y alguien que siempre ha estado dispuesto a compartirme su conocimiento, ayudándome también en mi desarrollo profesional. Una mención especial al Arq. Al Moshe Asturias por siempre impulsarme a trabajar con excelencia. Finalmente, un agradecimiento a mi familia, y amigos quienes siempre me han demostrado un gran apoyo y fe en mis habilidades.



---

## Lista de siglas y acrónimos

---

**AASHTO** American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte)

**CPR** Concrete Pavement Restoration (Restauración de Pavimentos de Concreto)

**Dfo** Deflexión Central

**Ep** Módulo de Pavimento

**FWD** Falling Weight Deflectometer

**GPR** Ground Penetrating Radar (Georadar)

**INVIAS** Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Carreteras Colombia

**IRI** International Roughness Index (Índice Internacional de Rugosidad)

**NTD** Non-Destructive Test (Ensayos No Destructivos)

**Mr** Módulo de Resiliencia de la Subrasante

**PSI** Present Serviceability Index (Índice de Serviciabilidad Presente)

**RSP** Módulo de Resiliencia de la Subrasante

**RCA** Reciclado de concreto hidráulico



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de siglas y acrónimos</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xvii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xx</b>
<b>Abstract</b>	<b>xxii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Objeto de estudio</b>	<b>9</b>
<b>6. Pavimentos rígidos</b>	<b>11</b>
6.1. GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS . . . . .	11
6.1.1. Definición de pavimento . . . . .	11
6.1.2. Elementos de un pavimento rígido . . . . .	12
6.1.3. Tipos de pavimento . . . . .	13
6.1.4. Comportamiento funcional de pavimento rígido . . . . .	15
6.1.5. Factores que afectan el comportamiento del pavimento rígido . . . . .	17
6.1.6. Evaluación de un pavimento . . . . .	17
6.2. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS . . . . .	18
6.2.1. Parámetros de diseño . . . . .	18

6.2.2.	Metodologías de diseño estructural de pavimentos rígidos . . . . .	23
6.3.	PATOLOGÍAS . . . . .	24
6.3.1.	Patologías en concreto hidráulico . . . . .	24
<b>7.</b>	<b>Evaluación de pavimentos</b>	<b>39</b>
7.1.	EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL PAVIMENTO . . . . .	39
7.1.1.	Nivel de servicio de las carreteras . . . . .	39
7.1.2.	Definición de rugosidad . . . . .	40
7.1.3.	Definición del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) . . . . .	41
7.1.4.	Métodos de medición de IRI . . . . .	44
7.1.5.	Definición del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI) . . . . .	48
7.1.6.	Curva de serviciabilidad . . . . .	49
7.2.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO . . . . .	51
7.2.1.	Ensayos destructivos . . . . .	51
7.2.2.	Ensayos no destructivos . . . . .	53
7.2.3.	Deflectometrías o deflexiones por cargas de impacto . . . . .	53
7.2.4.	Medición de deflexiones por medio de cargas de impacto . . . . .	55
7.2.5.	Georadar . . . . .	58
<b>8.</b>	<b>Intervenciones en pavimentos</b>	<b>61</b>
8.1.	RECICLAJE DE CONCRETO . . . . .	61
8.1.1.	Beneficios del reciclado de concreto . . . . .	62
8.1.2.	Uso del RCA . . . . .	62
8.1.3.	Desempeño de mezclas de concreto utilizando RCA . . . . .	63
8.1.4.	Consideraciones y propiedades del RCA . . . . .	64
8.1.5.	Producción del RCA . . . . .	65
8.2.	RUBBLIZING . . . . .	66
8.2.1.	Beneficios del rublizado . . . . .	66
8.2.2.	Desempeño . . . . .	67
8.2.3.	Propiedades del concreto rublizado . . . . .	68
8.2.4.	Evaluación de rublizado . . . . .	69
8.3.	RESTAURACIÓN DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN . . . . .	69
8.3.1.	Reparaciones profundas . . . . .	71
8.3.2.	Trituración con dientes de diamante . . . . .	73
8.3.3.	Sellado de juntas . . . . .	74
8.3.4.	Restauración de la transferencia de carga . . . . .	75
<b>9.</b>	<b>Metodología</b>	<b>77</b>
9.1.	EVALUACIÓN VISUAL DE LA AUTOPISTA . . . . .	77
9.1.1.	Equipo de cámaras para evaluación de patologías . . . . .	77
9.2.	EVALUACIÓN FUNCIONAL DE LA AUTOPISTA . . . . .	81
9.2.1.	Perfímetro inercial . . . . .	81
9.3.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA AUTOPISTA . . . . .	88
9.3.1.	Falling Weight Deflectometer . . . . .	88
9.4.	OTRAS METODOLOGÍAS . . . . .	96
9.4.1.	Secciones homogéneas . . . . .	96
9.4.2.	Georadar . . . . .	97
9.5.	DIAGNÓSTICO DEL PAVIMENTO . . . . .	102

<b>10. Presentación e interpretación de resultados</b>	<b>105</b>
10.1. IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EVALUADO . . . . .	105
10.1.1. Datos del tramo de estudio . . . . .	105
10.1.2. Nomenclatura de carriles . . . . .	107
10.2. PATOLOGÍAS PRESENTES EN EL TRAMO DE ESTUDIO . . . . .	108
10.2.1. Porcentaje de afectación y severidad de patologías . . . . .	108
10.2.2. Fichas técnicas de patologías . . . . .	113
10.3. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUC-	
TIVOS . . . . .	119
10.3.1. Índice internacional de rugosidad . . . . .	119
10.3.2. Escalonamiento . . . . .	126
10.3.3. Índice de serviciabilidad presente . . . . .	130
10.3.4. Deflexión central . . . . .	132
10.3.5. Estratigrafía . . . . .	134
10.3.6. Módulos de elasticidad . . . . .	137
10.3.7. Retrocálculo . . . . .	143
10.4. RESUMEN DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS . . . . .	147
10.5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO . . . . .	150
10.5.1. Calzada derecha . . . . .	153
10.5.2. Calzada izquierda . . . . .	154
10.6. PROPUESTA PARA MONITOREO DEL PROYECTO . . . . .	155
<b>11. Conclusiones</b>	<b>157</b>
<b>12. Recomendaciones</b>	<b>159</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>161</b>
<b>14. Glosario</b>	<b>167</b>



---

## Lista de figuras

---

1.	Esquema de comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos . . . . .	11
2.	Elementos de pavimento de concreto simple con juntas . . . . .	12
3.	Vista en perfil de una losa de hormigón simple con pasadores . . . . .	14
4.	Vista en perfil de una losa de hormigón reforzado y con juntas . . . . .	14
5.	Vista en planta de una losa con refuerzo continuo . . . . .	15
6.	Tipo de juntas y el efecto de la carga en las losas . . . . .	21
7.	Vista transversal de una losa, se muestra el ancho de una grieta . . . . .	25
8.	Características de las grietas de esquina . . . . .	26
9.	Características de las grietas longitudinales . . . . .	27
10.	Características de las grietas transversales . . . . .	28
11.	Características de las grietas en los extremos de los pasadores . . . . .	29
12.	Características de las grietas en bloque y las grietas tipo “Y” . . . . .	30
13.	Características de las grietas en pozos y sumideros . . . . .	30
14.	Características de separación de juntas transversal . . . . .	31
15.	Desportillamiento . . . . .	32
16.	Características de descascaramiento . . . . .	33
17.	Desintegración . . . . .	34
18.	Bache . . . . .	35
19.	Pulimientto . . . . .	36
20.	Escalonamiento . . . . .	37
21.	Modelo de cuarto de carro . . . . .	41
22.	Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación de IRI . . . . .	43
23.	Perfilógrafo de estructura tipo California por TC Technologies . . . . .	45
24.	Perfilómetro inercial RSP 5051 Mark IV por Dynatest . . . . .	46
25.	Perfilómetro inercial APL . . . . .	46
26.	Curva de comportamiento de un pavimento . . . . .	50
27.	Comportamiento del pavimento de acuerdo al índice de serviciabilidad inicial . . . . .	50
28.	Excavación de calicata en pavimento flexible . . . . .	51
29.	Núcleo o testigo extraído de una carpeta asfáltica . . . . .	52
30.	DCP realizado en carretera de terracería . . . . .	53
31.	Cuenca de deflexiones . . . . .	53
32.	Viga Benkelman . . . . .	56

33.	Dynalect . . . . .	56
34.	Falling Weight Deflectometer marca Dynatest . . . . .	57
35.	Georradar Ground Explorer marca MALA . . . . .	59
36.	Operación de reciclado y apilado del reciclado de hormigón . . . . .	61
37.	Comparación fotográfica de agregados naturales vírgenes con agregados de RCA . . . . .	65
38.	Rublizado de concreto hidráulico . . . . .	66
39.	Diagrama del ciclo de vida que muestra las adecuadas etapas de rehabilitación de un pavimento cuando están relacionadas con su condición . . . . .	70
40.	Remoción y reemplazo de losa de concreto . . . . .	71
41.	Textura de la superficie después del triturado de concreto . . . . .	73
42.	Sellado de juntas . . . . .	74
43.	Información cruda del reporte fotográfico obtenido mediante el equipo de cámaras . . . . .	78
44.	Selección de fallas tipo bloque y linear para un pavimento utilizando LDis . . . . .	79
45.	Ejemplo de ficha técnica para patologías . . . . .	81
46.	El perfil longitudinal se encuentra con el código 5405 en el reporte generado por el RSP . . . . .	87
47.	El Índice Internacional de Rugosidad se encuentra con el código 5406 en el reporte generado por el RSP . . . . .	87
48.	El escalonamiento de las losas de concreto se encuentra con el código 5414 en el reporte generado por el RSP . . . . .	87
49.	La información del GPR se encuentra con el código 5280 en el reporte generado por el RSP . . . . .	87
50.	Número de caídas y resumen de ensayos para cada estación obtenidas con el FWD . . . . .	91
51.	Información cruda de cada estación obtenida con el FWD . . . . .	92
52.	Información cruda de cada estación obtenida con el FWD . . . . .	95
53.	Método de diferencias acumuladas para obtención de secciones homogéneas . . . . .	97
54.	Ejemplo de un radargrama . . . . .	100
55.	Reporte de espesores de carpeta de rodadura obtenido con Reflexw . . . . .	101
56.	Reporte exportado a Excel de espesores de una capa de pavimento . . . . .	101
57.	Esquema de ubicación utilizando Google Earth . . . . .	106
58.	Esquema de ubicación . . . . .	106
59.	Nomenclatura de carriles . . . . .	107
60.	Calzada derecha: Daños por severidad encontrados. . . . .	109
61.	Calzada derecha: Daños por patología encontrados. . . . .	110
62.	Calzada izquierda: Daños por severidad encontrados. . . . .	112
63.	Calzada izquierda: Daños por patología encontrados. . . . .	112
64.	Ficha técnica: Grietas de esquina. . . . .	113
65.	Ficha técnica: Grietas lineales. . . . .	114
66.	Ficha técnica: Grietas en bloque. . . . .	114
67.	Ficha técnica: Desportillamiento de esquina. . . . .	115
68.	Ficha técnica: Desportillamiento de juntas. . . . .	116
69.	Ficha técnica: Descascaramiento. . . . .	116

70.	Ficha técnica: Desintegración. . . . .	117
71.	Ficha técnica: Baches. . . . .	118
72.	Ficha técnica: Pulimiento. . . . .	118
73.	Perfil longitudinal de la calzada derecha Escuintla – Puerto Quetzal . . . . .	120
74.	Perfil longitudinal de la calzada izquierda Escuintla – Puerto Quetzal . . . . .	121
75.	Calzada derecha, carril interno: Secciones homogéneas de IRI . . . . .	122
76.	Calzada derecha, carril externo: Secciones homogéneas de IRI . . . . .	123
77.	Calzada derecha: Índice Internacional de Rugosidad . . . . .	124
78.	Calzada izquierda, carril interno: Secciones homogéneas de IRI . . . . .	125
79.	Calzada izquierda, carril externo: Secciones homogéneas de IRI . . . . .	125
80.	Calzada izquierda: Índice Internacional de Rugosidad . . . . .	126
81.	Calzada derecha: Escalonamiento . . . . .	128
82.	Calzada izquierda: Escalonamiento . . . . .	129
83.	Calzada derecha, carril externo: sectores homogéneos del PSI . . . . .	131
84.	Calzada izquierda, carril externo: sectores homogéneos del PSI . . . . .	132
85.	Calzada derecha: Deflexiones centrales, Df0 . . . . .	133
86.	Calzada izquierda: Deflexiones centrales, Df0 . . . . .	134
87.	Calzada derecha: Estratigrafía . . . . .	135
88.	Calzada izquierda: Estratigrafía . . . . .	136
89.	Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico	138
90.	Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 2, base estabilizada . . . . .	139
91.	Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 3, mejoramiento de subrasante/subbase . . . . .	139
92.	Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico	140
93.	Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 2, concreto asfáltico y concreto hidráulico . . . . .	141
94.	Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 3, base estabilizada . . . . .	142
95.	Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 4, mejoramiento de subrasante/subbase . . . . .	142
96.	Calzada derecha: Módulos de subrasante . . . . .	144
97.	Calzada izquierda: Módulos de subrasante . . . . .	145
98.	Calzada derecha: Módulo de pavimento . . . . .	146
99.	Calzada izquierda: Módulo de pavimento . . . . .	147



---

## Lista de cuadros

---

1.	Tipos de suelo de subrasante y valores aproximados de K . . . . .	19
2.	El módulo de ruptura recomendado según en tipo de pavimento . . . . .	20
3.	Valores para el coeficiente de drenaje Cd . . . . .	22
4.	Valores recomendados del nivel de confianza atendiendo al tipo de camino . .	23
5.	Variables contempladas en cada metodología de diseño . . . . .	24
6.	Funciones y características del pavimento por tipo de evaluación . . . . .	40
7.	Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos	48
8.	Rangos de índice de serviciabilidad con su clasificación . . . . .	49
9.	Calificación de la transferencia de cargas . . . . .	58
10.	Técnicas de restauración de pavimentos de hormigón . . . . .	70
11.	Intervalos de almacenamiento de datos . . . . .	83
12.	Lecturas según velocidad de operación del equipo . . . . .	83
13.	Intervalos de medición de IRI . . . . .	84
14.	Intervalos de medición de IRI . . . . .	86
15.	Intervalo de mediciones de deflexiones según nivel de proyecto . . . . .	90
16.	Módulos semilla típicos . . . . .	96
17.	Filtros de software Reflex . . . . .	100
18.	Propiedades electromagnéticas de materiales utilizados en pavimentos . . . .	102
19.	Datos del tramo evaluado. . . . .	105
20.	Porcentajes de afectación por tramo de estudio. . . . .	109
21.	Porcentajes de afectación por tramo de estudio. . . . .	111
22.	Caracterización de la subrasante . . . . .	143
23.	Eficiencia de transferencia de carga para las calzadas de la autopista . . . . .	147
24.	Subtramos de análisis de la Calzada derecha . . . . .	152
25.	Subtramos de análisis de la Calzada izquierda . . . . .	152



En este trabajo de graduación se realiza la evaluación de la estructura de pavimento de la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal (CA-09 Sur) mediante ensayos no destructivos complementarios con el fin de establecer la importancia de utilizar tecnología y parámetros internacionales para conocer el desempeño de las carreteras, así como conocer las condiciones en las que se encuentra para poder dar un mantenimiento adecuado. Primero, en el Marco teórico se establece la diferencia entre pavimento flexible y rígido, las comparaciones de las ventajas constructivas, con el fin de comprender por qué el concreto hidráulico es una opción atractiva a la hora de construir carreteras principales o de alta importancia. Además, se realiza una investigación detallada acerca de la evaluación funcional y estructural de los pavimentos, incluyendo los equipos de tecnología utilizados y las normativas que los respaldan. La sección teórica finaliza con la exploración de las metodologías utilizadas internacionalmente, especialmente en Estados Unidos avaladas por la AASHTO, de rehabilitación de pavimentos rígidos con el objetivo de analizar aquellas opciones que permiten el reciclado de materiales.

A continuación, se realiza un análisis superficial del estado de la carretera. Este consiste establecer las principales patologías que se reflejan en el pavimento, presentadas en porcentajes de afectación en distintos niveles de severidad, y la presentación tanto de las posibles causas como de los procedimientos utilizados para solucionarlas. Seguidamente, se lleva a cabo la presentación el análisis de los datos y los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos para determinar la funcionalidad y la capacidad estructural del pavimento. Entre las características evaluadas se encuentran: rugosidad, índice de serviciabilidad, escalonamiento, deflectometrías, espesores de capas, módulos de elasticidad, módulos de resiliencia, transferencias de carga, entre otros. Dentro del análisis de los resultados, se establecen las posibles causas de las condiciones actuales del pavimento para demostrar la importancia de una evaluación exhaustiva integral de la estructura puede determinar la vida remanente o el procedimiento necesario para alargar la vida útil de la misma.

En la etapa final del trabajo se relaciona la evaluación realizada con la investigación de las metodologías utilizadas en la reconstrucción de pavimentos de concreto hidráulico, para poder proponer una solución que pueda solucionar los daños que presenta el pavimento y que los procedimientos sean viables al permitir reutilizar los materiales de la carretera de manera que el impacto económico y ambiental sean de beneficio para el país. Finalmente,

se plantean la importancia de realizar monitoreos continuos a los proyectos de carreteras y algunas bases a tomar en cuenta para las mediciones del tramo carretero una vez haya concluido su construcción. El monitoreo se propone utilizando las mismas tecnologías que se mencionaron con anterioridad, a manera de poder controlar el desempeño del proyecto y actuar a tiempo en dado caso se de una falla prematura o se requiera algún tipo de intervención menor antes de terminar la vida útil para la cual se diseñe.

In this thesis, the evaluation of the pavement structure of the Escuintla - Puerto Quetzal Highway (CA-09 South) is carried out through complementary non-destructive tests to establish the importance of using technology and international parameters to know the performance of the roads, as well as to know the conditions in which it is found in order to be able to give adequate maintenance. First, the Theoretical Framework establishes the difference between flexible and rigid pavement, the comparisons of constructive advantages, to understand why hydraulic concrete is an attractive option when building main or high importance roads. Also, detailed research is conducted on the functional and structural evaluation of pavements, including the technological equipment used and the regulations that support them. The theoretical section ends with exploring the methodologies used internationally, especially in the United States endorsed by AASHTO, for the rehabilitation of rigid pavements to analyze those options that allow the recycling of materials.

Next, a superficial analysis of the state of the road is carried out. It consists of establishing the main pathologies reflected in the pavement, presented in percentages of affectation at different levels of severity, and the presentation of both the possible causes and the procedures used to solve them. Next, the data analysis presentation and the results obtained in each of the tests are carried out to determine the pavement's functionality and structural capacity. Among the characteristics evaluated are roughness, serviceability index, grading, deflection, layer thickness, elasticity modules, resilience modules, and load transfers. Within the analysis of the results, the possible causes of the pavement's current conditions are established to demonstrate the importance of a comprehensive evaluation of the structure that can determine the remaining life or the procedure necessary to extend its life.

In the final stage of the work, the evaluation is related to the investigation of the methodologies used in the reconstruction of hydraulic concrete pavements, in order to propose a solution that can solve the damage presented by the pavement and that the procedures are viable by allowing the reuse of the road materials so that the economic and environmental impact is beneficial to the country. Finally, the importance of continuous monitoring of road projects and some bases to consider for the measurements of the road section once its construction has been completed are raised. The monitoring is proposed using the same technologies mentioned above to control the project's performance and act in time in case of premature failure or some minor intervention is required before the end of its useful life.



En el año 2017 la Alianza para el Desarrollo de la Infraestructura Económica (ANADIE) junto con el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (CIV) publicaron la descripción general y alcances del proyecto Rehabilitación, administración, Operación, Mantenimiento y Obras Complementarias de la Autopista Escuintla - Puerto Quetzal. El objetivo del proyecto es mejorar las especificaciones del tramo carretero debido a que actualmente presenta altos deterioros. Estos últimos son el resultado de la falta de mantenimiento adecuado durante los últimos, además de otros factores como lo son el exceso de cargas del transporte pesado que circulan en la vía.

Según la ANADIE (2017) el comportamiento del tránsito en el tramo carretero está relacionado con la actividad portuaria y en consecuencia tiene un impacto elevado en la actividad económica del país. La misma importancia regional y sus altos niveles de tránsito, demandan la necesidad de aumentar la capacidad estructural del proyecto mediante las intervenciones necesarias, además la construcción de varias obras complementarias que permitan el aumento de la circulación. El documento publicado establece que la rehabilitación y renovación de la ruta se debe realizar con una única solución técnica en cuanto al uso de los materiales y tecnología. Sin embargo, existe un rango de procedimientos constructivos en la rehabilitación de pavimentos rígidos que, la mayoría del tiempo, tienen como objetivo solucionar un problema; por lo tanto, utilizar una misma metodología en un proyecto de más de 40 km de longitud, deja de ser eficiente, económica y técnicamente viable.

El siguiente trabajo de graduación, se enfoca en un análisis de la prefactibilidad de la rehabilitación del proyecto mencionado con anterioridad. Para ellos en primera instancia se realiza una revisión de la literatura acerca de las características de los pavimentos rígidos; la evaluación funcional y estructural de los pavimentos, centrándose en ensayos destructivos que a la fecha han sustituido o complementado ensayos usados históricamente para este propósito. Además, se investiga la tecnología utilizada dentro de los ensayos no destructivos con el objetivo de generar información acerca de las características integrales del pavimento. También se investiga los procedimientos utilizados a nivel internacional en la rehabilitación de pavimentos de concreto hidráulico.

En la segunda etapa del trabajo de graduación se realiza un análisis superficial del tramo, en el cual se establecen las principales patologías que se pueden observar en el mismo. Estas se clasifican con el propósito de obtener fichas técnicas que establezcan las posibles causas de dichas fallas y las metodologías que existen para poder tratarlas. Seguidamente se efectúa el estudio del servicio de la vía y la confortabilidad del usuario mediante el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) con la ayuda de un perfilómetro inercial MARK IV fabricado por Dynatest. Además, se obtendrá el valor del escalonamiento de las losas de concreto que conforman la capa exterior del pavimento.

A continuación, se realiza la auscultación del tramo para la verificación de las capas que componen la estructura de pavimento por medio del Ground Penetration Radar (mejor conocido como GPR) fabricado por la compañía MALA ProEx GEOSCIENCE. Posteriormente, para evaluar la capacidad estructural del pavimento que posee en la actualidad, se efectúa un estudio de deflexiones del pavimento utilizando el Falling Weight Deflectometer (FWD TM 8000) fabricado por la compañía Dynatest. Una vez realizados los ensayos, se hace uso de programas como ELMOD, Reflexw Pro, etc., para obtener los resultados que a continuación sirven para el análisis del estado actual del pavimento en todos sus aspectos y características.

Así pues, se realiza un análisis profundo de las características funcionales y estructurales del tramo carretero para así poder dar un análisis integral de las condiciones actuales de la vía. Exponiendo de qué los ensayos realizados se complementan mutuamente y cómo todos son necesarios para tener una evaluación exhaustiva de la estructura de pavimento.

En la etapa final del trabajo se investiga acerca de las metodologías existentes a nivel global para la reconstrucción de pavimentos de concreto hidráulico, y se proponen procedimientos para la intervención de los subtramos de análisis establecidos mediante similitudes en características funcionales y estructurales. Los procedimientos propuestos son específicos para solucionar los problemas que presentan cada uno, y proponen una alternativa viable en la cual se puedan reutilizar los materiales de la carretera de manera que el impacto económico y ambiental sean de beneficio para el país. Finalmente, se plantean algunas bases a tomar en cuenta para el monitoreo del tramo carretero una vez haya concluido su construcción por medio de las mismas tecnologías que se mencionaron con anterioridad, a manera de poder controlar y actuar a tiempo en dado caso se dé una falla prematura o antes de terminar su vida útil.

**Badilla, Gustavo; Elizondo, Fabián; Barrantes, Roy** (2008) en su proyecto acerca de la “*Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo de IRI*” profundizan en el conocimiento de la forma de medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI), y en las especificaciones internacionales que garantizan el desempeño óptimo de las carreteras. Esto con el objetivo de determinar una metodología única que permita evaluar la condición superficial, representada por el IRI, de forma homogénea y objetiva.

**Pérez L., Karla** (2005) en su tesis “*Uso del perfilómetro inercial con sensores láser para la determinación del iri y sus aplicaciones en la ingeniería vial*” describe los equipos utilizados para realizar las mediciones del Índice Internacional de Rugosidad, específicamente del Perfilómetro inercial y las normas ASTM que definen el ensayo y la calibración del equipo. Además, detalla los campos de aplicación de los parámetros obtenidos de este tipo de medición que incluyen: recepción de obra, control de calidad, estudios de factibilidad técnica-económica y para gerencia de pavimentos.

**Escobar, Kerin; García, Alberto; Guzmán, Carlos** (2007) en la tesis presentada “*Análisis comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto*” se llevó a cabo la evaluación, verificación o comparación de resultados de la evaluación estructural llevada a cabo con FWD y Viga Benkelman. A partir de lo cual, y basados en la Metodología AASHTO-93, obtuvieron la correlación entre las deflexiones de ambos equipos.

**Rubio H., Rodrigo** (2012) en la tesis presentada “*Utilización del Falling Weight Deflectometer, FWD (deflectómetro de impacto) en el diseño del reforzamiento de pavimentos flexibles de carreteras en Guatemala y su complementación con otros métodos tradicionales*” presenta el uso de esta tecnología para el levantamiento y registro de información en pavimentos existentes, el control de calidad durante la construcción y el diseño del reforzamiento estructural de pavimentos flexibles en carreteras complementándolo con métodos de diseño tradicionales. Además, presenta una comparación de resultados obtenidos por métodos destructivos y métodos no destructivos para la evaluación de los pavimentos.

**Parra B., Marco** (2019) en su trabajo de titulación *“Análisis de retrocálculo para la determinación de las propiedades del pavimento whitetopping de la vía Biblián – Zhud”*, lleva a cabo la evaluación estructural mediante ensayos no destructivos de deflectometría a través del deflectómetro de impacto (FWD). Además, mediante retrocálculo con tres metodologías distintas (AASHTO 93, el software Elmod 6 y método de la distancia crítica) determina el módulo de reacción de la subrasante, el módulo de elasticidad, el módulo de rotura de la losa de hormigón y la eficiencia de la transferencia de carga entre las losas del pavimento.

**Cifuentes G., Ana** (2017) en su trabajo de graduación *“Auscultación, proceso e interpretación de datos obtenidos por Georadar aplicado a estructuras de pavimento y casos de geotecnia vial”* presenta el uso del georadar como ensayo no destructivo para obtener el perfil de un pavimento, incluyendo espesores y anomalías presentes en este. Así también expone factores importantes para analizar las estructuras de pavimento.

Es necesario crear conciencia de la importancia que un buen estado de la red vial tiene no solamente a nivel de confortabilidad del usuario, sino que también en todos los ámbitos socioeconómicos del desarrollo guatemalteco. Por un lado, según Pocasangre (2017) la reparación de las carreteras que se encuentran con índices de condición de pavimento muy bajos puede llegar a tener un costo entre cinco y siete veces mayor que aquellas que al término de su vida útil solamente necesitan trabajos preventivos o rehabilitaciones para poder tener una respuesta estructural similar a cuando se encontraban nuevas. Guerra (s.f.), por su parte, establece que “el turismo, la salud, la logística de transporte, la educación y, en general, todos los guatemaltecos” se ven afectados por el deterioro de la red vial y que, además, Guatemala es uno de los países con bajo nivel de movilidad en el transporte.

Una red vial en mal estado y un déficit de infraestructura vial limita el crecimiento y el desarrollo del nivel del país. Sin embargo, los daños ocasionados a los pavimentos no solamente se dan por una falta de mantenimiento de las vías. Sino también, el mal estado de los pavimentos es causado por paso de vehículos que exceden las cargas de diseño, la utilización de pavimento en condiciones distintas a las diseñadas, controles de calidad deficientes, diseño inadecuado del sistema de transferencia de carga, procedimientos inadecuados en la construcción, entre otros (Jaramillo, 2012). Cada carretera y diseño es distinto, por lo que conocer a profundidad sus características es clave para poder cumplir con una de las variables de buenas prácticas en la construcción de pavimentos.

El tramo de interés cobra una alta importancia regional debido a que Puerto Quetzal representa la puerta comercial de Guatemala con la Cuenca del Pacífico, incluyendo la conexión que tiene la ruta con zonas turísticas, en general se trata de una vía que tiene un gran impacto en la actividad económica del país. Y, sin embargo, desde su construcción hasta la actualidad el tramo no ha recibido un mantenimiento adecuado debido a la falta de recursos por parte del Estado para la inversión en infraestructura y su falta de un sostenimiento correcto de la red vial (CCTOP,2019). Dicha negligencia de la estructura de pavimento, el exceso de las cargas de transporte a las cuales ha sido sometida, el uso incorrecto de los hombros y arriate central, los daños causados al sistema de drenaje, entre otros (ANADIE,

2017), han causado que en la vía se evidencie la falla (fractura) parcial o total de las losas de concreto antes de que la estructura alcanzara su vida útil y que, en cambio, se encuentre en los niveles más bajos de comodidad y seguridad de la curva de serviciabilidad.

Por lo tanto, el trabajo de graduación presenta tecnologías que se utilizan a nivel internacional para evaluaciones de estructuras de pavimento mediante ensayos no destructivos, así con ellas poder analizar la situación y las causas del deterioro de cada uno de los tramos para poder proveer propuestas certeras con respecto a la rehabilitación de esta. Así también, la importancia del trabajo de graduación radica en presentar el análisis de la falla estructural en un sistema que era considerado de alta calidad: el sistema de losas cortas en concreto hidráulico en la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal (CA-09 Sur); puesto que se ha demostrado estadísticamente que los pavimentos rígidos construidos con concreto hidráulico pueden llegar a soportar hasta tres veces su capacidad de carga de diseño debido a que una de las propiedades del material es que gana resistencia con el tiempo y que resiste mejor que un concreto asfáltico las cargas transmitidas por vehículos pesados (Alfaro, 2015).

### 4.1. Objetivo general

Análisis de la prefactibilidad de la rehabilitación de la estructura de pavimento la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal de la ruta centroamericana CA-09 Sur.

### 4.2. Objetivos específicos

- Identificar las principales patologías que se encuentran en el tramo de estudio, además las posibles causas de su generación.
- Investigar tendencias internacionales acerca de la evaluación de estructuras de pavimento existente por medio de ensayos no destructivos complementarios y el uso de tecnología (Perfilómetro Inercial, Deflectómetro de impacto y Georradar GPR).
- Evaluar la estructura de pavimento existente por medio de ensayos no destructivos.
- Identificar las metodologías utilizadas a nivel global en la reconstrucción de pavimentos de concreto hidráulico.
- Proponer soluciones para la intervención de la estructura de pavimento actual de la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal CA-09 Sur.
- Plantear bases para el monitoreo constante del proyecto una vez finalizada la reparación.



---

### Objeto de estudio

---

El objeto de estudio identificado es el tramo carretero Escuintla – Puerto Quetzal – CA-09 Sur “A” que cuenta actualmente con dos pistas construidas en dos períodos distintos y con materiales distintos. La Pista Este (Izquierda) construida en el período de 1983-1989 y con sentido de Sur a Norte (Puerto Quetzal – Escuintla). Por otro lado, la Pista Oeste (Derecha) fue construida en el período de 1998-2000 y tiene un sentido de Norte a Sur (Escuintla – Puerto Quetzal). Ambas cuentan con de rodadura de concreto hidráulico. Las pistas se encuentran separadas por una franja central con un ancho variable entre 10 y 12 metros y, además, se componen de dos carriles de 3.60 metros cada uno, un hombro interno de 1.30 y uno externo de 2.50 metros (ANADIE, 2017).



## 6.1. GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS

### 6.1.1. Definición de pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura (Montejo, 1998).

Los pavimentos se denominan flexibles o rígidos por la forma en que transmiten los esfuerzos y deformaciones a las capas inferiores, que depende de la relación de rigideces relativas de las capas. Un pavimento flexible transmite esfuerzos concentrados en una pequeña área, mientras que un pavimento rígido debido a la alta rigidez del material, así como a su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia (Montalvo, 2015).

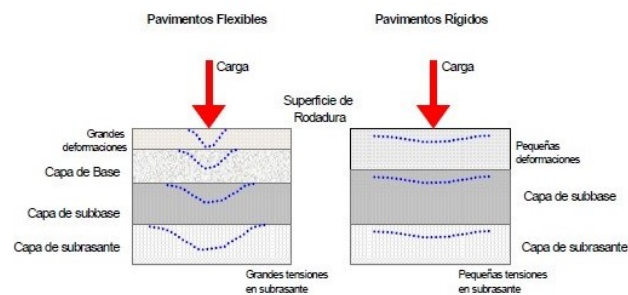


Figura 1: Esquema de comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos

Así pues, un pavimento rígido es aquel cuyo elemento fundamental es una losa de concreto hidráulico en la que 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. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural (Saucedo, 2010).

### 6.1.2. Elementos de un pavimento rígido

Un pavimento de concreto o pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o subbase. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la Subrasante (Sánchez y Machuca, 2012).

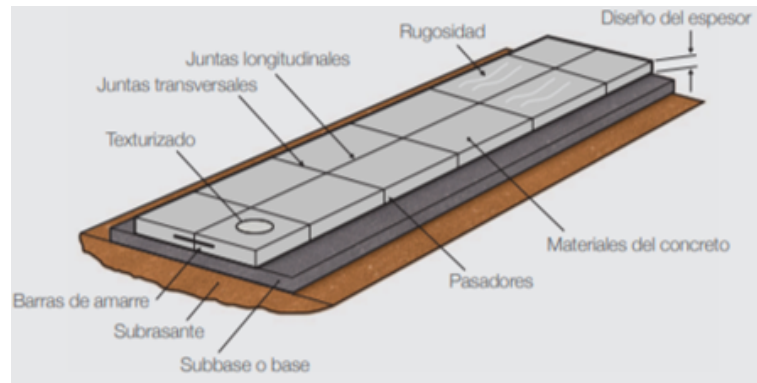


Figura 2: Elementos de pavimento de concreto simple con juntas (American Concrete Pavement Association – ACPA)

### Carpeta o superficie de rodadura

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento (Sánchez y Machuca, 2012).

### Subbase

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento (Sánchez y Machuca, 2012).

La función más importante de la subbase es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento, además la subbase sirve como capa de transición y suministra un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento (Fiallos, 2017).

### **Subrasante**

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño (Sánchez y Machuca, 2012).

La función de la subrasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor de soporte, es decir, mucho más importante es que la subrasante de un apoyo estable a que tenga una alta capacidad de soporte (Morales, 2004).

### **Juntas**

El objetivo de las juntas es copiar el patrón de fisuración que naturalmente desarrolla el pavimento en servicio. De acuerdo con su ubicación respecto al eje del pavimento, se denominan como longitudinales y transversales; según la función que cumplen se les denomina de contracción, articulación, construcción expansión y aislamiento (Morales, 2004).

Un correcto diseño de juntas permitirá prevenir la formación de fisuras transversales, longitudinales, la infiltración de agua y materiales incompresibles a la estructura del pavimento, así también permitirán el movimiento de las losas contra estructuras fijas e intersecciones (Fiallos, 2017).

### **6.1.3. Tipos de pavimento**

#### **Pavimentos de hormigón simple**

Se construyen sin acero de refuerzo y sin barras de transferencia de cargas en las juntas. Dicha transferencia se logra a través de la trabazón entre los agregados de las dos caras agrietadas de las losas contiguas (interlock), formadas por el aserrado o corte de la junta. Para que la transferencia de carga sea efectiva, es preciso tener losas cortas. Este tipo de pavimento se recomienda generalmente para casos en que el volumen de tránsito es de tipo bajo y clima templado, generalmente se apoyan directamente sobre la subrasante (Fiallos, 2017).

#### **Pavimentos de hormigón simple con pasadores**

Los pasadores son pequeñas barras de acero liso, que se colocan en la sección transversal del pavimento, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de

una losa a una losa contigua, mejorando así las condiciones de deformación en las juntas. De esta manera, se evitan los desplazamientos verticales diferenciales – escalonamientos. Según la Asociación de Cemento Portland - PCA por sus siglas en inglés –, este tipo de pavimento es recomendable para tráfico diario que exceda los 500 ESAL (ejes simples equivalentes), con espesores de 15 cm o más (Morales, 2004).

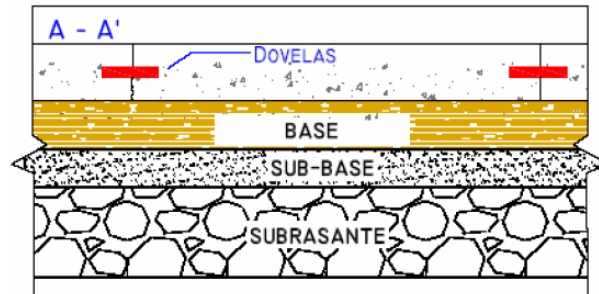


Figura 3: Vista en perfil de una losa de hormigón simple con pasadores (INVIAS, 2006)

### Pavimentos de hormigón reforzado y con juntas

Los pavimentos reforzados y con juntas contienen además del refuerzo, pasadores para la transferencia de carga en las juntas de contracción. Este refuerzo puede ser en forma de mallas de barras de acero o acero electrosoldado. El objetivo de la armadura es mantener las grietas que pueden llegar a formarse, con el fin de permitir una buena transferencia de cargas y de esta manera conseguir que el pavimento se comporte como una unidad estructural (Morales, 2004).

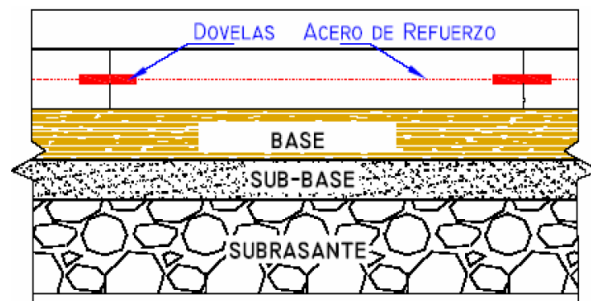


Figura 4: Vista en perfil de una losa de hormigón reforzado y con juntas (INVIAS, 2006)

### Pavimentos de hormigón reforzado y con refuerzo continuo

A diferencia de los pavimentos de concreto reforzado y con juntas, estos se construyen sin juntas de contracción, debido a que el refuerzo asume todas las deformaciones, específicamente las de temperatura. El refuerzo principal es el acero longitudinal, el cual se coloca a lo largo de toda la longitud del pavimento. El refuerzo transversal puede no ser requerido para este tipo de pavimentos (Morales, 2004).

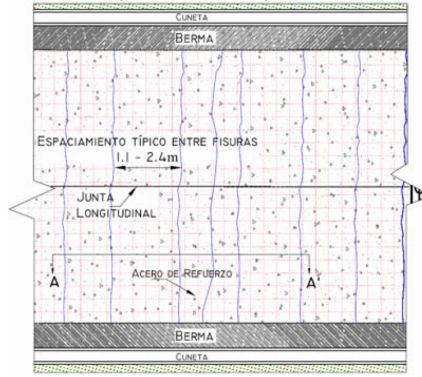


Figura 5: Vista en planta de una losa con refuerzo continuo (INVIAS, 2006)

## Pavimentos de hormigón presforzado

Los pavimentos de hormigón presforzado están constituidos a base de losas previamente esforzadas por lo que no contienen juntas de construcción. Se han ensayado varios sistemas de presfuerzo y postensado con el fin de llegar a soluciones de pavimentos de espesor reducido, gran elasticidad, capacidad de soporte, y reducción de juntas. Gracias a esto se han podido construir losas de más de 120 m de longitud, con una reducción del 50 % del espesor de la losa. Sin embargo, pese a los esfuerzos para desarrollar dicha técnica, en carreteras se han producido más dificultades que ventajas. Ha tenido en cambio más aplicación en aeropuertos con comportamiento excelente, tanto en pistas como en plataformas (Miranda, 2010).

## Pavimentos de hormigón fibroso

En este tipo de losas, el armado consiste en fibras de acero, de productos plásticos o de fibra de vidrio, distribuidos aleatoriamente, con lo que obtienen ventajas tales como el aumento de la resistencia a la tensión y a la fatiga, fisuración controlada, resistencia al impacto, durabilidad, ductilidad etc. (Miranda, 2010).

### 6.1.4. Comportamiento funcional de pavimento rígido

El comportamiento funcional de un pavimento rígido está asociado a la capacidad de brindar una superficie segura y cómoda al usuario. En este contexto la regularidad o rugosidad superficial es la característica predominante, entre otras características se tiene la textura, fricción superficial, trazado de la carretera y fisuras (Morales, 2004). La regularidad superficial o rugosidad de un pavimento es la característica que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al circular por una carretera.

La rugosidad de un pavimento tiene dos componentes, uno asociado a la calidad de la construcción inicial y otro a la variación de la forma del pavimento (alabeo) por cambios de temperatura y humedad. Como consecuencia de las mejoras en las técnicas constructivas, la incidencia de factores medioambientales ha disminuido su influencia relativa. El alabeo

de las losas es principalmente el resultado de la variación del gradiente de temperatura a través de la profundidad de la estructura del pavimento, el cual depende de las condiciones del clima y la hora del día. Cuando la temperatura de la superficie es mayor que la del fondo, la parte superior de la losa se expande más que el fondo provocando una tendencia a curvarse en forma convexa. El peso propio de la losa opone resistencia a la deformación e induce esfuerzos de tracción en el fondo de la losa y esfuerzos de compresión hacia la parte superior de la misma (Fiallos, 2017).

La textura de un pavimento se relaciona con las irregularidades superficiales que presenta la calzada respecto a una superficie perfectamente plana (Calo, Marcolini, Fernández, Camueira, y Souza, 2012). Es un parámetro crítico en la comodidad, seguridad de los usuarios y necesario para la conservación de carreteras. Este parámetro influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interface rueda-pavimento y de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene importancia para la adecuada adherencia entre la rueda y el pavimento (Morales, 2004).

La Asociación Mundial de la Carretera ha propuesto diferentes categorías para la clasificación de los diferentes tipos de textura de los pavimentos, en función de su longitud ( $\lambda$ ) y/o amplitud de onda ( $A$ ):

- **Microtextura** ( $\lambda < 0.5 \text{ mm}$ ;  $A < 0.2 \text{ mm}$ ). Esta textura se encuentra provista por las pequeñas irregularidades en las partículas de agregado fino por lo que no resulta visible al ojo humano. Una buena microtextura en general es suficiente para proveer un adecuado nivel de fricción en pavimentos secos o en húmedos (no inundados) con velocidades menores de 80 km/h. Esta característica no se encuentra vinculada con la generación del ruido neumático-pavimento. Aun cuando un incremento en la microtextura provocará mayor desgaste de los neumáticos, este aspecto negativo tiene poca importancia en comparación con la necesidad de alcanzar las mejores condiciones de fricción posibles (Calo *et al.*, 2012).
- **Macrotextura** ( $0.5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$ ;  $0.1 \text{ mm} < A < 20 \text{ mm}$ ). Esta propiedad se encuentra definida por las estrías o ranuras formadas en la superficie del pavimento, a partir de la operación de texturizado en fresco, o mediante otras técnicas aplicables sobre el hormigón endurecido. La misma juega un rol fundamental en las características de fricción de los pavimentos en condición húmeda, especialmente para vehículos a altas velocidades. Por lo tanto, en aquellas vías en las que se encuentre prevista la circulación de vehículos a más de 80 km/h, se requieren construirse con una adecuada macrotextura a fin de prevenir el riesgo de hidroplaneo. Esta característica superficial tiene impacto significativo en el ruido pavimento-neumático (Calo *et al.*, 2012).
- **Megatextura** ( $50 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$ ;  $0.1 \text{ mm} < A < 50 \text{ mm}$ ). Se encuentra relacionada con pequeños defectos como resultado de pobres prácticas constructivas o defectos en la superficie del pavimento. La misma puede causar vibraciones, afecta la calidad de circulación y puede provocar un mayor desgaste en el sistema de suspensión del vehículo (Calo *et al.*, 2012).

En general podemos afirmar que la aparición de fisuras sirve como un primer aviso de que una carretera cuenta con problemas. Es señal de esfuerzos que han sobrepasado los límites

de la resistencia del pavimento debidos a condiciones climáticas o de cargas de tráfico (J. Morales, 2004).

### **6.1.5. Factores que afectan el comportamiento del pavimento rígido**

Generalmente los pavimentos rígidos se proyectan para una vida útil de 20 años, sin embargo, estos pueden presentar distintos modos de falla o patologías antes del cumplimiento de su vida útil. Las principales causas de las fallas en los pavimentos rígidos los expresa Violini y Pappañardi (s.f.)

- Elevado incremento de las cargas circulantes y de su frecuencia con respecto a las previstas en el diseño original, causando daños superficiales o estructurales.
- Deficiencias durante el proceso constructivo en la calidad real de los materiales en espesores o en las operaciones de construcción, particularmente en la densificación de las capas.
- Diseños deficientes, como el inadecuado uso de métodos de diseño en la actualidad, incorrecta valoración de las características de los materiales empleados, incorrecta evaluación del tránsito existente y su proyección hacia el período de diseño del pavimento.
- Factores climáticos regionales desfavorables, como la elevación del nivel freático, inundaciones, lluvias prolongadas, cambios de temperatura, insuficiencia de drenaje superficial entre otros.
- Deficiente mantenimiento por limitaciones en los recursos económicos disponibles, equipo, maquinaria especializada y personal capacitado.

### **6.1.6. Evaluación de un pavimento**

La evaluación de un pavimento consiste en determinar los daños existentes en el mismo y las causas de origen. De igual manera, tiene por objetivo establecer un diagnóstico que permita seleccionar y proyectar la solución de mantenimiento o rehabilitación más adecuada para cada una de las secciones homogéneas en que puede dividirse la carretera según el estudio realizado. En la evaluación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos según Morales (2004):

- Debe ser sistemática y permanente, a fin de detectar los daños tan pronto como se presentan y tomar de inmediato las medidas preventivas o correctivas más adecuadas.
- No se debe asumir determinadas condiciones o propiedades de los materiales, dado que esto puede impedir que se obtengan los resultados deseados.
- Se debe distinguir entre los daños que influyen en la calidad del tránsito, y aquellos que se refieren al deterioro y reducción de la capacidad de carga del pavimento.
- La presencia de bombeo en juntas y grietas indica que hay deficiencias en el drenaje.

## 6.2. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Las metodologías de diseño tienen como fin simular analíticamente el comportamiento de una estructura de pavimento, ante diferentes esfuerzos y condiciones a la cual va a ser sometida, esto con el fin de determinar su periodo de vida útil. Para esto se establecen metodologías de diseño, que tienen en cuenta diferentes variables que contemplan parámetros inherentes a la durabilidad de la estructura, estos parámetros son los que diferencian una metodología con otra (López, 2015).

Todas las metodologías de diseño para estructuras de pavimento rígido, se establece como criterio de diseño la fatiga y la erosión, reconociéndose a la fatiga como el daño de las losas por las repeticiones de carga, representándose en desgaste superficial y o fisuras, y la erosión como la pérdida del material de apoyo de las losas, generando que estas queden en "Voladizo" permitiendo deflexiones en las losas, manifestándose en fisuras, dadas estas consideraciones se establecen las metodologías como medios para simular las posibles afectaciones de las estructuras ante las diferentes condiciones (López, 2015).

### 6.2.1. Parámetros de diseño

#### El tránsito y el período de diseño

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada al número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circulan por el camino, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2Ton) también conocidos como ESAL's. Lo conducente es realizar los cálculos para el carril de diseño, seleccionado para estos fines por ser el que mejor representa las condiciones críticas de servicio de la calle o camino (UNAM, s.f.).

AASHTO diseña los pavimentos por fatiga. La fatiga se entiende como el número de repeticiones o ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento. En realidad, al establecer una vida útil de diseño, lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un periodo de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento (UNAM, s.f.).

La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años, es común realizar diseños para 30, 40 o más de 50 años. Otro factor que hay que tomar en cuenta es la tasa de crecimiento anual, que depende del desarrollo económico – social, de la capacidad de la vía, tipo de vehículo que pueden ser más de un tipo que de otro. Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento de tráfico (UNAM, s.f.).

## La resistencia de la subrasante

La resistencia a la subrasante se obtiene mediante el módulo de reacción del suelo ( $K$ ) por medio de la prueba de placa. El módulo de reacción del suelo corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento.

El valor del módulo de reacción se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 Y D1196. El resultado de la prueba indica la característica de resistencia que implica la elasticidad del suelo. Esto es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por una placa entre las deformaciones correspondientes, producida por este esfuerzo. Dado que la prueba de placa es tardada y cara, el valor de  $k$ , es usualmente estimado por correlación a una prueba simple, tal como la Relación de Soporte de California (CBR). El resultado es válido ya que no se requiere una determinación exacta del valor de  $k$ ; las variaciones normales de un valor estimado no afectan apreciablemente los requerimientos del espesor del pavimento. Cuando se diseña un pavimento es probable que tenga diferentes valores de  $K$  a lo largo del tramo por diseñar, por lo que se recomienda utilizar el valor promedio de los módulos  $K$  para el diseño (UNAM, s.f.).

<i>Tipos de suelo</i>	<i>Soporte</i>	<i>Rango de valores de K (PCI)</i>
Suelo de grano fino en el cual el tamaño de las partículas de limo y arcilla predominan	Bajo	75 – 120
Arenas y mezclas de arena con gravas, con una cantidad considerable de limo y arcilla	Medio	130 – 170
Arenas y mezclas de arena con grava, relativamente libre de finos	Alto	180 – 220
Subbase tratada con cemento	Muy alto	250 – 400

Cuadro 1: Tipos de suelo de subrasante y valores aproximados de  $K$

## Características del concreto para pavimentos

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño y en su comportamiento a lo largo de su vida útil.

- Resistencia a la tensión por flexión o Módulo de Ruptura (MR)
- Módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ )

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera resistencia del concreto trabajando a flexión, que se conoce como resistencia a la flexión por tensión ( $S'c$ ) o Módulo de ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días (UNAM, s.f.).

Existe una prueba normalizada por la ASTM C78 para la obtención del módulo de ruptura la cual consiste en aplicar carga a la viga de concreto en los tercios de su claro de apoyo (Figura 3.6). Se puede realizar otra prueba similar aplicándole carga el centro del

claro; los resultados obtenidos son diferentes aproximadamente entre 15 % a 20 % mayores (UNAM, s.f.).

<b>Tipo de pavimento</b>	<b>MR Recomendado</b>	
	<i>(kg/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>(psi)</i>
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas industriales	45.0	640.1
Urbanas principales	45.0	640.1
Urbanas secundarias	42.0	597.4

Cuadro 2: El módulo de ruptura recomendado según en tipo de pavimento

El **módulo de elasticidad** del concreto ( $E_c$ ) está relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. En su defecto correlacionarlo con otras características del material como puede ser su resistencia a la compresión ( $f'_c$ ).

$$E_c = 21000\sqrt{f'_c}$$

### Transferencia de cargas entre losas de confinamiento lateral

También se conoce como coeficiente de transmisión de carga ( $J$ ) y es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir las fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objetivo de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento. Mientras mejor sea la transferencia de cargas, mejor será el comportamiento de las losas del pavimento (UNAM, s.f.).

La efectividad de la transferencia de carga entre las losas adyacentes depende de varios factores:

- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Soporte lateral de las losas

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, por lo que se recomienda su utilización cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25 % del tráfico total.
- El número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ESAL 's.

Esta transferencia de cargas se realiza a través de los extremos de las losas (juntas o grietas) y su valor depende del tipo de pavimento, del tipo de borde u hombro y de la colocación de los elementos de transmisión de carga (UNAM, s.f.).

El coeficiente de transmisión de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta como se observa en la siguiente figura:

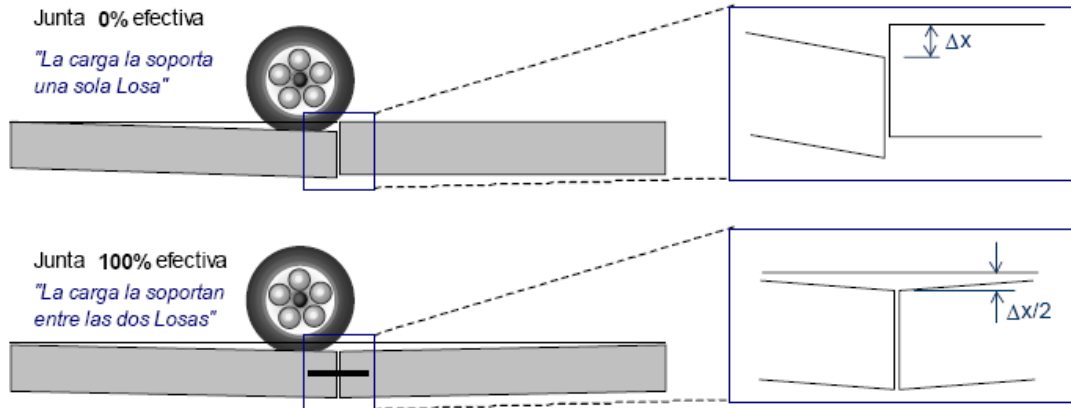


Figura 6: Tipo de juntas y el efecto de la carga en las losas  
(Altamirano, 2007)

**Soporte lateral** es el confinamiento que produce el soporte lateral y contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

- Carril ancho  $\geq 4.0\text{m}$
- Confinamiento con guarniciones o banquetas
- Con acotamientos laterales

Las **pasajuntas** son barras de acero redondo liso con un  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ , la cual no se debe adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de las losas longitudinalmente, pero si debe de transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa (UNAM, s.f.).

## Drenaje

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje es un factor importante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil y por lo tanto en el diseño del mismo. Se puede evaluar mediante el coeficiente de drenaje ( $C_d$ ) el cual depende de:

### 1. Calidad del drenaje

Viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento.

### 2. Exposición a la saturación

Porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento está expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Este valor depende de la precipitación media anual y de las condiciones del drenaje (UNAM, s.f.). Combinando todas las variables que interviene para llegar a determinar el coeficiente de drenaje Cd, se llega a los valores de la siguiente Tabla:

<i>Calidad del drenaje</i>	<i>Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación</i>			
	<i>Menos del 1%</i>	<i>1% - 5%</i>	<i>5% - 25%</i>	<i>Más del 25%</i>
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy Malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Cuadro 3: Valores para el coeficiente de drenaje Cd  
(Fuente: AASHTO, 1993)

Es importante evitar que exista presencia de agua, dado que en caso de presentarse afectará en gran medida a la respuesta estructural del pavimento. El agua atrapada puede producir efectos nocivos como:

- Reducción de la resistencia de materiales granulares.
- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos.
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos.
- Expansión por congelamiento del suelo.

## Confiabilidad

Los factores estadísticos que influyen en el comportamiento de los pavimentos son:

- Confiabilidad R
- Desviación estándar

La confiabilidad está definida como la probabilidad de que el sistema de pavimento se comporte de manera satisfactoria durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación. Otra manera de interpretar este concepto sería aquella que la probabilidad de

que los problemas de deformación y resistencia estén por debajo de los permisibles durante la vida de diseño del pavimento (UNAM, s.f.).

<i>Clasificación del camino</i>	<i>Urbano</i>	<i>Rural</i>
Autopistas	85% - 99.9%	80% - 99.9%
Arterias principales	80% - 99%	75% - 99%
Colectoras	80% - 95%	75% - 95%
Locales	50% - 80%	50% - 80%

Cuadro 4: Valores recomendados del nivel de confianza atendiendo al tipo de camino

## 6.2.2. Metodologías de diseño estructural de pavimentos rígidos

### Método PCA

Esta metodología de diseño tiene como propósito al igual que otras estructuras de concreto determinar los espesores mínimos de pavimentos, lo cual traduce menores costos, en el caso en donde los espesores son mayores, se encuentra un buen desempeño pero se requieren altos costos iniciales de construcción, pero bajos costos de mantenimiento, en el caso contrario en donde se diseñan menores espesores se generan bajos costos de construcción, pero altos costos de mantenimiento, por lo tanto el objetivo es determinar el espesor apropiado que garantice una relación adecuada entre los costos de construcción y mantenimiento, las variables que se tienen en cuenta para el desarrollo de esta metodología son Modulo de rotura del concreto(4.5 MPa), el K combinado de la Subrasante con la Sub Base (26 MPa), el criterio de dovelas y bermas (con dovelas y bermas), la carga por eje y las repeticiones esperadas (López, 2015).

### Método AASHTO-93

En esta metodología de diseño para pavimentos rígidos se establece de igual forma que el diseño para pavimentos flexibles, la determinación de una estructura de pavimento en este caso con concreto hidráulico que soporte un número determinado de ejes equivalente manteniendo unas condiciones de serviciabilidad, con unos materiales de características específicas. Para el desarrollo de esta metodología se tienen en cuenta los siguientes parámetros: la desviación estándar, la confiabilidad, Índice de serviciabilidad, el módulo resiliente de la Subrasante, el número de ejes equivalentes, el módulo de rotura y un coeficiente de correlación según las propiedades de la Sub Base (López, 2015).

### Manual de Diseño INVIAS

Método por el Manual de Diseño de pavimentos del INVIAS Este manual no se establece como una metodología de diseño, sino como una guía comparativa en la que se relacionan diferentes parámetros de diseño para determinar unos espesores para las estructuras de pavimento, se establece esta guía con el fin de tener una herramienta más confiable el pavimento

más adecuado para unas condiciones específicas, para el desarrollo de esta metodología únicamente se establecen cuatro parámetros de diseño; Tránsito, tipo de suelo, resistencia a la rotura del concreto y criterio de transferencia de carga por dovela y Berma (López, 2015).

## Comparación de metodologías de diseño

	<i>Criterio de diseño</i>	<i>PCA</i>	<i>AASHTO</i>	<i>Manual de diseño</i>
<i>Tránsito</i>	Número de ejes equivalentes		X	X
	Número de repetición de carga	X		
	Carga por eje	X		
<i>Subrasante</i>	CBR, Módulo	X	X	X
<i>Propiedades de los materiales</i>	Módulo resiliente, de rotura, CBR	X	X	X
	Coefficiente de aporte y de drenaje		X	
	Coefficiente de Poisson			
<i>Variables estadísticas</i>	Desviación estándar		X	
	Confiabilidad		X	
<i>Factor de seguridad</i>		X		
<i>Serviciabilidad</i>	PSI Inicial y Final		X	
<i>Transferencias de carga</i>	Dovelas	X	X	X
	Bermas	X	X	X

Cuadro 5: Variables contempladas en cada metodología de diseño

## 6.3. PATOLOGÍAS

### 6.3.1. Patologías en concreto hidráulico

Los daños que se pueden presentar en un pavimento rígido pueden dividirse en cuatro categorías generales: grietas, deterioro de las juntas, deterioro superficial y otros deterioros. Cada uno se describe por medio de su definición, nivel de severidad, forma de medición, posibles causas, evolución probables y reparaciones que se les pueden realizar. Es importante mencionar que las reparaciones mencionadas son de tipo preliminar y deben tomarse solamente como una primera aproximación y no una solución definitiva al problema. Además, la severidad atribuida es un criterio adoptado para diferenciar la magnitud del daño o el grado de deterioro, estos se dividen en: severidad baja, severidad media y severidad alta.

En general, en el caso de los pavimentos rígido, el modo de falla del pavimento también puede ser categorizados según la manera en que los daños afectan la integridad del mismo, como:

- **Defectos superficiales:** aquellos que afectan solamente la superficie de losas, reduciendo su serviciabilidad, pero sin detrimento de su capacidad de carga.
- **Defectos estructurales:** aquellos que comprometen la integridad de las losas, reduciendo su habilidad para soportar las cargas.
- **Defecto de las juntas:** aquellos específicamente asociados a juntas de pavimento.

## Grietas

En el grupo de se incluyen todas las discontinuidades y fracturas que afectan las losas de concreto. Es importante hacer la diferencia entre grieta y fisura, esta última se caracteriza por tener un ancho menor a 0.03mm.

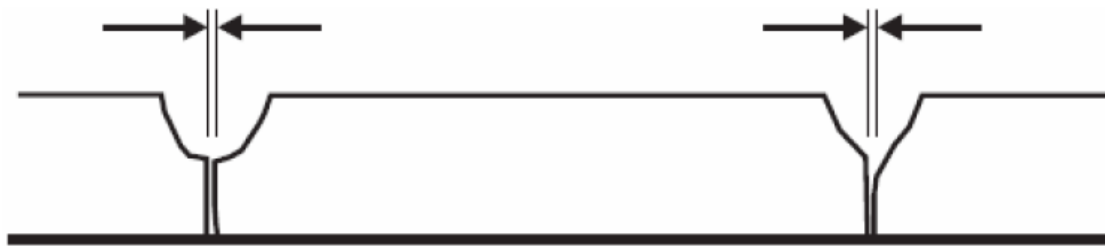


Figura 7: Vista transversal de una losa, se muestra el ancho de una grieta (INVIAS, 2006)

### 1. Grietas de esquina

Este tipo de deterioro genera un bloque de forma triangular en la losa; se presenta generalmente al interceptar las juntas transversal y longitudinal, describiendo un ángulo mayor que  $45^\circ$ , con respecto a la dirección del tránsito. La longitud de los lados del triángulo sobre la junta de la losa varía entre 0,3 m y la mitad del ancho de la losa. Este tipo de daño se presenta en placas de concreto simple y en placas de concreto reforzado (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006). Este tipo de daño puede generar incrementos en los escalonamientos y producir fracturas múltiples en las losas.

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- **Baja:** grietas selladas o con abertura menor a 0.003 m (3 mm). Escalonamiento imperceptible y el bloque de la esquina esta completo.
- **Media:** aberturas entre 0.003 m y 0.01 m (3 – 10 mm).
- **Alta:** aberturas mayores a 0.01 m (10 mm). Se presenta escalonamiento y el bloque de la esquina está dividido en varias partes.

Para la **medición del deterioro** se debe medir la longitud de la grieta en metros y el ancho de su abertura, reportando la cantidad de grietas de esquina presentes en cada losa para cada nivel de severidad. Si existen grietas selladas también deben ser medidas, estas siempre serán reportadas y tendrán un nivel de severidad bajo.

Las **principales causas** de la formación:

- Asentamiento de la base y/o la subrasante.
- Falta de apoyo de la losa, originado por erosión de la base.
- Alabeo térmico.
- Sobrecarga en las esquinas.
- Deficiente transmisión de cargas entre las losas adyacentes.

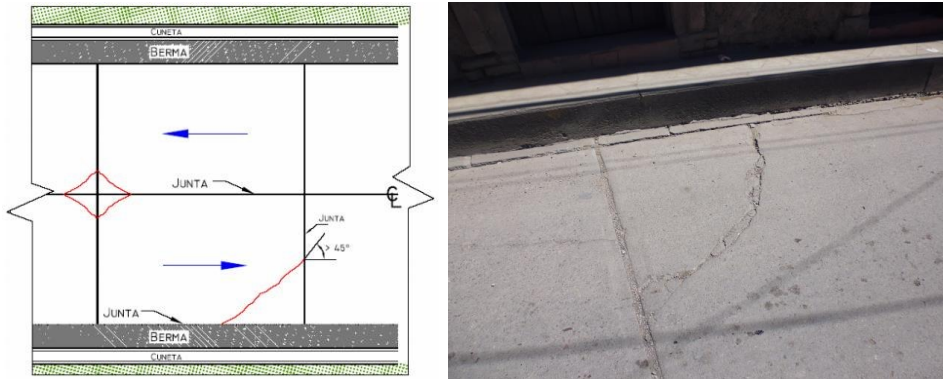


Figura 8: Características de las grietas de esquina (INVIAS, 2006)

## 2. Grietas longitudinales

Tipo de grietas que son predominantemente paralelas al eje de la calzada o que se extienden desde una junta transversal hasta el borde de la losa, pero la intersección se produce a una distancia (L) mucho mayor que la mitad de la longitud de la losa. Este tipo de daño se presenta en todos los tipos de pavimento rígido. Este tipo de daño puede generar incrementos en los escalonamientos y producir fracturas múltiples en las losas.

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- Baja: grietas selladas o con abertura menor a 0.003 m (3 mm). Escalonamiento imperceptible.
- Media: aberturas entre 0.003 m y 0.01 m (3 – 10 mm).
- Alta: aberturas mayores a 0.01 m (10 mm). Se presenta escalonamiento mucho mayor a 0.015 m (15 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe medir la longitud de la grieta en metros, reportando la cantidad de grietas longitudinales presentes en cada losa para cada nivel de severidad. Si existen grietas selladas también deben ser medidas, estas siempre serán reportadas y tendrán algún nivel de severidad.

Las **principales causas** son:

- Asentamiento de la base o la subrasante.
- Falta de apoyo de la losa, originado por erosión de la base.
- Alabeo térmico.
- Losa de ancho excesivo.

- Carencia de una junta longitudinal.
- Mal posicionamiento de las dovelas y/o barras de anclaje.
- Aserrado tardío de la junta.
- Contracción del concreto.

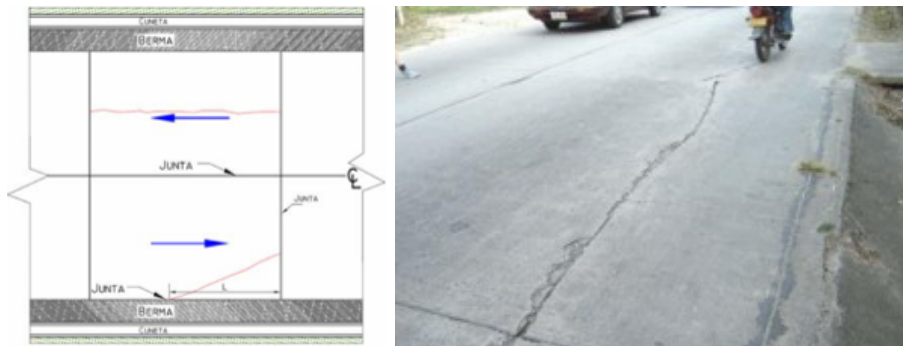


Figura 9: Características de las grietas longitudinales  
(INVIAS, 2006)

### 3. Grietas transversales

Grietas que se presentan perpendiculares al eje de circulación de la vía. Pueden extenderse desde la junta transversal hasta la junta longitudinal, siempre que la intersección con la junta transversal esté a una distancia del borde ( $T$ ) mayor que la mitad del ancho de la losa y la intersección con la junta longitudinal se encuentra a una distancia inferior que la mitad del largo de la losa ( $L$ ). Este tipo de daño se presenta en todos los tipos de pavimento rígido.

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- Baja: grietas selladas o con abertura menor a 0.003 m (3 mm). Escalonamiento imperceptible.
- Media: aberturas entre 0.003 m y 0.01 m (3 – 10 mm).
- Alta: aberturas mayores a 0.01 m (10 mm). Se presenta escalonamiento mucho mayor a 0.006 m (6 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe medir la longitud de la grieta en metros, reportando la cantidad de grietas longitudinales presentes en cada losa para cada nivel de severidad. Si existen grietas selladas también deben ser medidas, estas siempre serán reportadas y tendrán algún nivel de severidad.

Las **principales causas** son:

- Asentamiento de la base o la subrasante.
- Losas de longitud excesiva.
- Junta de contracción aserrada o formada tardíamente.
- Espesor de la losa insuficiente para soportar las solicitaciones.
- Gradiente térmico que origina alabeos.
- Problemas de drenaje.

- Cargas excesivas

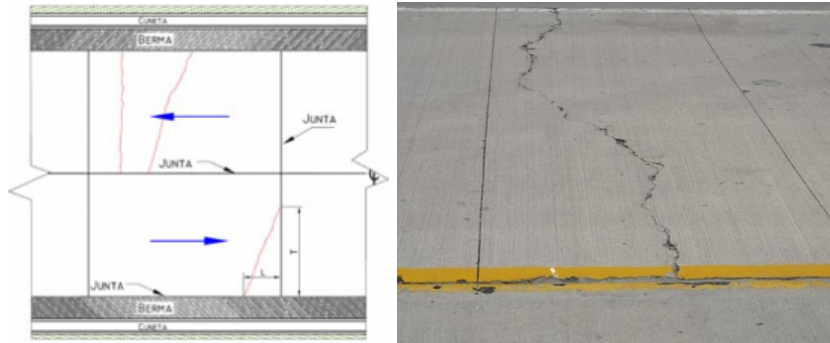


Figura 10: Características de las grietas transversales (INVIAS, 2006)

#### 4. Grietas en los extremos de los pasadores

Cercanas al extremo de los pasadores o dovelas. Pueden ser ocasionadas por la mala ubicación de los pasadores o por su movimiento durante el proceso constructivo. Este tipo de daño se presenta en placas de concreto simple y en placas de concreto reforzado (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006). Este tipo de daño puede generar escalonamiento de las grietas y/o agrietamiento en bloque.

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- Baja: grietas selladas o con abertura menor a 0.003 m (3 mm). Escalonamiento imperceptible.
- Media: aberturas entre 0.003 m y 0.01 m (3 – 10 mm).
- Alta: aberturas mayores a 0.01 m (10 mm). Se presenta escalonamiento mucho mayor a 0.006 m (6 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe medir la longitud de la grieta en metros, reportando la cantidad de grietas presentes en cada losa para cada nivel de severidad. Si existen grietas selladas también deben ser medidas, estas siempre serán reportadas y tendrán algún nivel de severidad.

Las **principales causas** son:

- Mala ubicación de los pasadores.
- Corrosión o desalineamiento de los pasadores.
- Movimiento durante el proceso constructivo.
- Diámetros de barras muy pequeño y cargas de tráfico altas.

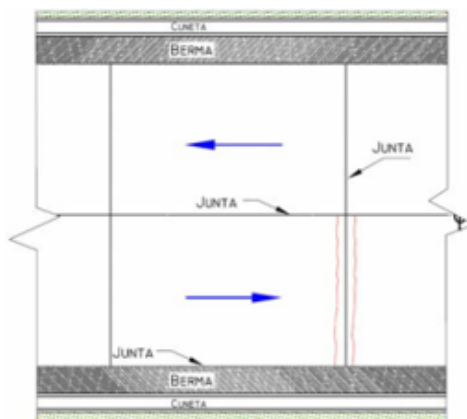


Figura 11: Características de las grietas en los extremos de los pasadores (INVIAS, 2006)

### 5. Grietas en bloque

Son también llamadas fracturación múltiple, estas aparecen por la unión de grietas longitudinales y transversales formando bloques a lo largo de la placa. Este grupo también comprende las grietas en “Y”. Aunque se presenta en todos los tipos de pavimentos rígidos, es más frecuente que se presente en placas de concreto simple y en placas de concreto reforzado (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006).

Representa la evolución final del proceso de fisuración, que comienza formando una malla más o menos cerrada; el tránsito y la continua flexión de las losas aceleran la subdivisión en bloques más pequeños, favoreciendo el desportillamiento de sus bordes. Pueden presentar diversas formas y aspectos, pero con mayor frecuencia son delimitados por una junta y una fisura. Pueden llegar a señalar el deterioro total de la estructura y/o hundimientos (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006).

En cuanto a los **niveles de severidad**, estas siempre son consideradas como un deterioro de las losas con severidad alta.

Para la **medición del deterioro** se debe medir el área afectada en metros cuadrados de cada losa.

Las **principales causas** son:

- Fracturación múltiple.
- Repetición de cargas pesadas (fatiga del concreto).
- Equivocado diseño estructural.
- Deficiencia en las condiciones de soporte.

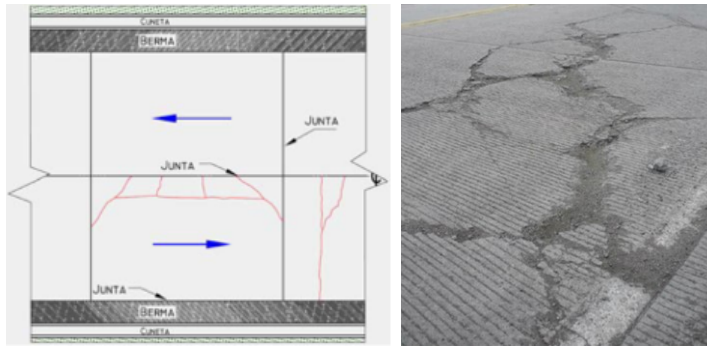


Figura 12: Características de las grietas en bloque y las grietas tipo “Y” (INVIAS, 2006)

## 6. Grietas en pozos y sumideros

Son grietas que están directamente relacionadas con la presencia del pozo o del sumidero. Este tipo de deterioro se presenta en todos los tipos de pavimento rígido. Los deterioros con mayor probabilidad de ocurrencia como consecuencia de este daño son el bombeo o afloración de agua en la superficie y el deterioro total de la losa (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006).

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- Baja: grietas selladas o con abertura menor a 0.003 m (3 mm). Escalonamiento imperceptible.
- Media: aberturas entre 0.003 m y 0.01 m (3 – 10 mm).
- Alta: aberturas mayores a 0.01 m (10 mm). Se presenta escalonamiento mucho mayor a 0.006 m (6 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe medir el área afectada en metros cuadrados de cada losa.

La **principales causas** de la formación de este tipo de grietas se atribuye a la variación en la distribución de esfuerzos debida a la presencia de pozos o sumideros, éstos se convierten en una zona vulnerable a la aparición de grietas derivadas de la geometría irregular de la zona adyacente al pozo que no permite una buena distribución de esfuerzos (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006).

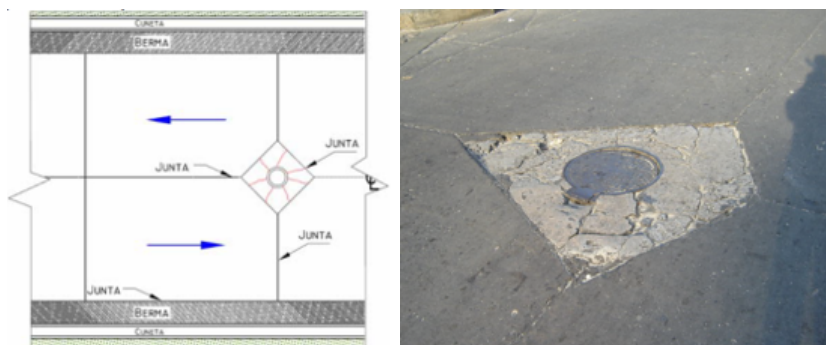


Figura 13: Características de las grietas en pozos y sumideros (INVIAS, 2006)

## Daños en juntas

### 1. Separación de juntas longitudinales

Corresponde a una abertura en la junta longitudinal del pavimento. Este tipo de daño se presenta en todos los tipos de pavimento rígido. El deterioro con mayor posibilidad de ocurrencia debido a la evolución de una separación de juntas longitudinales es la pérdida del perfil longitudinal; también puede haber bombeo debido a la entrada de agua en daño con severidad alta (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, 2006).

Los **niveles de severidad** están definidos de la siguiente manera:

- Baja: abertura menor a 0.003 m (3 mm). Levantamiento imperceptible, desportillamiento mínimo.
- Media: aberturas entre 0.003 m y 0.025 m (3 – 25 mm).
- Alta: aberturas mayores a 0.025 m (25 mm). Se presenta diferencia de nivel entre losas adyacentes o altura sobre nivel medio de vía mucho mayor a 0.010 m (10 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe tomar la longitud en metros de la junta afectada por cada losa.

Las **principales causas** de la formación:

- Contracción o expansión diferencial de losas debido a la ausencia de barras de anclaje entre carriles adyacentes.
- Desplazamiento lateral de las losas motivado por un asentamiento diferencial en la subrasante.
- Ausencia de bermas.
- Asentamiento diferencial de la subrasante.

Dentro de las **posibles intervenciones** que existen para reparar este daño se debe tener en cuenta la severidad de la falla. Cuando la sección transversal no presenta deformaciones que signifiquen pérdida de confort al manejar se debe sellar. Sin embargo, Si hay un nivel de severidad medio o alto, se debe reconstruir el tramo, reconformando y recompactando la subrasante y colocando barras de amarre en la junta longitudinal.

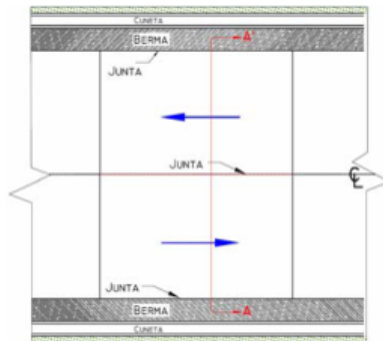


Figura 14: Características de separación de juntas transversal (INVIAS, 2006)

## Deterioros superficiales

### 1. Desportillamiento de juntas

Desintegración de las aristas de una junta (longitudinal, transversal), con pérdida de trozos, que puede afectar hasta 0,15 m (15 cm) a lado y lado de la junta. Este tipo de deterioro se presenta en todos los tipos de pavimento rígido con juntas. La evolución más probable del desportillamiento de las juntas es la entrada de agua a la base generando bombeo.

Los **niveles de severidad** se definen combinando el estado de los bloques que se forman por el fracturamiento en contacto con la junta y sus dimensiones, se clasifican de la siguiente forma:

- Baja: pequeñas fracturas, que no se extienden más de 0,08 m (80 mm) a cada lado de la junta, dan lugar a pequeñas piezas que se mantienen bien firmes, aunque ocasionalmente algún pequeño trozo puede faltar.
- Media: las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 0,08 m (80 mm) a cada lado de esta, dando origen a piezas o trozos relativamente sueltos, que pueden ser removidos; algunos o todos los trozos pueden faltar, pero su profundidad es menor de 0,025 m (25 mm).
- Alta: las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 0,08 m (80 mm) a cada lado de esta, las piezas o trozos han sido removidos por el tránsito y tienen una profundidad mayor de 0,025 m (25 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe tomar la longitud en metros de la junta afectada por placa y se reporta la severidad del daño.

Las **principales causas** de la formación:

- Debilitamiento de los bordes de la junta debido a defectos constructivos.
- Desintegración del concreto, por mala calidad del material.
- Presencia de material incompresible en la junta, el cual al expandirse genera concentración de esfuerzos y la posterior falla ante el paso de vehículos.
- Mal procedimiento de corte de la junta.
- Aplicación de cargas antes de conseguir la resistencia mínima recomendada del concreto.

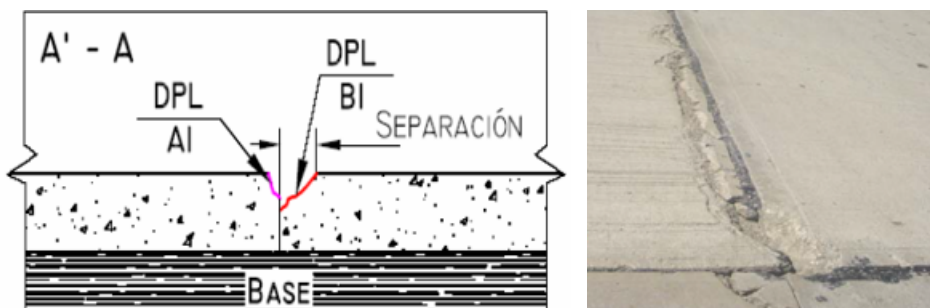


Figura 15: Desportillamiento  
(INVIAS, 2006)

## 2. Descascaramiento

Descascaramiento es la rotura de la superficie de la losa hasta una profundidad del orden de 5 a 15 mm, por desprendimiento de pequeños trozos de concreto. El descascaramiento puede incrementar su grado de severidad hasta generar desintegración.

Los **niveles de severidad** se definen de acuerdo con la profundidad a la cual ha existido pérdida de material superficial y se clasifican de la siguiente forma:

- Baja: pérdida de material superficial a una profundidad menor a 0.005 m (5 mm).
- Media: pérdida de material superficial a una profundidad de entre 0.005 m (5 mm) y 0.015 m (15 mm).
- Alta: pérdida de material superficial a una profundidad mayor a 0.015 m (15 mm).

Para la **medición del deterioro** se debe medir el área de cada descascaramiento por placa identificando la severidad de la falla.

La **principal causa** es:

- Exceso de acabado del concreto fresco colocado, lo que produce exudación del mortero y agua, lo cual provoca que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.

También se debe tomar en cuenta que las fisuras capilares existentes en el pavimento pueden evolucionar a descascaramiento por efecto del tránsito, posibilitando de esta manera el levantamiento o desprendimiento del material superficial que puede progresar en área y en profundidad. El fenómeno es posible encontrarlo en pavimento con refuerzo cuando la armadura se coloca muy cerca de la superficie y no se le da el recubrimiento adecuado.

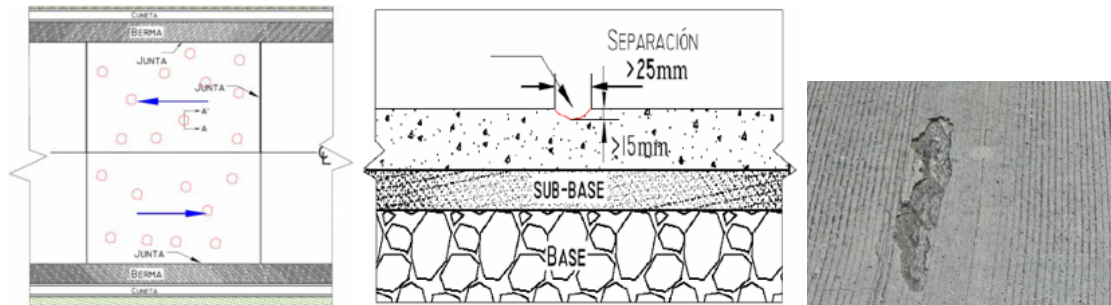


Figura 16: Características de descascaramiento (INVIAS, 2006)

## 3. Desintegración

Consiste en pérdida constante de agregado grueso en la superficie, debido a la progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de matriz arena-cemento del concreto, provocando una superficie con pequeñas cavidades. La desintegración de la superficie del pavimento puede incrementar su grado de severidad hasta generar baches

Los **niveles de severidad** se definen de acuerdo con el área en la cual ha existido pérdida de material superficial, se clasifican de la siguiente forma:

- Baja: pequeños desprendimientos muy superficiales, puntuales o concentrados en pequeñas áreas, como remiendos.
- Media: peladuras generalizadas, se extienden en la superficie dando lugar a una textura abierta, pero los desprendimientos se limitan a material fino, solo superficialmente.
- Alta: peladuras generalizadas, se extienden en la superficie dando lugar a una superficie rugosa, con desprendimiento de agregado grueso formando cavidades o pequeños baches superficiales.

Para la **medición del deterioro** se debe medir el área por severidad del daño de cada losa.

Las **principales causas** son:

- Efecto abrasivo del tránsito sobre concreto de pobre calidad, esto por inadecuado uso de dosificaciones (bajo contenido de cemento, exceso de agua, agregados con una incorrecta granulometría).
- Deficiencias durante la ejecución (segregación de mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso).
- Material inapropiado en el interior del hormigón tal como terrones de arcilla o cal viva.
- Mortero poco homogéneo.
- Deficiente calidad de los materiales.
- Agregados expansivos o de baja durabilidad.
- Reparaciones hechas sin seguir recomendaciones técnicas.

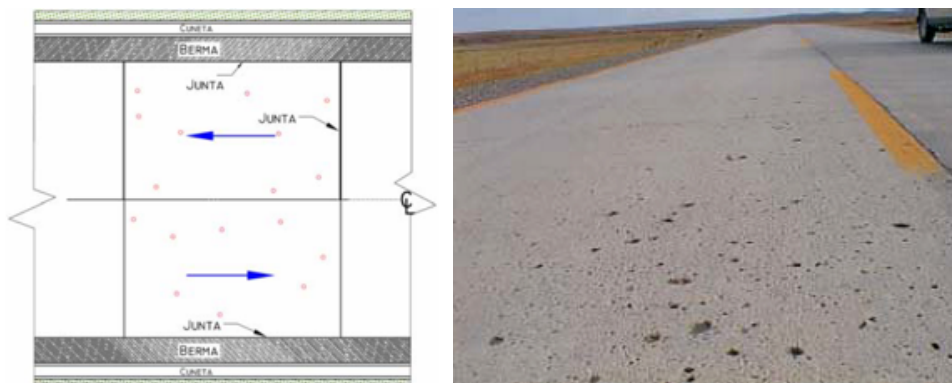


Figura 17: Desintegración  
(INVIAS, 2006)

#### 4. Baches

Desintegración de la losa de concreto y la remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares que incluso puede dejar expuesto el material de base

Los **niveles de severidad** se definen de acuerdo a la profundidad a la cual ha existido pérdida de material:

- Baja: profundidad de afectación menor o igual que 25 mm.
- Media: profundidad de afectación entre 25 mm y 50 mm.
- Alta: profundidad de afectación mayor a 50 mm.

Para la **medición del deterioro** se debe medir en metro cuadrados el área afectada, registrando la mayor severidad existente por cada losa.

Las **principales causas** de la formación:

- Fundaciones y capas inferiores inestables.
- Espesores del pavimento estructuralmente insuficientes. Retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas.
- Acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento.



Figura 18: Bache  
(INVIAS, 2006)

## 5. Pulimientto

Carencia o pérdida de la textura superficial necesaria para que exista una fricción adecuada entre el pavimento y los neumáticos.

En cuanto a los **niveles de severidad** no se definen categorías de clasificación, sino que esta falla siempre ser de una severidad alta cuando es reportada.

Para la **medición del deterioro** se debe medir el área afectada en cada losa o la cantidad de losas afectadas.

Las **principales causas** de la formación:

- El tránsito produce un desgaste de la superficie de los agregados, especialmente cuando la mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente y favorece la exposición de los mismos.
- La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito.

- El pulimento de los agregados puede ser considerado cuando un examen visual revela que la rugosidad sobre la superficie es muy reducida y se presenta una superficie suave al tacto.



Figura 19: Pulimiento  
(INVIAS, 2006)

#### 6. Escalonamiento de juntas longitudinales y transversales

Es una falla provocada por el tránsito que corresponde a un desnivel de la losa en su junta con respecto a una losa vecina. El escalonamiento de las juntas puede ocasionar fractura de la losa, si éste se combina con bombeo que implica pérdida del material de base.

Los **niveles de severidad** se definen teniendo en cuenta la diferencia de altura o desnivel entre las placas adyacentes:

- Baja: desnivel menor a 0.005m (5 mm).
- Media: desnivel entre 0.005m (5 mm) y 0.010 m (10 mm).
- Alta: desnivel mayor a 0.010 m (10 mm).

Para la **medición del deterioro** se pueden tomar en cuenta la siguientes formas:

- Si la losa a medir está más alta que la de referencia o contigua, registrar como escalonamiento negativo (-); en el caso contrario indique escalonamiento positivo (+).
- Definir si el desnivel se presenta en el largo o ancho de la losa y determinar su magnitud en metros, se debe tener en cuenta si el desnivel está asociado con desportillamientos o con alguna grieta definida claramente en otro tipo de daño.

Las **principales causas** de la formación:

- Deficiencia en el traspaso de cargas entre las losas o trozos de losas.
- Erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta.
- Asentamiento diferencial de la subbase o subrasante.
- Falta de capacidad de soporte de la subrasante.

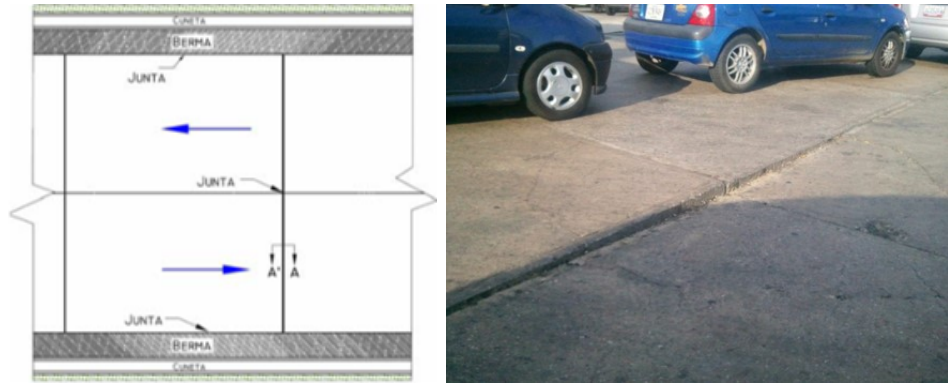


Figura 20: Escalonamiento  
(INVIAS, 2006)



## 7.1. EVALUACIÓN FUNCIONAL DEL PAVIMENTO

La evaluación funcional de una estructura de pavimento hace referencia a la inspección superficial realizada en una vía con el propósito de determinar los deterioros que afectan al usuario, pero que no comprometen la capacidad estructural del pavimento (Morales, 2004). Existen diferentes indicadores para establecer el estado superficial de un pavimento, cada uno es expresado a través de fórmulas, en las que se recoge una serie de parámetros del pavimento. Para cada indicador existen tablas en las cuales se dan valores que indican en que condición se encuentra el pavimento.

### 7.1.1. Nivel de servicio de las carreteras

La calificación de un pavimento se mide por medio de la serviciabilidad o nivel de servicio que prestan durante el periodo de vida útil. El comportamiento de una carretera puede ser estimado desde dos aspectos: estructural y funcional. Por otro lado, el comportamiento funcional es interpretado por los usuarios como la percepción de la calidad de la superficie de la capa de rodadura. El comportamiento funcional comprende las características principales que afectan la seguridad, el confort y costes de los usuarios; siendo la regularidad superficial, textura y resistencia al deslizamiento las que definen el aspecto funcional (Ramos, 2018).

Se percibe que, en la función de seguridad del pavimento, los indicadores son la textura y la resistencia al deslizamiento o también denominado fricción. Sin embargo, la textura (principalmente la macrotextura), al igual que la regularidad superficial también brinda el nivel de servicio de confortabilidad y serviciabilidad al usuario.

<i>Tipo de evaluación</i>	<i>Función del pavimento</i>	<i>Características del pavimento</i>	<i>Indicador</i>
Condición funcional	Serviciabilidad	Regularidad superficial	Índice Internacional de Rugosidad (IRI)
	Seguridad	Textura	Macrotextura
			Microtextura
		Resistencia al deslizamiento o fricción	Coefficiente de resistencia al deslizamiento

Cuadro 6: Funciones y características del pavimento por tipo de evaluación (Ramos, 2018)

### 7.1.2. Definición de rugosidad

La regularidad o rugosidad superficial de un pavimento hace referencia a un fenómeno que depende en gran medida del perfil longitudinal de la superficie de este, sin embargo, también es afectada por las características mecánicas de los vehículos y las velocidades de circulación. Esta es una de las características más influyentes en la sensación de confort y seguridad que experimenta un usuario (Sánchez y Solminihac, 1989).

Las irregularidades de la superficie de una carretera se deben principalmente a dos causas: el proceso constructivo y el uso de la misma (Ramos, 2018). Por lo tanto, cuando se habla de regularidad superficial se puede hacer referencia a la evaluación funcional de un pavimento, el cual está relacionada directamente con la percepción del usuario al utilizar una determinada vía (Badilla, s.f.). Así pues, una evaluación funcional ofrece información acerca del estado de la regularidad, sus condiciones de seguridad y comodidad. Lo cual, a su vez, tiene una alta incidencia en gastos de transporte, mantenimiento de la red vial y costo de operación de vehículos debido a que una superficie en mal estado impacta negativamente en la velocidad de circulación, aumenta el desgaste de llantas y el consumo de combustible (Badilla, s.f.).

Una irregularidad también impacta directamente en efectos dinámicos como la transmisión de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento, favoreciendo así al deterioro y aumento en el costo de una intervención. Sin embargo, una falla en la estructura también incide en la superficie, demostrándose con la aparición de baches y otro tipo de deformaciones (Sánchez y Solminihac, 1989). Por lo mismo, este fenómeno debe ser evaluado desde el inicio del período de servicio de la vía y en toda la vida útil de la misma.

Además, la rugosidad ofrece la oportunidad de servir como indicador de calidad en la recepción de carreteras nuevas o recién terminadas tras un proceso de rehabilitación o reconstrucción (Sánchez y Solminihac, 1989). Un pavimento construido con una buena regularidad superficial puede tener una vida útil mayor a una contraparte con más deformaciones. En este aspecto se debe tomar en consideración que la vida útil y el progreso o aumento de las irregularidades de un pavimento depende de muchos otros factores como la carga de tráfico, el clima, variabilidad de materiales, entre otros (Caro y Peña, 2012).

### 7.1.3. Definición del Índice Internacional de Rugosidad (IRI)

Con el objetivo de establecer un parámetro universal de la medida de la regularidad superficial, en 1982 en Brasil y patrocinado por el Banco Mundial, se realizó el proyecto llamado “International Road Roughness Experiment” (IRRE) donde se seleccionó un único parámetro de medición de la regularidad, el cual se conoce como Índice de Rugosidad Internacional – IRI por sus siglas en inglés (Sánchez y Solminihaç, 1989). Según la norma de ensayo ASTM E 867-06, se define el concepto de “roughness” o rugosidad como: “[la] desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal” (ASTM, 1995).

El IRI fue definido como un resumen matemático del perfil longitudinal de la rugosidad del camino en una huella, que a su vez representa las vibraciones que induce dicha rugosidad en un auto típico por medio de la pendiente promedio rectificadas –razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida – cuando este viaja a una velocidad de 80 m/km. Por lo que para poder establecer el valor de IRI se utiliza un modelo matemático que se encarga de simular la suspensión de una rueda (un cuarto de llanta) y masa de un vehículo típico circulando por una vía o la superficie de un camino (Caro y Peña, 2012).

#### Cálculo de IRI

El modelo del de cuarto de carro simula la cuarta parte de un vehículo ideal o típico a través del cual se registran características asociadas a la vía basándose en los desplazamientos verticales inducidos al carro. El modelado del vehículo se simplifica como un conjunto de masas entrelazadas entre sí – donde la masa suspendida representa la masa del vehículo,  $M_s$ , y la masa no suspendida a la masa de la rueda,  $M_r$  – y con la superficie de la carretera por medio de resortes – donde el resorte primario representa la rueda,  $K_r$ , y el resorte secundario a la suspensión del carro,  $K_s$  – como se representa en la Figura (Ramos, 2018).

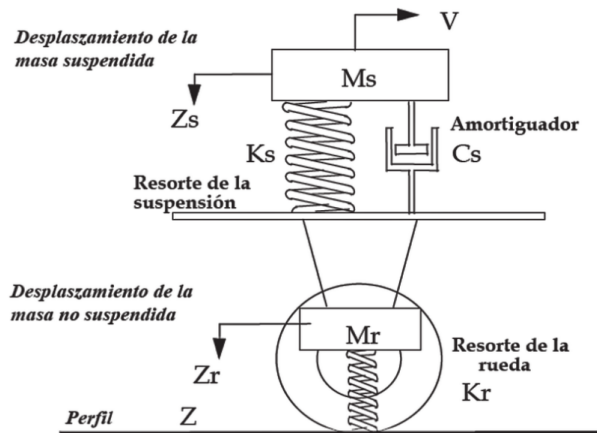


Figura 21: Modelo de cuarto de carro

De acuerdo con Badilla Vargas (s.f.) el modelo de cuarto de carro se pueden registrar las características asociadas a la vía basadas en los desplazamientos verticales inducidos al vehículo. Esto debido a que el movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masa provocando movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino al momento de realizar una medición.

Según Sánchez y Solminihac (1989), si se conoce el perfil longitudinal de la carretera,  $y(x)$ , y la velocidad a la que circula el vehículo,  $V$ , entonces se puede calcular en cada punto el movimiento,  $z_1$  y  $z_2$ , de cada una de las masas,  $m_1$  y  $m_2$ , que componen el modelo. También se puede definir la respuesta del vehículo en términos de la pendiente rectificada –  $RS$ , Rectified Slope – en cada uno de los puntos en que se discretiza el perfil longitudinal.

$$RS_i = |z'_1 - z'_2|$$

Donde,  $z_1$  y  $z_2$  representan las pendientes de las masas del vehículo en las distintas posiciones,  $i$ , a lo largo del camino de la rueda.

Finalmente, el IRI se obtiene como la media aritmética de la pendiente rectificada a lo largo del camino recorrido, donde  $n$  es el número de puntos contabilizados. Por lo tanto,

$$IRI = \left[ \sum_{i=1}^n RS_i \right] / n$$

Para el cálculo del IRI es necesario conocer en cada punto de un tramo las pendientes  $z'_1$  y  $z'_2$  de las masas del vehículo tipo. Estas pendientes se obtienen de un modo recursivo, basándose en los valores obtenidos en el punto anterior. De esta forma si se conoce el movimiento del vehículo en un punto  $i - 1$ , la respuesta en el punto siguiente puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$Z_i = [ST]Z_{i-1} + y^i PR$$

En donde,  $Z = [z'_2, z''_2, z'_1, z''_1]^T$ , con las primas representando derivadas espaciales,  $y^i = (y_i - y_{i-1})/dx$ , y representa la distancia entre muestras, es constante en cada intervalo,  $dx$ , y  $[ST]$  y  $(PR)$  con matrices de  $4 \times 4$  y  $4 \times 1$ , respectivamente, cuyos coeficientes dependen del intervalo de muestra,  $dx$ .

El sistema de ecuaciones anterior se puede resolver para cualquier punto de la carretera, excepto para el primer punto del primer tramo en el que se desconocen los valores de  $z'_i$ ,  $z'_2$ ,  $z''_1$  y  $z''_2$  en el punto anterior. Para inicializar el proceso de cálculo se adopta como valores iniciales del movimiento del vehículo los siguientes:

$$z^l = z'_2 = (y_a - y_1)/ll$$

$$z''^l = z''_2 = 0$$

En donde  $y_1$  e  $y_a$  son las elevaciones del primer y a-ésimo puntos correspondientes a distancias de cero y 11 m., respectivamente.  $z'_1$  y  $z'_2$  representan, por lo tanto, la pendiente media del perfil de carretera en el primer tramo de 11 m. (0.5 seg a 80 km/h). El procedimiento anterior para el cálculo del IRI es válido para intervalos entre medidas,  $dx$ , comprendidos entre 0.25 y 0.6 m.

## Resultados de IRI

Los resultados del valor de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, por lo que la unidad de medida es la de una pendiente adimensional; sin embargo, con el objetivo de no presentar valores muy pequeños, se recomienda presentar los resultados en m/km o pulg/mi. Debido a que la longitud del tramo de medición tiene influencia en el valor de IRI obtenido, según Sánchez y Solminihac (1989) para definir de manera más detallada la regularidad de una carretera, lo más apropiado son tramos mínimos de 200 metros para la definición de IRI.

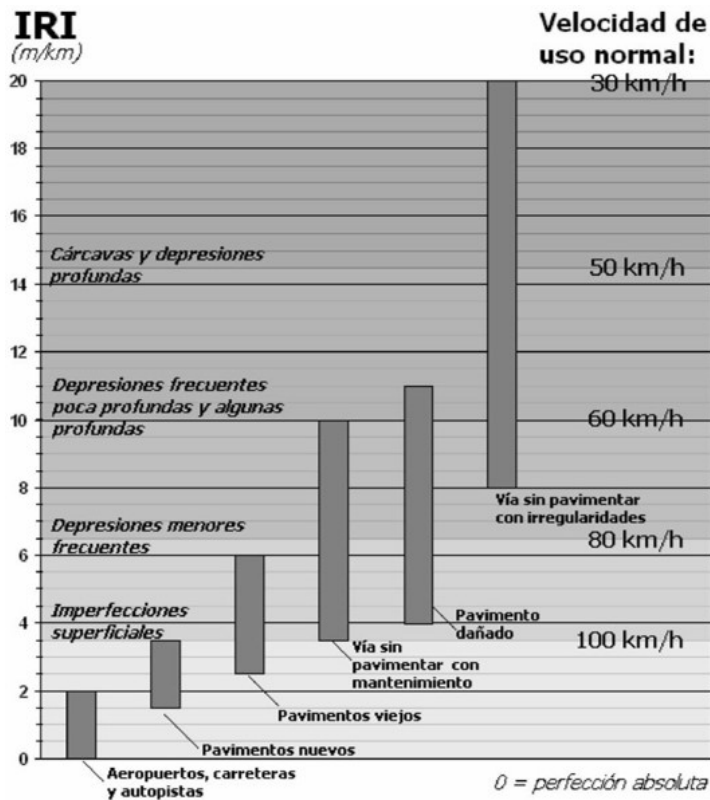


Figura 22: Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación de IRI

Además, cabe mencionar que el IRI es influenciado por longitudes de onda que van desde 1.25 hasta 30 metros, pues es en estas en las que se encuentran las irregularidades referentes a bacheos, juntas y otras fallas superficiales del pavimento (Caro y Peña, 2012). Esto es importante debido a que longitudes de onda inferiores a las mencionadas con anterioridad, corresponden a irregularidades propias de microtexturizados, macrotexturizados y megatexturizados, los cuales influyen de manera mínima a la evaluación del IRI – sin embargo,

su aporte tampoco es despreciable. Por otro lado, las longitudes de onda mayores a los 30 m pueden estar ligadas a la geometría de la vía – como curvas verticales y otros aspectos topográficos – que tampoco influyen considerablemente a valores de IRI (Caro y Peña, 2012).

La figura anterior muestra los valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento según el Banco Mundial. El rango de la escala de IRI va desde 0 hasta 20 m/km, en donde 0 representa una vía con una superficie uniforme perfecta mientras que el 20 representa una vía sin pavimentar o inestable. Con esto se puede concluir que a menor sea el valor de IRI obtenido, este representara una superficie más lisa, mientras que valores mayores son representativos de superficies más rugosas.

En la misma figura también se puede apreciar distintas velocidades de uso según el IRI, por lo que valores más bajos de rugosidad permiten velocidades mayores de circulación, por otro lado, valores altos dificultan la circulación de vehículos a altas velocidades. El estado de una carretera nueva tiene un valor de IRI mayor a cero, debido a que valores igual a cero son sumamente difíciles de conseguir desde el punto de vista constructivo. La rugosidad de la vía se irá modificando lentamente con el paso del tránsito.

#### 7.1.4. Métodos de medición de IRI

##### Clase 1: Perfiles de precisión

Método de clase uno hace referencia a que se requiere que el perfil longitudinal de una huella se mida de forma precisa y se defina por medio de una serie de elevaciones en puntos separados por una distancia pequeña. Por lo tanto, este método representa el más alto nivel de precisión y calidad para obtener la medida de IRI, de tal manera que la reproducibilidad de los valores obtenidos no podría mejorarse. Cabe destacar que la repetitividad de una medición tiene límites en cuanto que es prácticamente imposible seguir exactamente una misma huella de rueda (Onofre, Sánchez y Santiago, 2008).

De acuerdo con Onofre *et al.* (2008) Existen principalmente dos tipos de perfilómetros: los dinámicos y los estáticos. El perfilómetro dinámico permite obtener perfiles a velocidades altas, aunque el perfil obtenido no es una réplica exacta de la vía en los componentes del perfil con longitudes de onda inferiores y superiores a ciertos valores, sí es exacto en cuanto a la zona de longitudes de onda influyentes en la regularidad superficial. Por otro lado, los sistemas estáticos pueden obtener medidas más exactas del perfil longitudinal, sin embargo, son de bajo rendimiento por lo que se consideran adecuados solo en estudios especiales.

Onofre *et al.* (2008) describe que dentro de los equipos dinámicos se encuentran los siguientes:

- **Perfilógrafos:** son utilizados ampliamente para evaluar la regularidad de pavimentos de asfalto hidráulico durante la construcción. Fue desarrollado por los departamentos de carreteras de California y Texas, y el laboratorio de investigaciones de caminos en Inglaterra. Consiste en un conjunto de patines con una rueda al centro que posee libertad de movimiento vertical. Dicho movimiento vertical, relativo a las ruedas, queda

registrado en una planilla continua. Su ventaja radica en costo inicial bajo, simplicidad de operación y una buena repetitividad. Sus desventajas son su baja velocidad de operación y su incapacidad para medir rugosidad en longitudes de onda iguales a múltiplos del largo del patín.

- **Perfilómetros inerciales:** se trata de una versión moderna del perfilómetro inercial producido por General Motor Research en la década de los 60. Consiste en un vehículo con un instrumento que mide los perfiles en ambas huellas de rodadura al conducir a lo largo de una carretera, donde la referencia inercial se consigue a través de acelerómetros verticales. Se debe determinar la distancia del cuerpo del perfilómetro hasta la superficie de la vía, esto se obtiene mediante sensores sin contacto directo al pavimento – pueden ser ópticos, acústicos, laser, varían según el modelo. Luego las señales del acelerómetro se integran dos veces para determinar la posición del cuerpo del perfilómetro y cuando dicha señal se agrega a la señal de posición del seguidor de la vía se obtiene el perfil.
- **Perfilómetros inerciales APL:** estos analizadores de perfiles longitudinales (APL) fueron desarrollados por el Laboratorio Central de Ponts et Chaussees – LCPC por sus siglas en francés – y ha sido fabricado para hacer rápidamente evaluaciones continuas de 100 a 300 km de carretera en un solo día. Consiste en un remolque especial con una rueda, chasis con lastre y un péndulo inercial de baja frecuencia que sirve de referencia pseudohorizontal. El remolque está diseñado de tal manera que no sea sensible a los movimientos provocados por la tracción del vehículo, por lo que solamente detecta el perfil de la trayectoria recorrida por la rueda a una frecuencia entre 0.5 y 20 Hz.

La banda de longitudes de onda detectada por el APL depende de la velocidad a la cual se realiza la medición. Cuando el perfilómetro trabaja a una velocidad entre los 50 y 100 km/h, el equipo es capaz de detectar la rugosidad de todos los valores de longitud de onda que son requeridos para el IRI. Así también puede detectar ondas altas de hasta 100 m cuando trabaja a una velocidad de 150 km/h o bajas de 0.3 m cuando se remolca a aproximadamente 22 km/h.



Figura 23: Perfilógrafo de estructura tipo California por TC Technologies



Figura 24: Perfilómetro inercial RSP 5051 Mark IV por Dynatest



Figura 25: Perfilómetro inercial APL

Por otro lado, Onofre *et al.* (2008), establecen que en cuanto a los equipos de medición estáticos se encuentran:

- **Levantamientos con miras a nivel:** en este método se emplea el equipo tradicional de topografía. Es un equipo que se consigue fácilmente a bajo costo, pero requiere muchas horas de trabajo y en general es mejor usarlo sólo cuando se deben medirse unos pocos perfiles.
- **Perfilómetros de barra del TRRL:** se tratan de un tipo de perfilómetro automático desarrollado por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL). Consiste en una barra de aluminio de 3 m de longitud apoyada en cada extremo sobre trípodes ajustables usados para la nivelación. Un carro se desliza sobre la barra y hace contacto

con el suelo mediante una rueda seguidora con un diámetro de 250 mm mientras recorre la barra en toda la longitud. Los instrumentos de medida instalados en el carro detectan los desplazamientos verticales, los mínimos y transformar las medidas en valores digitales con 1 mm de resolución y registran los valores numéricos a intervalos constantes. Para obtener un perfil continuo de la huella de la rueda, la barra se reubica sucesivamente sobre segmentos consecutivos.

- ***Machine for Evaluating Roughness using Low cost Instrumentation (MER-LIN)***: consiste en una estructura metálica de 1.8m de longitud, con una rueda al frente, un pie de apoyos fijo atrás y un apoyo central oscilante (Fig. 2.8). Este último mide las desviaciones de cota de un punto respecto en la rasante que definen los otros dos puntos. El apoyo central unido a un brazo que en su extremo superior posee un puntero que permite registrar estas desviaciones en una planilla de papel.

## **Clase 2: otros métodos perfilométricos**

Al igual que la clase 1, estos métodos se basan en la medida del perfil longitudinal, pero carecen la exactitud de los anteriores. En estos entran perfilómetros y métodos estáticos que no satisfacen los criterios de precisión y exactitud requeridos para ser clase 1 (Onofre et al., 2008).

## **Clase 3: estimaciones mediante correlaciones**

Las medidas que se obtienen con estos métodos dependen en gran magnitud de las características dinámicas de cada vehículo y es necesario convertir las medidas recolectadas con estos sistemas a coeficiente que sean comparables con el IRI. Por lo tanto, es necesario utilizar ecuaciones de correlación para convertir a escala IRI los valores de pendiente media rectificadas obtenidos con esta metodología. Dichas ecuaciones se obtienen calibrando los equipos tipo respuesta – Response-Type Road Roughness Measuring Systems, RTRRMS por sus siglas en inglés – con otros aparatos de clase 1 o 2 (Onofre et al., 2008). Además, como las características mecánicas de los vehículos varían muy fácilmente, es necesario mantener controles muy rigurosos tanto en el uso del vehículo como en su mantenimiento.

## **Clase 4: valores subjetivos y medidas sin calibrar**

En casos en los que simplemente se desea conocer el estado aproximado de la uniformidad de la superficie de una carretera, se puede utilizar un aparato tipo respuesta sin calibrar se puede estimar el estado de la carretera o bien se puede valorar este mediante las sensaciones de confort y seguridad que experimenta una persona experta en la materia al circular por la vía. La conversión de estas observaciones a la escala IRI, se limita a una equivalencia aproximada que se asocia a unas descripciones estándar del estado de la carretera en función del valor de IRI (Sánchez y Solminihaç, 1989).

A continuación, se presenta un resumen de los equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de un pavimento,

Equipo	Descripción	Grado de precisión	Aplicaciones	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	El Dipstick consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300 mm o 250 mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 pulgadas), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro.	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie.	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfilómetro inercial	Son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Determina el movimiento vertical del eje de referencia y mide desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento.	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de redes viales grandes

Cuadro 7: Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos (Gustavo Badilla, s.f.)

### 7.1.5. Definición del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

La AASTHO (American Association of State Highway Officials) desarrolló una prueba en 1959 en la que se estableció la serviciabilidad a partir del promedio de las evaluaciones de todos los usuarios. Este promedio da origen al índice conocido como Present Serviciability Rating, PSR. Por lo tanto, la serviciabilidad es la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento y se definió una escala de evaluación de 0 a 5, donde una evaluación con nota 5 significa una superficie perfecta, mientras que un valor de 0 significa intransitable (Pradena, 2006).

Este concepto se basó en la suposición de que los usuarios le otorgaban mayor importancia a la calidad del rodamiento que prestaba el pavimento, que al tipo y a la magnitud de sus grietas y otros deterioros funcionales y estructurales (Sánchez, 2014).

Si bien el PSR es una calificación de las carreteras, se basa en la opinión de los usuarios, es decir, un valor subjetivo mas no objetivo. A partir de estos resultados, se realizaron mediciones objetivas tales como irregularidades del perfil longitudinal y transversal, ahuellamientos, magnitudes de grietas y fisuras. A partir de esta información se obtuvo un valor más verídico de la condición de la carretera, creándose así el Índice de serviciabilidad presente – PSI por sus siglas en inglés (Ramos, 2018).

En las ecuaciones para determinar el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), se incluyen, dependiendo del tipo de pavimento, mediciones de ahuellamiento, agrietamiento, baches e irregularidades del pavimento; siendo esta última la que domina los valores estimados de serviciabilidad. Esto significa que las irregularidades del pavimento tienen el mayor efecto en la evaluación de los usuarios que califican la calidad de rodado. De acuerdo con lo anterior

es que muchas agencias viales relacionan el Índice de Serviabilidad con mediciones de la regularidad del pavimento (Pradena, 2006).

<i>Índice de Serviabilidad (PSI)</i>	<i>Calificación</i>
5 – 4	Muy buen
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 – 0	Muy mala

Cuadro 8: Rangos de índice de serviabilidad con su clasificación (AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993)

### **Cálculo de PSI**

Según el AASHTO Road test, el cálculo del PSI de un pavimento flexible se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \text{Log}(1 + SV) - 1,38(RD)^2 - 0,01(C + P)^{0.5}$$

Donde:

SV: Varianza de la pendiente longitudinal, representada por la regularidad superficial

C: Superficie agrietada, representada por el área que contempla las fisuras y grietas presentes en el pavimento

P: Área bacheada, representada por el área que incluye zonas específicas de hundimiento parcial en el pavimento

RD: Ahuellamiento, representado por la depresión a lo largo de la franja de recorrido de los neumáticos.

#### **7.1.6. Curva de serviabilidad**

Según Pradena (2006) el comportamiento de un camino se puede asociar a valores del índice de serviabilidad en distintos momentos de la vida útil de este. Esto indica que para distintos momentos en la vida de los pavimentos existirán valores de índice de serviabilidad asociados.

El índice de serviabilidad inicial (Po) es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción de este, para su elección es necesario considerar los métodos de construcción, ya que de esto depende la calidad del pavimento (Saucedo, 2010).

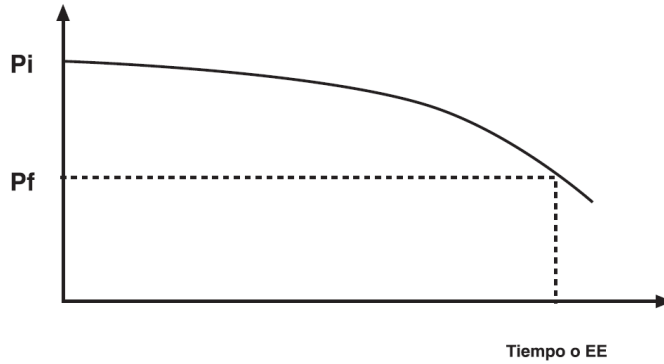


Figura 26: Curva de comportamiento de un pavimento (Pradena, 2006)

- Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad  $P_o = 4.7$  ó  $4.8$ .

El índice de serviciabilidad final ( $P_t$ ) tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil, o bien, el valor más bajo que pueda ser admitido, antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o la reconstrucción del pavimento (Saucedo, 2010).

La importancia de esto radica en que en los procedimientos de diseño de nuevos pavimentos y de la rehabilitación de estos, se incorpora la variable  $\Delta PSI$  – pérdida de serviciabilidad – con la cual es posible considerar la variación de la serviciabilidad de un pavimento desde el inicio de su vida de servicio hasta el nivel que el proyectista considera de falla (o inaceptable) dependiendo de la importancia de la vía (Ramos, 2018).

Es importante mencionar que mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga mayor será su vida útil, esto es debido a que las curvas de deterioro se comportan de manera paralela o con el mismo gradiente para unas condiciones determinadas (Saucedo, 2010), como se muestra a continuación:

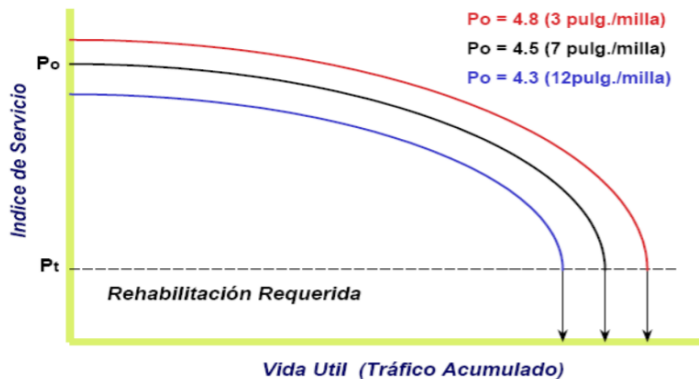


Figura 27: Comportamiento del pavimento de acuerdo al índice de serviciabilidad inicial (Saucedo, 2010)

## 7.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

La evaluación estructural del pavimento pretende determinar la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante o pavimento-subbase en cualquier instante de su vida de servicio con lo cual se puede indicar si se necesita o no de una rehabilitación (Fiallos, 2017). Esta se puede llevar a cabo a través de los siguientes métodos: inspección visual y ensayo de materiales; ensayos no destructivos; capacidad estructural basada en vida remanente; y, finalmente, espectro radiometría. Sin embargo, en el presente trabajo de graduación se tomará en cuenta solamente el uso de ensayos no destructivos en la evaluación estructural del pavimento.

### 7.2.1. Ensayos destructivos

Se denominan ensayos destructivos a aquellos cuya ejecución requiere alterar el pavimento existente en algún punto.

#### Excavación de calicatas

La excavación de calicatas para determinar propiedades de los materiales de capas corresponde al procedimiento tradicional de recolectar información de diseño y tiene como objetivo la determinación de distintas propiedades de los materiales de las capas que conforman el pavimento, para el diseño y/o evaluación estructural. Entre los parámetros a considerar, se encuentran: espesores de capas, CBR de las capas granulares, clasificación, densidades y humedades. Como complemento de este procedimiento, se debe realizar una inspección visual de la superficie, de modo de detectar posibles fallas (en especial grietas) que puedan determinar un menor aporte estructural de las capas de rodado (Thenoux y Gaete, s.f.).



Figura 28: Excavación de calicata en pavimento flexible  
(Mecanicista, s.f.)

## Extracción de testigos de concreto asfáltico y hormigón

Según la INVE-758-07 las muestras de pavimentos de concreto hidráulico se emplean principalmente para verificar el espesor de las losas y, en menor grado para determinar resistencias cuando los ensayos realizados en muestras tomadas de concreto hidráulico fresco resultan insuficientes para una debida evaluación estadística de la obra. También se utilizan para comprobar la calidad final del pavimento cuando se han registrado deficiencias durante la construcción (Thenoux y Gaete, 2012).



Figura 29: Núcleo o testigo extraído de una carpeta asfáltica (Mecanicista, s.f.)

## Placa de carga

El ensayo de placa de carga sirve para la evaluación de la capacidad portante del material de subrasante, bases, y en algunos casos, del pavimento completo utilizando placas de diámetros relativamente grandes. De este ensayo se determina un módulo de reacción ( $k$ ). Para aplicar este método en pavimentos existentes, se requiere efectuar calicatas de gran superficie, lo cual resulta poco práctico y costoso. Este ensayo a quedado paulatinamente en desuso (Thenoux y Gaete, 2012).

## Ensayos de Penetración Dinámica (DCP)

El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) es un dispositivo que permite realizar de un modo expedito, una auscultación in-situ de las capas de suelo de la subrasante y bases granulares. El principio se basa en la acción de una masa dinámica que cae desde una altura preestablecida, lo que produce la penetración de una sonda en forma de cono. Como resultado del ensayo, se encuentra la penetración de la sonda para un determinado número de golpes (PR), el cual está relacionado con las propiedades de CBR (Thenoux y Gaete, 2012).



Figura 30: DCP realizado en carretera de terracería  
(Anónimo)

### 7.2.2. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos – NDT por sus siglas en inglés – son preferidos ante los destructivos ya que los primeros no alteran la distribución de esfuerzos del pavimento además de que demandan menos tiempo para dar resultados (Blake, 2008). En general, los NDT se basan en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de los pavimentos.

### 7.2.3. Deflectometrías o deflexiones por cargas de impacto

Esta metodología se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante, por lo que se puede mencionar que la metodología de evaluación estructural por medio de NDT, es un proceso de diseño inverso (retrocálculo) ya que utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales.

El término deflexión, se refiere a la medida de las deformaciones elásticas que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo, estado del pavimento y sus alrededores. Los equipos de deflectometría pueden registrar deflexiones en diferentes puntos por lo que ayuda a definir completamente la caracterización de las deformaciones conocido como cuenco de deflexiones (Escobar, García, y Guzmán, 2007).

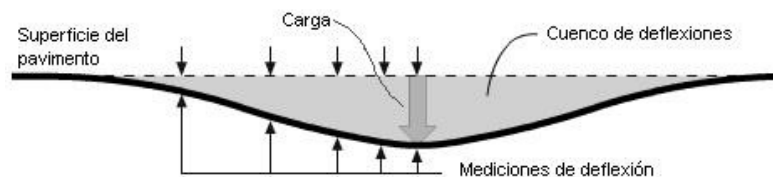


Figura 31: Cuenco de deflexiones  
(Escobar, García y Guzmán, 2007)

## Medición de deflexiones

Para carreteras de dos carriles, las mediciones de las deflexiones se hacen sobre el borde exterior, a ambos lados de la línea central. Para carreteras de un solo carril, las deflexiones sólo se deben medir en el borde más exterior, tomando adicionalmente medidas de las deflexiones en las esquinas, juntas, grietas y en áreas de pavimento deterioradas, para determinar la capacidad de transferencia de carga (Morales, 2004); de acuerdo con (ASTM D4694-96, 2003) se sugieren en 3 niveles de muestreo.

### Nivel 1

Cuando se tiene un conocimiento general del pavimento a evaluarse, los ensayos se realizarán a intervalos de 200-500 m; por cada sección uniforme se recomienda un mínimo de 5 a 10 ensayos para asegurar una muestra estadísticamente significativa. Para pavimentos rígidos simples con juntas se ubicará en el centro de la losa, para medir la eficiencia en la transferencia de carga, los ensayos en las juntas a evaluarse deberían ser de al menos el 5 % de todas las losas.

### Nivel 2

Si el proyecto requiere de un análisis más detallado para realizar posibles rehabilitaciones, los ensayos se realizarán a intervalos de 25-200 m; por cada sección uniforme se recomienda un mínimo de 10 a 20 ensayos. Para este nivel se recomienda trabajar con el 25 % de las losas de concreto para medir la eficiencia de la transferencia de carga.

### Nivel 3

Este nivel presenta un grado más detallado de análisis en donde se requiere analizar zonas con alta deflexión o detección de huecos bajo los pavimentos de hormigón hidráulico; los intervalos van de 3 a 25 m y se realizan en ambas huellas de la pista tanto externa como interna. En este nivel se recomienda ensayar todas las juntas conforme se ensaya el centro de losa, grietas y juntas cercanas a la misma.

La caracterización del cuenco de deflexiones está basada en tres parámetros básicos, que si bien no otorgan un estado representativo de la estructura del pavimento, sirven para generar una visión y condición de homogeneidad del proyecto, los mismos son (Escobar *et al.*, 2007).

- **Deflexión máxima normalizada:** corresponde a la deflexión medida por el sensor ubicado bajo el plato de carga y se normaliza por medio de la siguiente ecuación (Escobar *et al.*, 2007):

$$do_{normalizada} = do\left(\frac{carga\ aplicada}{carga\ normalizada}\right)$$

Con esta normalización se pueden evaluar tramos sin que tenga influencia la variación de cargas entre ensayos e igualmente normalizar para temperatura.

- **Área:** provee una estimación de la rigidez relativa de la sección del pavimento.
- **Índice de curvatura de la superficie:** refleja la rigidez relativa de las capas superiores de un pavimento.

#### 7.2.4. Medición de deflexiones por medio de cargas de impacto

Existen tres tipos de equipos para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas las cuales utilizan cargas estáticas, vibratorias o de impacto. Para cualquiera de ellas el principio es el mismo y consiste en aplicar una carga de magnitud conocida a la superficie del pavimento y medir las deflexiones que ocurren.

##### Viga Benkelman

Es el dispositivo más antiguo desarrollado, el cual ha sido tradicionalmente usado para medir deflexiones. Consiste en una estructura con tres puntos de apoyo, de los cuales dos se apoyan en el pavimento en forma de viga simple y un tercero que pivotea en torno a esta bajo la acción de una carga normalizada (Eje simple de 80 kN), con lo cual se registra la deformación relativa entre estos puntos. Este dispositivo tiene la importancia de que es utilizado como el parámetro base para la evaluación estructural de varias metodologías, como ser la del Asphalt Institute (USA), el TRRL (Inglaterra) y el modelo HDM-III (Thenoux y Gaete, 2012).

##### Deflectómetro

Consiste en utilizar una viga de deflexión similar a la Viga Benkelman, pero montada en el chasis de un vehículo especialmente adaptado para tales fines. Los deflectómetros más conocidos, son el Lacroix del LCPC (Francia) y una versión modificada por el TRRL (Inglaterra), y el desarrollado en California. La ventaja de este equipo respecto de la viga Benkelman, es que permite realizar las mediciones en forma continua, pudiendo auscultar un número mayor de kilómetros al día. Además, esta correlacionado con la viga Benkelman, por lo cual los valores entregados son fácilmente convertibles a esta última, de acuerdo al método del TRRL (Thenoux y Gaete, 2012).

##### Dynalect

Este dispositivo desarrollado y usado en los Estados Unidos, opera bajo el principio de fuerzas vibratorias, la cual es aplicada en el pavimento por medio de dos pequeñas ruedas metálicas. La magnitud de estas deformaciones, son captadas por medio de cinco geófonos colocados en el centro del eje de las dos ruedas y espaciados a intervalos de 30 cm. desde el punto de aplicación. La ventaja respecto a los anteriores métodos es que puede registrar

además de la deflexión máxima, deflexiones en otros puntos alejados, permitiendo estimar por retroanálisis las características estructurales de las capas del pavimento, especialmente el suelo de fundación. Estas mediciones pueden ser correlacionadas además con las medidas por otros equipos (Thenoux y Gaete, 2012).



Figura 32: Viga Benkelman  
(Castro, Monteiro, Ramos, Souza y Santos, 2016)



Figura 33: Dynaflect  
(BeelBank, s.f.)

### Falling Weight Deflectometer (FWD)

El más usado es el Deflectómetro de Impacto o Falling Weight Deflectometer (FWD por sus siglas en inglés) que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad, a través de una masa suspendida que se eleva y luego se deja caer sobre una placa que se ha situado en la superficie del pavimento. Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes magnitudes de cargas de impacto y duración, semejantes a las de una carga real del tránsito. La secuencia de operación consiste

en situar el equipo en el punto fijado, se baja la placa y los sensores hasta que se apoyen en la superficie y se aplica la carga o la serie de cargas previstas.

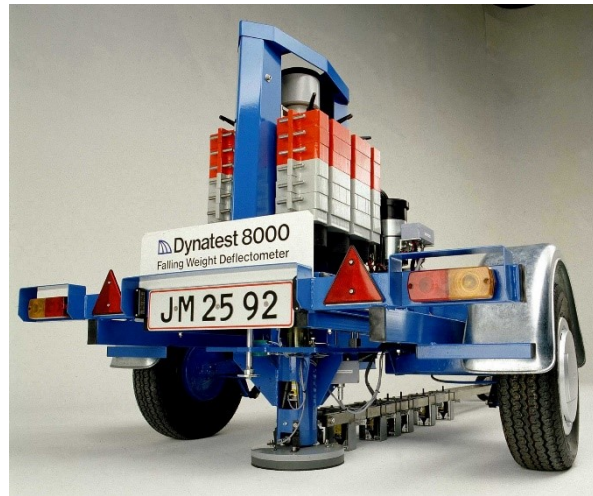


Figura 34: Falling Weight Deflectometer marca Dynatest (Dynatest, 2019)

A continuación, se recoge el conjunto y se traslada al siguiente punto de medición. Mediante sensores se mide la deflexión en el centro de la placa y a diferentes distancias, formando así lo que se conoce como cuenco de deflexión. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), teniendo en cuenta que donde se aplica la carga tendrá un geófono. La deflexión medida en el punto de aplicación de la carga da el resultado de la capacidad estructural del pavimento en conjunto, mientras que la deflexión registrada por los sensores más alejados es debida a la deformación de las capas más inferiores (subbase y subrasante) (Escobar *et al.*, 2007).

Para el uso de los datos proporcionados por el FWD, existen dos metodologías de análisis, una la utilización directa de la deflexión y la otra la determinación de las características estructurales del pavimento auscultado mediante calculo inverso o retrocálculo. Se pueden realizar comparaciones relativas entre zonas de un tramo o entre tramos y también determinar la capacidad resistente del pavimento. Con respecto a la segunda, el retrocálculo puede considerarse la aplicación fundamental de los equipos tales como el FWD, que registra todo el cuenco de deflexión, en donde se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales (Escobar *et al.*, 2007).

#### 1. Funcionamiento y concepto de área

El concepto de área, definido mediante el cuenco de deflexiones, es una medida para interpretar la capacidad estructural de un pavimento, tiene dimensiones de longitud o de desplazamiento del punto de carga, para remover el efecto de la magnitud de esta última. Este parámetro establecido por el Ing. Hoffman en 1981. El retrocálculo consiste en la determinación y análisis de parámetros estructurales característicos de cada una de las capas del pavimento (módulos) a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie, la carga aplicada por el FWD y los espesores de las capas (Fiallos, 2017).

## 2. Eficiencia en la transferencia de cargas

La eficiencia en la transferencia de cargas (LTE) en las juntas basada en las deflexiones se obtiene mediante la siguiente ecuación (AASHTO, 1993):

$$LTE = \frac{Dul}{Dl} * 100$$

Donde,

LTE, es la eficiencia de la transferencia de carga en la junta expresada en tanto por ciento

Dul, es la deflexión a 15 cm de la junta en la losa no cargada

Dl, es la deflexión a 15 cm de la junta en la losa cargada

Dicha transferencia de carga puede ser calificada según su porcentaje, como se indica a continuación.

<b>Calificación</b>	<b>LTE (%)</b>
Excelente	90 - 100
Bueno	75 - 89
Regular	50 - 74
Pobre	25 - 49
Muy Pobre	0 - 24

Cuadro 9: Calificación de la transferencia de cargas  
(AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993)

## 3. Ventajas

La principal ventaja del FWD frente a los demás equipos es que permite registrar la forma de todo el cuenco de deflexión, y no solo la deflexión máxima central ya que la carga que solicita el pavimento representa mejor la sollicitación ejercida por el paso de un eje pesado a altas velocidades. Otra ventaja es poder estudiar el efecto en todas las capas por retrocálculo gracias a la medición de hasta 10 puntos de información distanciados desde los 20 cm hasta los 1.8 m medidos desde el punto de aplicación de la carga y también la aplicación dinámica de la carga (de 20/30 milisegundos) que simula el paso de una llanta a una velocidad promedio de 60 a 80 km/h. Tener la forma del cuenco de deformaciones puede ayudar a interpretar si el daño se debe a la estructura del pavimento o a la subrasante sobre la cual se apoya la estructura del pavimento (Escobar *et al.*, 2007).

### 7.2.5. Georadar

Un equipo de aplicación múltiple en la evaluación de pavimentos es el Georadar o Ground Penetrating Radar (GPR). Esta máquina consta de una antena (receptora) que va montada en un vehículo que recorre a una velocidad aproximadamente constante y otra emisora ubicada en el área de interés. Permite auscultar el pavimento en toda su profundidad

o parcialmente dependiendo del tipo de antena utilizada. El GPR se usa para determinar espesores de las capas del pavimento e identificar defectos del mismo, así como para evaluar la eficiencia en la transferencia de cargas en las juntas.

El principio de funcionamiento se basa en el coeficiente dieléctrico de los materiales; puesto que cada material tiene un coeficiente distinto, el georadar puede diferenciar los diversos tipos de material de acuerdo al tiempo de rebote de la onda emitida. Problemas por presencia de agua o exceso de humedad en las capas son fácilmente detectadas por el GPR y pueden observarse en los perfiles denominados Colormap que se generan a partir de las mediciones obtenidas en campo (Chang, 2008).

Los pavimentos son estructuras lineales, por lo tanto, la precisión de la ubicación en donde se tomen los datos juega un papel importante. El estudio puede realizarse de dos maneras según el propósito: si se requiere una visión más general de todo el pavimento y se busca encontrar secciones problemáticas se realizan mediciones no detalladas; mientras que si se quiere estudiar un tramo que ha sido seleccionado para intervención se realizan mediciones más detalladas. Las primeras deben realizarse en dirección longitudinal a altas velocidades para que el tráfico no se vea afectado. Por otro lado, los estudios detallados deben realizarse a bajas velocidades y, cuando se requiera, en dirección transversal para medir secciones transversales o identificar la profundidad de las grietas (Benedetto, 2015).



Figura 35: Georadar Ground Explorer marca MALA (MALA, 2019)

## Equipos y métodos utilizados

La norma ASTM D4748-10 con el título “Método de evaluación estándar para la determinación del espesor de capas de pavimento utilizando radares de corto pulso” trata especialmente de la aplicación de GPR para determinar los espesores de capa de un pavimento.

Para el diagnóstico de estructuras viales, usualmente se utilizan antenas entre el rango de cientos de MHz hasta 4 GHz. Los radares de frecuencia escalonada son mayormente usados para los estudios que requieren detalles, ya que éstos miden la amplitud y la fase de la señal reflejada para cada frecuencia y transforman esta información a un perfil de tiempo. Para estudios de espesor de capas específicamente, las antenas aéreas de 1 a 2 GHz de frecuencia han mostrado ser las más efectivas (Benedetto, 2015).



### 8.1. RECICLAJE DE CONCRETO

El reciclado de hormigón es la rotura, eliminación, trituración y procesamiento de hormigón endurecido para producir un agregado de hormigón reciclado (RCA), un material granular que generalmente se puede utilizar como sustituto del agregado virgen en diversas aplicaciones (ACPA, 2009). El reciclado de materiales de pavimentación (incluido el pavimento de hormigón) en nuevas aplicaciones de pavimentación está respaldado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), que afirma que "la reutilización del material utilizado para construir el sistema de carreteras original tiene un buen sentido económico, ambiental e ingenieril" (FHWA 2002).



Figura 36: Operación de reciclado y apilado del reciclado de hormigón (Snyder, 2018)

### 8.1.1. Beneficios del reciclado de concreto

Entre las buenas razones para reciclar el pavimento de hormigón figuran el aumento de la demanda de agregados de calidad ante la limitación de los recursos, la reducción de la disponibilidad de espacio en los vertederos y la adopción de prácticas de construcción sostenibles. El reciclado de hormigón ofrece el potencial de grandes ahorros en el costo de los agregados, que comprende entre el 20 % y el 30 % del costo de los materiales y suministros de construcción del pavimento, además de entre el 10 % y el 15 % de los costos totales de construcción - excluyendo la ingeniería y la adquisición de derechos de vía (Snyder, 2018).

Según Snyder (2018), el reciclado del pavimento de hormigón es una opción inteligente y ambientalmente sostenible que conserva los agregados y otros recursos, reduce el uso innecesario del limitado espacio de los vertederos, ahorra energía y puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El reciclado de hormigón puede eliminar la necesidad de minar o extraer nuevos agregados vírgenes y puede reducir las distancias de transporte y el consumo de combustible asociados tanto con el suministro de agregados como con la eliminación de las losas de hormigón.

El uso del RCA permite ahorrar dinero y tiempo, además de reducir el impacto ambiental del pavimento de hormigón. Su uso puede acortar potencialmente el tiempo de finalización del proyecto como resultado de la agilización de los calendarios de construcción debido a la reducción de los tiempos de transporte. El potencial de ahorro en el transporte de materiales es aún mayor cuando no hay ningún agregado disponible localmente y el agregado debe ser transportado en camión desde más lejos. Los calendarios de construcción acelerados dan lugar a menos cierres de carril, lo que mejora la seguridad pública. La seguridad pública también mejora si el procesamiento del agregado está cerca del proyecto y se requieren menos millas de vehículos comerciales para su transporte (Snyder, 2018).

### 8.1.2. Uso del RCA

El RCA se ha utilizado con éxito en muchas aplicaciones de pavimentación, incluidas nuevas mezclas de pavimentación de hormigón para pavimentos una o dos capas, para pavimentos de mezclas asfálticas en caliente (MAC), aplicaciones de subbases ligadas y no ligadas – por ejemplo, bases granulares y tratadas o estabilizadas con cemento –, capas de drenaje, material de relleno y más.

Las aplicaciones de capa de cimentación y de relleno son los usos más comunes del RCA producido a partir de pavimentos de hormigón. Ofrecen la facilidad y el ahorro de costes resultante del procesamiento de los materiales en la obra, así como la tolerancia a contaminantes menores (por ejemplo, materiales de sellado, acero residual y suelos de subrasante) en estas aplicaciones. Además, el RCA suele proporcionar una subbase fuerte y estable gracias a la naturaleza angular de las partículas y a un grado de cementación secundaria que se produce en presencia de humedad a lo largo del tiempo.

El RCA se utiliza comúnmente en aplicaciones de subbase y relleno, pero un RCA en particular puede ser de calidad suficiente para su uso en la producción de una mezcla de pavimento de hormigón duradera que, de otro modo, podría requerir el uso de un agregado local más caro o el transporte de un agregado no local de alta calidad. En estas situaciones,

se puede utilizar una fuente de agregado local de menor calidad en lugar del RCA en las aplicaciones de subbase y relleno; sin embargo, la eficacia en función de los costos de este enfoque debe incluir la consideración de los costos de manipulación de materiales, preparación para el uso y transporte – tanto desde el punto de vista monetario como ambiental (Snyder, 2018).

### **8.1.3. Desempeño de mezclas de concreto utilizando RCA**

Según Snyder (2018) se han identificado más de 100 proyectos en los Estados Unidos que fueron construidos utilizando RCA como parte de la mezcla de pavimento de concreto, donde la mayoría de estos proyectos han tenido un buen desempeño y son considerados casos de éxito. Sin embargo, algunos proyectos sí han fallado prematuramente y han provisto lecciones en el diseño y construcción de detalles del pavimento de concreto RCA o han llevado a modificaciones de diseño de mezclas de concreto con RCA para producir concreto con propiedades y un desempeño similar a los del hormigón convencional. A continuación, se presentan algunos casos de éxito utilizando pavimentos de concreto con RCA.

#### **US 75, Iowa – 1976**

El Departamento de Transporte de Iowa (DOT) reconstruyó una porción de la US 75 cerca de Rock Rapids, Iowa, utilizando un pavimento de dos ascensores en 1976, incorporando cerca del 60 % de agregado de concreto reciclado y 40 % de pavimento de asfalto reciclado (del pavimento original) en el ascensor inferior de 7 pulgadas y todos los materiales vírgenes en el ascensor superior de 4 pulgadas. Muchos de los paneles reforzados de 20 pies de largo desarrollaron grietas transversales, que fallaron debido a la falla del acero de refuerzo, pero el pavimento estaba por lo demás en buenas condiciones en 2006.

El pavimento fue recubierto con MAC en 2008 después de 42 años de servicio. El proyecto es particularmente digno de mención debido al uso de una cantidad importante de MAC reciclado (típicamente considerado un contaminante en las mezclas de hormigón RCA) en el elevador de pavimento inferior.

#### **Austria – 1980 al presente**

La autopista austríaca de hormigón de la A-1 Salzburgo-Viena fue reconstruida a finales del decenio de 1980 y utilizó una construcción de dos ascensores con hormigón reciclado y agregado de MAC en el ascensor inferior. El éxito de este proyecto llevó a la adopción de la pavimentación con dos capas utilizando materiales reciclados en el ascensor inferior como práctica estándar en Austria (Kreen y Stinglhammer 1994) y a un aumento del uso de esta técnica de construcción en otros países europeos.

## **I-10 cerca de Houston, Texas – 1995**

Una sección de 30 años de antigüedad del pavimento de hormigón armado continuo (CRCP) de la I-10 fue triturada para producir el RCA que se utilizó para proporcionar el 100 % de los agregados gruesos y finos para la nueva mezcla de CRCP (Won 2007). El ACR debía cumplir las normas del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) para el agregado de pavimento de concreto. La experiencia con este proyecto contribuyó a la decisión de TxDOT de 1999 de limitar el uso del RCA fino a menos del 20 % de reemplazo del total del agregado fino en proyectos futuros (Won 2007).

Inicialmente el contratista tuvo dificultades para producir un concreto manejable de manera consistente debido a un control inadecuado de la humedad de las reservas de RCA, pero este problema se remedió con la instalación de sistemas mejorados de rociadores de las reservas. También hubo algunos problemas con la variabilidad de la resistencia, generalmente debido a los resultados ocasionales de las pruebas bajas. El módulo elástico relativamente bajo del hormigón RCA se considera un factor clave en el excelente rendimiento de este proyecto hasta la fecha.

### **8.1.4. Consideraciones y propiedades del RCA**

Los RCA destinados a ser utilizados en mezclas de pavimento de hormigón deben tratarse como un material de ingeniería, teniendo debidamente en cuenta las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas, como la capacidad de absorción y el coeficiente de expansión térmica, y el impacto que esas diferencias tienen en las propiedades plásticas y de endurecimiento del hormigón resultante. La consideración de estas propiedades puede dar lugar a la necesidad de modificar el diseño de la mezcla de hormigón utilizando aditivos químicos y/o minerales, diferentes proporciones de los componentes de la mezcla y/o la mezcla de agregados. Estos factores también pueden requerir la consideración de diferentes características estructurales del pavimento – por ejemplo, el espesor, las dimensiones de los paneles o el refuerzo.

Según Snyder (2018) las propiedades de un RCA específico dependen de muchos factores, entre ellos las propiedades del hormigón original y la cantidad de mortero recuperado en el RCA. Una mayor cantidad de mortero regenerado suele dar lugar a una absorción cada vez mayor, una menor gravedad específica, una menor resistencia a las partículas y una menor resistencia a la abrasión de la que se presentaría si se retirara la fracción de mortero para dejar sólo la porción de agregado natural de los RCA.

En general, los RCA deben cumplir los mismos requisitos que el agregado virgen para la aplicación de que se trata – por ejemplo, mezcla de hormigón, capa de subbase. Con el cuidado adecuado y el control del proceso, el RCA generalmente puede producirse para cumplir los requisitos estándar de calidad y clasificación del agregado (Snyder, 2018).

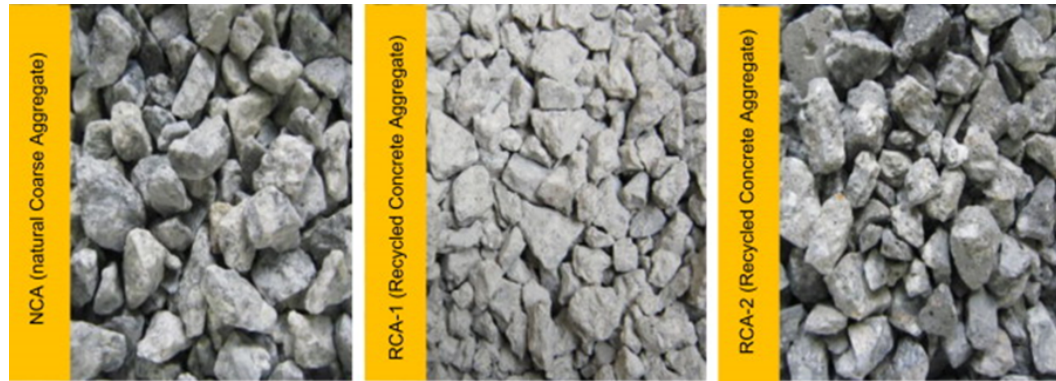


Figura 37: Comparación fotográfica de agregados naturales vírgenes con agregados de RCA (Mohammad Zahidul, Islam Bhuiyan, Faisal Hj. Ali, Firas A. Salman, 2015)

### 8.1.5. Producción del RCA

Para producir el reciclado del pavimento se deben tomar en cuenta los siguientes pasos:

1. Como primer paso evaluar la fuente del hormigón para poder determinar su idoneidad para aplicaciones potenciales.
2. Después se debe preparar la losa, retirarla y reciclarla por separado de los materiales asfálticos, sellar juntas, etc., según sea necesario para la aplicación elegida.
3. Romper y retirar la losa de concreto.
4. Eliminar cualquier malla de acero, barras de refuerzo y/o dovelas.
5. Moler el hormigón y dimensionar el RCA.
6. Tratar el RCA para eliminar cualquier contaminante adicional (un proceso comúnmente conocido como beneficiación), en caso sea necesario.
7. Finalmente, se debe almacenar el apilar el RCA.

El mismo equipo básico utilizado para procesar los agregados vírgenes también puede utilizarse para triturar, dimensionar y almacenar el RCA. Sin embargo, la selección de los procesos de trituración puede afectar a la cantidad de mortero que se adhiere a las partículas de áridos reciclados y, por lo tanto, a las propiedades del RCA.

Las trituradoras de mandíbula suelen ser más eficaces para producir mayores cantidades de agregado reciclado grueso, pero las partículas de RCA resultantes suelen contener cantidades relativamente altas de mortero recuperado, lo que suele aumentar la capacidad de absorción de los agregados. Las trituradoras de impacto son más eficaces para eliminar el mortero de las partículas de agregado natural, lo que da lugar a un RCA grueso con propiedades más parecidas a las del agregado virgen, pero también da lugar a la producción de cantidades menores de RCA grueso a partir de un determinado volumen de hormigón procesado (Snyder, 2018).

## 8.2. RUBBLIZING

Según la ACPA (1998), la rubblización es un procedimiento destructivo que rompe una losa de hormigón existente en pequeños fragmentos. Esto destruye la integridad estructural del pavimento y reduce su capacidad de carga. A diferencia de la restauración de pavimentos de hormigón – por sus siglas en inglés, CPR – o de las superposiciones de hormigón, la rubblización no aborda la causa del deterioro del pavimento existente y a veces puede exacerbar el problema. Por ejemplo, muchos deterioros del hormigón son el resultado de unas condiciones de apoyo deficientes. La rubblización de un pavimento destruye la acción natural de la losa de hormigón, lo que hace que los problemas sean más pronunciados. Esto puede y ha causado el fallo temprano de la capa de asfalto. El único momento apropiado para rubblizar un pavimento de hormigón existente es cuando tiene graves problemas de durabilidad del material.

La rubblización rompe el pavimento de hormigón existente en pequeños fragmentos que van desde trozos de tamaño de arena hasta piezas de aproximadamente 100 mm (4 pulgadas) a 200 mm (8 pulgadas) de ancho. Fue desarrollado como un intento de controlar el agrietamiento reflectivo que ocurre en una capa de asfalto de hormigón. El agrietamiento reflectivo es el que se produce por encima de las juntas de un pavimento de hormigón. Ocurre porque la capa de asfalto es demasiado débil para soportar los movimientos de temperatura diarios y estacionales del hormigón subyacente (ACPA, 1998).



Figura 38: Rubblizado de concreto hidráulico  
(Antigo, s.f.)

### 8.2.1. Beneficios del rubllizado

Debido al gasto, el tiempo y el retraso del tráfico que implica la CPR y la reconstrucción, la repavimentación de los pavimentos de hormigón con una capa de asfalto de mezcla en caliente (MAC) es una opción muy atractiva para muchas agencias. Además, los pavimentos de PCC desgastados presentan un problema particular para la rehabilitación debido a la probabilidad de que se produzcan grietas por reflexión cuando se coloca una sobrecapa de MAC. Los movimientos horizontales y verticales que se producen dentro de la capa de hormigón subyacente causan el agrietamiento por reflexión. El agrietamiento por reflexión

puede ocurrir en cualquier junta o grieta de hormigón. El problema de las grietas por reflexión debe ser abordado en la fase de diseño de la sobrecapa de MAC si se quiere lograr un rendimiento a largo plazo del recubrimiento. El objetivo de la rublización es eliminar el agrietamiento por reflexión en la superposición de la mezcla asfáltica mediante la destrucción total de la acción de la losa existente del pavimento de hormigón (Decker y Hansen, 2005).

El rublizado ha demostrado ser una de las formas más económicas y exitosas de eliminar el agrietamiento por reflexión de las capas de mezcla asfáltica colocadas en los pavimentos de concreto existentes. El principio fundamental de este enfoque es reducir significativamente la longitud efectiva de la losa del pavimento de PCC, esta reducción de la longitud efectiva de la losa dará lugar a mínimos movimientos horizontales de las juntas y grietas de la losa debido a los cambios de temperatura estacionales. Por lo tanto, la reducción al mínimo de las fuerzas de tracción y corte que normalmente se producen en la parte inferior de la capa de asfalto (Decker y Hansen, 2005).

### **8.2.2. Desempeño**

En general, se ha comprobado que el rendimiento en el terreno de las superposiciones de mezclas asfálticas en las losas rublizadas es de bueno a excelente, como se muestra en los casos que se presentan a continuación y que se han tomado de Wienrank y Lippert (2005). En general, los datos del rendimiento y el costo de proyectos muestran que una capa de asfalto de un pavimento de hormigón frondoso es una solución a corto plazo que dura entre 8 y 12 años.

#### **Interestatal 55 Frontage Road construida en 1994**

La rublización se logró usando un interruptor de frecuencia resonante PB-4. Se colocó una capa bituminosa de 127 mm (5 pulgadas) sobre el pavimento rublizado. No se construyó ninguna sección de control; sin embargo, hay una sección de parche y recubrimiento inmediatamente al sur del proyecto construido el año anterior que puede utilizarse para la comparación.

Para el año 2005 existía un extenso agrietamiento transversal y longitudinal, que se convirtió en agrietamiento de bloques en muchas zonas. Algunas de las grietas eran de gravedad media, y existían algunas áreas aisladas de grietas de fatiga en la trayectoria de la rueda exterior. Esta sección tenía la superposición más delgada de cualquier sección de ahuellamiento. La superficie del pavimento estaba ligeramente erosionada, y no se había realizado ningún sellado de grietas u otro tipo de mantenimiento. El valor del IRI fue de 1,89 m/km. El ahuellamiento fue bajo, a 1,8 mm.

#### **Interestatal 57 construida en 1996**

El primer proyecto experimental a gran escala en una interestatal se construyó en la I-57 en 1996. El pavimento existente era un CRCP de 203 mm (8 pulgadas) que había sido previamente superpuesto. La superposición existente se eliminó de todas las secciones. Las

capas superpuestas colocadas sobre el hormigón existente eran más gruesas que la capa superpuesta estándar del Illinois Department of Transportation (IDOT), que era de 82,6 mm (3,25 pulgadas) en ese momento.

En todas las secciones se desarrollaron grietas longitudinales en el medio del carril. Se han realizado baches en la sección de control, lo que indica el deterioro del pavimento subyacente. El agrietamiento longitudinal de medio carril también es más predominante en esta sección. La sección rublizada de 152 mm (6 pulgadas) tuvo un valor IRI de 1,74 m/km (110 pulgadas/mi), y 4,8 mm (0,19 pulgadas) de rodadura. La sección rublizada más gruesa tenía un IRI medio de 1,22 m/km y un valor medio de ahuellamiento de 4,2 mm. El valor de IRI para la sección de control fue de 1,36 m/km (86 pulg/mi), con un ahuellamiento de 0,12 pulg. La sección con una capa bituminosa de 152 mm (6 pulg) de CRCP existente tuvo un IRI de 0,92 m/km (58 pulg/mi), y un ahuellamiento de 3,8 mm (0,15 pulg).

### **Interestatal 57 construida en 1997**

En 1997 se construyó un tercer proyecto en la I-57 con una sección con rublización estándar y otra con rublizado más grueso. La sección de rublización gruesa – de sólo 152 m (500 pies) de longitud – se construyó para determinar si hay algún efecto negativo de utilizar un procedimiento de rublización más rápido.

Un examen de las imágenes digitales recogidas en 2004 indica que el pavimento se mantiene en excelentes condiciones. Se observaron algunas grietas longitudinales en la mitad del carril, junto con un par de parches bituminosos y algunas pequeñas áreas de exudación. El promedio del IRI de ambas secciones fue de 1,30 m/km (83 pulg/mi). En este proyecto se produjeron importantes ahuellamientos en el año siguiente a la construcción. Una investigación reveló que la formación de surcos se debía a un problema con las mezclas bituminosas y que no estaba relacionada con la rublización. En 2003, la formación de surcos alcanzó un promedio de 9,0 mm (0,35 pulg). En este momento, no hay diferencia en el rendimiento entre la rublización estándar y la rublización gruesa.

### **8.2.3. Propiedades del concreto rublizado**

El módulo de una losa de hormigón fracturada es un parámetro extremadamente importante para el buen funcionamiento de las superposiciones de MAC en los sistemas de hormigón rehabilitados. Cuanto mayor sea el grado de fractura de la losa y/o el despegue de acero y hormigón logrado en el proceso de construcción, menor será el módulo efectivo de la losa. Así pues, el módulo efectivo de una losa fracturada es una función del tamaño nominal del fragmento o del espaciamiento de la grieta realmente logrado en el proceso de rublización (Decker y Hansen, 2005).

A medida que el módulo del concreto disminuye (la losa se fractura más intensamente), la probabilidad de tener problemas de grietas por reflexión en el recubrimiento de mezclas asfálticas se reduce significativamente. Sin embargo, a medida que el módulo disminuye, la probabilidad de tener una capacidad estructural insuficiente también aumenta significativamente. El objetivo final es reducir el valor del módulo efectivo de la losa a un valor mínimo

o crítico, de manera que no se produzcan grietas por reflexión, pero no reducirlo a un valor tan bajo que la capacidad existente de la losa fracturada se reduzca a un punto en el que se requiera un exceso de espesor del revestimiento de HMA (Decker y Hansen, 2005).

#### **8.2.4. Evaluación de rublizado**

Cada pavimento de concreto desgastado puede no ser candidato a la rublización con un recubrimiento de mezcla asfáltica en caliente. Se debe realizar una evaluación estructural del pavimento existente, del tráfico, de la subrasante y de las condiciones ambientales. Estos pasos son imprescindibles para determinar si el pavimento específico es un candidato apropiado para la rublización. Los estudios del estado del pavimento existente son importantes para comprender el material de base para la superposición. Sin embargo, la mayoría de los pavimentos de concreto pueden ser rublizados de manera apropiada y superpuestos con mezcla asfáltica. El diseño del espesor de la superposición puede basarse en la Guía de Diseño de Pavimentos de la AASHTO (AASHTO 93) o en la teoría mecanicista.

Los pasos generales del proceso de construcción son los siguientes según Wienrank y Lippert (2005):

1. Instalar los desagües si no hay ninguno o si los desagües existentes no funcionan correctamente. Los desagües inferiores proporcionan un drenaje durante la construcción y también ayudan a prevenir los daños relacionados con la humedad una vez terminada la construcción.
2. Eliminar cualquier recubrimiento de hormigón bituminoso existente (normalmente mediante fresado).
3. Retire y reemplace cualquier reparación bituminosa no sólida existente.
4. Rublizar el pavimento.
5. Compactar el pavimento roto.
6. Pavimentar los levantamientos del ligante de la capa de hormigón bituminoso.
7. Permitir el tráfico en las secciones que tengan un grosor adecuado (si es necesario).
8. Pavimentar la superficie de la capa de hormigón bituminoso.

### **8.3. RESTAURACIÓN DEL PAVIMENTO DE HORMIGÓN**

La restauración del pavimento de hormigón – CPR por sus siglas en inglés – es una serie de técnicas de ingeniería que repara áreas aisladas de deterioro en un pavimento de hormigón. La CPR apropiada y oportuna mantiene el pavimento en una condición de confort, segura y extiende su vida útil en un promedio de 9-10 años. Esta es más o menos la misma vida que se espera de una capa de asfalto sobre un pavimento de hormigón frotado. Algunos proyectos de RCP se han desempeñado durante más de 17 años (Snyder, 2018).

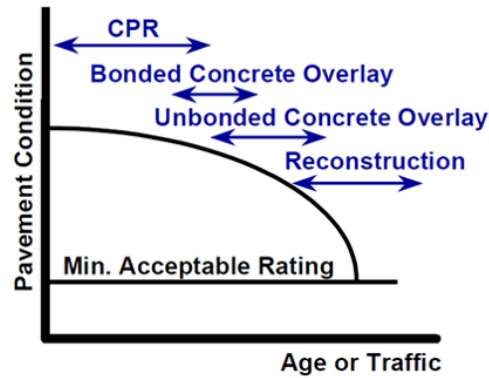


Figura 39: Diagrama del ciclo de vida que muestra las adecuadas etapas de rehabilitación de un pavimento cuando están relacionadas con su condición (Snyder, 2018)

La CPR ofrece una fórmula económica y eficiente en energía para mantener una autopista envejecida. La CPR se recomienda cuando gran parte de la losa del pavimento permanece en buen estado con sólo áreas limitadas de deterioro/pérdida de calidad de conducción debido a problemas en las juntas y grietas. La RCP es un sistema total que incluye el sellado inferior, el reemplazo de la losa de profundidad total, las reparaciones parciales de profundidad y desportillamiento, el restablecimiento de la transferencia de carga en las juntas, el ranurado y pulido de la superficie del pavimento, la limpieza y el resellado de las juntas y la restauración de los hombros.

<i>Técnica</i>	<i>Uso</i>
Reparaciones profundas	Reparar las losas agrietadas y el deterioro de las juntas
Reemplazo de losas	Reemplazar losas que muestren un deterioro mediano o severo
Reparaciones a mediana profundidad	Reparar el deterioro de las juntas y grietas, además de la mala condición de la superficie
Pulido con diamante	Ampliar la serviciabilidad, mejorar la resistencia al manejo y el derrape, reducir ruido
Rediseño con dovelas	Restablecer la transferencia de carga en las juntas y en las grietas
Sellado de juntas y grietas	Minimizar la infiltración de agua y materiales incompresibles en el sistema de juntas
Estabilización de la losa	Llenar vacíos pequeños debajo de la losa de concreto
Cross-Stitching	Reparar grietas longitudinales de baja y mediana severidad
Grooving	Reducir accidentes durante época lluviosa y prevenir el hidroplaneo
Rediseño de drenajes de borde	Agregar un Sistema longitudinal de drenaje
Rediseño de hombro de hormigón	Disminuye las tensiones en las juntas del pavimento y las deflexiones de las esquinas

Cuadro 10: Técnicas de restauración de pavimentos de hormigón (Snyder, 2018)

La restauración completa no se logrará a menos que se administren todos los pasos necesarios que comprenden el sistema de CPR. La restauración incompleta permitirá un mayor deterioro, tal vez anulando todas las medidas correctivas adoptadas. La CPR es menos costosa que la repavimentación convencional con hormigón asfáltico. Un análisis de costos muestra que un programa completo de RCP puede costar solo entre el 50 y el 60 por ciento de lo que costaría una sobrecapa de asfalto de 4 pulgadas (Concrete Construction Staff, s.f.).

Cada técnica está diseñada específicamente para reparar o prevenir la recurrencia de una cierta condición o una combinación de estas. Si bien cada técnica puede utilizarse individualmente, son más eficaces cuando se utilizan varias juntas. En algunos casos, puede aplicarse más de una técnica de CPR. Sin embargo, una técnica suele ser más adecuada que la otra debido al estado del pavimento. Por lo general, repara las zonas aisladas de peligro que deben ser atendidas sin destruir la integridad estructural de la losa.

### 8.3.1. Reparaciones profundas

La reparación a profundidad completa – por sus siglas en inglés FDR –, tal como se describe en este documento, incluye tanto la sustitución parcial de la losa como la sustitución total de la losa para hacer frente a cualquier variedad de angustia. La FDR se ha utilizado ampliamente desde el decenio de 1970 tanto para el pavimento de hormigón liso unido (JPCP) como para el pavimento de hormigón armado unido (JRCP). En combinación con otras técnicas de restauración de pavimentos de hormigón necesarias, FDR permite la reparación a largo plazo de juntas estructural y/o funcionalmente deterioradas, grietas de trabajo, losas destrozadas y el deterioro de múltiples losas. FDR puede aumentar significativamente la vida útil del pavimento antes de que se requiera una superposición o reconstrucción estructural, y puede aumentar la vida útil de un pavimento que se superpondrá con asfalto de mezcla en caliente al proporcionar una alta eficiencia en la transferencia de la carga de las juntas (LTE). La FDR correctamente fijada con clavijas y pasadores evita el problema de las fallas recurrentes en las juntas con las consiguientes rugosidades y grietas. (Darter, 2017).



Figura 40: Remoción y reemplazo de losa de concreto (FHWA, s.f.)

La FDR se realiza típicamente en combinación con otros tratamientos de restauración de pavimentos de hormigón (CPR), como la reparación parcial de profundidad (PDR), el reajuste de barra de espiga (DBR), el cosido en cruz y el rectificad con diamante para aumentar la vida útil de los pavimentos de hormigón liso unidos (JPCP) y de los pavimentos de hormigón armado unidos (JRCP). Las claves más críticas para que un FDR tenga éxito son que debe ser estructuralmente sólido (por ejemplo, longitud y anchura, transferencia de carga de juntas transversales a largo plazo mediante el anclaje adecuado del tamaño apropiado y el número de barras de pasadores), los límites deben abarcar el deterioro existente, el hormigón FDR debe ser duradero, la capa base debe ser reparada si está dañada, los pasadores deben estar firmemente anclados y el FDR no debe estar excesivamente curvado hacia arriba debido a las temperaturas extremas de la colocación. Ya sea como un tratamiento independiente o como parte de la RCP, los FDR son quizás el componente más crítico para lograr la deseada extensión de la vida útil de los JPCP y JRCP (Darter, 2017).

Los aspectos claves de una reparación profunda incluyen:

- Los límites y el área de reparación deben estar bien definidos para incluir el deterioro del hormigón existente.
- El aserrado y la eliminación de todo el hormigón existente debe realizarse sin dañar el hormigón circundante.
- Los cimientos del área de reparación (capa base, subdrenaje) deben estar adecuadamente preparados.
- Se deben proporcionar niveles adecuados de transferencia de carga de juntas transversales ancladas correctamente en la losa existente para evitar fallas.
- Los procedimientos de colocación y acabado del hormigón deben ser adecuados.
- Se debe practicar el curado del hormigón para inhibir un elevado rizado ascendente de la losa.
- La mezcla de hormigón no debe mostrar una gran cantidad de contracción de secado.
- Las juntas intermedias deben ser aserradas y selladas en el momento óptimo.
- No se debe permitir el tráfico en la reparación hasta que se alcance una resistencia suficiente para evitar un daño excesivo por fatiga temprana.

### **Uso de reemplazo de losas**

La sustitución de losas en California se utiliza para hacer frente al grave deterioro de las distintas losas en zonas aisladas cuando otras estrategias, como la de no hacer nada, no pueden prolongar la vida útil por lo menos 5 años o no son rentables. Pero los siguientes criterios de evaluación también se utilizan para determinar si las losas deben ser reemplazadas (Bhattacharya, Zola y Rawool, 2008):

- Losas con dos o más esquinas rotas.

- Losas con grietas de etapa 3 (3 o más piezas).
- Losas con segmentos que se mueven en relación a los demás.
- Losas dañadas debido a la falta de apoyo causada por el asentamiento, la falla de la base, o el rizado excesivo.
- Losas con grietas longitudinales o transversales de más de  $\frac{1}{2}$  pulgadas de ancho. Dependiendo del nivel de tráfico, las losas con grietas de menor gravedad también pueden ser incluidas para asegurar que no se necesiten reparaciones adicionales dentro de la vida de diseño de la rehabilitación objetivo.

### 8.3.2. Trituración con dientes de diamante

La trituración con dientes de diamante es una técnica aplicada a un pavimento de hormigón existente para producir un viaje suave, una superficie antideslizante de textura longitudinal y un menor nivel de ruido en el pavimento/neumáticos. La molienda de diamante se ha utilizado ampliamente desde mediados de los años 60. En combinación con otras técnicas de restauración de pavimentos de hormigón (CPR) necesarias, la molienda de diamante proporciona un importante tratamiento restaurador y de conservación rentable que puede aumentar significativamente la vida útil del pavimento antes de que se requiera un recubrimiento estructural o una reconstrucción. (Darter y Biel 2016).



Figura 41: Textura de la superficie después del triturado de concreto (FHWA, s.f.)

Según Darter (2017) el objetivo principal de la trituración es restaurar o mejorar la calidad de marcha de un pavimento eliminando las irregularidades del perfil de la superficie. El aplanamiento del perfil de un pavimento también reduce las cargas dinámicas o de impacto a las que está sometida la estructura, extendiendo así su vida útil. Este procedimiento también mejora la resistencia al deslizamiento creando una textura de superficie uniforme (Freeman, 1994). Se utiliza para proporcionar una superficie lisa, pero con textura para los pavimentos de hormigón existentes más antiguos que han sido reparados adecuadamente. El rectificado de diamante, en combinación con otras reparaciones, puede reducir el índice de rugosidad internacional (IRI) de los pavimentos existentes de un 20 a un 80 por ciento.

Utah y otros estados suelen realizar la molienda de diamantes principalmente para eliminar las fallas en las articulaciones y para restaurar la textura (y la fricción) y la suavidad del pavimento. También es útil utilizar las siguientes consideraciones:

- Consideración de la edad del pavimento, el tráfico, el diseño y el historial de rehabilitación pasado.
- Evaluación de la condición del pavimento existente en términos del tipo de deterioro (fallas en las juntas, paneles de balanceo, agrietamiento de la losa, asentamientos), severidad y extensión, así como el IRI existente a lo largo del proyecto, y carril por carril.
- Profundidad del hormigón sano en las juntas transversales.
- Vida útil deseada del pavimento restaurado.
- Nivel de ruido (pavimento/neumáticos).
- Consideraciones sobre el espaciado de las cuchillas.

### 8.3.3. Sellado de juntas

El componente de resellado de las juntas de CPR tiene por objeto evitar la intrusión de agua y materiales incompresibles en la estructura del pavimento a través de las juntas de contracción, expansión y construcción. El agua superficial que entra en las juntas ablanda y erosiona los cimientos y puede provocar fallos en el pavimento. Los materiales incompresibles en las juntas provocan desconchados al reducir el espacio lateral disponible para la expansión térmica. La función del sellador es simplemente sellar la junta entre dos sustratos de hormigón; no tiene por objeto servir de adhesivo para unir los sustratos entre sí. La capacidad del sellador para soportar movimientos térmicos y de carga repetidos es mucho más crítica que su resistencia (Freeman, 1994).



Figura 42: Sellado de juntas  
(Probacons S.A., s.f.)

#### **8.3.4. Restauración de la transferencia de carga**

El propósito del restablecimiento de la transferencia de carga es restaurar o establecer un mecanismo para transferir cargas inducidas por vehículos de una losa a la siguiente. Esos mecanismos permiten la distribución uniforme de las tensiones en las subcapas del hormigón sin que se produzcan tensiones excesivamente elevadas en los bordes de la losa. Los fallos en la transferencia de cargas se manifiestan típicamente en losas y parches fallados o asentados y, en algunos casos, en grietas transversales (Freeman, 1994).



## **9.1. EVALUACIÓN VISUAL DE LA AUTOPISTA**

### **9.1.1. Equipo de cámaras para evaluación de patologías**

#### **Características del equipo**

El equipo de levantamiento y registro de falla es un sistema que nos permite registrar el tipo, severidad y la cuantificación de fallas que presenta un pavimento flexible y rígido de un proyecto. El mismo cuenta con dos cámaras de alta definición con dos cámaras Basler ACE con lentes tipo Kowa las cuales se colocan para obtener distintas perspectivas de la superficie del pavimento. A su vez, estas cámaras son programadas con un odómetro para obtener fotos cada cierta longitud, usualmente se toman cada cinco metros.

De igual manera, el sistema cuenta con un equipo especial de cómputo, el cual lleva a cabo la configuración de parámetros como lo es la tabulación de la estación inicial del proyecto, descripción del proyecto e información adicional. También es el encargado de realizar el reporte fotográfico el cual va georreferenciado cada una de las fotos con sus coordenadas, estación de inicio del proyecto y el ID de cada una de las fotografías que compone el proyecto. El reporte genera una fotografía a cada 5 metros, lo cual permite una mayor exactitud a la hora de realizar el procesamiento de los datos.

#### **Reporte de datos crudos obtenidos con el equipo**

El equipo de cómputo al realizar el reporte fotográfico, clasifica todas las fotografías en dos carpetas separadas según la cámara con la que fue tomada la fotografía, las cuales a su vez se encuentran enumeradas desde uno. Además, se genera un archivo .csv que contiene el nombre del proyecto, número de fotografía, la estación a la que esta corresponde, además de su correspondiente latitud y longitud (obtenidas por medio de un GPS independiente)

como se muestra en la siguiente imagen. Esta información es luego importada en el software LDis para su análisis.

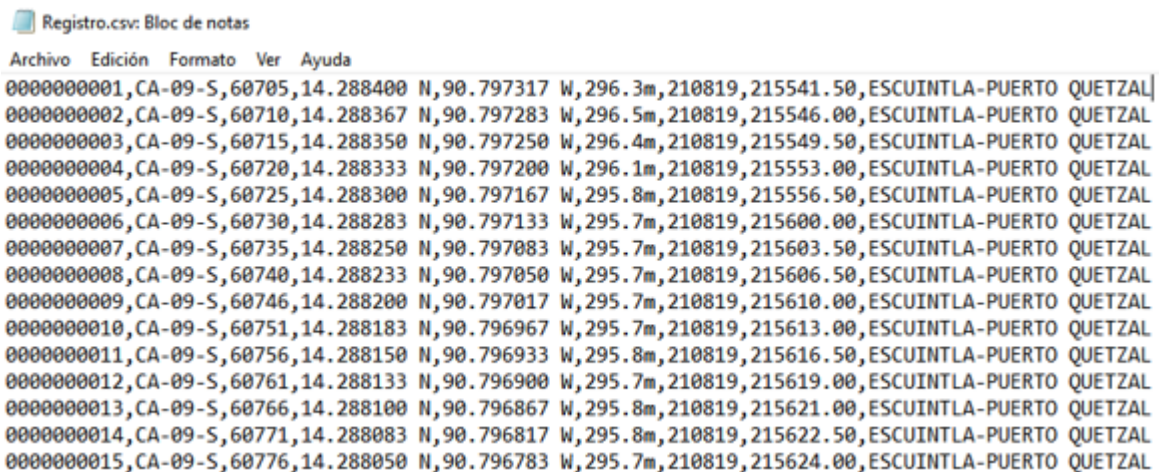


Figura 43: Información cruda del reporte fotográfico obtenido mediante el equipo de cámaras

## Software LDis para lectura de fotografías

El software LDis está especializado en la cuantificación de áreas y la identificación de las patologías presentes un tramo. El programa cuenta con un extenso catálogo de fallas de pavimento rígido y flexible que se utilizan para identificar y nomenclaturar las fallas del pavimento. El software utiliza tanto las fotografías como el reporte con la información de cada una derivada del levantamiento realizado con anterioridad con el equipo de las cámaras.

Para realizar una cuantificación se selecciona el área de falla y el programa, en función del ancho de carril, estima el largo, ancho y área. Por otro lado, Para clasificar la falla se utiliza el menú de opciones del catálogo de fallas. Primero se debe elegir la severidad de la falla para luego seleccionar de qué tipo se trata. El programa también permite realizar selecciones tanto lineares (longitudes de grietas) como fallas de bloque.

Una vez clasificadas las fallas, el programa guarda la información en el apartado “Fallas reportadas en [número de estación]”, donde también se agrega la estación, un código único y las coordenadas geográficas en las que se encuentra la falla obtenida de la información previamente obtenida.

Cuando se finaliza el levantamiento el programa LDis tiene la opción de exportar a Excel la información recopilada en el proyecto. La información exportada contiene qué tipo de fallas y con qué severidad se encuentran en cada estación, sus dimensiones y las coordenadas geográficas de la misma para que se facilite su ubicación en campo.



Figura 44: Selección de fallas tipo bloque y linear para un pavimento utilizando LDis

## Composición de catálogo de patologías

Las secciones fundamentales y generales que componen un catálogo de patologías de: tipo de pavimento, modo de falla, denominación de la falla, descripción de esta, posibles causas, niveles de severidad, medición, esquemas y fotografías, guía alternativa de mantenimiento. Estos aspectos se describen con mayor ampliación a continuación.

### 1. Nombre de la patología

Se indica la denominación asignada.

### 2. Descripción de la patología

Se describe lo que se observa a nivel superficial.

### 3. Tipo de falla

Estas se dividen principalmente en **fallas funcionales y estructurales**. Las primeras afectan la seguridad y el confort al tránsito, mientras que las segundas afectan la capacidad de carga y comprometen la vida útil del pavimento (Violini y Pappalardi, s.f.).

En caso se adviertan más de un tipo de daño en una misma ubicación o punto, es necesario reportar el daño que más incomodidad presente a los usuarios de la vía.

### 4. Ubicación habitual

Se indica su posicionamiento en relación con las juntas y bordes de la calzada

### 5. Orientación predominante

Se indica la orientación de la falla en caso de que la hubiera (por ejemplo las fisuras)

6. Cuantificación

Medición de la patología de acuerdo con su morfología y cómputo por losa.

7. Posibles causas

Se describen las causas primarias de la patología y los factores secundarios, que condicionan a las primeras.

8. Efectos de la patología

Se describe el daño, el nivel de afectación y su futura serviciabilidad.

9. Técnicas de investigación

Se establecen los estudios, mediciones y controles que puedan indicar si se han producido cambios, que afecten las propiedades o comportamiento de la calzada de hormigón (Violini y Pappalardi, s.f.).

10. Acciones de contingencia

Se indican las acciones específicas requeridas para normalizar el proceso, en función de lo obtenido en las técnicas de investigación (Violini y Pappalardi, s.f.).

11. Nivel de severidad

Se clasifican los daños producidos según el nivel de severidad como: bajo, medio y alto. De esta manera, existen fallas menores que no comprometen la estructura ni la funcionalidad del pavimento. Pero hay otras de media y alta severidad que pueden afectar el desempeño a corto, mediano y largo plazo, provocando la reducción de la vida útil, si no se realiza la acción correctiva o reparación correspondiente (Violini y Pappalardi, s.f.).

Cuando en un mismo tipo de daño se presentan varios niveles de severidad, es necesario reportar el más alto.

12. Técnicas de investigación

Se indica la necesidad de reparar o no la calzada, en función del nivel de severidad del daño, incluyendo para alguna de las patologías, reparaciones alternativas.

13. Ejemplo de catálogo

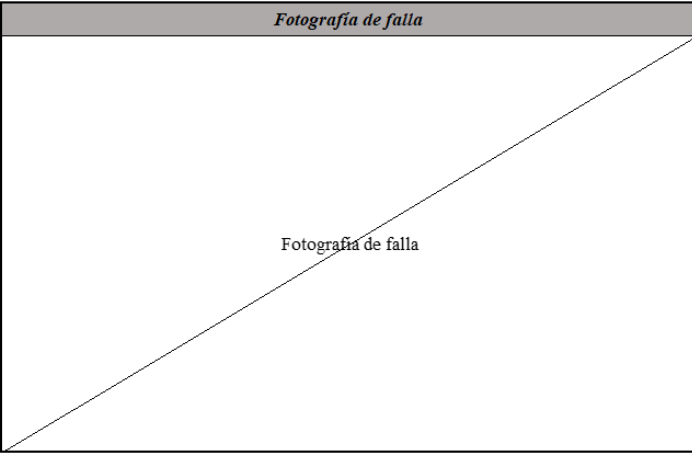
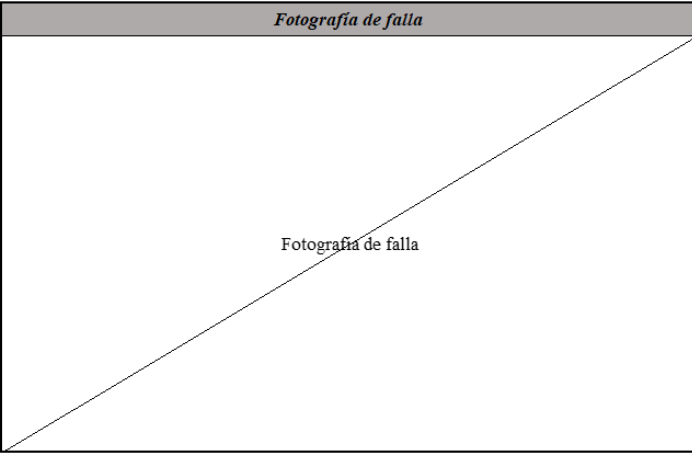
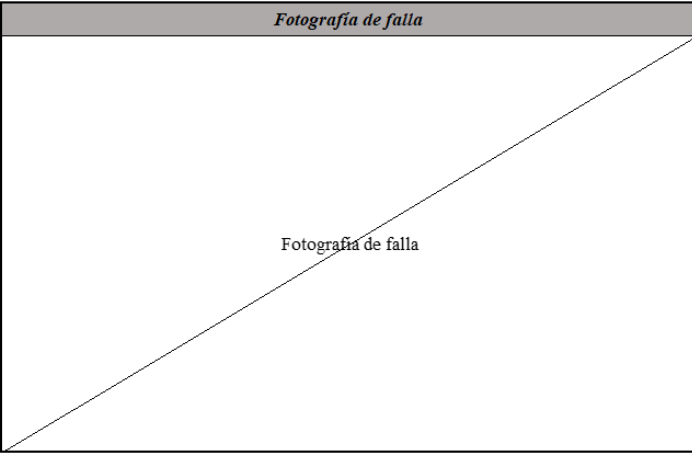
NOMBRE DE PATOLOGÍA																									
<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #cccccc;">Descripción de patología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="width: 20%;"><i>Tipo de falla:</i></td> <td></td> </tr> <tr> <td><i>Orientación :</i></td> <td></td> </tr> <tr> <td><i>Cuantificación :</i></td> <td></td> </tr> <tr> <td><i>Nivel de severidad:</i></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #cccccc;">Ubicación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Latitud:</b></td> <td>14.216548°</td> </tr> <tr> <td><b>Longitud:</b></td> <td>-90.4864181°</td> </tr> </tbody> </table> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <p>Mapa georreferenciado</p> </div>	Descripción de patología		<i>Tipo de falla:</i>		<i>Orientación :</i>		<i>Cuantificación :</i>		<i>Nivel de severidad:</i>		Ubicación		<b>Latitud:</b>	14.216548°	<b>Longitud:</b>	-90.4864181°	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Fotografía de falla</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 150px; text-align: center; vertical-align: middle;">  </td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #cccccc;">Posibles causas de la patología</th> </tr> <tr> <th style="width: 50%;">Primarias</th> <th style="width: 50%;">Factor secundario</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 100px;"></td> <td style="height: 100px;"></td> </tr> </tbody> </table>	Fotografía de falla		Posibles causas de la patología		Primarias	Factor secundario		
Descripción de patología																									
<i>Tipo de falla:</i>																									
<i>Orientación :</i>																									
<i>Cuantificación :</i>																									
<i>Nivel de severidad:</i>																									
Ubicación																									
<b>Latitud:</b>	14.216548°																								
<b>Longitud:</b>	-90.4864181°																								
Fotografía de falla																									
																									
Posibles causas de la patología																									
Primarias	Factor secundario																								
<i>Efectos de la patología:</i>																									
<i>Posible solución:</i>																									

Figura 45: Ejemplo de ficha técnica para patologías

## 9.2. EVALUACIÓN FUNCIONAL DE LA AUTOPISTA

### 9.2.1. Perfilómetro inercial

#### Características del Perfilómetro Inercial Mark IV

El Perfilómetro Láser RSP Mk-IV de Dynatest mide una serie de índices y características, incluyendo el perfil longitudinal, índice de rugosidad internacional (IRI), Ride Number (RN), perfil transversal y macrotextura. El sistema también puede proporcionar datos para el cálculo del Boeing Bump Index. El RSP tiene una funcionalidad "STOP and GO" única que permite que el equipo funcione de manera eficiente en áreas urbanas, en semáforos, señales de parada, cruces y rotondas, lo que lo convierte en una herramienta ideal para la recolección de datos tanto en redes urbanas como rurales. El equipo cumple con los estándares ASTM E950

Clase 1, AASHTO R57 y estándares de camino Estatal, como el Tex-1001-S, para asegurar que los datos se pueden usar para la evaluación de proyectos en Sistemas de Gestión de Pavimentos (Dynatest, 2019).

Beneficios Clave del Perfilómetro Láser RSP MK-IV (Road Surface Profiler MK-IV):

- Análisis rápido de la rugosidad para todas las secciones de la red
- Funciona a velocidad de tráfico, por lo que no se requiere gestión del mismo
- Ofrece recopilación, análisis y almacenamiento de datos en tiempo real, ahorrando tiempo de ingeniería para el post-procesamiento de datos
- La monitorización automática de las lecturas láser garantiza una alta calidad de los datos
- Datos altamente precisos, repetibles y reproducibles que permiten la utilización de estos en un PMS
- Sistema modular, fácil de mantener, de servicio y de actualización
- La característica "STOP and GO" permite realizar pruebas de secciones cortas y calles urbanas, haciendo del RSP una herramienta ideal para el nivel de proyectos, así como para la recopilación y análisis de datos a nivel de red
- Con la opción GPS, todos los datos pueden referenciarse geológicamente permitiendo trazar en un sistema GIS
- El programa RSPwin Field proporciona guías paso a paso para la calibración de los láseres, acelerómetros y DMI, haciendo la calibración simple y fácil de realizar (Dynatest, 2019)

## **Auscultación utilizando el RSP**

### **1. Almacenamiento de datos**

El usuario del RSP selecciona el intervalo al cual desea almacenar cada uno de los parámetros medidos o calculados. Dichos parámetros tienen un intervalo mínimo y máximo disponible para su almacenamiento. Además, los resultados que despliega el equipo se basan en datos medidos cada 25 mm, promediados cada 20 mm para el IRI, cada 10 m para el Ahuellamiento (Rutting), y cada 20 m para el Ride Number (Pérez, 2005).

El operador puede especificar las unidades de visualización y las unidades de archivo de datos. Esto significa que la computadora se puede configurar para mostrar los resultados de la prueba en la pantalla en el sistema métrico mientras se almacenan datos en unidades estándar en inglés y viceversa (Dynatest, 2008).

<i>Parámetro</i>	<i>Intervalo mínimo</i>	<i>Intervalo máximo</i>
	<i>(m)</i>	<i>km (milla)</i>
Velocidad	1.000	1.609 (1)
Elevación del láser	0.025	1.609 (1)
Calidad del láser	1.000	1.609 (1)
Elevación del perfil	0.025	1.609 (1)
IRI	10.000	1.609 (1)
Ride Number	10.000	1.609 (1)

Cuadro 11: Intervalos de almacenamiento de datos

## 2. Velocidad de operación

Según el fabricante, el vehículo donde se tiene montado el RSP no debe operarse a velocidades menores a 25 m/km cuando se esté llevando a cabo el ensayo o medición deseada, tampoco superar los 110 km/h. Si el operador se sale de estos límites establecidos, se emitirá una advertencia y la prueba dejará de ser válida (Pérez, 2005).

El número de lecturas que el equipo realiza en cada intervalo de almacenamiento de datos está en función de la velocidad de operación. El valor almacenado corresponde al promedio del número de mediciones tomadas en 25mm (Pérez, 2005).

<i>Velocidad de operación</i>	<i>Número de lecturas en un intervalo de 25mm</i>
<i>(km/h)</i>	
40	36
50	28
60	24
70	20
80	18

Cuadro 12: Lecturas según velocidad de operación del equipo (Pérez., 2005)

## 3. Intervalo de medición

El IRI es un valor promedio sobre un tramo de carretera de longitud L. Los valores de IRI dependen del valor elegido para L. Generalmente, se utiliza un intervalo de reporte de IRI (L) de 100 m, para evaluación de proyectos nuevos y un intervalo más amplio, 200 m, para evaluación a nivel red vial (Pérez, 2005).

<i>Nivel del proyecto</i>	<i>Intervalo de medición</i>
	<i>(m)</i>
Proyectos nuevos	@100
Evaluación red vial	@200

Cuadro 13: Intervalos de medición de IRI

#### 4. GPS

Se puede conectar una unidad GPS directamente a la PC. La unidad GPS debe configurarse a 2400, 4800, 9600, 19200 o 38400 baudios y enviar el mensaje estándar NMEA "GGA". La tasa máxima de informes es de 10 Hz. A este ritmo, debe asegurarse de que no se envíen otros mensajes desde la unidad GPS. El applet GPS muestra las coordenadas geográficas actuales (Dynatest, 2008).

5. Cámara Se puede conectar una cámara compatible con Windows a la computadora. El sistema de cámara debe cumplir con el sistema Windows DirectX (controlador compatible con WDM). Se pueden usar la mayoría de las cámaras Firewire y Web (Dynatest, 2008).

Al tener la cámara conectada a la computadora, es posible tomar fotografías instantáneas a intervalos fijos o a voluntad. Si desea tomar fotografías a intervalos fijos a lo largo de la sección de la carretera, debe establecer el "Intervalo de imagen" como lo desee y marcar "Almacenar imágenes", pero también puede tomar fotos individuales adicionales mediante. Los archivos se almacenan como imágenes en bruto sin comprimir, produciendo archivos grandes, pero el programa de campo puede almacenar las imágenes en formato JPG comprimido (Dynatest, 2008).

#### 6. Información en archivos de medición

Según Pérez (2005) en los archivos de medición de IRI y Ahuellamiento, debe incluirse la siguiente información:

- Fecha en que se realizaron las mediciones de perfil
- Localización y descripción del tramo evaluado
- Nombre/Iniciales del operador
- Carril evaluado, dirección
- Velocidad de medición
- IRI medido por cada sensor láser
- Ahuellamiento

## Índice Internacional de Rugosidad con Perfilómetro Inercial

Las mediciones de elevación del perfil longitudinal se obtienen mediante el uso de un acelerómetro para controlar el movimiento vertical de la carrocería del vehículo y un sensor láser para medir el desplazamiento entre la carrocería del vehículo y el pavimento. Las

mediciones de elevación del perfil de la carretera se obtienen sumando el movimiento de la carrocería del vehículo con el desplazamiento apropiado de la carrocería (Dynatest, 2008).

El IRI se calcula de acuerdo con los procedimientos y las especificaciones descritas en el Documento técnico número 46 del Banco Mundial, "Directrices para realizar y calibrar mediciones de aspereza vial".

De igual manera la medición del Índice de Regularidad Internacional se basa en las Normas de ASTM E 950 "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference", la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM E 1170 "Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces", la cual abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera (Badilla et al., 2008).

Para la medición de este parámetro es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte, la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

#### 1. Índice de Serviciabilidad Presente

La calidad del pavimento evaluada por el PSI – Índice de Serviciabilidad Presente – se basa en los datos de rugosidad y los daños del pavimento. Sin embargo, el PSI se ve afectado por factores subjetivos como, por ejemplo, la determinación de la proporción de grietas, mientras que el IRI no se ve afectado por este tipo de factores cuando se aplica una medición directa. Para minimizar la subjetividad en la determinación de PSI, un número de investigaciones establecieron relaciones entre IRI utilizando medidas especializadas por equipos (unidad de medida m/km) y PSI para pavimentos de hormigón (Hoang, 2017).

Hoang (2017) descubrió que el PSI y el IRI presentan una relación de R2 igual a 0.8729 cuando se realiza la correlación de los valores según la siguiente expresión:

$$PSI = 5e^{-282(IRI-1)}$$

### **Escalonamiento de las losas de concreto con Perfilómetro Inercial**

Algunos pavimentos se construyen colocando losas / segmentos (concreto u otro material) muy juntos. La falla es el fenómeno de golpes causados por la diferencia de altura entre dos losas sucesivas.

El método de detección de fallas de Dynatest es compatible con la "Práctica estándar para estimar fallas de pavimentos de concreto" de AASHTO. El algoritmo de detección tiene tres fases: aproximación (avance), falla (zona de caída) y abandono (cola). Las excursiones

de perfil en la fase de falla no se tienen en cuenta (pueden producirse grietas o rellenos). Se calcula la altura promedio de las fases de Aproximación y Abandono. La diferencia de altura es la altura de falla (Dynatest, 2008).

Los valores para el ancho de cada fase y la altura mínima de falla cumplen con el estándar AASHTO. El algoritmo esperará 500 mm para ver si hay fallas en la otra trayectoria de la rueda o en la línea central para almacenar las fallas juntas en una línea en el archivo de datos (Dynatest, 2008).

## Reporte de datos crudos obtenidos con el RSP

### 1. Almacenamiento y reporte de datos

El RSP almacena sus datos en un archivo ASCII delimitado por comas. Esto significa que el archivo es "legible por humanos" que la información en cada línea del archivo está separada por comas. Esto facilita el procesamiento y manejo de datos. Los datos delimitados por comas se pueden importar fácilmente a Microsoft Excel para análisis e informes ad hoc (Dynatest, 2008).

Este programa produce archivos que son directamente 'Importables' a la mayoría de los programas de hojas de cálculo y fácilmente legibles por software dedicado. Un archivo consta de información de ".Encabezado" seguida de datos de perfil RSP y datos opcionales de IMS y posicionamiento global. Los elementos numéricos se encuentran dentro de campos fijos indicados por [X, Y, W], que define las posiciones de primer y último carácter y el ancho (Dynatest, 2008).

<b>Unidades</b>	Unidades métricas	
	Sistema inglés	
<b>Estacionamientos</b>	m, km	
	pie, yarda	
	milla, milla pie	
<b>Información geográfica</b>	Coordenadas, grados	Latitud norte positiva
		Longitud este positiva
	Altitud, m	

Cuadro 14: Intervalos de medición de IRI

La información del reporte genera secciones con un código único a cada parámetro que se ha evaluado. Los datos están listados respetando el intervalo establecido con anterioridad. A continuación, se muestran los códigos que se usarán para este estudio y el detallamiento de los datos que se encuentran en cada apartado.

```

Longitudinal Profile elevation
5405, 0.000000, 0.000100, -0.5, -0.8, 2.1
  [ 28, 34, 7] -0.5 Left Wheel path (mm/inches)
  [ 36, 42, 7] -0.8 Centreline
  [ 44, 50, 7] 2.1 Right Wheel path

```

Figura 46: El perfil longitudinal se encuentra con el código 5405 en el reporte generado por el RSP

```

International Roughness Index (IRI)
5406, 0.000000, 0.020000, 4.75, 4.09, 3.69
  [ 28, 33, 6] 4.75 Left Wheel path (m/km or in/mile)
  [ 35, 40, 6] 4.09 Centreline IRI
  [ 42, 47, 6] 3.69 Right Wheel path

```

Figura 47: El Índice Internacional de Rugosidad se encuentra con el código 5406 en el reporte generado por el RSP

```

Faulting
5414, 0.007890, 5.4, 5.6, 5.4, 5.2
  [ 6, 15, 10] 0.007890 Station (average)
  [ 17, 22, 6] 5.4 Average Fault Depth
  [ 24, 29, 6] 5.6 Left wheel path
  [ 31, 36, 6] 5.4 Centre line
  [ 38, 43, 6] 5.2 Right wheel path

```

Figura 48: El escalonamiento de las losas de concreto se encuentra con el código 5414 en el reporte generado por el RSP

```

Geographic Positioning System (GPS)
5280, 0.000000, 0.001000, 0, 130743.5, +90.0000000, +180.0000000, 9999.9, 0, 5,
416, 11

  [ 28, 28, 1] 0 0: No Failure
                9: Timeout
  [ 30, 35, 6] 130743.5 Time format hhmmss.s
  [ 37, 47, 11] +90.0000000 Latitude (degrees, real)
  [ 49, 60, 12] +180.0000000 Longitude (degrees, real)
  [ 62, 67, 6] 9999.9 Height (meters, always)
  [ 69, 70, 2] 2 0:No Nav. 1:Std.GPS 2:DGPS
  [ 72, 73, 2] 5 No of satellites

```

Figura 49: La información del GPR se encuentra con el código 5280 en el reporte generado por el RSP

## 2. Informes de medición

De acuerdo con Pérez (2005) en los informes de medición de IRI y Ahuellamiento, debe incluirse la siguiente información:

- Fecha en que se realizaron las mediciones de perfil Localización y descripción del tramo evaluado
- Carril evaluado
- Resumen estadístico, incluyendo IRI promedio y desviación estándar; para todo el tramo y para las secciones homogéneas

- Gráficas de IRI, IRI promedio e IRI promedio + desviación estándar con sus respectivas secciones homogéneas
- Gráficas de diferencias acumuladas y definición de secciones homogéneas para IRI
- Resumen estadístico, incluyendo Ahuellamiento promedio y desviación estándar; para todo el tramo y para las secciones homogéneas
- Gráficas de Ahuellamiento, Ahuellamiento promedio y Ahuellamiento promedio + desviación estándar, con sus respectivas secciones homogéneas (si fue medido el Ahuellamiento)
- Gráficas de diferencias acumuladas y definición de secciones homogéneas para Ahuellamiento

## 9.3. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA AUTOPISTA

### 9.3.1. Falling Weight Deflectometer

#### Características de Deflectómetro de impacto FWD

El Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) de Dynatest aplica una carga dinámica que simula la carga dinámica de una llanta. La respuesta del pavimento se analiza con el software ELMOD (Evaluación de los Módulos de Capa y Diseño de Superposición) de Dynatest para determinar los módulos elásticos, los esfuerzos y las deformaciones de cada capa modelada. ELMOD reporta la capa más débil y el modo de falla, vida residual y determina las alternativas óptimas de rehabilitación. El Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) está disponible como un remolque o una versión montada en camión (Truck Mounted Deflectometer) (solamente en Estados Unidos) que cumple todas las normas FWD en todo el mundo.

Beneficios Clave del Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer):

- Pruebas estructurales automatizadas y rápidas aplicables a los pavimentos de todo el mundo.
- Determina la capa de falla, en lugar de simplemente determinar la capacidad de resistencia de carga.
- Control de calidad de pavimentos nuevos (QC/QA).
- Compara una amplia gama de opciones de rehabilitación, incluyendo fresados y reciclados, en lugar de simplemente aplicar sobrecapas.
- El uso del Deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) proporciona datos estructurales precisos, reproducibles y repetibles.
- El monitoreo automatizado y en tiempo real de las celdas de carga, los geófonos y las variaciones de la información garantizan una alta calidad de los datos recopilados.

- Utiliza el análisis empírico-mecanicista aplicable a la mayoría de las estructuras de pavimento.
- El Deflectómetro de Impacto FWD se utiliza en todo el mundo, desde los desiertos más calientes y secos, hasta los trópicos húmedos y las regiones más frías (Dynatest, 2019).

## Auscultación utilizando el FWD

Los deflectómetros de impacto definidos en la norma ASTM D4694-96. Estos equipos aplican una sollicitación al pavimento por impacto y determinan una cuenca de deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento.

### 1. Dispositivo generador de impacto

Este dispositivo debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía, tiene que ser capaz de levantar una o varias masas predeterminadas y soltarlas. La onda generada por el impacto de la masa debe tener aproximadamente una forma sinusoidal y aplicarse comuna amplitud pico de 50kN. La duración del impulso de fuerza debe permanecer en un intervalo de 20 a 60ms. El sistema de guía debe presentar una fricción despreciable y debe estar diseñado de tal modo que las masas caigan perpendiculares a la superficie del pavimento (Escobar *et al.*, 2008).

### 2. 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 450mm 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 (Escobar *et al.*, 2008).

### 3. Geófono 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 equipo cuenta con 9 geófonos separados a distancias predefinidas, los mismos tienen una apreciación de 1 micra. El espaciamiento adecuado entre sensores es de 300mm. Los sensores pueden ser de varios tipos: transductores de desplazamiento, de velocidad, o de aceleración (acelerómetros) (Escobar *et al.*, 2008).

### 4. Celda de carga

La celda tiene que ser colocada de tal manera que no restrinja la capacidad de obtener mediciones de deflexión, bajo el centro de la placa de carga (Escobar *et al.*, 2008).

### 5. Intervalo de medición

El número de ensayos y los intervalos de medición para el FWD dependen del nivel de proyecto que se está realizando según Pérez, Garnica, Gómez e Italdehui (2004):

<i>Nivel del proyecto</i>	<i>Intervalo de medición</i>	<i>Ensayos por sección uniforme de pavimento</i>	<i>Ensayo de juntas para eficiencia de transferencia de carga</i>
	(m)		(%)
Red de carreteras	100 – 500	7	10
Proyecto general	50 – 200	15	25
Proyecto detallado	10 – 100	-	-

Cuadro 15: Intervalo de mediciones de deflexiones según nivel de proyecto

También se puede tomar en cuenta el hecho que, si el tramo tiene una longitud menos a 2 o 3 kilómetros, se recomienda realizar mediciones a cada 25m en ambos carriles y de forma alterna. Sin embargo, si el tramo tiene una longitud mayor, se debe analizar el objetivo del estudio. Si se trata de un diseño de rehabilitación o control de calidad, la medición se debe llevar a cabo a cada 50m en ambos carriles y de forma altera; si se trata de un estudio de red, puede llevarse a cabo a cada 250m solamente en el carril pesado (Pérez *et al.*, 2004).

## 6. Calibración del equipo

Es necesario realizar la calibración de distintos geófonos que conformar parte del equipo de medición, dicha acción consiste en una comparación de sus mediciones contra patrones nacionales o internacionales de la misma magnitud por definir (Escobar, García y Guzmán, 2008). Después, se debe verificar que el equipo y el sistema de registro cumplan con las siguientes especificaciones:

- ASTM D4694-96, Especificaciones de la señal y del sistema de registro
  - Las mediciones de la deflexión y el almacenamiento deben manejar una resolución de  $\pm 1\mu\text{m}$  o menos (Escobar *et al.*, 2008).
  - Las mediciones de la carga y la deflexión requieren registrarse dentro de un periodo de tiempo o ventana de medición como mínimo de 60ms, para tener una precisión de tiempo de carga máxima y deflexión de  $\pm 2\%$  y precisión de las deflexiones de  $\pm 2\mu\text{m}$  (Escobar *et al.*, 2008).
- AASHTO T256-01, Determinación de deflexiones en sitio
  - La placa de carga y los geófonos deben estar apoyados en una superficie estable y firme.
  - Si al levantar y dejar caer el dispositivo generador de impacto, ocurre una deformación permanente bajo la placa de carga, es necesario mover el equipo y reducir el impacto aplicado hasta que la deformación permanente no sea significativa (Escobar *et al.*, 2008).
  - Se debe ejecutar dos secuencias de carga y si la diferencia es mayor al 3% en cualquier geófono, se debe registrar la variabilidad (Escobar *et al.*, 2008).

## 7. Configuración del equipo

La configuración del equipo es almacenada en un archivo de salida y constituye un insumo para el programa de análisis. Dentro de esta configuración se incluye información como el diámetro de la placa de carga, número y posición de los transductores (geófonos) de deflexión y la orientación de los geófonos de deflexión con respecto a la placa de carga (Escobar *et al.*, 2008).

## Reporte de datos crudos obtenidos con el FWD

### 1. Reporte de datos

La recolección de datos se realizará mediante el software adquirido con el equipo FVO. Las medidas de deflexiones en cada punto están claramente identificadas con la progresiva de referencia, y deben presentar idealmente los datos de temperatura ambiente y del pavimento en cada punto. En caso de disponer de medidas de coordenadas de GPS, las mismas son registradas también en cada punto de medida.

Los archivos crudos pueden ser visualizados por medio de Microsoft Acces, en donde se presentan varias pestañas. En la primera pestaña como se muestra a continuación, se presentan la cantidad de ensayos llevados a cabo en una misma estación (por lo general son tres) así como el esfuerzo, la fuerza y las deflexiones obtenidas por cada geófono para cada uno de esos ensayos.

StationID	DropID	Histc	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	
1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	1191	84.15	581.3	491.2	446.4	395.5	313.5	207.3	132.4	89.1	67.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	<input checked="" type="checkbox"/>	1189	84.07	577.6	490.1	446.0	395.4	313.7	207.3	131.9	88.7	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	1190	84.14	575.5	490.5	446.8	396.3	314.6	208.5	132.1	89.3	66.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	4	<input checked="" type="checkbox"/>	1208	85.37	214.3	132.1	105.6	92.2	81.2	68.7	58.1	47.6	38.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	5	<input checked="" type="checkbox"/>	1206	85.25	212.7	131.4	105.5	91.8	80.9	68.7	57.9	47.6	38.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	6	<input checked="" type="checkbox"/>	1209	85.42	212.7	131.2	105.3	91.8	81.0	68.3	57.9	47.3	38.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	7	<input checked="" type="checkbox"/>	1203	85.02	183.7	169.2	158.5	145.0	124.3	96.5	76.1	62.0	50.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	8	<input checked="" type="checkbox"/>	1207	85.30	184.4	169.6	158.9	145.3	124.3	96.6	75.9	62.1	50.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	9	<input checked="" type="checkbox"/>	1202	84.93	183.9	169.6	158.8	145.3	124.2	96.6	76.0	62.0	49.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10	<input checked="" type="checkbox"/>	1224	86.48	137.1	130.8	126.6	121.7	113.1	97.7	82.5	69.2	57.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	11	<input checked="" type="checkbox"/>	1225	86.59	137.7	130.8	126.8	121.7	113.1	97.6	82.6	69.3	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	12	<input checked="" type="checkbox"/>	1223	86.43	137.7	130.3	126.5	121.2	112.6	97.3	82.2	68.7	57.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	13	<input checked="" type="checkbox"/>	1210	85.52	235.3	232.7	229.5	224.0	213.4	193.4	170.5	140.0	112.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	14	<input checked="" type="checkbox"/>	1209	85.46	235.0	232.4	229.2	223.7	212.9	193.2	170.5	140.1	112.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	15	<input checked="" type="checkbox"/>	1210	85.53	234.8	232.5	228.9	223.9	213.1	193.3	170.6	140.7	111.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	16	<input checked="" type="checkbox"/>	1221	86.29	143.7	133.3	125.4	116.9	101.3	79.3	61.2	47.3	34.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	17	<input checked="" type="checkbox"/>	1215	85.85	143.0	132.8	124.9	116.5	101.2	79.4	61.2	47.1	34.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	18	<input checked="" type="checkbox"/>	1219	86.15	143.1	133.1	125.2	116.6	101.4	79.4	61.1	47.2	35.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	19	<input checked="" type="checkbox"/>	1229	86.84	111.3	106.5	104.0	101.0	95.2	85.7	75.7	63.8	54.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	20	<input checked="" type="checkbox"/>	1228	86.79	110.6	106.0	103.8	100.6	94.7	85.4	75.4	63.6	53.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	21	<input checked="" type="checkbox"/>	1230	86.93	111.6	106.7	104.7	101.4	95.6	86.1	75.9	63.9	54.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	22	<input checked="" type="checkbox"/>	1214	85.83	151.4	136.0	125.5	113.3	96.4	74.0	57.9	47.0	39.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	23	<input checked="" type="checkbox"/>	1213	85.73	152.6	136.6	126.1	113.9	96.6	74.6	58.4	47.2	39.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 50: Número de caídas y resumen de ensayos para cada estación obtenidas con el FWD

En la segunda pestaña del archivo exportado de datos crudos se tiene específicamente la identificación de cada estación evaluada, así como la temperatura del pavimento y del aire, también señala la hora en que se realizó el ensayo para cada punto. Además, por medio del GPS integrado, indica la ubicación georreferenciada de cada uno de los puntos más la altitud en cada uno de ellos.

SessionID	StationID	Station	StationUnit	StationDire	Asphalt	Surf	Air	Cracks	Time	Latitude	Longitude	Height
1	1	60700.1	meters	1		34	32	None	11:39	14.288395	-90.797378	303.7 inicio carril 2
1	2	60900.6	meters	1		33.6	31.7	None	11:40	14.2873933	-90.795833	302.4
1	3	61100.8	meters	1		31.1	32	None	11:44	14.2864283	-90.794265	301.1 inicio de concre
1	4	61300.9	meters	1		33.2	32.2	None	11:46	14.2854633	-90.7927	292.3
1	5	61502.4	meters	1		30.5	32.5	None	11:48	14.284505	-90.79112	293.3
1	6	61700.8	meters	1		31.8	32.9	None	11:51	14.283555	-90.789573	300.1
1	7	61900.9	meters	1		34.3	33.2	None	11:53	14.2825967	-90.788005	307.6
1	8	62101.3	meters	1		35.9	33.3	None	11:55	14.28184	-90.786327	306.3
1	9	62300.7	meters	1		35.5	33.2	None	11:56	14.2812	-90.784602	302.4
1	10	62500.1	meters	1		34.2	33.2	None	11:58	14.2805417	-90.78289	296.6
1	11	62700	meters	1		34.7	33.2	None	12:01	14.2795217	-90.781378	297
1	12	62900.9	meters	1		34.4	33.1	None	12:03	14.278285	-90.78002	291
1	13	63102	meters	1		34.8	32.9	None	12:06	14.2770383	-90.778668	284.6
1	14	63299.9	meters	1		34.7	32.5	None	12:07	14.2758117	-90.777335	280.3
1	15	63500.9	meters	1		34.3	32.2	None	12:09	14.274545	-90.776007	275.1
1	16	63700.7	meters	1		34.6	31.9	None	12:11	14.2730117	-90.77505	269.9
1	17	63900.5	meters	1		33.5	31.7	None	12:13	14.27125	-90.7747	265.3
1	18	64101	meters	1		34.6	31.4	None	12:16	14.269445	-90.774687	260.9
1	19	64300.1	meters	1		34.5	31	None	12:32	14.2676433	-90.774673	257.3
1	20	64500.8	meters	1		34.1	31	None	12:33	14.2658317	-90.774677	252
1	21	64701.7	meters	1		34	31	None	12:35	14.26402	-90.774663	248.5
1	22	64902.7	meters	1		34.7	30.9	None	12:37	14.2622067	-90.774662	243.6
1	23	65100.9	meters	1		34.3	30.7	None	12:38	14.2604183	-90.774657	239.3

Figura 51: Información cruda de cada estación obtenida con el FWD

## 2. Información en archivos de medición

Según Escobar *et al.* (2008) en los archivos de cada pavimento evaluado, debe incluirse la siguiente información:

- Fecha y hora en que se realizaron las mediciones
- Inicio y fin de la estación o localización física del tramo evaluado
- Nombre/Iniciales del operador
- Factores de calibración
- Localización de cortes o terraplenes
- Ubicación de alcantarillas, puentes y otras
- características de control vertical
- Descripción del tipo de pavimento
- Condiciones ambientales
- Extensión de los deterioros superficiales

## Retrocálculo

El retrocálculo o retroanálisis permite definir el módulo elástico equivalente de capas de pavimento que corresponden a una carga aplicada y a unas deflexiones inducidas. El procedimiento consiste en la suposición de valores de módulos elásticos para cada una de las capas del pavimento y mediante el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias radiales del punto de aplicación de la carga. Cuando se obtienen las deflexiones calculadas, se comparan con las deflexiones medidas; de esta manera, el proceso se repite cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado el máximo número de iteraciones.

### 1. Módulo de resiliencia de la subrasante

En el diseño de pavimentos rígidos se utiliza el módulo de reacción de la subrasante. Se define como el valor medido o estimado en la parte superior del suelo (subrasante) donde se asienta las capas del pavimento, generalmente en la base (Abad, 2018).

Según el método AASHTO (1993) el módulo resiliente de la subrasante puede ser obtenido por retrocálculo con las deflexiones medidas en el Deflectómetro de impacto, para el sensor ubicado a 180 cm del eje de carga, utilizando la siguiente expresión:

$$M_{rr} = \frac{(1 - \mu_s^2) P}{\pi d_r r}$$

Donde,

$M_{rr}$ : Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (MPa o lb/pulg<sup>2</sup>)

P: Carga aplicada en el impacto (kN o libras)

$\mu$ : Relación de Poisson de la subrasante

$d_r$ : Deflexión registrada a la distancia r medida desde el centro de carga (centímetros o pulgadas)

r: Distancia entre el eje de carga del sistema y el sensor dado (centímetros o pulgadas)

Y si se asume una relación de Poisson de 0.5, la ecuación anterior se reduce a la siguiente expresión

$$M_{rr} = \frac{0.24 P}{d_r r}$$

La deflexión utilizada para el cálculo sólo depende de la deformación de la subrasante. Se mantiene la suposición que, a una distancia razonable de la carga, la deflexión no está influenciada por los valores de los módulos de las capas superiores, sin embargo, no debe alejarse tampoco mucho del punto de medida, ya que las deflexiones serían muy pequeñas y difíciles de determinar (Higuera, 2010).

El módulo de resiliencia requiere de un factor de ajuste C para que el valor obtenido sea consistente con la subrasante. Es recomendado utilizar un valor de C=0.33. Entonces,

$$M_r = C \frac{0.24 P}{d_r r}$$

Donde,

P: Carga aplicada (libras)

$M_r$ : Módulo resiliente de la subrasante (lb/pulg<sup>2</sup>)

$M_{rr}$ : Módulo resiliente por retrocálculo de la subrasante (lb/pulg<sup>2</sup>)

C: Factor de ajuste (0.33)

### 2. Módulo de elasticidad

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y esfuerzos están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del hormigón.

### 3. Módulo de reacción de la subrasante (K)

El módulo de reacción estático efectivo debajo de la losa de pavimento rígido se requiere para el diseño de pavimentos rígidos y de capas de refuerzo para pavimentos de este tipo que estén fracturados (Higuera, 2010).

El procedimiento recomendado para el retrocálculo del módulo K efectivo de ensayos no destructivos está basado en el concepto de AREA

$$rea[in] = 6D0 + 2D1 + 2D2 + D3D0rea[mm] = 150D0 + 2D1 + 2D2 + D3D0$$

Donde:

D0: Deflexión máxima bajo el centro de carga (mm)

D1: Deflexión a 300 mm

D2: Deflexión a 600 mm

D3: Deflexión a 900 mm

Para un plato de carga de 150 mm (5.9 pulg) de radio, la relación entre AREA y el radio de rigidez relativa se determina mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \left[ \frac{\ln\left(\frac{36AREA}{1812.279133}\right)}{2.559340} \right]^{4.3870009}$$

Entonces, el módulo K efectivo puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$Kr = \frac{P}{8D_0\rho^2} \left( 1 + \frac{1}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{a}{2\rho}\right) + 0.5772156649 + 1.25 \right] \frac{a^2}{\rho^2} \right)$$

Donde,

Kr: Módulo de reacción de la subrasante por retrocálculo (lb/pulg<sup>3</sup> )

D0: Deflexión máxima en el centro de la placa de carga (pulgadas)

P: Carga aplicada en el impacto (libras)

a: Radio del plato de carga (pulgadas)

$\rho$ : Radio de rigidez relativa (pulgadas)

El módulo Kr obtenido por retrocálculo de ensayos de deflexión no destructivos es el módulo K dinámico. se recomienda en la Guía AASHTO, los valores del módulo K obtenidos por retrocálculo deben ser divididos por 2 para obtener los módulos de diseño (Higuera, 2010). Finalmente, el módulo de elasticidad del concreto se determina así:

$$E = \frac{PCC}{D^3}$$

Donde,

E: Módulo de elasticidad del concreto (lb/pulg<sup>2</sup> )

D: Espesor de la losa de concreto (pulgadas)

PCC: Factor del concreto de cemento Portland (lb– pulg)

## Software ELMOD6

Según Dynatest (2019) ELMOD – por sus siglas en inglés, Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design – analiza la respuesta del pavimento del FWD y del HWD determinando el módulo, la tensión y la presión de cada capa significativa. Reporta la capa de fallo y vida residual utilizando el módulo LCCA que permite al usuario seleccionar las alternativas óptimas de rehabilitación. ELMOD 6 utiliza tres modos de retroanálisis:

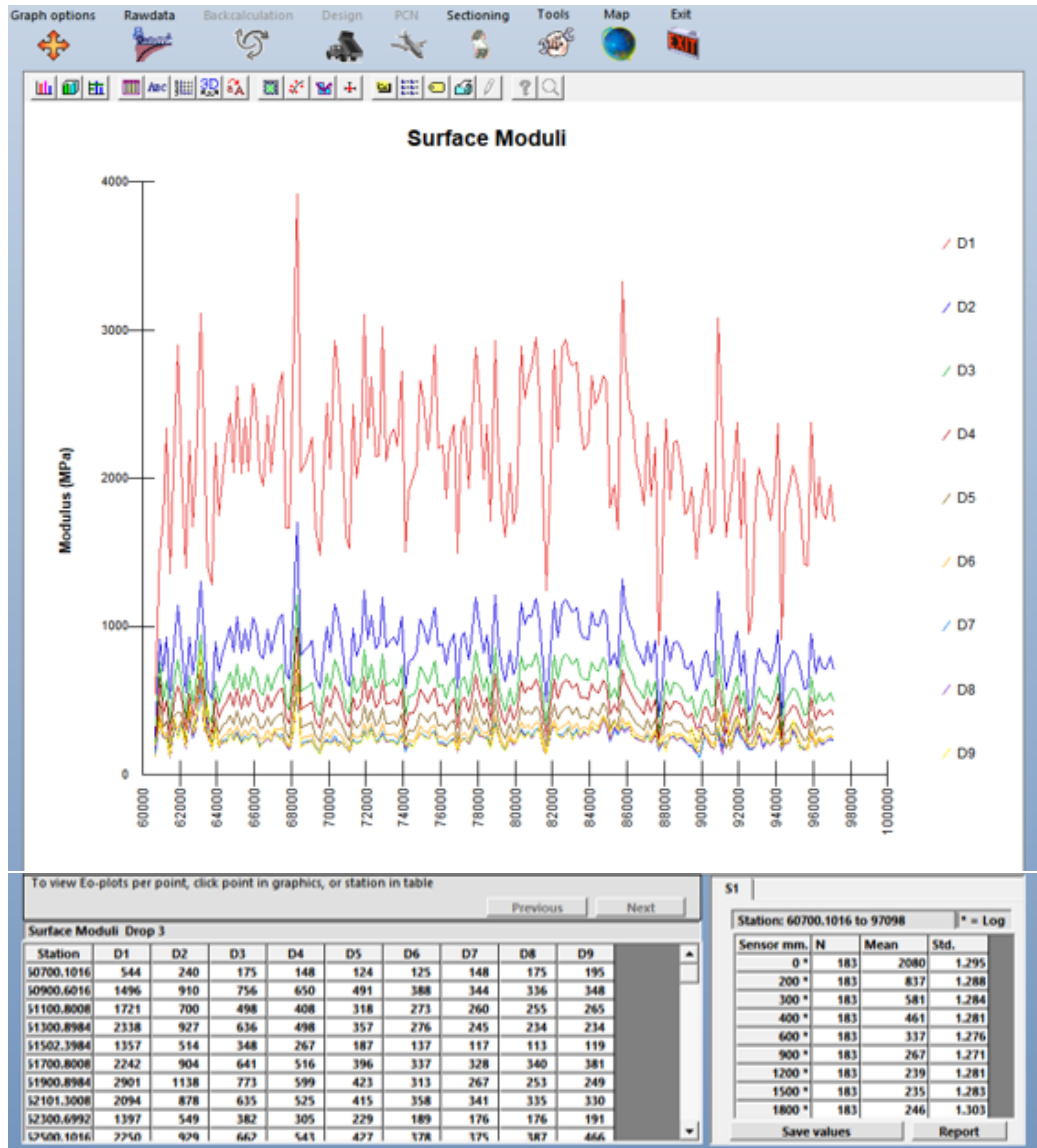


Figura 52: Información cruda de cada estación obtenida con el FWD

### 1. Ajuste de cuenco de deflexión

El método requiere parámetros de entrada los cuales son módulos de elasticidad estimados de cada capa del pavimento, estos también son llamados módulos semilla. Con base a estos módulos, se genera un cuenco de deflexiones teórico, el cual es comparado y ajustado con los cuencos obtenidos en las mediciones realizadas. Los módulos

incrementan o disminuyen usualmente en un 10 %, si el error en el cualquier cuenco es menor que el cuenco original, este se considera como el mejor escenario. Este proceso se itera hasta que se encuentre un mínimo de error entre los cuencos de deflexión calculados y de medición.

<b>Material</b>	<b>Módulo semilla</b>	
	<i>(psi)</i>	<i>(MPa)</i>
Concreto de cemento portland	5,000,000	35,000
Bases tratadas con cemento	600,000	4,100
Bases granulares	30,000	200
Subbases granulares	15,000	100
Suelos cohesivos	7,000	50
Suelos estabilizados con cemento	50,000	350
Suelos estabilizados con cal	20,000	140

Cuadro 16: Módulos semilla típicos  
(AASHTO, 1993)

## 2. Radio de curvatura

Utiliza las propiedades reales o aparentes de la subrasante para determinar los módulos de las capas del sistema de pavimento a través del radio de rigidez. Para empezar, el método calcula las propiedades de la subrasante, la rigidez y la no linealidad a través de las desviaciones de los geófonos exteriores. Mientras que, utilizando el radio de rigidez de los geófonos centrales se evalúa la rigidez de la capa de rodadura del pavimento. Para las capas restantes se calcula la rigidez en base a la respuesta global del pavimento frente a la carga impuesta (Abad, 2018).

3. FEM / LET / MET En este método, el análisis de retrocálculo puede desarrollarse por: Método de Elementos Finitos (FEM), Método de Espesor Equivalente (MET) o Teoría Elástico Lineal (LET).

## 9.4. OTRAS METODOLOGÍAS

### 9.4.1. Secciones homogéneas

Algunas características propias de un pavimento varían a lo largo de la longitud de la carretera, y el patrón de variación puede ser muy diferente de un tipo de parámetro a otro. En general, las secciones homogéneas son sectores del pavimento de comportamiento similar.

En la Guía de diseño de estructuras de pavimento de la AASHTO (1993) Anexo J establece que un método analítico para delinear estadísticamente unidades homogéneas de medidas de un pavimento a lo largo de un sistema de carretera es la aproximación de diferencias acumuladas.

En la siguiente figura se ilustra el concepto de aproximación total usando la suposición inicial de un valor de respuesta ( $r_i$ ) continuo y constante dentro de varios intervalos (0 a  $x_1$ ;  $x_1$  a  $x_2$ ;  $x_2$  a  $x_3$ ) a lo largo de la longitud del proyecto. Así pues, es evidente que existen tres únicas unidades, teniendo diferentes magnitudes de respuesta ( $r_1$ ,  $r_2$ , y  $r_3$ ) a lo largo del proyecto. A continuación, se ilustra cómo resultaría una gráfica respuesta-distancia. Esta metodología se utilizó en la mayoría de los parámetros utilizados en este trabajo de graduación.

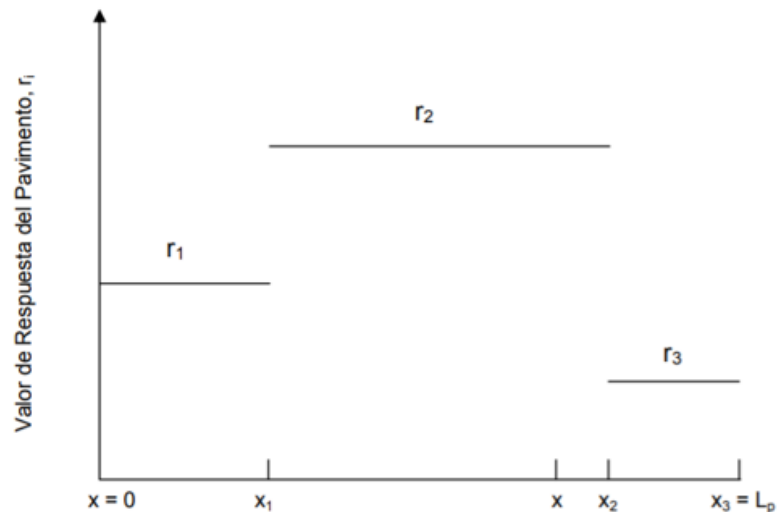


Figura 53: Método de diferencias acumuladas para obtención de secciones homogéneas (AASHTO, 1993)

#### 9.4.2. Georadar

##### Características de GPR MALA

El nuevo equipo MALA GX HDR es un sistema integrado que consiste en una unidad de control GX y una antena HDR, unidos a través de un único cable de datos/corriente. La unidad de control GX viene con un software específicamente diseñado para el registro y tratamiento de señales de georadar. El sistema lleva integrado un sistema GPS, que permite registrar simultáneamente la posición de cada medida.

La serie de antenas HDR constituye el último avance en lo que se refiere al método de georadar. Presenta una serie de ventajas respecto a las antenas convencionales, tales como:

- Toma de datos HDR en tiempo real.
- Tasas de adquisición de datos significativamente mayores.
- Mayor relación calidad de señal-ruido.
- Aumento de ancho de banda.
- Rango dinámico y resolución muy elevados.

- Salida de datos de 32 bit.
- Mayor profundidad de penetración.
- Mejor capacidad de detección.

## Auscultación con GPR

### 1. Unidad de control

Controla los tiempos de envío de señales eléctricas que son convertidas en electromagnéticas por la antena emisora y recibe las señales reflejadas en forma de registros de radargramas.

### 2. Antena emisora y receptora

La emisora transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten hacia el medio. La receptora capta la energía reflejada y transformada en pulsos eléctricos que envía a la unidad central. Ambas antenas, emisora y receptora, están integradas en un mismo elemento.

### 3. Registro de profundidad

Un transmisor emite ondas electromagnéticas de determinada frecuencia (frecuencia central de la antena utilizada) que reflejan parte de su energía al atravesar las diferentes capas del pavimento. El receptor capta esas reflexiones generando un registro de estas en un gráfico profundidad (ns) – distancia (m). La profundidad está dada por el tiempo que tarda la onda (o parte de ella) en salir del transmisor y llegar al receptor.

La profundidad en metros correspondiente al cambio de capa se obtiene a través de las velocidades de onda de los materiales atravesados. La velocidad de la onda en un material depende de la constante dieléctrica del mismo, la cual varía con diversos factores, principalmente con la humedad.

### 4. Software de adquisición de datos

Este software (Mala GPR GroundVision 2) recomienda las siguientes características para la adquisición de datos:

- Frecuencia de muestreo: aproximadamente 10 a 12 veces la frecuencia central de la antena.
- Número de muestras: debería ser aproximadamente 500 para un mejor desempeño.

### 5. Velocidad de medición La especificación técnica de Inglaterra DMRB 7.3.2: Información para evaluar pavimentos – anexo 6 HD 29/2008: Radar de penetración (DMRB 7.3.2 2008) afirma que la velocidad de la toma de datos es un factor importante. Se define como “baja velocidad” a velocidades menores a 30 kilómetros por hora y “velocidad de flujo de tránsito” a velocidades mayores a 80 kilómetros por hora (Bendetto, 2015). Además, clasifica exactitudes para el uso del GPR (de A a D), asignándoles las siguientes aplicaciones:

- **Calsificación A:** mediciones rutinarias con suficiente precisión y confiabilidad. Tiene aplicaciones como medir los espesores de capa de obras viales.

- **Calsificación B:** es necesario verificar los resultados del GPR con otro método. Si se toman las mediciones a baja velocidad se pueden identificar vacíos bajo pavimentos de concreto no reforzado y cambios de humedad en la capa de subbase. Esta clasificación no aplica para velocidades de flujo de tránsito.
- **Calsificación C:** sólo para casos excepcionales. Para mediciones hechas a bajas velocidades pueden determinarse las profundidades de grietas
- **Calsificación D:** no se puede verificar (Benedetto, 2015).

## 6. Interpretación de datos

Los archivos generados se analizan e interpretan, obteniéndose los tiempos para los cuales se dan las reflexiones de las distintas capas. Una vez que se tiene la profundidad de la capa en tiempo (ns), se transforma a metros a través de la velocidad de onda en el material considerado. En el programa Reflex se ingresan las velocidades de cada capa y la transformación se realiza de forma automática.

## **Tipos de antena a utilizar en campo**

La norma ASTM D4748-10 “Método de evaluación estándar para la determinación del espesor de capas de pavimento utilizando radares de corto pulso” trata acerca de la aplicación de GPR para determinar los espesores de capa de un pavimento. Establece que:

- Antenas con 1 GHz de frecuencia pueden identificar el espesor de la capa de superficie de hasta 40 centímetros con una precisión de  $\pm 5$  milímetros.
- Antenas con 2 GHz pueden identificar una capa de espesor menor que 25 centímetros con la precisión de  $\pm 2.5$  milímetros (Benedetto, 2015).

El rango de frecuencia que ha sido elegido a través de investigaciones para la aplicación en pavimentos es de 800 MHz a 1.6 GHz, el GPR proporciona imágenes de alta resolución de la subsuperficial y de las estructuras a través de ondas electromagnéticas de banda ancha, opera en un rango ancho de frecuencias entre 10 MHz y 5 GHz para los sistemas de impulso y de 1 a 8 GHz para sistemas de frecuencias escalonadas.

## **Reporte de datos crudos obtenidos con el GPR**

La señal se adquiere mediante el software Mala GroundVision, generándose como archivo principal un .rd3. Este archivo se analiza con el software Reflex donde, mediante distintos filtros, se distinguen y marcan las interfaces entre materiales.

Las imágenes que se obtienen del archivo .rd3 se les llama radargramas, las cuales son imágenes bidimensionales, en donde las abscisas muestran la distancia cubierta del perfil analizado y las ordenadas el tiempo necesario para que la señal emitida por la antena se refleje y llegue de nuevo a esta.

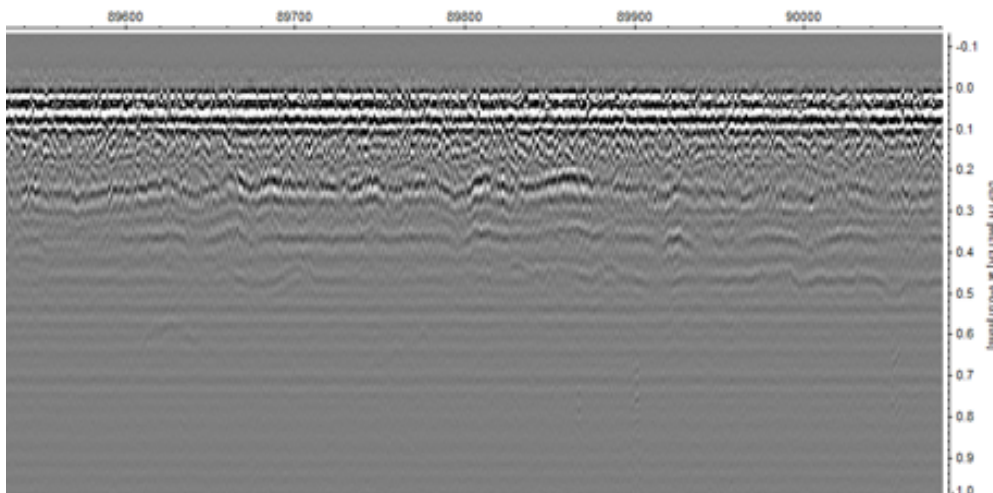


Figura 54: Ejemplo de un radargrama

### 1. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo serán presentados mediante gráficos progresiva (m) – profundidad (cm). Las capas se representan con distintos colores, cuya intensidad varía de acuerdo con la calidad del reflejo de la capa.

## Software Reflex

Es un programa para el procesamiento e interpretación de datos obtenidos por medio del georradar, ultrasonido y refracciones y reflexiones sísmicas. Éste cuenta con diferentes filtros que son aplicados a los datos crudos para obtener radargramas que son más fáciles de interpretar. Una vez aplicados los filtros al radargrama, el programa permite realizar un trazo de las distintas interfaces presentes para luego poder realizar un cálculo de las profundidades de cada una. La información se guarda en un reporte específico para cada trazo realizado, el cual luego puede ser exportado y utilizado en hojas de cálculo para realizar el análisis estadístico, o de otra índole, de los datos ya procesados.

<i>Filtro</i>	<i>Descripción</i>
Subtract- mean (dewow)	Elimina los componentes de baja frecuencia, los cuales son causados por la saturación de la señal por llegadas tempranas de las reflexiones. Evita que se distorsione el espectro de todo el perfil medido.
Subtract-DC-Shift	Utiliza dos valores de tiempo y dentro de este rango calcula la media todos los trazos y la subtrae.
Background removal	Elimina las líneas horizontales causadas por el ruido, el cual ocurre principalmente en los materiales sueltos.
Gain function	Mejora la visibilidad del radargrama aplicando factores de amplificación.

Cuadro 17: Filtros de software Reflex  
(Jol, 2009)

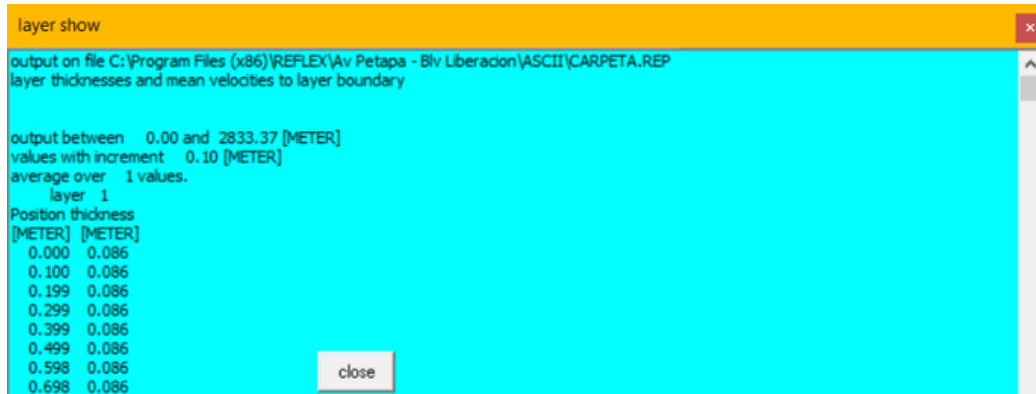


Figura 55: Reporte de espesores de carpeta de rodadura obtenido con Reflexw

Column1	Column2	Column3
layer thicknesses and mean velocities to layer boundary		
output between 0.00 and 2833.37 [METER]		
values with increment 49.97 [METER]		
average over 501 values.		
layer 1		
Position	thickness	
[METER]	[METER]	
0.000	0.077	
49.974	0.076	
99.948	0.077	
149.923	0.074	
199.897	0.073	
249.871	0.077	
299.845	0.080	
349.820	0.072	

Figura 56: Reporte exportado a Excel de espesores de una capa de pavimento

### 1. Definición de las capas de pavimento

La norma ASTM D6432 llamada “Guía estándar para el uso del georradar para investigación de la subsuperficie” establece que la amplitud de la onda reflejada y la señal transmitida dependen del coeficiente de reflexión, el cual cambia en las interfaces de materiales. Para obtener un radargrama con espesores bien definidos es necesario que exista una diferencia en las propiedades eléctricas de los materiales. Para calcular el espesor de las capas es indispensable calcular o conocer la velocidad de propagación de onda, la cual ha sido deducida de la constante dieléctrica, para esto ASTM provee la siguiente información:

<i>Material</i>	<i>Relative Permittivity</i>	<i>Pulse Velocities</i>
	<i>(K)</i>	<i>(m/Ns)</i>
Sand (dry)	4 – 6	0.15 – 0.12
Sand (saturated)	25	0.055
Silt (saturated)	10	0.095
Clay (saturated)	8 – 12	0.106 – 0.087
Granite (dry)	5	0.134
Limestone (dry)	7 – 9	0.113 – 0.1
Concrete (w, f, age)	5 – 10	0.134 – 0.095
Asphalt	3 – 5	0.173 – 0.134

Cuadro 18: Propiedades electromagnéticas de materiales utilizados en pavimentos (ASTM, 2011)

## 9.5. DIAGNÓSTICO DEL PAVIMENTO

Después de finalizar y analizar la información relacionada al estado del pavimento, es posible determinar el tipo de intervención que requiere la estructura. Se tienen dos alternativas:

- **Mantenimiento:** se refiere a todos los trabajos que tienden a resguardar la obra en su condición presente o mantenerla en su nivel actual, y generalmente se limita a bacheos, riegos de sellado, lechadas asfálticas, mantenimiento de bermas, limpieza de cauces.
- **Rehabilitación:** Los trabajos de rehabilitación de pavimentos según su finalidad se clasificarán en estructurales y superficiales. Las primeras tendrán por objeto aumentar significativamente la capacidad estructural del pavimento existente, adecuándola a las acciones del tráfico previsto durante su período de servicio. El objeto de las segundas será conservar o mejorar sus características funcionales – seguridad, comodidad, entre otros – y la protección del pavimento en su conjunto – aumento de la durabilidad, impermeabilidad, uniformidad y aspecto.

Los trabajos de rehabilitación estructural, adecuadamente proyectados y construidos, darán solución a ambos tipos de rehabilitación, ya que supondrá la mejora de la regularidad longitudinal, transversal y de la textura superficial.

Las soluciones por aplicar en una rehabilitación estructural podrán ser de los siguientes tipos:

- Eliminación parcial y reposición de la capa del pavimento existente, incluyendo un eventual reciclado de los materiales.
- Sobrecapa aplicada sobre el pavimento existente.
- Combinación de los dos tipos anteriores.

- Reconstrucción total del pavimento, utilizando materiales nuevos o aprovechando los materiales del pavimento antiguo (reciclado), en este caso los costos se reducen.

En la presente tesis se presenta la opción de reconstrucción total del pavimento, aprovechando los materiales del pavimento antiguo con metodologías como el RCA y el rubblizing del concreto. Los indicadores de serviciabilidad (PSI, IRI, Escalonamiento) permiten determinar el estado en el que se encuentra superficialmente el pavimento y si es necesario una rehabilitación. Por otro lado, la evaluación estructural a través de ensayos no destructivos permite conocer parámetros como el módulo elástico del concreto ( $E_c$ ), el módulo resiliente de la subrasante ( $M_r$ ) y el módulo de reacción. Mientras que la revisión visual del pavimento existente permite definir las reparaciones previas de ser necesarias en algunos sectores del tramo.



---

Presentación e interpretación de resultados

---

## 10.1. IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EVALUADO

### 10.1.1. Datos del tramo de estudio

La evaluación visual por medio de fotografías, la evaluación funcional del pavimento basada en la medición rugosidad por medio del Perfilómetro Inercial (RSP) y la evaluación estructural mediante la deflexión determinada por el Deflectómetro de Impacto (FWD) se realizó en el Tramo: Escuintla – Puerto Quetzal, Ruta Centroamericana CA-09 Sur “A”, iniciando en el kilómetro 61.000 y finalizando en el kilómetro 101.000, teniendo una longitud de 40.0 kilómetros

<i>Datos</i>	<i>Descripción</i>
Tramo	Escuintla – Puerto Quetzal
Departamento	Escuintla
Tipo de carretera y clasificación	Centroamericana (primaria)
Número de ruta	CA-09 Sur “A”
Número de carriles	4
Número de carril por sentido	2
Tipo de terreno	Plano y semirrecto
Tipo de superficie de rodadura	Concreto hidráulico
Km Inicial	61.000
Km Final	101.000

Cuadro 19: Datos del tramo evaluado.



Figura 57: Esquema de ubicación utilizando Google Earth

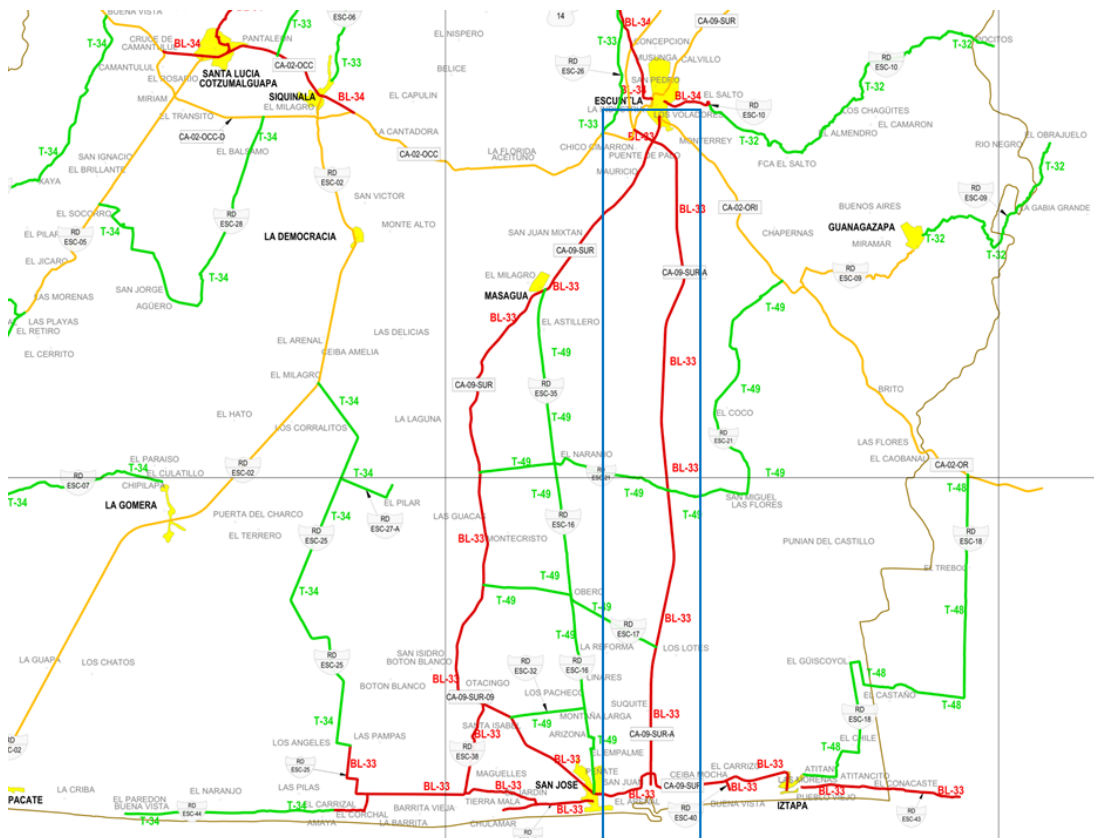


Figura 58: Esquema de ubicación  
(COVIAL, 2019)

### 10.1.2. Nomenclatura de carriles

Para la facilidad de la auscultación y la presentación de los resultados obtenidos de dicho proceso, se tomará en cuenta la siguiente nomenclatura de los carriles que conforman el tramo evaluado de la autopista:

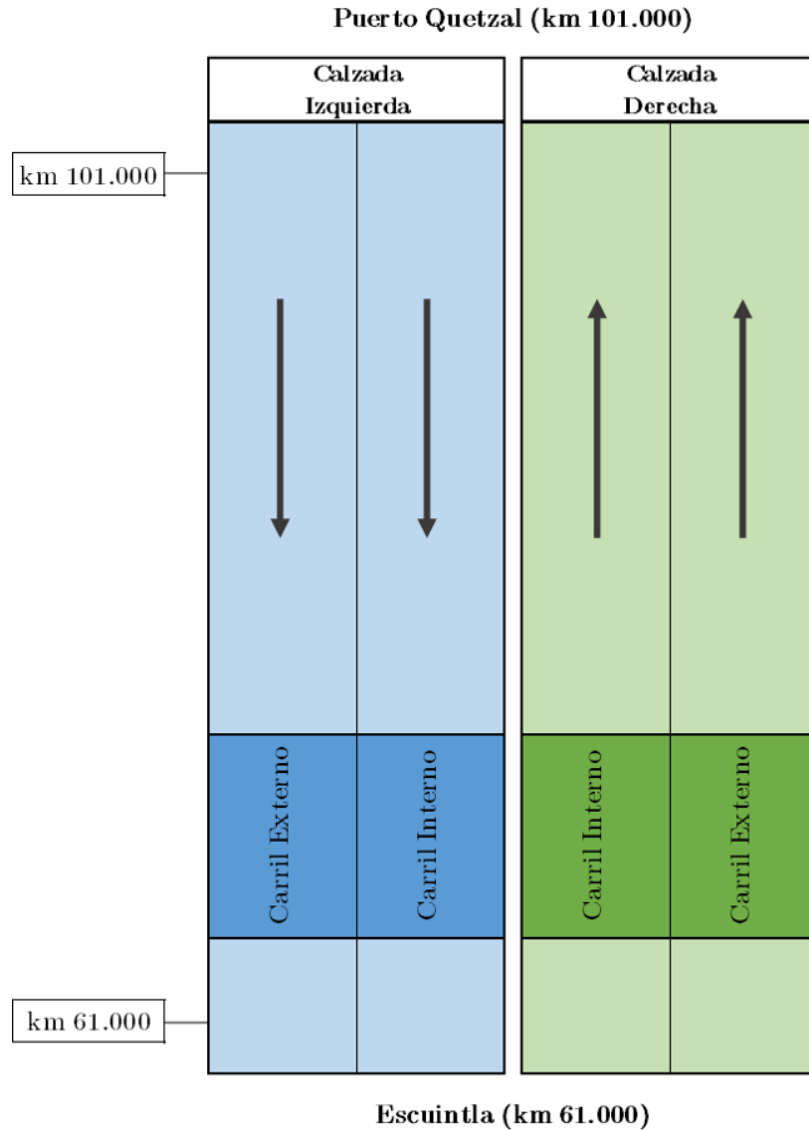


Figura 59: Nomenclatura de carriles

- **Calzada derecha, Carril interno:** carril que se encuentra inmediatamente a la par de la franja central que separa las pistas, este va en dirección de Norte a Sur, es decir, de Escuintla (km 61.000) hacia el Puerto Quetzal (km 101.000) y su tránsito va en la misma dirección.
- **Calzada derecha, Carril externo:** carril que se encuentra en la parte más externa de la pista derecha, este va en dirección de Norte a Sur, es decir, de Escuintla (km

61.000) hacia el Puerto Quetzal (km 101.000), su tránsito también va en esta misma dirección.

- **Calzada izquierda, Carril interno:** carril que se encuentra inmediatamente a la par de la franja central que separa las pistas, este va en dirección de Sur a Norte, es decir, de Puerto Quetzal (km 101.000) hacia Escuintla (km 61.000) y su tránsito va en esta dirección.
- **Calzada izquierda, Carril externo:** carril que se encuentra en la parte más externa de la pista izquierda, este va en dirección de Sur a Norte, es decir, de Puerto Quetzal (km 101.000) hacia Escuintla (km 61.000) y su tránsito va en esta misma dirección.

Para la evaluación funcional de la Calzada Izquierda solamente se realizaron las mediciones del km 61.000 hasta el km 64.800 debido a que el resto del tramo (del km 64.800 al km 101.000) presenta un deterioro con una severidad muy alta y debido al estado superficial tan deteriorado del pavimento, el equipo de medición (perfilómetro inercial) podría verse en peligro de recibir daños físicos. Por otro lado, la medición completa de la Calzada Izquierda sí se realizó para la evaluación estructural y del GPR con el objetivo de obtener la estratigrafía de toda la pista.

## 10.2. PATOLOGÍAS PRESENTES EN EL TRAMO DE ESTUDIO

### 10.2.1. Porcentaje de afectación y severidad de patologías

El área de cada tramo se calcula al multiplicar el ancho total de la calzada, sin incluir el ancho de los hombros, por la longitud del tramo. Luego se calcula el porcentaje de afectación de cada tramo con relación a esta área. El porcentaje de afectación de la vía se calcula dividiendo el área total afectada, la suma de los daños encontrados en cada tramo, entre el área total inspeccionada, la suma de las áreas de cada tramo (INVIAS, 2006).

#### Calzada derecha

Subtramo de análisis		T1	T2	T3	T4
Estacionamiento	<i>Inicial</i>	61.000	64.000	87.000	97.800
	<i>Final</i>	64.000	87.000	97.800	101.000
	<i>Distancia</i>	3.000	23.000	10.800	3.200
Patología	<i>Severidad</i>	<i>Porcentaje de afectación</i>			
Grietas de Esquina	<i>Baja</i>	0.031%		0.001%	0.002%
	<i>Media</i>	0.015%	0.001%		
	<i>Alta</i>	0.017%		0.001%	0.003%
Grietas Lineales (transversal / longitudinal)	<i>Baja</i>	0.357%	0.274%	0.123%	0.005%
	<i>Media</i>	0.444%	0.190%	0.020%	0.015%
	<i>Alta</i>	0.084%	0.025%	0.004%	0.003%

<b>Grietas en Bloque</b>	<i>Baja</i>				
	<i>Media</i>				
	<i>Alta</i>		0.154%	0.033%	0.030%
<b>Desportillamiento de Esquina</b>	<i>Baja</i>	0.011%	0.001%	0.001%	0.000%
	<i>Media</i>	0.025%	0.000%	0.000%	0.002%
	<i>Alta</i>	0.010%	0.000%		
<b>Desportillamiento de Junta</b>	<i>Baja</i>	0.007%	0.188%	0.184%	0.074%
	<i>Media</i>	0.005%	0.123%	0.123%	0.014%
	<i>Alta</i>	0.004%	0.010%	0.002%	
<b>Descascaramiento</b>	<i>Baja</i>			0.004%	
	<i>Media</i>			0.000%	
	<i>Alta</i>				
<b>Desintegración</b>	<i>Baja</i>		1.402%	0.407%	0.027%
	<i>Media</i>		0.375%	0.359%	0.090%
	<i>Alta</i>		0.060%		
<b>Baches</b>	<i>Baja</i>	0.002%	0.006%	0.019%	0.004%
	<i>Media</i>	0.001%	0.005%	0.004%	
	<i>Alta</i>		0.007%	0.072%	
<b>Pulimiento</b>	<i>Baja</i>	0.006%	0.177%	0.197%	0.156%
	<i>Media</i>	0.008%	0.092%	0.095%	0.035%
	<i>Alta</i>	0.000%	0.003%	1.248%	0.011%

Cuadro 20: Porcentajes de afectación por tramo de estudio.

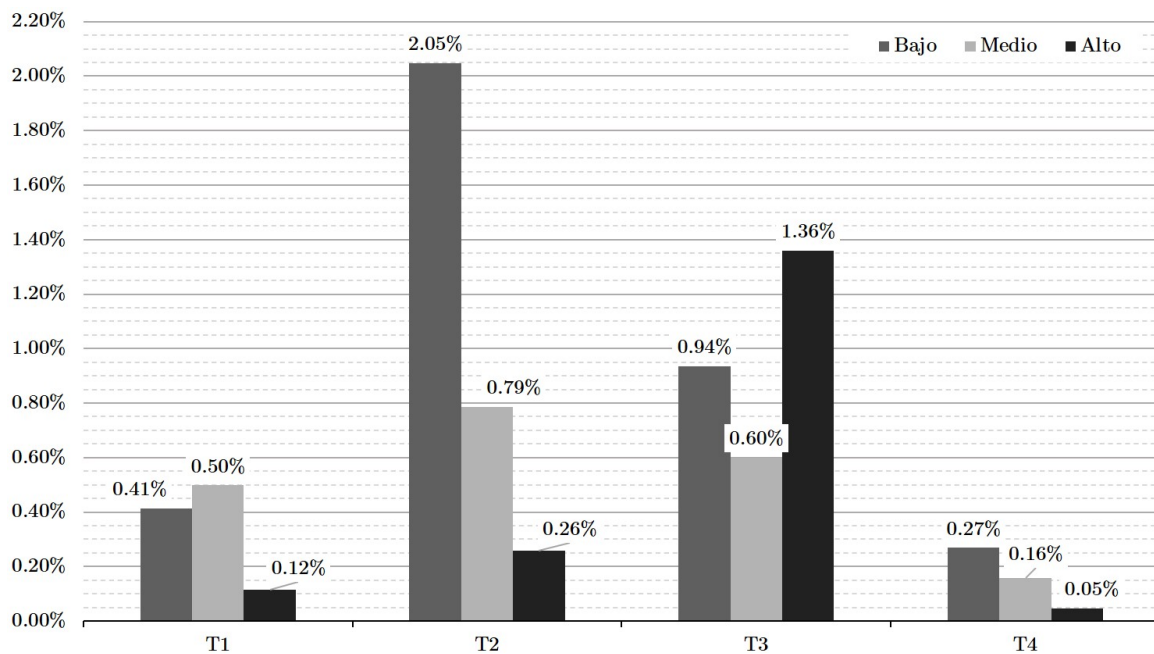


Figura 60: Calzada derecha: Daños por severidad encontrados.

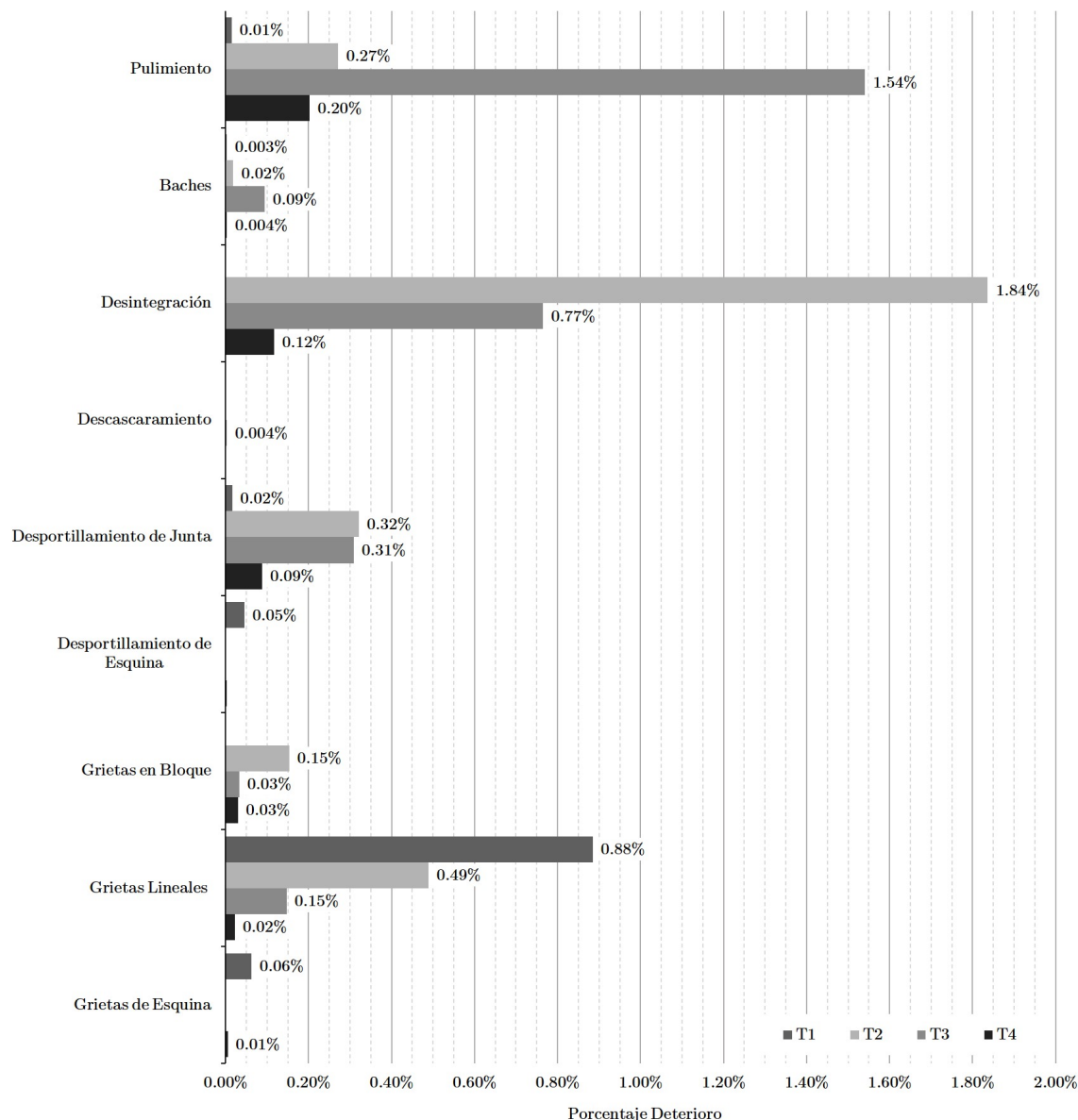


Figura 61: Calzada derecha: Daños por patología encontrados.

Como se puede observar en el Cuadro 20 y en los posteriores gráficos, el tramo 3 (km. 87.000 - km. 97.800) presenta el mayor porcentaje de patologías catalogadas con severidad alta; sin embargo, es el tramo 2 (km 64.000 – km 87.000) presenta la mayor cantidad de área deteriorada. Se puede concluir que el sector 2 se ve predominantemente afectado por áreas que presentan desintegración en la capa de concreto hidráulico (1.84 %), mientras que el sector 3 y 4 por presencia de pulimiento (1.54 % y 0.20 % respectivamente), lo cual indica mal estado de la superficie de los tramos y, por ende, la falta de seguridad que podrían prestar los mismo a los usuarios que utilicen la vía. En el tramo 1 (km 61.000 – 64.000) existe una mayor frecuencia de grietas lineales (0.88 %), transversales y/o longitudinales, debido a que en este tramo se encuentran losas de geometría optimizada se pueden atribuir dichas grietas a la pérdida de capacidad para soportar las sollicitaciones de cargas.

## Calzada izquierda

De la Calzada izquierda solamente se tiene información del km 61.000 al 64.800, en este tramo de análisis existe una evidente frecuencia alta de áreas que presentan grietas lineales (3.15 %), además se observa que las áreas de afectación han sido predominantemente clasificadas con una severidad alta. Al comparar con la Calzada Derecha, se observa que existe un mayor deterioro en la Izquierda y que, a su vez, presenta una condición más crítica.

Subtramo de análisis		T1
Estacionamiento	<i>Inicial</i>	61.000
	<i>Final</i>	64.800
	<i>Distancia</i>	3.800
Patología	<i>Severidad</i>	<i>Porcentaje de afectación</i>
Grietas de Esquina	<i>Baja</i>	0.003%
	<i>Media</i>	0.044%
	<i>Alta</i>	0.007%
Grietas Lineales (transversal / longitudinal)	<i>Baja</i>	0.047%
	<i>Media</i>	0.894%
	<i>Alta</i>	2.206%
Desportillamiento de Esquina	<i>Baja</i>	0.002%
	<i>Media</i>	0.005%
	<i>Alta</i>	0.005%
Desportillamiento de Junta	<i>Baja</i>	0.004%
	<i>Media</i>	0.032%
	<i>Alta</i>	0.018%
Baches	<i>Baja</i>	0.000%
	<i>Media</i>	0.053%
	<i>Alta</i>	0.345%
Pulimiento	<i>Baja</i>	0.006%
	<i>Media</i>	0.107%
	<i>Alta</i>	0.011%

Cuadro 21: Porcentajes de afectación por tramo de estudio.

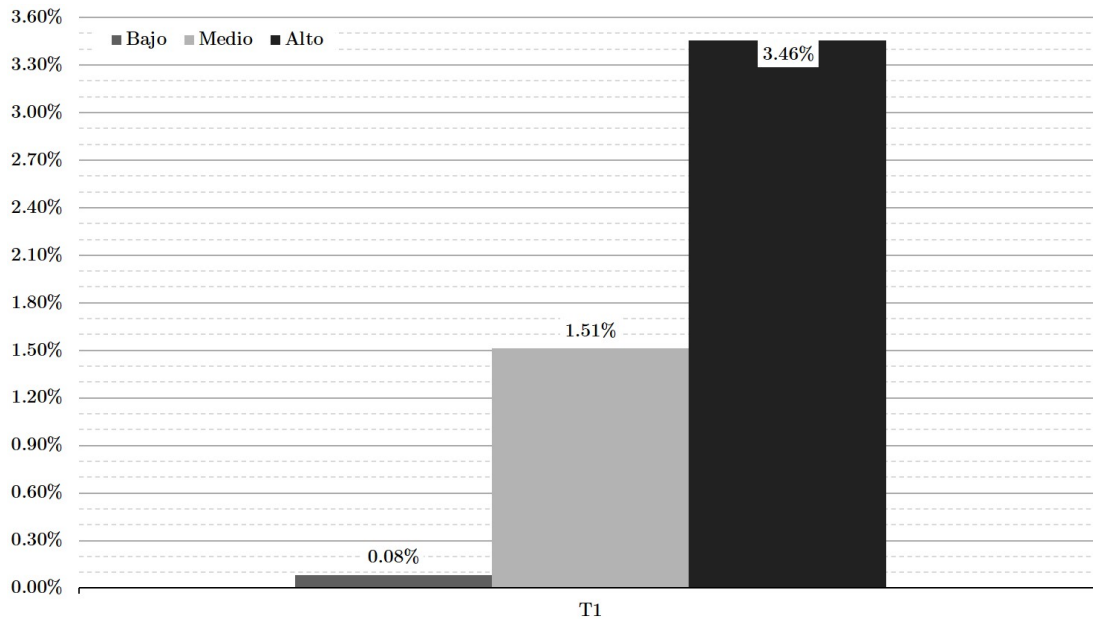


Figura 62: Calzada izquierda: Daños por severidad encontrados.

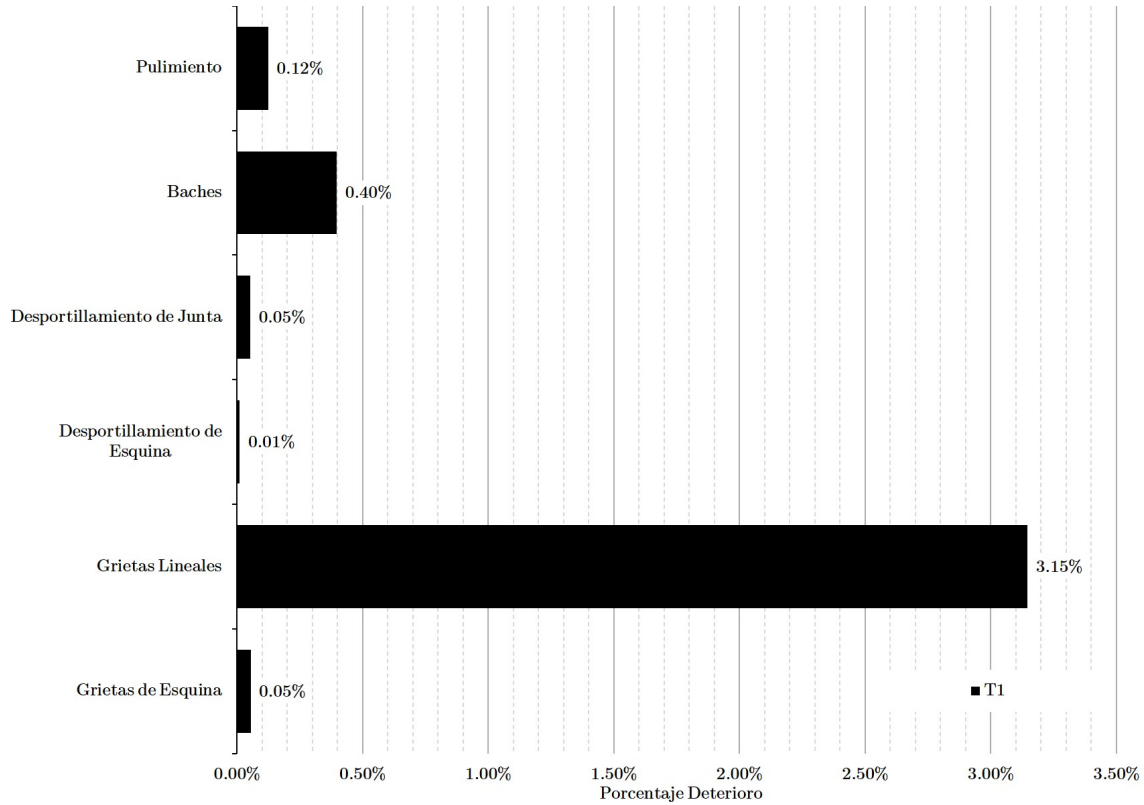


Figura 63: Calzada izquierda: Daños por patología encontrados.

## 10.2.2. Fichas técnicas de patologías





GRIETAS DE ESQUINA	
<b>Descripción de patología</b>	
Grieta que origina un bloque de forma triangular en la losa, intercepta la junta transversal y la longitudinal.	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla estructural
<b>Orientación :</b>	Ángulo mayor a 45°
<b>Cuantificación :</b>	0.327 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	13.999667°
<b>Longitud:</b>	-90.787583°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	
<b>Posibles causas de la patología</b>	
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
1) Sobrecarga en las esquinas de las losas 2) Deficiencia en la transmisión de cargas entre losas adyacentes	1) Falta de apoyo de la losa, por asentamiento de las capas inferiores
<b>Efectos de la patología:</b>	Este tipo de daño puede generar incrementos en los escalonamientos y producir fracturas múltiples en las losas.
<b>Posible solución:</b>	Es recomendable llevar a cabo un sellado de juntas y grietas en caso la severidad sea baja o media, si es alta se debe llevar a cabo una reparación en todo el espesor de la losa

Figura 64: Ficha técnica: Grietas de esquina.

GRIETAS LINEALES (TRANSVERSALES / LONGITUDINALES)	
<b>Descripción de patología</b>	
Grietas que son predominantemente paralelas o perpendiculares al eje de la zalcaza, se extiende desde una junta hasta el borde de la losa	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla estructural
<b>Orientación :</b>	Transversal / Longitudinal
<b>Cuantificación :</b>	1.230 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	14.2757°
<b>Longitud:</b>	-90.776933°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	


	<i>Posibles causas de la patología</i>	
	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
	1) Espesor insuficiente para soportar las sollicitaciones (cargas excesivas)  2) Fatiga de la losa	1) Asentamiento de la cimentación  2) Contracción del concreto o alabeo térmico
<b>Efectos de la patología:</b>	Este tipo de daño puede generar incrementos en los escalonamientos y producir fracturas múltiples en las losas. Además puede producir una grieta activa en todo el espesor de la losa que no permite transferir las cargas por todo el ancho y largo de la misma.	
<b>Posible solución:</b>	Es recomendable llevar a cabo un sellado de juntas y grietas en caso la severidad sea baja o media, si es alta se debe llevar a cabo una reparación en todo el espesor de la losa.	

Figura 65: Ficha técnica: Grietas lineales.


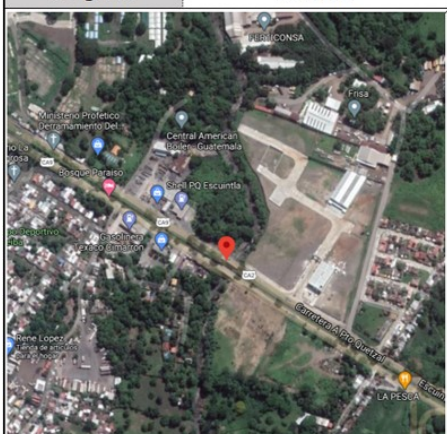
<b>GRIETAS EN BLOQUE</b>					
<b>Descripción de patología</b>	<b>Fotografía de falla</b>				
Grietas interconectadas entre sí, forman grandes o pequeños polígonos					
<b>Tipo de falla:</b>	Falla estructural				
<b>Orientación :</b>	Transversal / Longitudinal				
<b>Cuantificación :</b>	1.85 m <sup>2</sup>				
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto				
<b>Ubicación</b>					
<b>Latitud:</b>	14.28485°				
<b>Longitud:</b>	-90.791333°				
	<b>Posibles causas de la patología</b>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>Primarias</b></th> <th><b>Factor secundario</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>           1) Fracturación múltiple.             2) Repetición de cargas pesadas (fatiga del concreto).             3) Deficiencia en las condiciones de soporte.         </td> <td>           1) Diseño estructural equivocado.         </td> </tr> </tbody> </table>	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>	1) Fracturación múltiple.  2) Repetición de cargas pesadas (fatiga del concreto).  3) Deficiencia en las condiciones de soporte.	1) Diseño estructural equivocado.
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>				
1) Fracturación múltiple.  2) Repetición de cargas pesadas (fatiga del concreto).  3) Deficiencia en las condiciones de soporte.	1) Diseño estructural equivocado.				
<b>Efectos de la patología:</b>	Representa la evolución final del proceso de fisuración, favorece el desportillamiento en los bordes de la losa. Pueden llegar a señalar el deterioro total de la estructura y/o hundimientos.				
<b>Posible solución:</b>	Reparación en todo el espesor de la losa, reemplazando longitudinal y transversalmente toda la zona afectada.				

Figura 66: Ficha técnica: Grietas en bloque.


DESPORTILLAMIENTO EN ESQUINAS	
<b>Descripción de patología</b>	
Desintegración de las esquinas de una losa con pérdida de trozos	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla superficial
<b>Orientación :</b>	Transversal / Longitudinal
<b>Cuantificación :</b>	0.198 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	14.28295°
<b>Longitud:</b>	-90.788517°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	
<b>Posibles causas de la patología</b>	
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
1) Debilitamiento de los esquinas de la junta debido a defectos constructivos. 2) Aplicación de cargas antes de conseguir la resistencia mínima recomendada del concreto.	1) Presencia de material incompresible en la esquina, el cual al expandirse genera concentración de esfuerzos y la posterior falla ante el paso de vehículos.
<b>Efectos de la patología:</b>	Es probable que genere entrada de agua a las capas inferiores del pavimentos, generando de esta manera bombeo.
<b>Posible solución:</b>	Para cualquier nivel de deterioro, es recomendable llevar a cabo un resellado de las áreas afectadas.

Figura 67: Ficha técnica: Desportillamiento de esquina.

DESPORTILLAMIENTO EN JUNTAS	
<b>Descripción de patología</b>	
Desintegración de las aristas de una junta (longitudinal / transversal) con pérdida de trozos	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla superficial
<b>Orientación :</b>	Transversal / Longitudinal
<b>Cuantificación :</b>	0.038 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Medio
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	14.279867°
<b>Longitud:</b>	-90.781683°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	


	<b>Posibles causas de la patología</b>	
	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Debilitamiento de los bordes de la junta debido a defectos constructivos.</li> <li>2) Aplicación de cargas antes de conseguir la resistencia mínima recomendada del concreto.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Presencia de material incompresible en la junta, el cual al expandirse genera concentración de esfuerzos y la posterior falla ante el paso de vehículos.</li> <li>2) Mal procedimiento de corte de la junta.</li> </ol>
<b>Efectos de la patología:</b>	Es probable que genere entrada de agua a las capas inferiores del pavimentos, generando de esta manera bombeo	
<b>Posible solución:</b>	Para cualquier nivel de deterioro, es recomendable llevar a cabo un resellado de las juntas	

Figura 68: Ficha técnica: Desportillamiento de juntas.


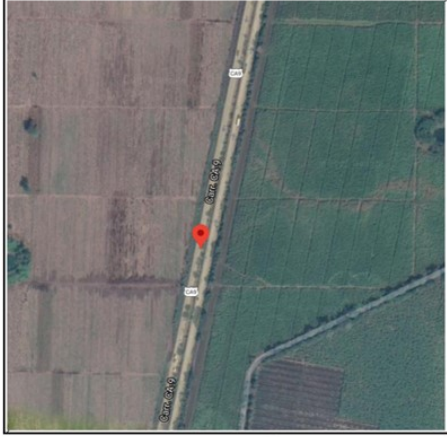
<b>DESCASCARAMIENTO</b>					
<b>Descripción de patología</b>	<b>Fotografía de falla</b>				
Rotura de la superficie de la losa por desprendimiento de pequeños trozos de concreto					
<b>Tipo de falla:</b>		Falla superficial			
<b>Orientación :</b>					
<b>Cuantificación :</b>		0.018 m <sup>2</sup>			
<b>Nivel de severidad:</b>		Medio			
<b>Ubicación</b>					
<b>Latitud:</b>	14.018933°				
<b>Longitud:</b>	-90.7835°				
	<b>Posibles causas de la patología</b>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>Primarias</b></th> <th><b>Factor secundario</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1) Exceso de acabado del concreto fresco colocado, lo que produce exudación del mortero y agua, lo cual provoca que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.</td> <td>1) Evolución de fisuras por efecto del tránsito</td> </tr> </tbody> </table>	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>	1) Exceso de acabado del concreto fresco colocado, lo que produce exudación del mortero y agua, lo cual provoca que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.	1) Evolución de fisuras por efecto del tránsito
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>				
1) Exceso de acabado del concreto fresco colocado, lo que produce exudación del mortero y agua, lo cual provoca que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.	1) Evolución de fisuras por efecto del tránsito				
<b>Efectos de la patología:</b>	El descascamiento puede incrementar su grado de severidad hasta generar desintegración.				
<b>Posible solución:</b>	Reparación de espesor parcial o recubrimiento con una mezcla asfáltica, garantizando la adherencia entre capas.				

Figura 69: Ficha técnica: Descascamiento.

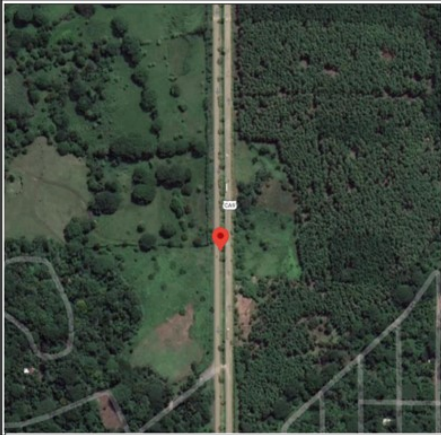



DESINTEGRACIÓN	
<b>Descripción de patología</b>	
Pérdida constante de agregado grueso en la superficie, deja una superficie con pequeñas cavidades.	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla superficial
<b>Orientación :</b>	
<b>Cuantificación :</b>	7.18 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	14.252017°
<b>Longitud:</b>	-90.774567°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	
<b>Posibles causas de la patología</b>	
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
1) Efecto abrasivo del tránsito sobre concreto de pobre calidad. 2) Concreto con exceso de mortero o mal dosificado	1) Deficiencias durante la ejecución (segregación de mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso)
<b>Efectos de la patología:</b>	La desintegración de la superficie del pavimento puede incrementar su grado de severidad hasta generar baches.
<b>Posible solución:</b>	Reparación de espesor parcial o recubrimiento con una mezcla asfáltica, garantizando la adherencia entre capas.

Figura 70: Ficha técnica: Desintegración.

BACHES	
<b>Descripción de patología</b>	
Desintegración de la losa de concreto y la remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares	
<b>Tipo de falla:</b>	Falla superficial
<b>Orientación :</b>	
<b>Cuantificación :</b>	0.455 m <sup>2</sup>
<b>Nivel de severidad:</b>	Alto
<b>Ubicación</b>	
<b>Latitud:</b>	14.088967°
<b>Longitud:</b>	-90.77895°
	
<b>Fotografía de falla</b>	
	

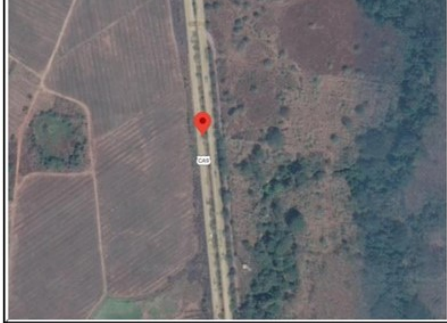
	<i>Posibles causas de la patología</i>	
	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>
	<p>1) Acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque de veredas alta y que provocan la desintegración y remoción de la superficie del pavimento</p>	<p>1) Retención de agua en zonas fisuradas. 2) Espesores del pavimento estructuralmente insuficientes.</p>
<b>Efectos de la patología:</b>	Puede llevar a una fractura total de la losa.	
<b>Posible solución:</b>	Demoler el concreto existente, realizando la reparación en la profundidad total de las losas	

Figura 71: Ficha técnica: Baches.



<b>PULIMIENTO</b>					
<b>Descripción de patología</b>	<b>Fotografía de falla</b>				
Carencia o pérdida de la textura superficial					
<b>Tipo de falla:</b>		Falla superficial			
<b>Orientación :</b>					
<b>Cuantificación :</b>		0.168 m <sup>2</sup>			
<b>Nivel de severidad:</b>		Medio			
<b>Ubicación</b>					
<b>Latitud:</b>	14.287183°				
<b>Longitud:</b>	-90.795133°				
	<b>Posibles causas de la patología</b>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>Primarias</b></th> <th><b>Factor secundario</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <p>1) Desgaste de la superficie de los agregados por tránsito.</p> <p>2) Mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente y favorece la exposición de los mismos.</p> </td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>	<p>1) Desgaste de la superficie de los agregados por tránsito.</p> <p>2) Mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente y favorece la exposición de los mismos.</p>	
<b>Primarias</b>	<b>Factor secundario</b>				
<p>1) Desgaste de la superficie de los agregados por tránsito.</p> <p>2) Mezcla de concreto y/o agregados es de calidad deficiente y favorece la exposición de los mismos.</p>					
<b>Efectos de la patología:</b>	La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito.				
<b>Posible solución:</b>	Llevar a cabo una reparación parcial del espesor de la losa de concreto con el único objetivo de obtener una adecuada textura en la nueva colocación del concreto hidráulico.				

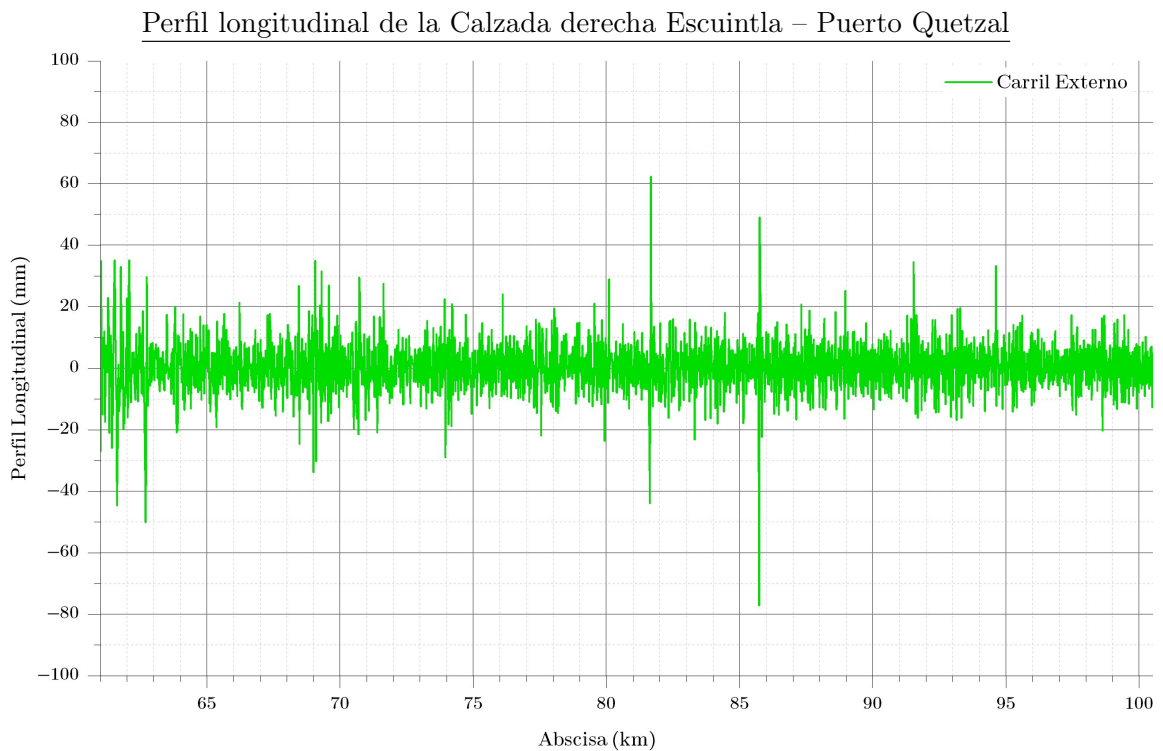
Figura 72: Ficha técnica: Pulimiento.

## 10.3. EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

### 10.3.1. Índice internacional de rugosidad

Según Badilla, Elizondo y Barrantes (2008) la obtención del Índice de Regularidad Internacional (IRI), contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático, en el cual se involucran aspectos de análisis estadístico del perfil y una posterior modelación para medir la rugosidad asociada al perfil del camino. Así pues y como se ha mencionado con anterioridad, el IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal obtenidas en este caso con un perfilómetro – RSP, siglas en inglés correspondientes a Road Surface Profiler.

Con el RSP las elevaciones se registran respecto a un eje de referencia inercial y una vez obtenido el perfil longitudinal, se le aplica un primer filtro que consiste en una serie de adecuaciones matemáticas y de análisis estadístico tal como la media móvil para así poder obtener un nuevo perfil suavizada que contiene las irregularidades del tramo (Badilla *et al.*, 2008).



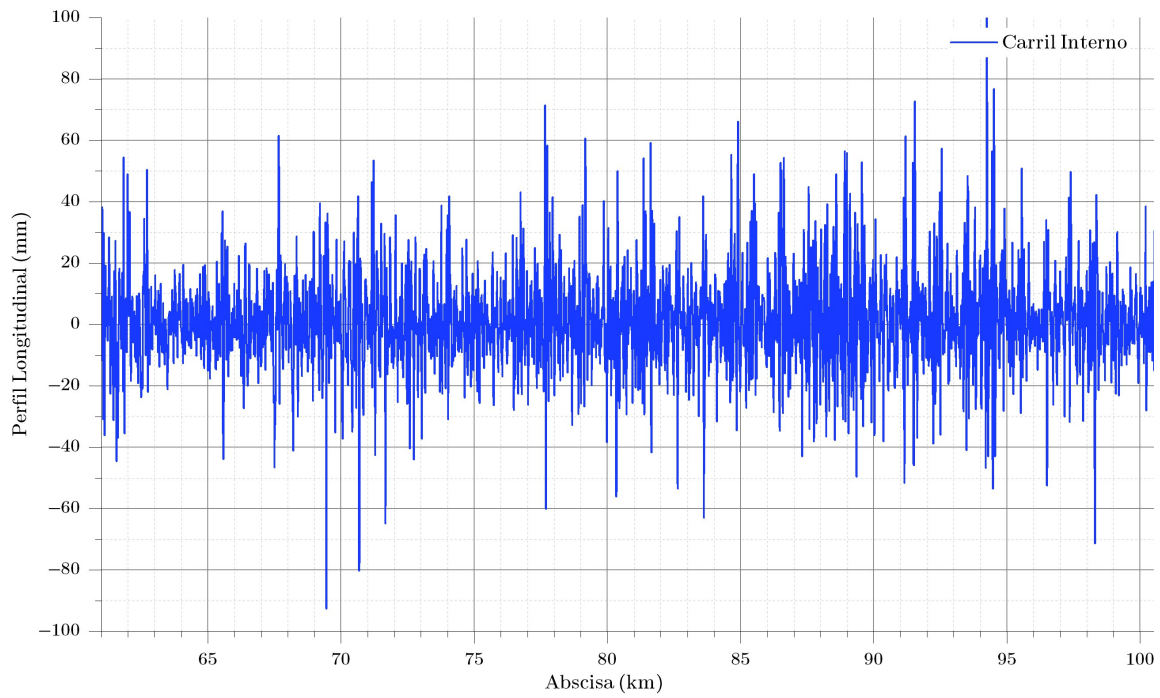
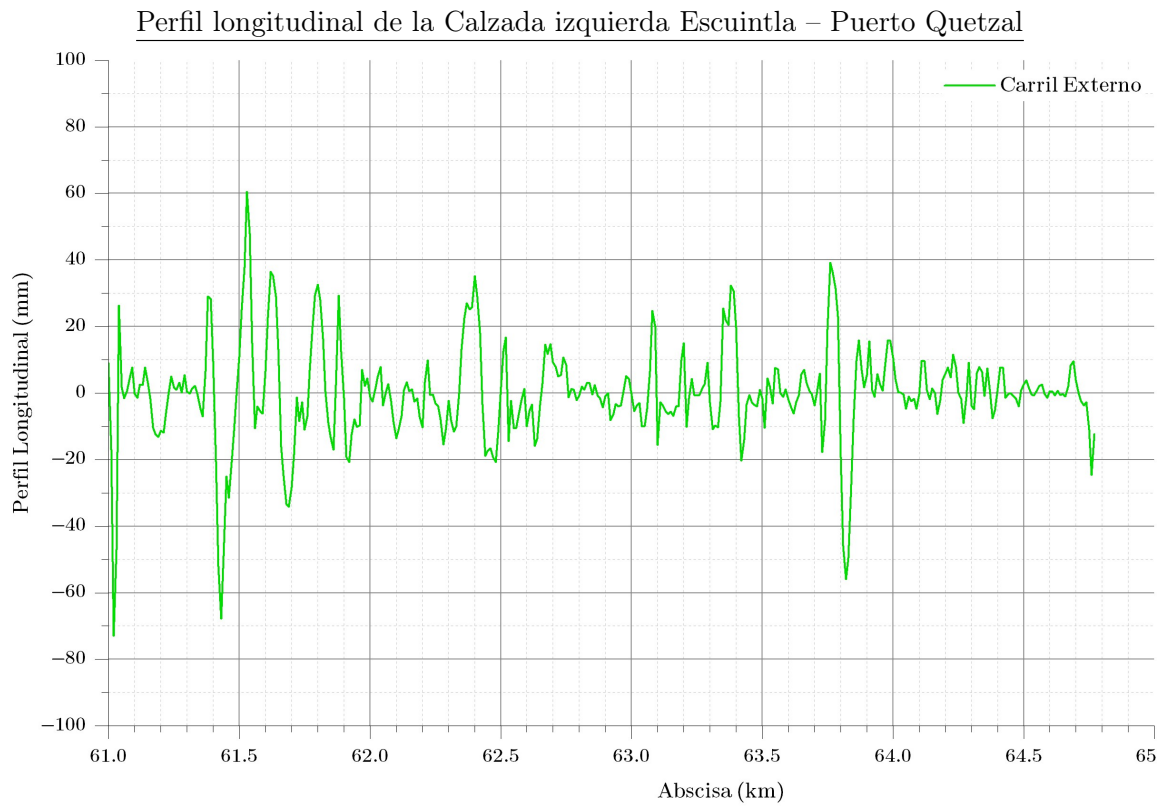


Figura 73: Perfil longitudinal de la calzada derecha Escuintla – Puerto Quetzal



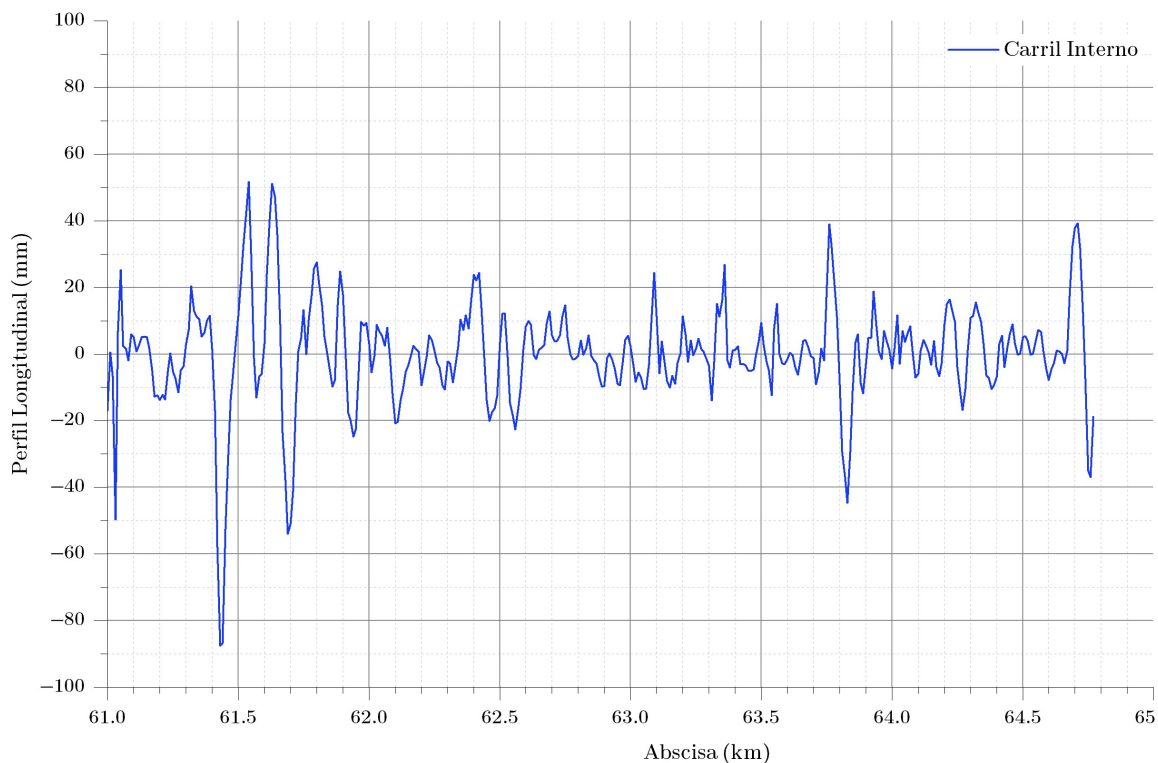


Figura 74: Perfil longitudinal de la calzada izquierda Escuintla – Puerto Quetzal

Como se puede observar en los datos obtenidos del perfil longitudinal en la Calzada derecha, el Carril interno presenta una mayor variabilidad de estos puesto que abarcan un mayor rango de diferencias de alturas; sin embargo, este hecho no es un reflejo de una rugosidad mayor o menor en comparación a la del Carril externo, sino que solamente indica que su deterioro ha sido menos constante. Por otro lado, en la Calzada izquierda podemos observar que el perfil longitudinal de ambos carriles es bastante similar en cuanto a sus valores y su variabilidad, por lo tanto, se espera que los resultados de rugosidad sean similares entre ambos carriles.

Después al perfil suavizado se le aplica el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro a una velocidad de 80 km/hr y se le determina finalmente el IRI. Este segundo filtro se encarga de medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino. Los movimientos verticales del eje respecto a la masa suspendida se calculan y se acumulan. El valor en m/km – metros acumulados por la suspensión por kilómetros viajados – es la medida final de la regularidad del camino (Badilla *et al.*, 2008).

Debido a que IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen y que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de irregularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de IRI satisfactorios, es necesario mencionar el intervalo de longitud que se usó para determinar este parámetro en el proyecto. Por una parte, el equipo fue calibrado para almacenar el promedio de rugosidad cada 10 metros y el perfil longitudinal cada 25mm (resolución mínima que tiene el equipo y que según la norma ASTM E950 clasifica como un uno Clase 1); por otro lado, el reporte exportado

una vez se finalizó la medición fue programado para promediar los resultados de la medición y así obtener los datos a intervalos de cada 50 metros.

Obtenido el reporte a intervalos de 50 metros, se procedió a graficar el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, MRI) que constituye el IRI promedio de las huellas izquierda y derecha para luego establecer las secciones homogéneas por medio de un software desarrollado por la empresa SERPIN. El software permite definir el inicio y fin de sectores con un comportamiento similar y automáticamente obtener los resultados de la media y la desviación estándar de cada uno de ellos. La desviación típica disminuye según se va aumentando la longitud de evaluación siempre y cuando el comportamiento de los sectores sea relativamente constante. De hecho, este valor estadístico puede servir de referencia para establecer si un sector homogéneo fue elegido de manera correcta o no.

### Calzada derecha

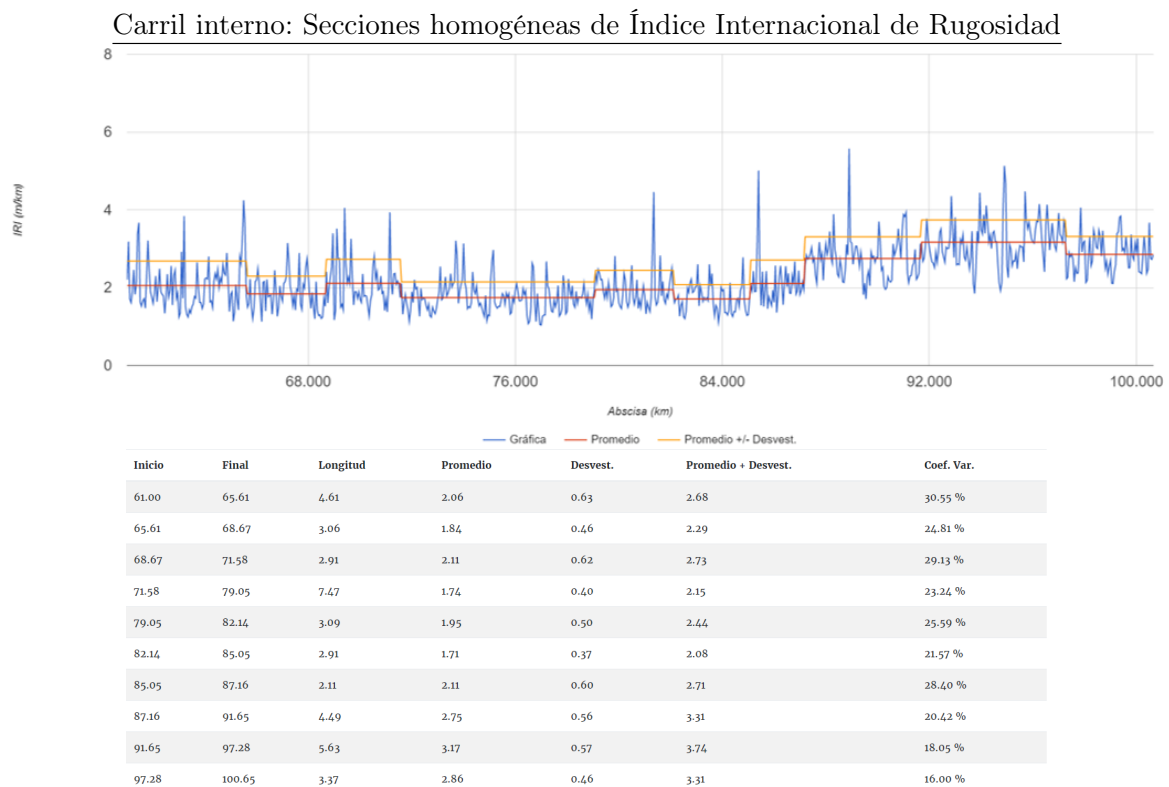


Figura 75: Calzada derecha, carril interno: Secciones homogéneas de IRI

El Carril interno de la Calzada derecha presenta dos zonas con niveles distintos de deterioro, la primera zona se encuentra desde el km 61.000 hasta el km 87.160 y muestra valores promedio de Índice de Rugosidad en un intervalo de 1.71 m/km – 2.11 m/km los cuales evidencian un deterioro clasificado como bajo o medio. La segunda zona abarca desde el km 87.160 hasta el final del tramo evaluado (km 101.000), esta presenta un nivel de deterioro de medio a alto con valores de rugosidad entre 2.75 m/km y 3.17 m/km. A lo largo de todo el tramo evaluado se obtuvieron coeficiente de variación por debajo del 30 % por

lo tanto se considera que la pista presenta una rugosidad homogénea, aun cuando existen algunos valores atípicos, estos corresponden a inicios o finales de puentes, transiciones u otros factores puntuales que incrementan los valores de IRI.

Carril externo: Secciones homogéneas de Índice Internacional de Rugosidad

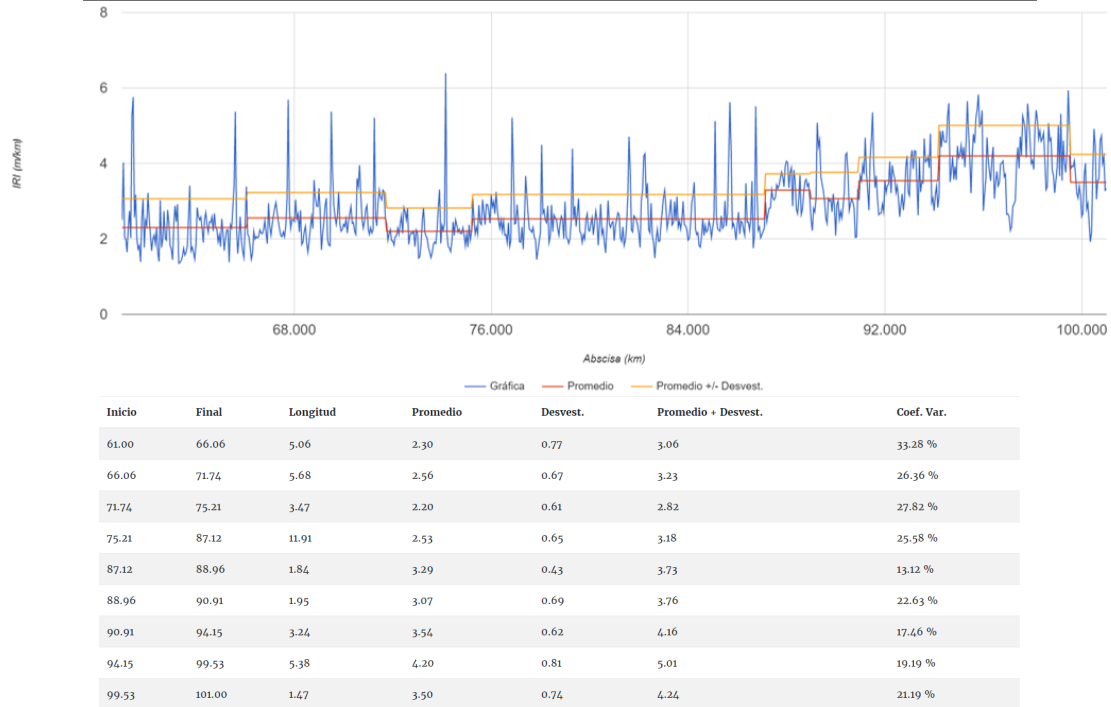


Figura 76: Calzada derecha, carril externo: Secciones homogéneas de IRI

Al igual que en el Carril interno, el Carril externo presenta dos zonas con niveles de deterioro bastante diferenciados. La zona 1 se encuentra desde el inicio del carril hasta el km 87.120 con valores de rugosidad promedio que oscilan desde 2.20 m/km hasta 2.56 m/km, estos son representativos de un deterioro medio-alto. Por otro lado, la zona 2 se encuentra desde el km 87.120 hasta el km 101.000 y presenta IRIs entre 3.07 y 5.38 m/km, estos ya son considerados valores altos y evidencian un mayor deterioro en el tramo. Este carril también presenta coeficiente de variación por debajo del 30 %, con excepción del primer sector.

Como se muestra en la Figura 77 la diferencia entre la zona 1 y la 2 es más evidente en el Carril externo que en el Carril interno, esto significa que no solamente presenta mayor rugosidad, sino que la variación en los datos del primero es mayor. El Carril externo (considero de baja velocidad), por los resultados obtenidos, es el que ha acumulado la mayor cantidad de cargas dinámicas y se refleja en el alto deterioro superficial. Principalmente en la zona 2 de este carril, donde se observan los mayores IRIs de toda la Calzada derecha, y puede ser causado por la influencia de los vehículos pesados de las empresas que se encuentran cercanas a esta zona. El estado de la capa de rodadura y la funcionalidad de la pista en los sectores críticos se ve afectado por la presencia ocasional de grietas longitudinales y de esquina, baches pequeños poco profundos, frecuentes descascaramiento de juntas y esquinas, eventuales desconchamientos, entre otros.

### Índice Internacional de Rugosidad

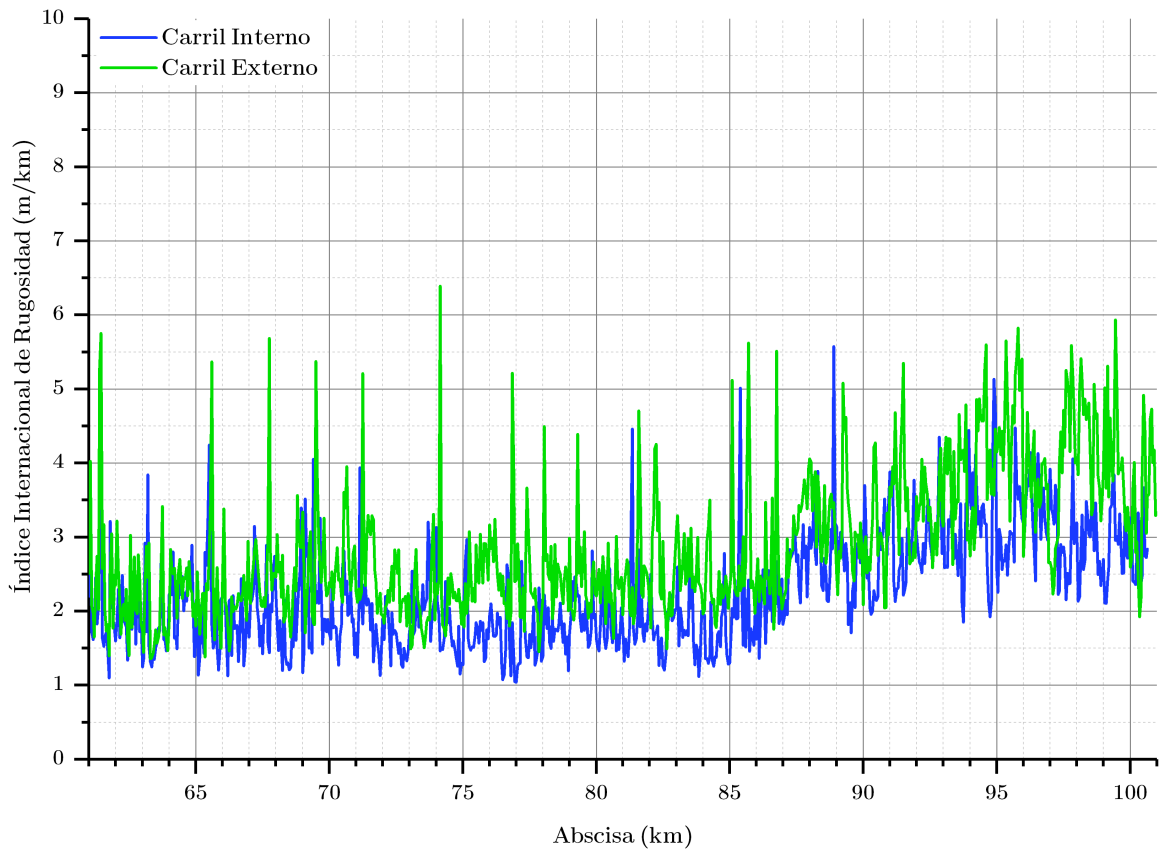
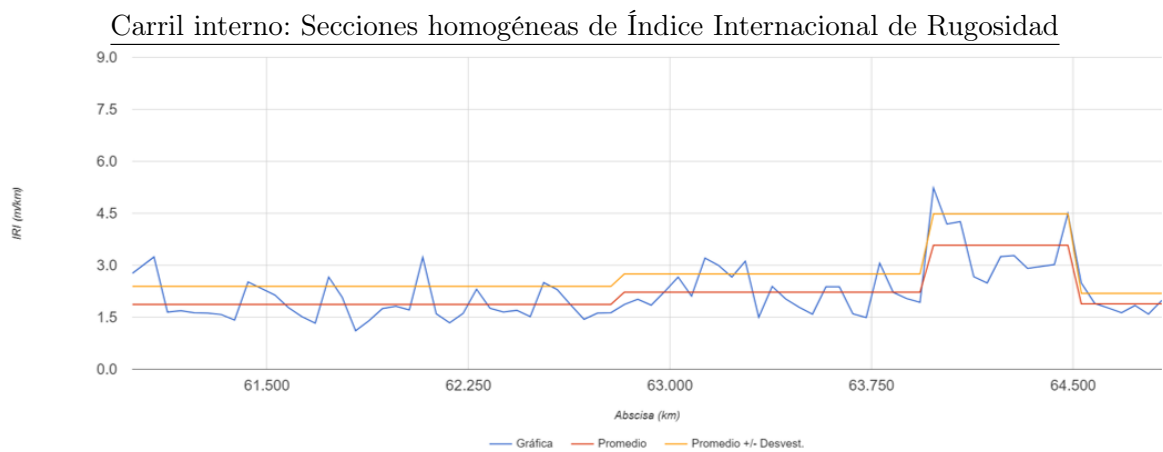


Figura 77: Calzada derecha: Índice Internacional de Rugosidad

### Calzada izquierda



Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desvest.	Promedio + Desvest.	Coef. Var.
61.00	62.79	1.79	1.87	0.52	2.39	27.75 %
62.79	63.94	1.15	2.22	0.52	2.75	23.59 %
63.94	64.51	0.57	3.58	0.90	4.48	25.27 %
64.51	64.83	0.32	1.89	0.30	2.19	15.96 %

Figura 78: Calzada izquierda, carril interno: Secciones homogéneas de IRI

El Carril interno de la Calzada izquierda presenta valores promedio de rugosidad entre 1.87 m/km y 3.58 m/km, siendo en el tercer sector (km 63.940 – km 64.510) donde se observa el promedio más alto del tramo y entra dentro de una severidad media-alta. El resto del carril presenta valores que demuestran una deterioro superficial medio-bajo, además que el tramo presenta homogeneidad en sus resultados puesto que todos los coeficientes de variación son menores a un 30

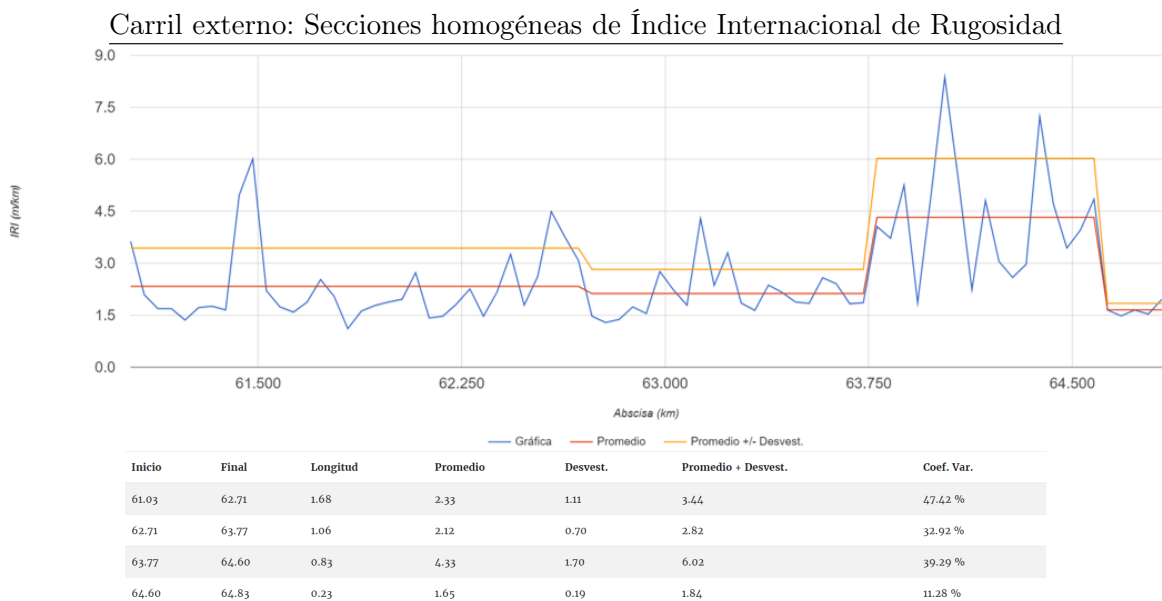


Figura 79: Calzada izquierda, carril externo: Secciones homogéneas de IRI

El Carril externo, a comparación del interno, por medio de sus resultados de IRI muestra un deterioro superficial con una variabilidad alta, sin embargo, en términos de la severidad del detrimento de su superficie presenta valores similares a los del carril adyacente en la Calzada izquierda. Sus valores promedio de rugosidad se encuentran en un intervalo de 2.33 m/km hasta 4.33 m/km, este último corresponde al sector tres (km 63.770 – 64.600) y representan un daño severo de la capa de rodadura del pavimento.

En el subtramo del km 63.700 al km. 64.400 se ubica el distribuidor de tráfico a Taxisco, por lo que también se considera una individualidad dado que es un lugar de varios entronques de rutas, con geometría irregular, lo que imposibilita tener valores de rugosidad similares a los de las tangentes y es por esta razón que cuenta con el deterioro superficial más alto de la Calzada izquierda como se observa en la Figura 80. En general, la funcionalidad, el confort y la seguridad son aspectos que se ven afectados gravemente en esta Calzada por la presencia de agrietamientos en bloque, losas divididas, grietas lineales, entre otras; estas patologías se

encuentran principalmente con una severidad alta a partir del km 64.830 hasta el final del tramo.

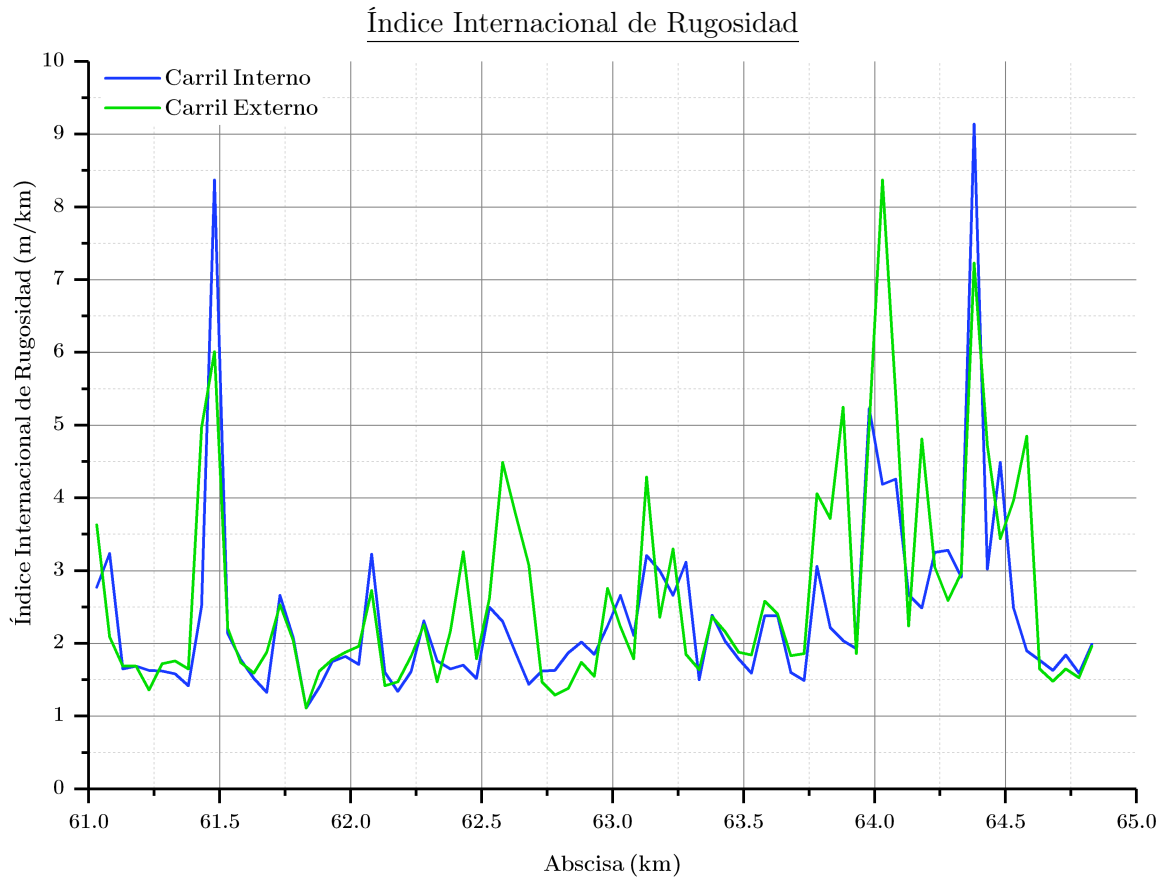


Figura 80: Calzada izquierda: Índice Internacional de Rugosidad

### 10.3.2. Escalonamiento

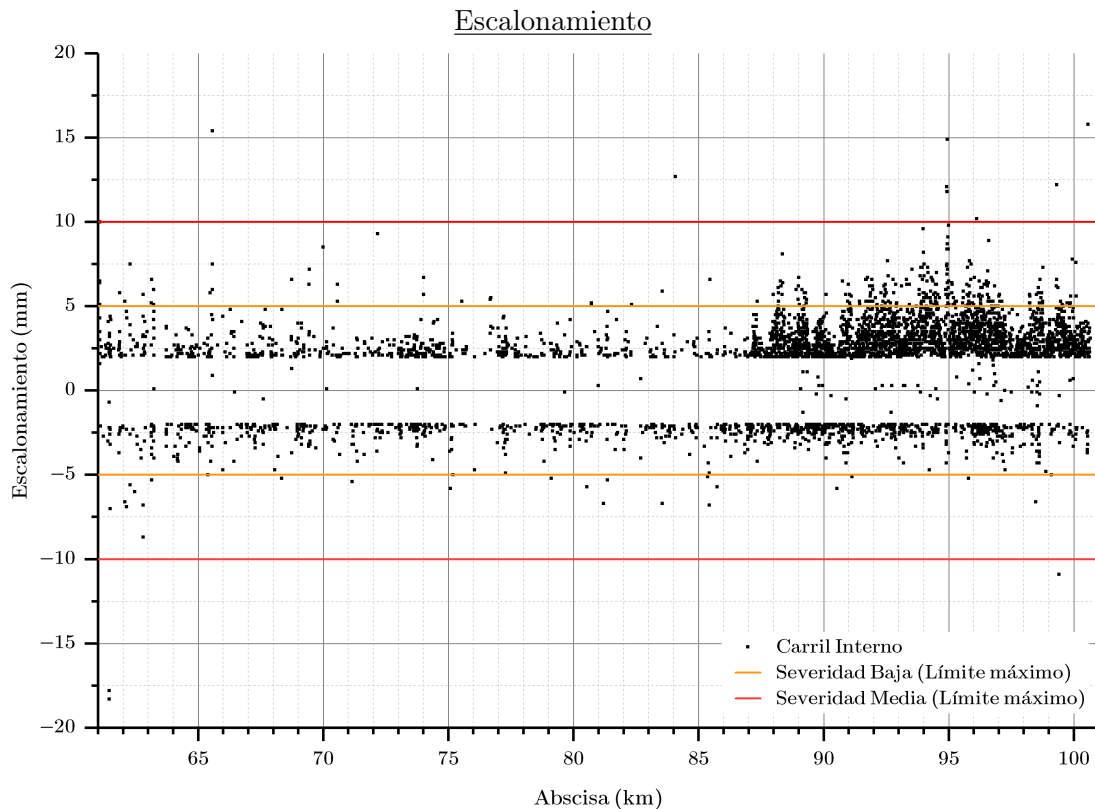
El escalonamiento representa la diferencia, ya sea positiva o negativa, del nivel de los bordes de las juntas transversales y/o longitudinales entre dos losas de concreto hidráulico. Este parámetro es sumamente importante conocerlo debido a que es altamente influyente en la transferencia de carga, por lo que a mayor sea el valor absoluto de escalonamiento menor será el porcentaje de carga entre las losas, además que si su severidad es muy alta puede llegar a causar la división de la losa. El escalonamiento puede deberse a la deficiencia en el traspaso de las cargas entre las losas, erosión de la base, un asentamiento diferencial de la base/subbase) o la subrasante, inclusive por la falta de capacidad de esta última; de igual manera, es un parámetro que permite predecir, hasta cierto punto, el deterioro a mediano y largo plazo.

Debido a que se considera como una patología es muy difícil lograr observar a simple vista, por lo tanto, el levantamiento del escalonamiento se realizó con el perfilómetro inercial fijando parámetros geométricos de la estructura y umbrales de aceptación. El equipo detecta cada punto en el que existe una diferencia de altura entre las losas de concreto hidráulico y

realiza la anotación dentro de su base de datos. Los datos registrados han sido analizados con un umbral de  $\pm 5$  mm como el límite máximo de una patología con severidad baja y de  $\pm 10$  mm como máximo permitido de una severidad media, arriba de este último valor se considera como severidad alta según los parámetros del Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos por INVIAS (2006).

### Calzada derecha

La Calzada derecha del proyecto está compuesta por dos tipos de losas, es decir, por dos tipos de superficie de rodadura, en la primera parte del recorrido que abarca del kilómetro 61.000 hasta el 64.020 se pueden encontrar losas de concreto hidráulico de geometría optimizada, o mejor conocidas como losas cortas, y el resto de la pista, hasta el km 101.000, está compuesta por losas de geometría convencional, o losas largas. Como se observa en los gráficos presentados a continuación, en la sección que corresponde a las losas cortas se detectan aproximadamente siete puntos por encima del límite máximo y que por tratarse de una severidad alta deben ser revisados e intervenidos para poder reestablecer una buena transmisión de cargas entre las losas de concreto. La poca saturación de puntos en esta sección indica que el escalonamiento, si bien está presente dentro del tramo, es de un nivel bajo medio que podría ser mejorado con algún método de restauración.



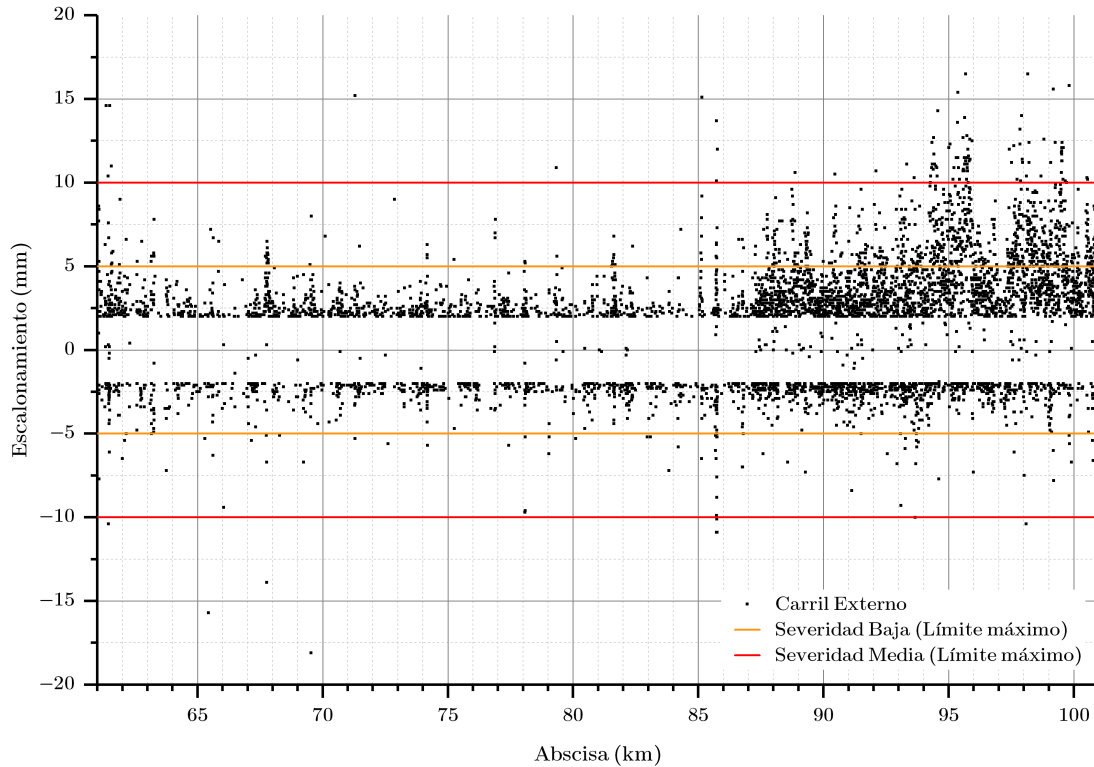


Figura 81: Calzada derecha: Escalonamiento

A partir del km 64.020, inicio de losas largas, hasta aproximadamente el km 87.000 se puede observar un comportamiento del escalonamiento similar al encontrado en la sección de losas cortas. Esto quiere decir que, si bien existen algunos puntos que superan el límite de  $\pm 10$  mm y entran a una categoría de severidad alta, la mayor parte de este sector se encuentra en un nivel bajo-medio y la limitada saturación de los puntos nos indican que el registro de escalonamientos no es tan grande. Sin embargo, a partir del km 87.000 hasta el final del tramo se evidencia un aumento considerable en la saturación de los puntos en los dos carriles que componen la Calzada derecha. Aun cuando la concentración de puntos parece mayor en el Carril interno, la mayoría de los puntos se mantiene por debajo del límite para una severidad baja; por otro lado, en el Carril externo se puede observar un aumento en los puntos que indican un escalonamiento medio y de hecho existen más que superan este límite y pasan a ser de severidad alta.

Por lo tanto, este último sector si necesita ser intervenido para poder reestablecer una buena transmisión de cargas y así evitar futuras fallas de las losas de concreto, que a su vez ponen en riesgo a los usuarios y deterioran más el pavimento tanto superficial como estructuralmente. De hecho, las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes (2001) establecen que “todas las irregularidades de más de 10 mm detectadas en longitudes hasta de 8 metros, dentro de cada sección de 100 metros de pavimento deben ser corregidas por medio de equipos de fresado o métodos abrasivos equivalentes”.

# Calzada izquierda

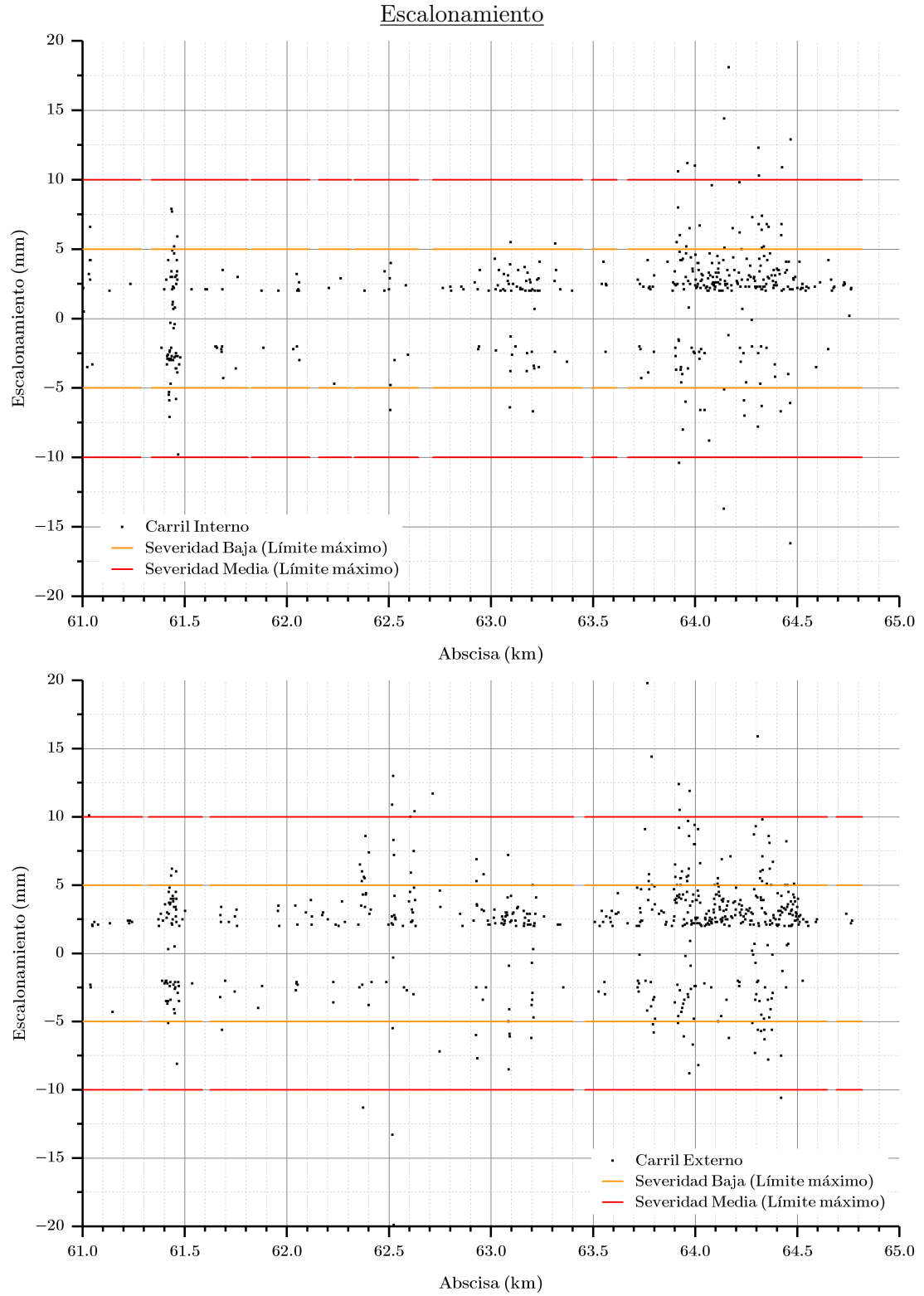


Figura 82: Calzada izquierda: Escalonamiento

En la Calzada izquierda, como se mencionó con anterioridad, se hizo el levantamiento hasta el kilómetro 64.830 debido a las condiciones de deterioro de la pista, está compuesta en toda su longitud por losas de geometría convencional. En este caso, se observa una mayor cantidad de puntos fuera del umbral de aceptación (severidad alta) en el Carril externo; sin embargo, la mayor concentración de puntos se encuentra dentro del límite de severidad baja, por lo que si se quisiera mejorar el escalonamiento de este tramo bastaría con una restauración superficial y simplemente revisar los puntos que tienen más de 10 mm (valor absoluto) de escalonamiento.

### 10.3.3. Índice de serviciabilidad presente

El comportamiento de la vía se puede asociar a valores de índice de serviciabilidad en distintos momentos de su vida útil. Por lo tanto, para cada momento en la vida de los pavimentos existen valores de PSI asociados que luego conforman las curvas de serviciabilidad que nos permiten, a su vez, establecer los momentos indicados para intervenirlos y así poder prolongar su buen desempeño.

Aunque la serviciabilidad es originalmente la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento, este parámetro también se basa en los datos de rugosidad y los daños superficiales del mismo. Estos últimos son factores tomados en cuenta en la medición del IRI, que, contrario al PSI, no se ve afectado por evaluaciones subjetivas, sino que hace uso de herramientas estadísticas para su determinación. Por lo tanto, existen numerosas correlaciones que permiten obtener el valor de la serviciabilidad por medio de la rugosidad de la vía, en este caso se utiliza la establecida por Hoang (2017) puesto que sus evaluaciones se hicieron con pavimentos de concreto hidráulico y obtuvieron una relación  $R^2$  de 0.87, lo cual establece que la correlación tiene una confiabilidad alta.

Es importante mencionar que los parámetros iniciales y finales de PSI son elegidos por el diseñador y son únicos para cada proyecto, por sus características y según el fin del mismo. No se tiene información de los parámetros elegidos para el diseño original de la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal, por lo tanto, no se puede realizar una comparación de la serviciabilidad presente del proyecto versus el parámetro final. Sin embargo, actualmente en las rehabilitaciones y reconstrucciones de rutas centroamericanas, en Guatemala, se espera que la vía alcance un IRI de 3.5 – 4.0 m/km al final de su vida útil, esto se traduce a un índice de serviciabilidad final de 2 – 2.20. Por lo tanto, se tomarán estos valores como referencia para la evaluación de la serviciabilidad de la autopista.

Debido a que el reporte del Índice de Rugosidad fue realizado a cada 50 metros y la correlación para obtener el PSI utiliza estos valores, el informe de los resultados de serviciabilidad también se establecieron con este intervalo. Así como el IRI, se utilizó el software de gráficas de SERPIN para poder establecer los sectores homogéneos dentro de los tramos auscultados y así poder conocer en los parámetros de serviciabilidad actuales del proyecto, como se muestra en las siguientes gráficas. Debido a que ambos carriles externos de cada calzada son los críticos por tener valores de rugosidad más altos, solamente para estos se obtendrá el Índice de Serviciabilidad.

## Calzada derecha

En este caso, la serviciabilidad de la Calzada derecha se puede dividir en dos zonas, la primera abarca desde el km 61.000 hasta el km 87.190, del primer al tercer sector según el gráfico presentado a continuación, y presenta índices promedios en un intervalo de 3.83 – 4.05 con los cuales se puede afirmar que conserva una serviciabilidad buena y es candidato a alguna metodología de CPR para el mantenimiento de las losas que tengan algún defecto o falla y así poder extender su vida útil. Ahora bien, la segunda zona, km 87.190 al km 101.000, presenta una serviciabilidad de regular con promedio como 2.83 y 3.06. Por lo tanto, esta última zona deberá ser rehabilitada con procedimientos más profundos.

Carril externo: sectores homogéneos del Índice de Serviabilidad Presente (PSI)



Figura 83: Calzada derecha, carril externo: sectores homogéneos del PSI

## Calzada izquierda

La Calzada izquierda por su parte presenta una serviciabilidad buena en los primeros dos sectores, del km 61.000 al 63.750, y una serviciabilidad regular en el último sector, hasta el km 64.830. Como se mencionó antes del 63.700 al km. 64.400 se ubica el distribuidor de tráfico a Taxisco lo cual presenta un tramo de convergencia y de alto tránsito, como sería esperado este ha acumulado más ciclos de carga que se traducen a rugosidades más altas y serviciabilidad más bajas.

### Carril externo: sectores homogéneos del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

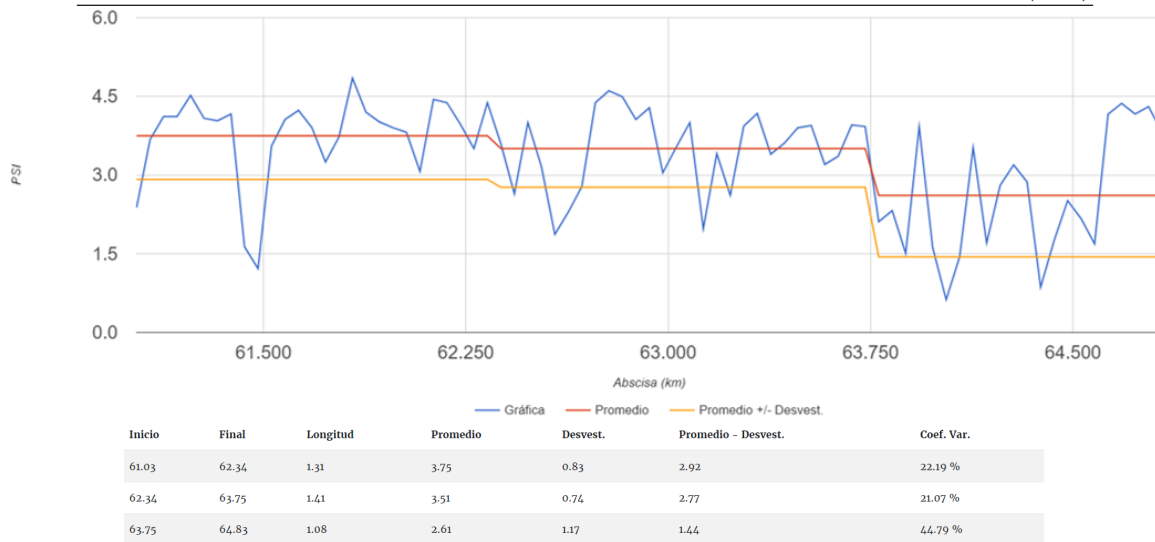


Figura 84: Calzada izquierda, carril externo: sectores homogéneos del PSI

#### 10.3.4. Deflexión central

El pavimento es una estructura constituida por varias capas y materiales, esta al ser sometida a una carga perpendicular a la superficie misma del pavimento, produce tensiones y deformaciones que provocan un desplazamiento en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas (centésimas o milésimas de milímetro). Es este desplazamiento al que se conoce con el nombre de deflexión. Existiendo una relación entre los valores de los módulos y los valores de la deflexión.

El procesamiento de los datos de las deflexiones se realiza con ayuda de planillas de cálculo. En las que, como primer paso, se lleva a cabo la normalización de las deflexiones, que en este caso se hizo con 80kN (esfuerzo de 1200 kPa) por tratarse de un pavimento rígido. Luego de ello se procede a pasar las deflexiones normalizadas a una planilla de cálculo y realizar un análisis estadístico, es importante mencionar que se deben descartar los valores que estén fuera del rango de la media +/- dos desviaciones estándar, para poder definir valores característicos. Se realiza un análisis con las propiedades del cuenco de deflexiones mediante la planilla de cálculo y luego se procede a realizar el retrocálculo.

Al correr la macro de Excel se obtiene la Deflexión Central ( $Df_0$ ), Módulo de Resiliencia de subrasante ( $M_r$ ), Módulo Efectivo de Pavimento ( $E_s$ ) y el Número estructural efectivo ( $S_{Neff}$ ) del pavimento existente. Posteriormente se calculan los parámetros estadísticos, promedio, desviación estándar, percentil 85 y coeficiente de variación por tramos homogéneos con la ayuda del programa de gráficas de SERPIN. Las deflexiones proporcionan una idea general del comportamiento del pavimento, sin embargo, durante el análisis de debe considerar que un valor alto puede deberse a una subrasante deficiente, un módulo de pavimento deficiente o, en el caso más crítico, ambos.

La deflexión central es la deflexión máxima registrada en el geófono ubicado en la celda de carga, que se utiliza para establecer el tipo de rigidez del pavimento auscultado. Al tratarse de un pavimento rígido los golpes son impartidos en el centro geométrico de la losa. Para el presente estudio se realizaron pruebas a nivel de proyecto general debido a la longitud de evaluación, por lo que cada prueba se realizó a 200m únicamente en el carril crítico – Carril externo para ambas calzadas – puesto que son los más susceptibles a acumular cargas dinámicas pesadas a bajas velocidades de operación.

### Calzada derecha

Del análisis de las deflexiones de la Calzada derecha, como se muestra en la Figura 85 se obtuvieron cuatro sectores, de los cuales el segundo que abarca desde el km 68.040 hasta el 87.430 se caracteriza por ser el más largo y el que presenta un promedio de deflexión más bajo con 146.63 micrómetros. El sector más crítico es el que se encuentra del km 87.430 al km 97.770 con un promedio de 205.90  $\mu\text{m}$ , y este presenta el mayor coeficiente de variación del tramo general con un 31 %. Este comportamiento puede verse afectado ya sea por la subrasante o por las capas del pavimento. Por otro lado, los otros coeficientes de variación se encuentran entre un 20 – 22 % lo que indica que son valores bastante uniformes.

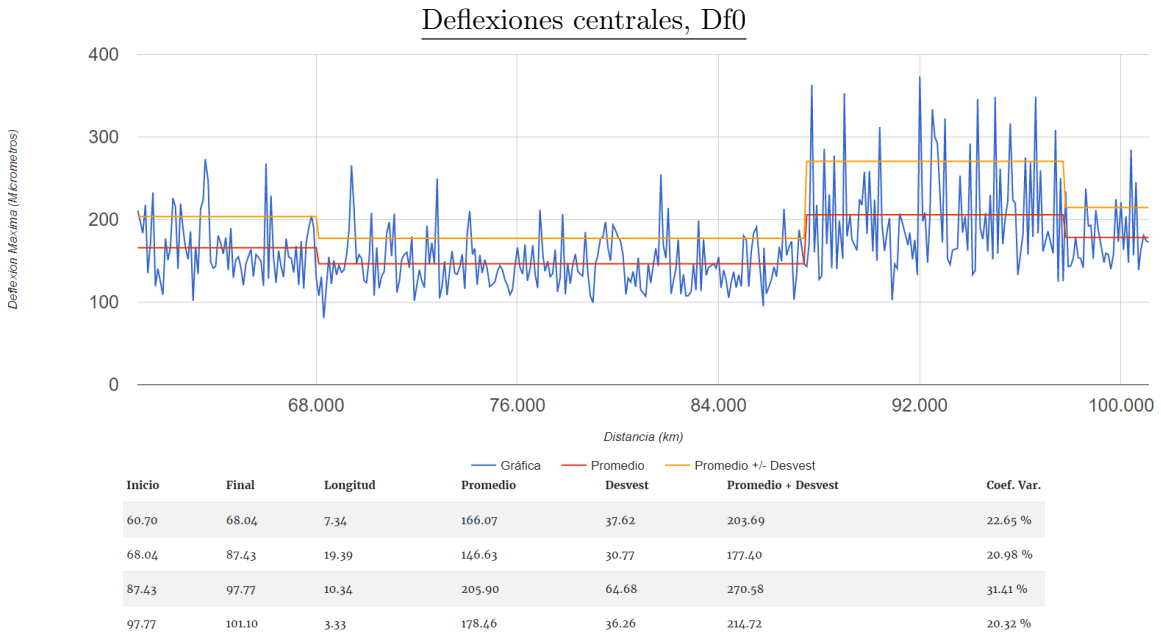


Figura 85: Calzada derecha: Deflexiones centrales, Df0

### Calzada izquierda

Las deflexiones obtenidas para la Calzada izquierda son más críticas en el sector dos (km 63.420 – km 73.560) con un valor promedio de 284 micrómetros. En el resto del tramo presenta deflexiones más bajas y que se encuentran en un intervalo desde 191 hasta 262  $\mu\text{m}$ . Es importante mencionar que el mayor deterioro superficial en esta calzada se encuentra a partir del km 73.560 hasta el km 101.000, sin embargo, las deflexiones en este sector no

son altas debido a las losas de geometría convencional que se encuentran por debajo de las losas que, en la actualidad, se encuentra en la posición de capa de rodadura. En general, la Calzada izquierda presenta deflexiones más altas que la Calzada derecha, lo que indica que la primera necesitará una intervención más profunda que la última para poder recuperar su capacidad estructural.

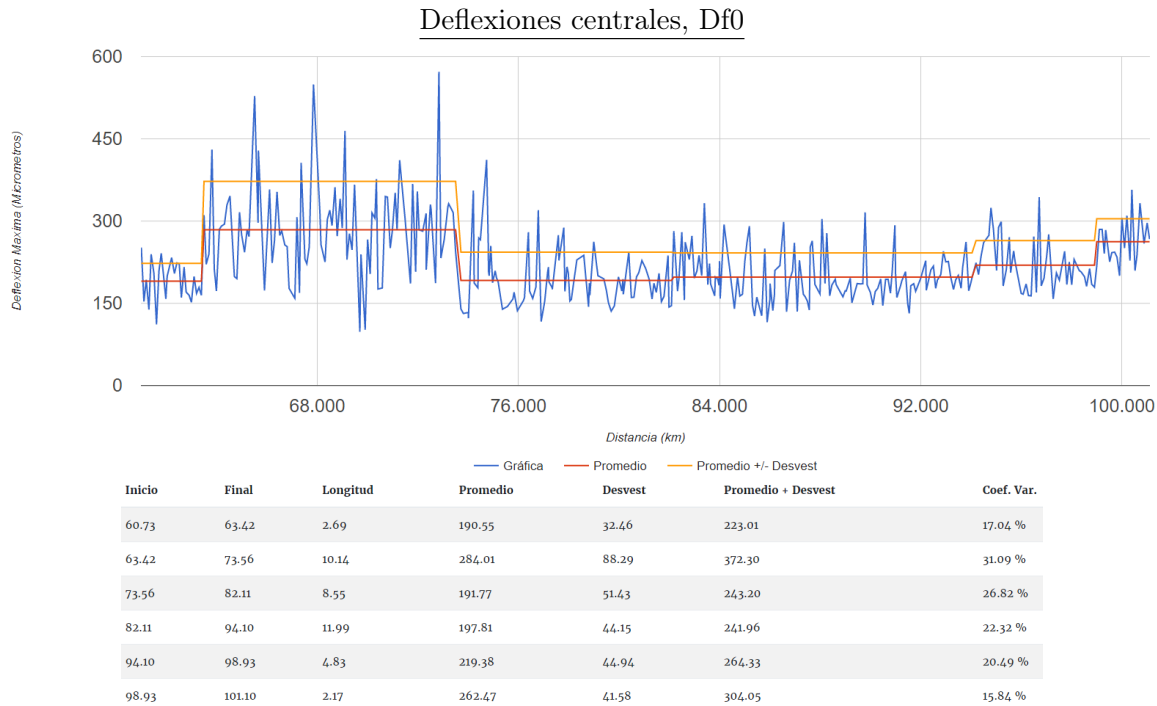


Figura 86: Calzada izquierda: Deflexiones centrales, Df0

### 10.3.5. Estratigrafía

El rango de frecuencia que ha sido elegido a través de investigaciones para la aplicación en pavimentos es de 800 MHz a 1.6 GHz, el GPR proporciona imágenes de alta resolución de la sub-superficie y de las estructuras a través de ondas electromagnéticas de banda ancha, opera en un rango ancho de frecuencias entre 10 MHz y 5 GHz para los sistemas de impulso y de 1 a 8 GHz para sistemas de frecuencias escalonadas (SERPIN, 2019). Para este proyecto en específico, la auscultación utilizando el georradar se realizó con tres antenas diferentes: una antena de 800 MHz con un rango de 1-3 m de profundidad, una antena de 1.6 GHz con un rango de 0-1 m de profundidad y una antena de 2.3 GHz para una profundidad de 0-0.50 m de profundidad.

El campo electromagnético emitido por el radar interactúa con el escenario investigado: ocurren reflexión, transmisión y dispersión en cualquier fase correspondiente al cambio de propiedades dieléctricas. El retorno es detectado por el receptor del radar. Por lo tanto, los cambios en la amplitud de ondas o patrones de reflexión en el radargrama pueden ser generados por cambios en el tipo de suelo o roca y en el contenido de humedad y por la presencia de contaminantes u otros artefactos humanos.

La medición se realizó en toda la longitud de solamente uno de los dos carriles para cada calzada, esto debido a que dos carriles que van en la misma dirección y se encuentran inmediatamente adyacentes tienen una misma estructura. Por otro lado, dos calzadas que están divididas por una franja central de entre 10 y 12 metros y que, a su vez, fueron construidas en distintos períodos, no tienen una misma estructura e inclusive puede ni siquiera ser similar.

### Calzada derecha

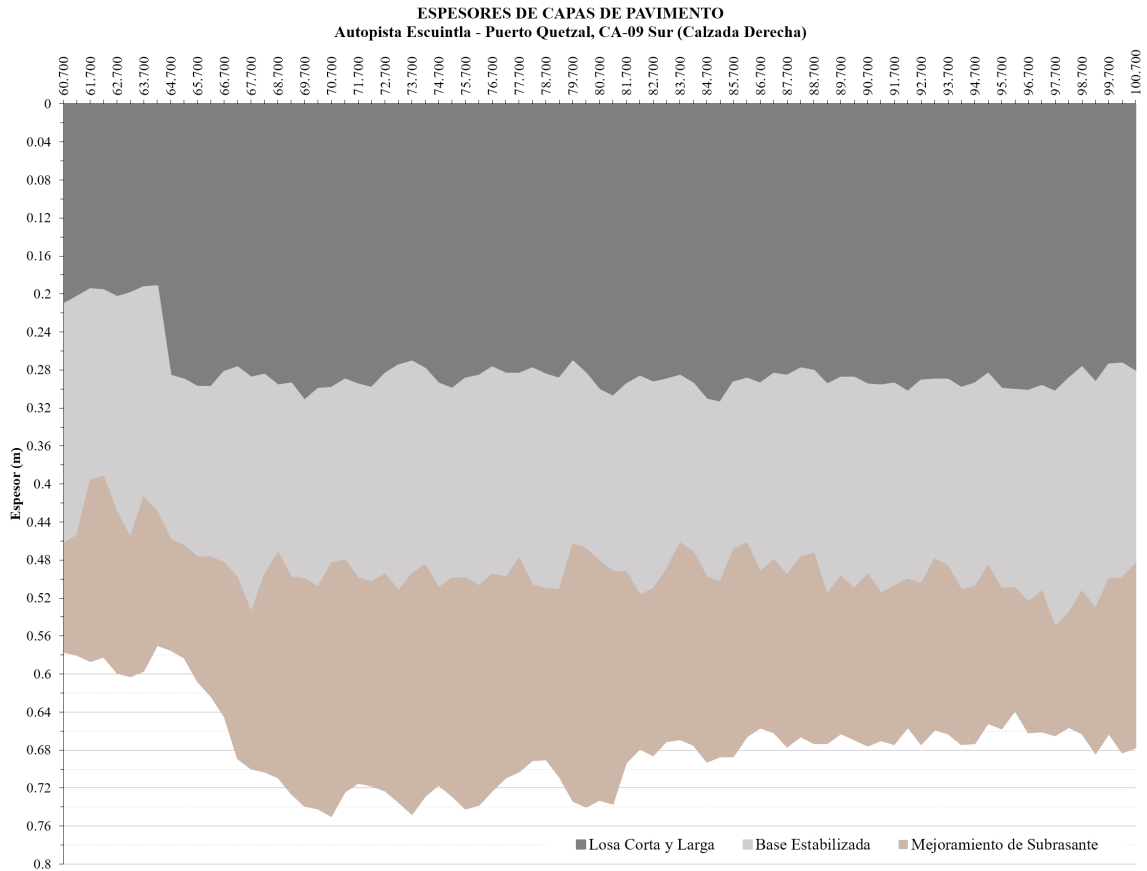


Figura 87: Calzada derecha: Estratigrafía

La Calzada derecha de la autopista Escuintla – Puerto Quetzal, con un tránsito vehicular en la misma dirección, del km 61.000 al km 64.020 tiene como capa de rodadura losas de geometría optimizada de 1.80 m por 1.80 m con un espesor promedio de 20 cm, a partir del km 64.020 la esta capa se compone por losas de geometría convencional con unas dimensiones promedio de 3.60 m por 3.60 m y un espesor promedio de 29 cm. Como capa de base, en toda su longitud, la Calzada derecha cuenta con un material estabilizado que varía en espesor dentro de un rango de 17 – 25 cm. Además, esta pista cuenta con una tercera capa que cumple con las características de un mejoramiento de subrasante y cuyo espesor varía entre los 12 y los 27 cm, como se muestra en la siguiente figura.

## Calzada izquierda

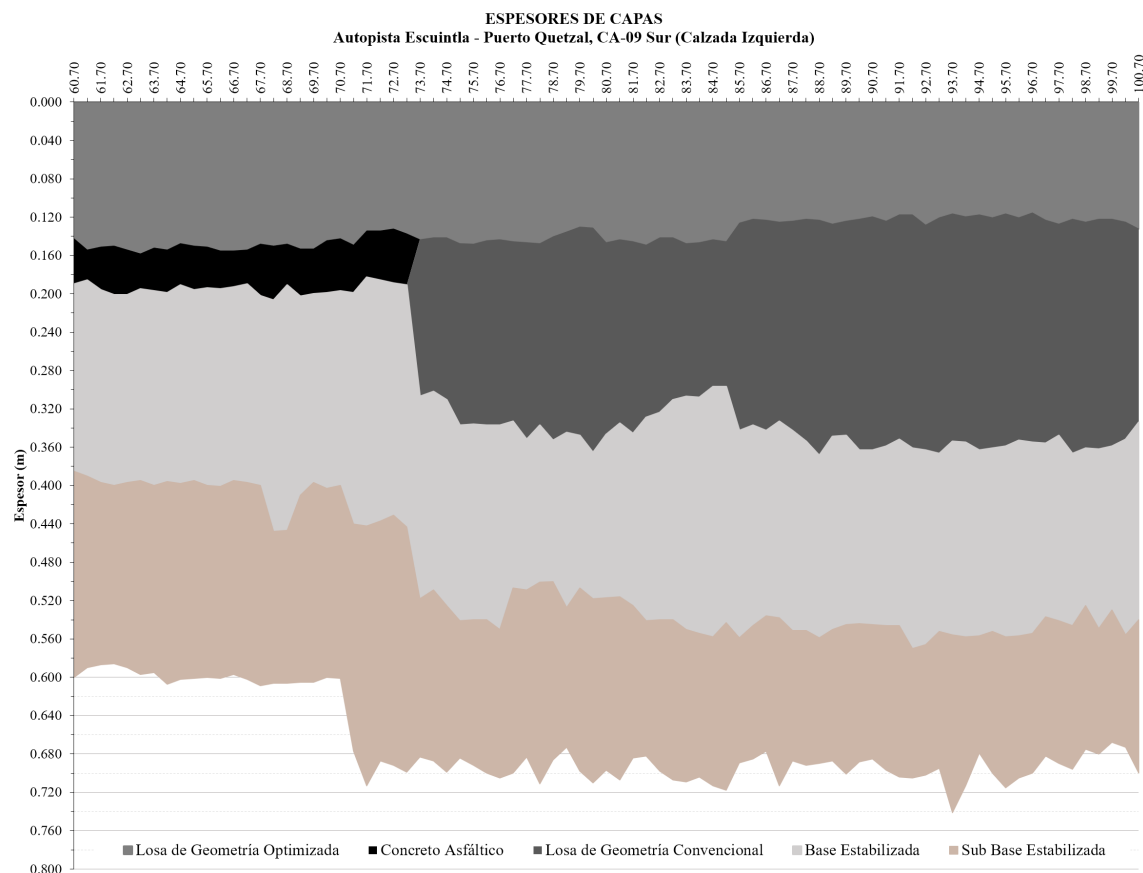


Figura 88: Calzada izquierda: Estratigrafía

La Calzada izquierda tiene como capa de rodadura, en toda la longitud del tramo, losas de geometría optimizada con de 1.80 m por 1.80 m y un espesor promedio de 14 cm, esta capa es la que a partir del km 64.600 se encuentra con un alto deterioro, con losas desde parcial hasta completamente fracturadas. Como segunda capa del km 61.000 al km 73.500 se encuentra una mezcla asfáltica en caliente con un espesor promedio de 5 cm; a partir del km 73.500 y hasta el km 101.000 como segunda capa se ubican losas de geometría convencional con un espesor promedio de 20 cm. En la tercera capa, en toda la longitud del tramo, se localiza una base estabilizada con espesores que varían de 15 a 26 cm. Finalmente, como cuarta capa se encuentra otro material estabilizado que cumple la función de una subbase con espesores dentro de un rango entre 12 y 27 cm.

La estratigrafía encontrada en la Calzada izquierda es bastante distinta y el hecho de que existan losas largas y una capa de concreto asfáltico debajo de la capa de rodadura (losas cortas) indica que esta última fue una rehabilitación que se le hizo a un pavimento previamente existente. De hecho, existe una metodología propuesta por la AASHTO que consiste en colocar una capa de refuerzo diseñada para que el pavimento pueda volver a soportar cargas en nuevo período de diseño, la metodología se conoce como sobrecapas de refuerzo. Es más común usar concreto asfáltico como sobrecapas de refuerzo, sin embargo,

el concreto hidráulico también es utilizado, como en este caso, ya que permite aumentar la capacidad estructural del pavimento existente y/o renovar sus características superficiales (Morales, 2004).

Existen capas de refuerzo adheridas y no adheridas, en este caso se trata del primer tipo ya que según Morales (2004) el refuerzo pasa a formar un todo con la losa existente, resistiendo ambos conjuntamente la acción de las cargas de tránsito; por otro lado, en las no adheridas se diseña con una capa de separación entre el refuerzo y la losa existente, esta capa no existe en la estructura. Por tratarse de una capa adherida es muy importante que a la hora del procedimiento constructivo se logre una buena adherencia entre el refuerzo y el pavimento existente. Como se sabe que la Calzada izquierda presenta altos deterioros superficiales a partir del inicio de este tipo de estructura, pero a su vez presenta bajas deflexiones, es posible que en algún momento la adherencia entre estas capas haya fallado y que el refuerzo no pudiera transmitir correctamente las cargas a las capas inferiores, absorbiendo un alto porcentaje y resultando en el detrimento de la misma.

### 10.3.6. Módulos de elasticidad

El módulo de elasticidad permite relacionar la carga aplicada con la deformación que se produce en un material, en las losas de pavimentos permite definir la rigidez y la capacidad de transmitir las cargas que producen los neumáticos. La estructura del pavimento a evaluado no es convencional como se mencionó con anterioridad, por lo tanto, se utilizó el software ELMOD 6 para obtener los módulos elásticos de cada una de las capas que conforman el pavimento del tramo. Este es un software capaz de considerar hasta 5 capas de diferentes propiedades, para el análisis mediante el método de ajuste de cuenco de deflexión.

Para procesar los datos de deflectometría se debe verificar que las deflexiones sean decrecientes a medida que se alejan del plato de carga del Deflectómetro, Una vez ingresada la deflectometría se ingresan los parámetros de entrada para el análisis, éstos implican básicamente las características y propiedades de la estructura. Los espesores de las capas se eligen a partir del promedio de los valores obtenidos mediante la auscultación realizada con el georradar. Para el análisis de los módulos se escoge la opción de “ajuste al cuenco de deflexión” ya que los parámetros ingresados de deflectometría son simples, además de ofrecer el menor error medio cuadrático (RMS), error producido entre los datos de deflectometría ingresados y los calculados por el software.

## Calzada derecha

### 1. Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico

Según la exploración realizada con el georradar, la primera capa – de superficie a suelo –, o capa de rodadura, que conforma la estructura de pavimento de la Calzada derecha consiste en losas de concreto hidráulico. Del km 60.900 al km 64.000 se ubican las losas de geometría optimizada con un espesor de 20 cm y del km 64.000 hasta el final del proyecto, km 101.000, se encuentran las losas de geometría convencional de 29 cm; sin embargo, según se observa en la gráfica anterior, los módulos de elasticidad de los tramos, hasta el km 80.240, es bastante similar. Son los últimos dos sectores,

km 83.580 – km 101.000, los que presentan los valores más bajos de módulo con un promedio de 25,000 MPa y los coeficientes de variación más elevados de todo el tramo con 53 y 43 % respectivamente. A pesar de esto último, todo el tramo presenta valores promedio característicos de una capa de pavimento de concreto hidráulico.

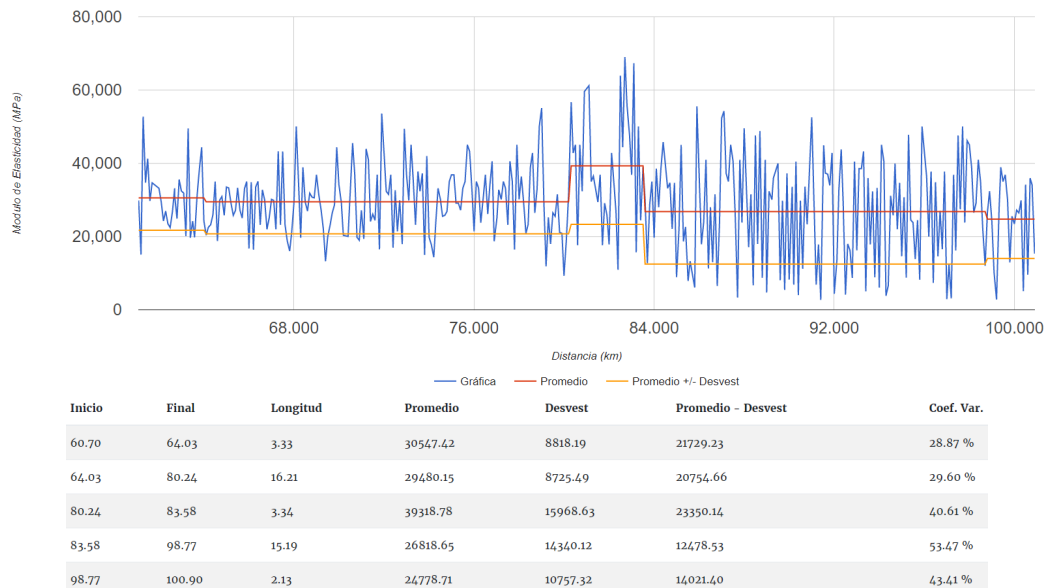
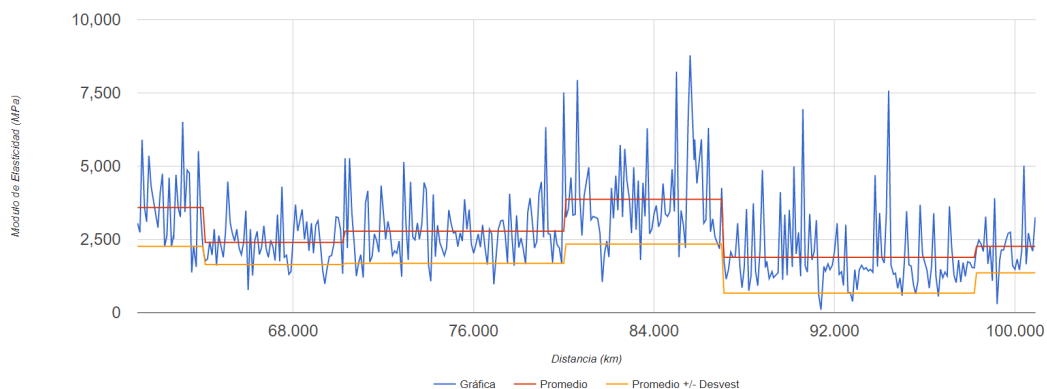


Figura 89: Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico

## 2. Módulos de elasticidad Capa 2, base estabilizada

En la segunda capa se detectó una capa de base estabilizada con un conglomerante hidráulico, el módulo de elasticidad promedio de esta capa es de 2,780 MPa, esto indica que según la información de INVIAS (2002) el tramo completo se encuentra un poco por debajo de la respuesta esperada de un material con estas características. Todos los sectores presentan un coeficiente de variación por encima del 30 % por lo que los resultados obtenidos son bastante heterogéneos, especialmente el quinto sector (km 87.010 – km 98.240), que también presenta el módulo más bajo con 1,890 MPa.



Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desvest	Promedio - Desvest	Coef. Var.
60.70	64.02	3.32	3590.61	1326.18	2264.43	36.93 %
64.02	70.27	6.25	2395.64	751.52	1644.12	31.37 %
70.27	80.00	9.73	2780.63	1097.92	1682.70	39.48 %
80.00	87.01	7.01	3871.14	1530.12	2341.01	39.53 %
87.01	98.24	11.23	1890.66	1221.34	669.32	64.60 %
98.24	100.90	2.66	2264.33	903.33	1360.99	39.89 %

Figura 90: Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 2, base estabilizada

### 3. Módulos de elasticidad Capa 3, mejoramiento de subrasante/subbase

La tercera capa se trata de un material granular que funciona como una subbase o como un mejoramiento de subrasante. El módulo de elasticidad promedio para esta capa es de 179 MPa, si se observa la gráfica con los sectores, se puede apreciar que todos mantienen un promedio similar y que solamente el cuarto sector disminuye de manera más evidente. Al mismo tiempo se puede observar que en toda la longitud del tramo de estudio los valores presentan una variabilidad alta, lo cual se confirma con los coeficientes de variación de hasta 46 %. Aun así, los módulos obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para un material granular.

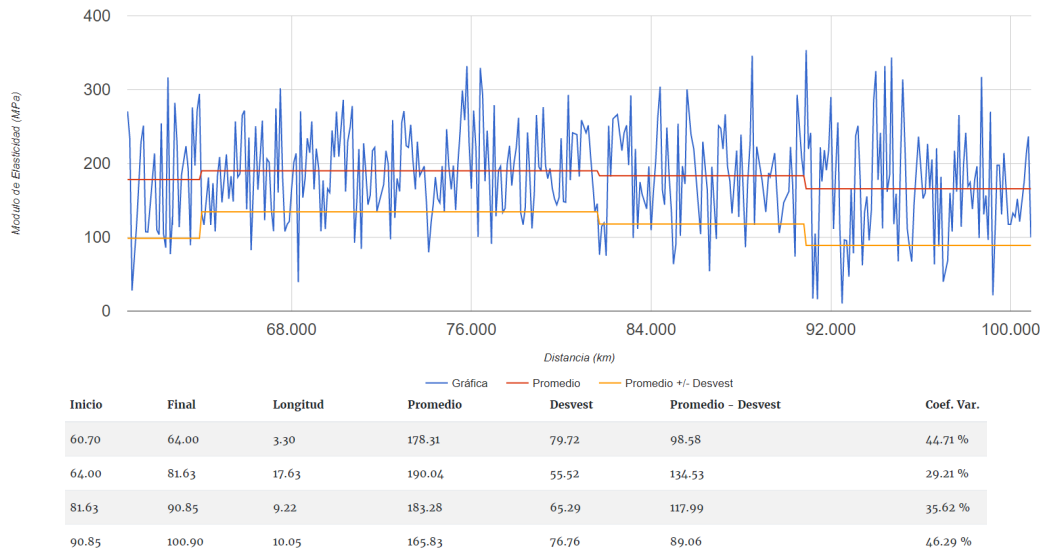


Figura 91: Calzada derecha: Módulos de elasticidad Capa 3, mejoramiento de subrasante/subbase

## Calzada izquierda

### 1. Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico

En toda la longitud del tramo, la Calzada izquierda cuenta con una capa de rodadura (primera capa) compuesta por losas de concreto hidráulico de geometría optimizada. En la gráfica de módulos de elasticidad correspondientes a esta capa se pueden evidenciar claramente tres zonas, la primera corresponde al sector 1 (km 60.730 – km 64.180) que tiene un módulo promedio de 31,176 MPa, valor esperado de este tipo de material. La segunda zona concuerda con el sector 2 (km 64.180 – km 73.610) y en

esta ya se observa un descenso considerable en el módulo a un valor de 14,806 MPa, menos de la mitad del módulo de la primera zona; aun cuando los valores son bajos, aún presentan un nivel de capacidad estructural que ayuda, en cierta manera, al pavimento. La tercera zona contiene el sector 2,3 y 4 (km 73.610 -km 101.100) y este presenta valores muy bajos, que además son altamente variables.

La Figura 92 presenta claramente que a partir del km 73.610, la capa de rodadura de la Calzada izquierda se encuentra altamente dañada y con una capacidad estructural casi nula; esto indica que en esta zona del tramo las losas de concreto hidráulico han perdido su aporte estructural y se encuentra en un estado crítico que demanda una reconstrucción. Una adecuada capa de rodadura es importante, y sobre todo en los pavimentos de concreto hidráulico, debido a que su fin es distribuir las cargas de manera correcta a las capas inferiores y si no funcionan de manera correcta, las capas inferiores se someten a esfuerzos, o condiciones, para los que no han sido diseñadas.

Según Rubio (2014) el concepto de losas cortas se basa bajo el principio de que una sola llanta debe de cargar en cada losa, de esta manera se reducen los esfuerzos en la losa. De tal manera que las losas deben de estar moduladas para lograr esto. Así pues, entre los factores que afecta este tipo de capas de pavimentos es el sobrepeso de los camiones que transitan la vía, factor que representa un grave conflicto en Guatemala; así como el incremento de esquinas y bordes debido al incremento de juntas, que a su vez incrementa la cantidad de puntos donde se tiene caso crítico de carga (centro de losa y esquina de losa).

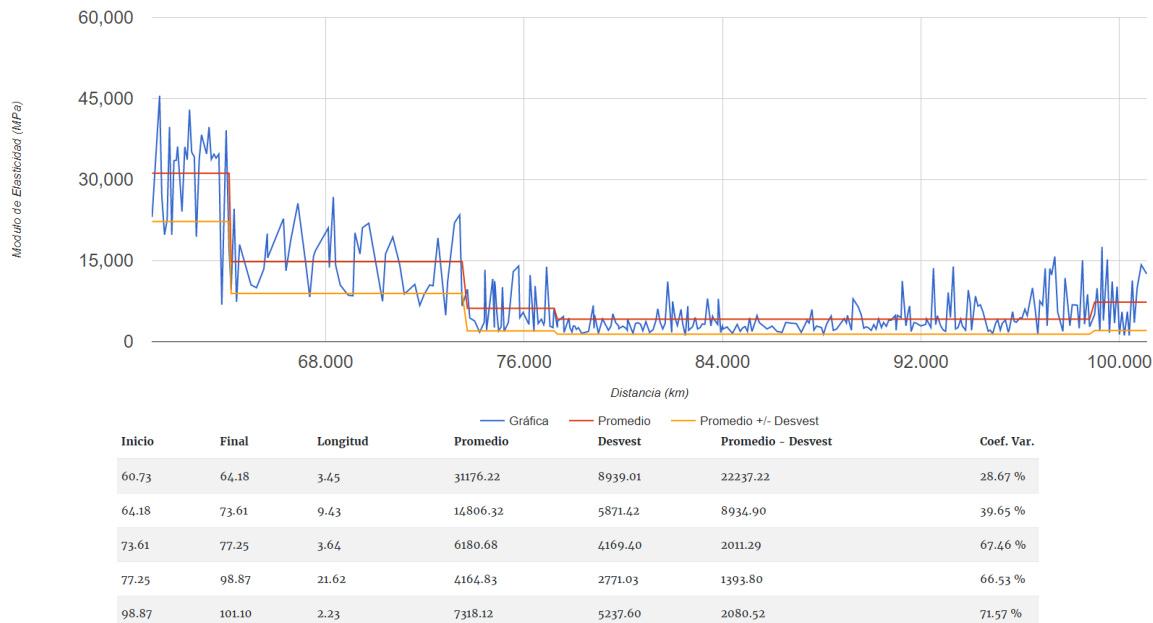


Figura 92: Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 1, losas de concreto hidráulico

## 2. Módulos de elasticidad Capa 2, concreto asfáltico y losas de concreto hidráulico

Los módulos para la segunda capa de la Calzada izquierda se dividen en dos partes. La primera incluye del km 60.700 al km 73.500 debido a que el material presente en este sector es un concreto asfáltico. Debido a que la variabilidad de los valores es bastante alta en este sector, porcentaje de confiabilidad del 77 %, para el análisis se

toma en cuenta el valor promedio menos una desviación estándar, por lo tanto, la capa alcanza un módulo de elasticidad promedio de 405 MPa a 20°C. Significa que el concreto asfáltico presenta un aporte bajo a la estructura. El resto del tramo presenta una losa de concreto hidráulico de geometría convencional que alcanza módulos de elasticidad de 14,000 a 20,000 MPa, los resultados indican que esta capa aún ofrece un aporte estructural considerablemente alto a la estructura. Se presenta un sector crítico de la losa que va del km. 86.200 – km. 87.200 con un módulo de elasticidad promedio de 7,728 MPa.

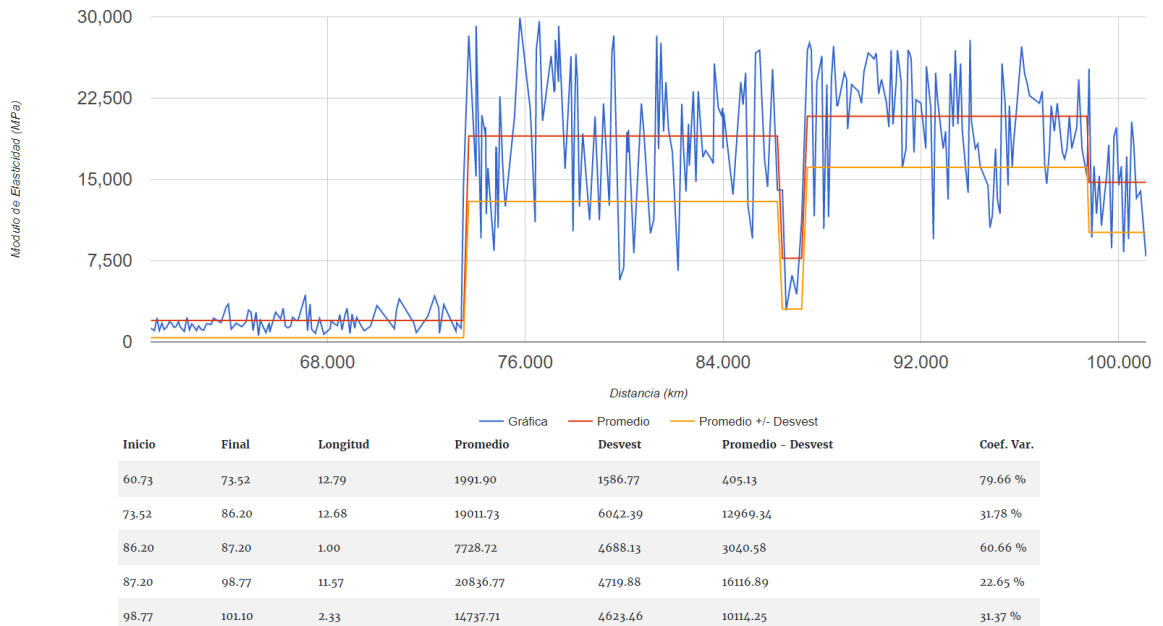
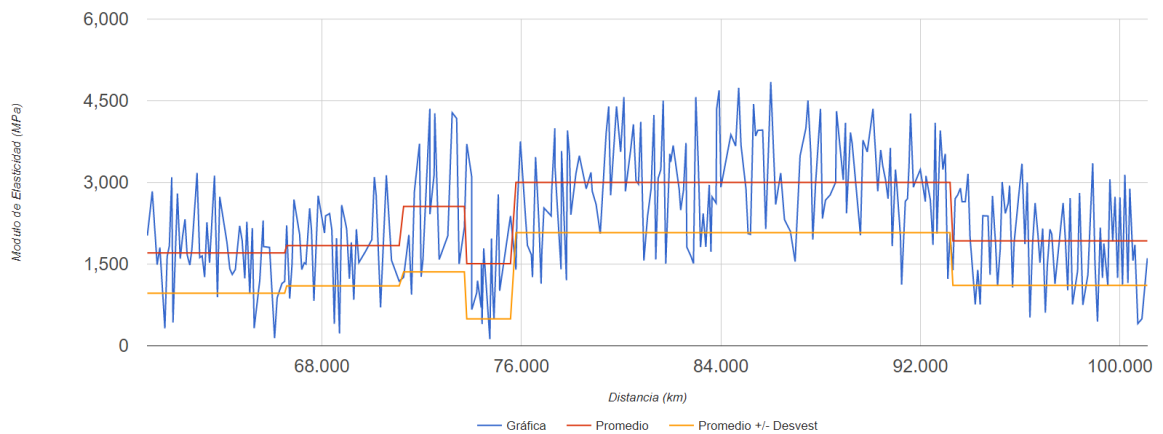


Figura 93: Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 2, concreto asfáltico y concreto hidráulico

### 3. Módulos de elasticidad Capa 3, base estabilizada



Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desvest	Promedio - Desvest	Coef. Var.
60.73	66.53	5.80	1704.70	737.07	967.63	43.24 %
66.53	71.16	4.63	1840.50	739.33	1101.17	40.17 %
71.16	73.76	2.60	2561.08	1204.29	1356.80	47.02 %
73.76	75.56	1.80	1507.76	1012.81	494.95	67.17 %
75.56	93.23	17.67	3000.62	923.99	2076.63	30.79 %
93.23	101.10	7.87	1928.36	818.02	1110.34	42.42 %

Figura 94: Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 3, base estabilizada

En la tercera capa se ubica una base estabilizada con un conglomerante hidráulico, los primero cuatro sectores (km 60.730 – km 75.560) tienen una tendencia parecida y un módulo de elasticidad promedio de 1,903 MPa. En el quinto sector, km 75.560 al km 93.230, se observa el promedio más alto con un valor de 3,000 MPa y el sector 6 que presenta un módulo de elasticidad de 1,928 MPa. Los valores del módulo, a lo largo de todo el tramo, presentan altos coeficientes de variación y se encuentran un poco por debajo del valor esperado para un material estabilizado pero que aún aportan a la respuesta estructural del pavimento.

#### 4. Módulos de elasticidad Capa 4, mejoramiento de subrasante/subbase

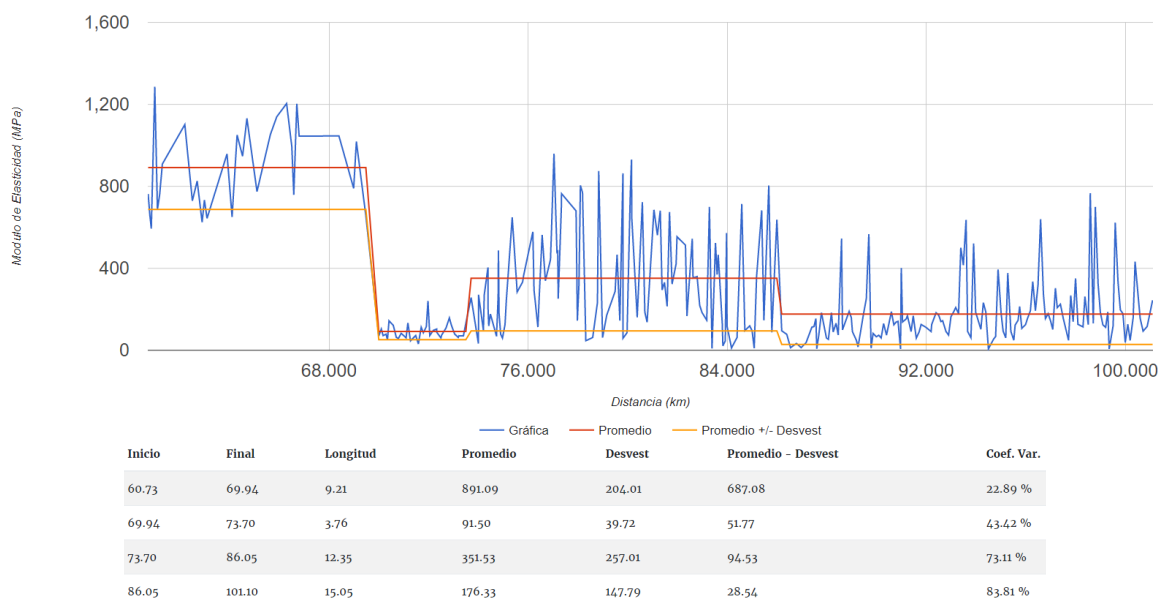


Figura 95: Calzada izquierda: Módulos de elasticidad Capa 4, mejoramiento de subrasante/subbase

Según la exploración realizada con GPR, la cuarta capa se trata de un material estabilizado que funciona como una subbase o como un mejoramiento de subrasante. Sin embargo, los resultados de módulo de elasticidad para esta capa indican que el primer sector si cuenta con un material estabilizado con un módulo promedio de 891 MPa; el sector dos presenta valores característicos de un material natural (subrasante) con un módulo de 91 MPa, es decir, en este no se encuentra ningún tipo de estructura; y finalmente, el tercer y cuarto sector (km 73.700 – 101.100 MPa) registran promedio en un rango de 177 – 351 MPa, indicativos de la presencia de un material granular. Con

excepción del primer sector, el resto del tramo presenta altos coeficientes de variación con porcentajes por encima del 40 %.

### 10.3.7. Retrocálculo

#### Módulo de reacción de la subrasante

El módulo de reacción de la subrasante indica el valor que se asienta la subrasante al estar sometida a un esfuerzo, el módulo corresponde a la capa del suelo en la que se construye el pavimento. En este caso se utilizó la AASHTO Guide of Pavement Structures “Part II, - Rigid Pavement Design and Rigid Pavement Joint Design” para poder determinar este parámetro. Luego de hacer el cálculo del módulo dinámica se procedió a realizar el cálculo del módulo estático, con este último y con la caracterización del suelo desarrollada por Montejo Fonseca (2006) se procedió clasificar los resultados obtenidos. A continuación, se presenta el resumen de los resultados para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante aplicando el método AASHTO.

Los resultados obtenidos en el Cuadro 22 anterior indican que el soporte de la subrasante para la Calzada derecha es clasificado como alto en toda la longitud del tramo, mientras que un tercio de la subrasante de la Calzada izquierda (km 75.500 – km 91.480) tiene un soporte alto y el resto (km 60.900 – km 75.500, km 91.180 – km 101.100) un soporte alto. Por lo que se puede concluir que el proyecto en general se encuentra construido en una subrasante adecuada y con una buena respuesta al ser sometida a esfuerzos.

<i>Calzada</i>	<i>Inicio</i>	<i>Final</i>	<i>Longitud</i>	<i>Kest</i>	<i>Soporte</i>
	<i>(km)</i>	<i>(km)</i>	<i>(km)</i>	<i>(pci)</i>	
Derecha	60.900	64.000	3.100	514.06	Muy Alto
	64.000	86.000	22.000	584.37	Muy Alto
	86.000	101.100	15.100	488.75	Muy Alto
Izquierda	60.900	75.500	14.600	141.77	Medio
	75.500	91.480	15.980	182.88	Alto
	91.480	101.100	9.620	148.71	Medio

Cuadro 22: Caracterización de la subrasante

#### Módulo de resiliencia de la subrasante

El módulo de subrasante da información acerca del suelo en el cual fue cimentado el pavimento, su importancia radica en que, si el subsuelo se trata material arcilloso, este puede verse afectado por cambios volumétricos y afectar el desempeño del pavimento; además es un indicador de la buena o mala distribución que tienen las cargas a través de la estructura. A continuación, se procede al análisis del módulo de subrasante.

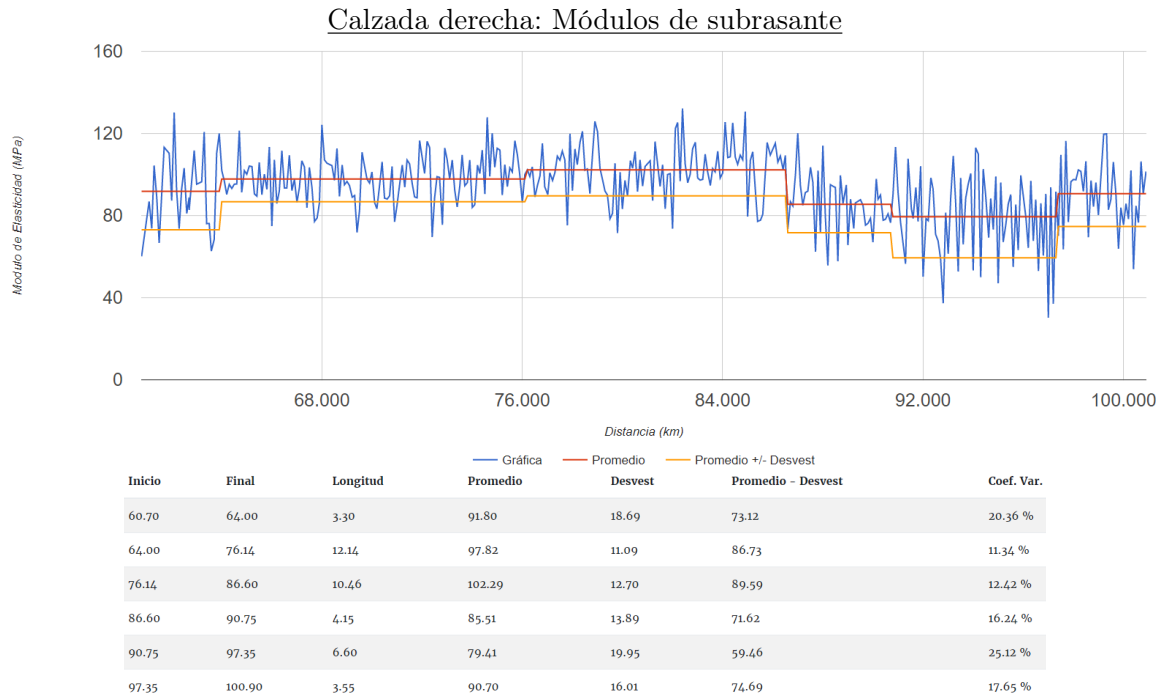
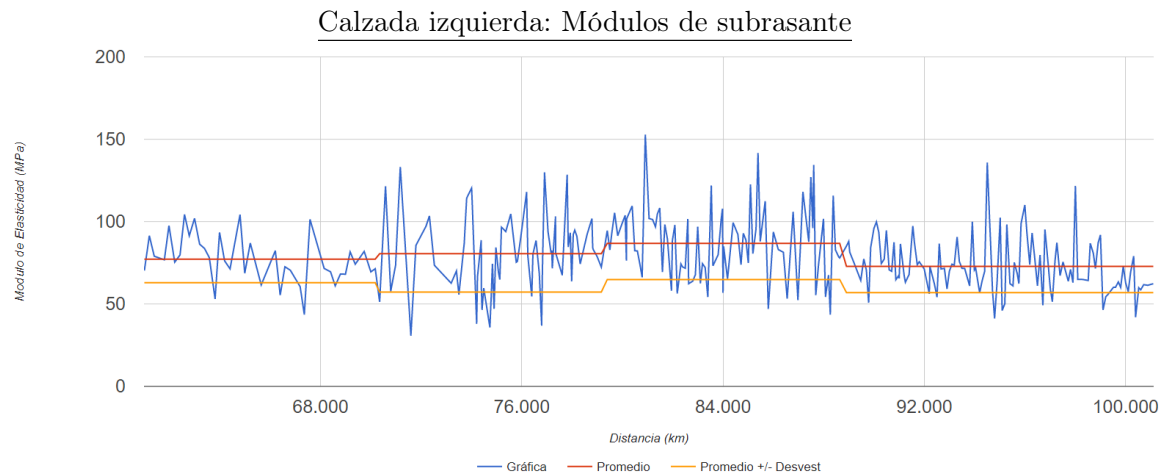


Figura 96: Calzada derecha: Módulos de subrasante

El módulo de subrasante dinámico para la Calzada derecha presenta valores promedio que varían entre los 79 MPa y 102 MPa, obteniendo los valores más bajos en el quinto sector que abarca del km 90.750 al km 97.350 con un módulo de resiliencia de 85.51 MPa (equivalentes a un CBR de 13 %). Los módulos promedio permanecen más o menos constantes del km 60.700 al km 86.600, a partir de este último punto los valores disminuyen considerablemente. Sin embargo, en general, los módulos de subrasante obtenidos indican dos situaciones: primero, existe una adecuada distribución de la carga a través de la estructura del pavimento y, segundo, el subsuelo puede presentar características geotécnicas adecuadas (Anexo X). Este último punto, al momento de una intervención, deberá ser comprobado con mayor detalle mediante más extracciones de calicatas y estudios de suelos correspondientes (granulometría, límites de Atterberg, Proctor, CBR, entre otros).



Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desvest	Promedio - Desvest	Coef. Var.
60.80	70.26	9.46	77.22	14.34	62.88	18.57 %
70.26	79.28	9.02	80.50	23.26	57.24	28.90 %
79.28	88.77	9.49	86.81	21.96	64.85	25.30 %
88.77	101.10	12.33	72.79	15.95	56.84	21.91 %

Figura 97: Calzada izquierda: Módulos de subrasante

La Calzada izquierda, al igual que la Derecha, presenta valores de módulo de subrasante correspondientes a un subsuelo con características geotécnicas adecuadas, con plasticidad baja a media (ver Anexo X). Los módulos se encuentran en un rango que varía desde los 72 hasta los 86 MPa, se puede observar que los valores son bastante constantes a lo largo de todo el tramo en comparación de la Calzada derecha, en la que si se observa una variabilidad más alta. Sin embargo, cabe resaltar que los módulos de resiliencia de la subrasante pueden indicar una adecuada distribución de las cargas a través de la estructura de pavimento debido a la cantidad de capas que la conforman, los espesores de estas y una buena adherencia en las interfaces de estas, sin tomar en cuenta la capa de rodadura – que como se mencionó anteriormente se encuentra altamente deteriorada.

### Módulo de pavimento

El módulo de pavimento da información sobre la forma de construcción, y la calidad de los materiales utilizados en la misma. Además, este módulo es representativo de la respuesta estructural del conjunto de capas del pavimento, en contraste de los módulos de elasticidad de cada una de las capas que se presentó con anterioridad.

Los valores de módulos de pavimento más bajos de la Calzada derecha se encuentran en el sector 3 (km 87.430 – km 97.780) con un promedio de 1602.93 MPa, además presenta el coeficiente de variación más alto de la pista con un 30.82 %, lo cual indica cierta variabilidad en los valores de este tramo. Así también, el sector tres corresponde a las deflexiones más altas por lo que este comportamiento se le atribuye más al módulo de pavimento. A pesar de esto, la Calzada derecha, en general, presenta módulos representativos de una buena recuperación elástica ante las cargas dinámicas a las que es sometido el pavimento.

Es importante mencionar que en los puntos de transición en los que cambian drásticamente los módulos de pavimento, sector tres de la Calzada derecha y sector dos de la izquierda, son críticos en la vida del pavimento ya que están sujetos a esfuerzos generados por esta misma diferencia. Además, que a la hora de querer realizar algún método de rehabilitación o reconstrucción es ideal poder llegar estos sectores bajos al mismo nivel de respuesta elástica que el resto del tramo.

### Calzada derecha: Módulo de pavimento

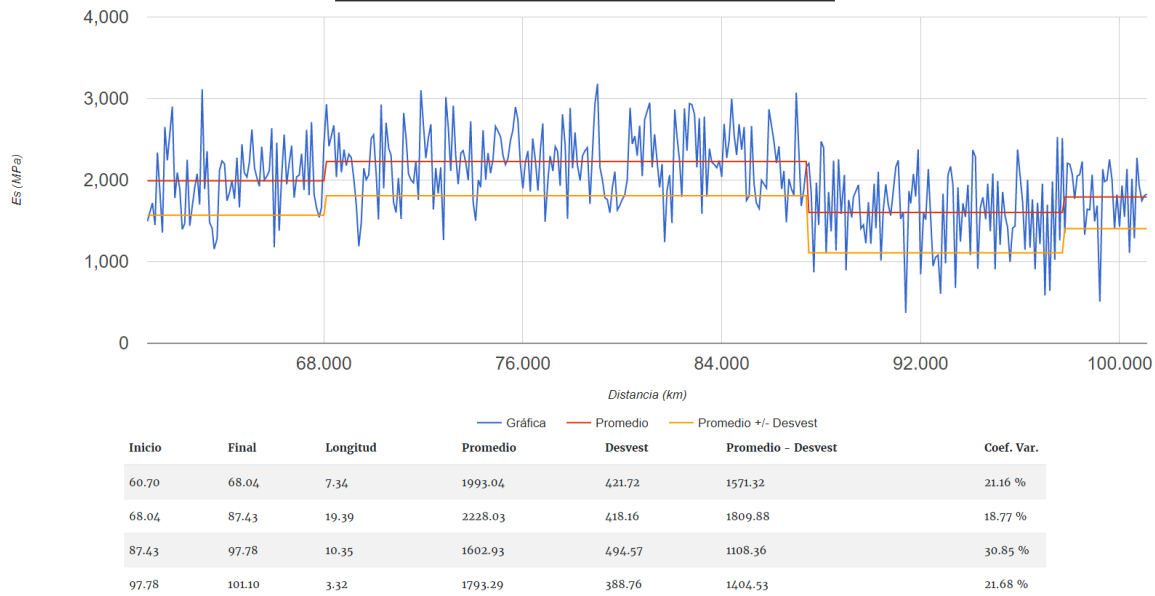
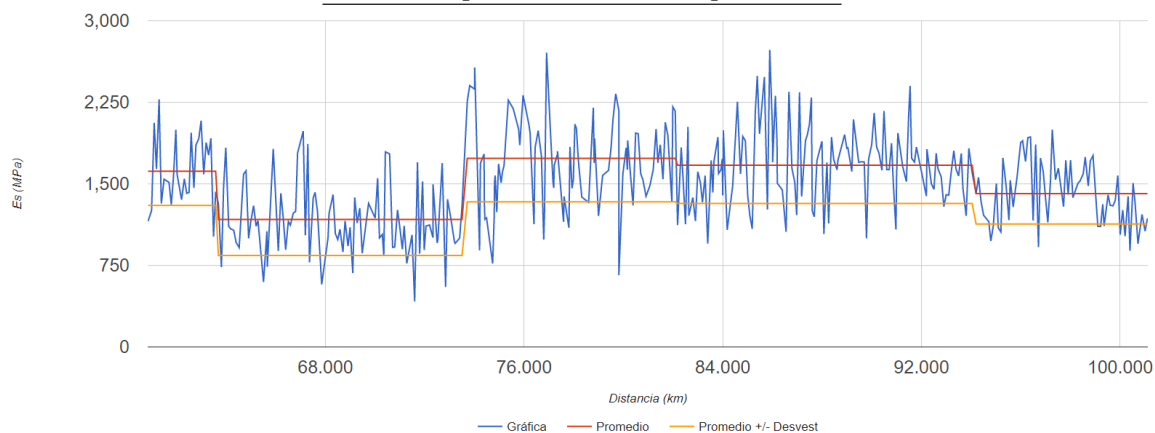


Figura 98: Calzada derecha: Módulo de pavimento

Por otro lado, como se puede observar en la Figura 99 el tramo de la Calzada izquierda se divide en cinco sectores con módulos promedios que varían desde 1173 hasta 1735 MPa. En todos los sectores se obtuvieron coeficientes de variación menores al 30 % porque se puede afirmar que los datos de cada uno son bastante homogéneos. El segundo sector presenta el módulo más bajo de la Calzada izquierda con un promedio de 1173.32 MPa, este coincide con el sector de deflexiones más altas para la misma pista. Este último punto indica que las deflexiones altas del tramo se deben a que la recuperación elástica ante las cargas dinámicas no es menor que en el resto del tramo. Sin embargo, es importante mencionar que en los sectores 3,4, y 5, se encuentra la capa de rodadura más dañada en todo el tramo de estudio; por lo tanto, los módulos de pavimento altos indican que las capas inferiores del pavimento aún conservan una respuesta estructural importante para el desempeño del mismo.

### Calzada izquierda: Módulo de pavimento



Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desvest	Promedio - Desvest	Coef. Var.
60.73	63.59	2.86	1616.10	315.14	1300.96	19.50 %
63.59	73.54	9.95	1173.32	332.05	841.27	28.30 %
73.54	82.11	8.57	1735.63	400.92	1334.71	23.10 %
82.11	94.10	11.99	1671.85	351.58	1320.27	21.03 %
94.10	101.10	7.00	1410.59	279.24	1131.35	19.80 %

Figura 99: Calzada izquierda: Módulo de pavimento

## Eficiencia de la transferencia de carga

Para el cálculo de la eficiencia de la transferencia de carga se promedia el valor de la junta y pasajunta de cada losa evaluada. A continuación de muestra el resultado promedio de la eficiencia para la Calzada derecha y la Calzada izquierda.

<i>Calzada</i>	<i>LTE</i>
	(%)
Derecha	88.50
Izquierda	79.00

Cuadro 23: Eficiencia de transferencia de carga para las calzadas de la autopista

Como se observa en el cuadro resumen 23 del promedio general la eficiencia de la transferencia de carga, la Calzada derecha presenta un 88.50 % por lo que es considerada como una transferencia buena; sin embargo, la transferencia de la Calzada izquierda es clasificada como regular-mala con un 79 %.

## 10.4. RESUMEN DE DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las patologías de un pavimento indican los daños que pueden verse reflejados en la superficie de este. Como se mencionó en el trabajo las patologías pueden ser solamente superficial o pueden comprometer la integridad estructural de las losas y que por lo tanto afectan a su capacidad de soportar las solicitaciones de estas. En este caso se realizaron las fichas técnicas de las distintas patologías presentes en el tramo de estudio, con sus posibles causas y recomendaciones para intervención. Sin embargo, se llevó a cabo el estudio de los porcentajes de afectación en distintos subtramos de análisis para poder establecer las patologías predominantes en cada uno de ellos.

En la Calzada derecha se encontró que el subtramo 3 que abarca desde el km. 87.000 al km. 97.800 presenta el mayor porcentaje de patologías catalogadas con severidad alta; sin embargo, es el subtramo 2 (km 64.000 – km 87.000) presenta la mayor cantidad de área deteriorada, este se ve predominantemente afectado por áreas que presentan desintegración en la capa de concreto hidráulico (1.84 %). Por otro lado, el sector 3 y 4 (km 97.800 – km 101.000) tienen una mayor presencia de pulimiento (1.54 % y 0.20 % respectivamente), lo

cual indica mal estado de la superficie de los tramos y, por ende, la falta de seguridad que podrían prestar los mismo a los usuarios que utilicen la vía. Por otro lado, en el tramo 1 (km 61.000 – 64.000) existe una mayor frecuencia de grietas lineales (0.88 %), transversales y/o longitudinales, debido a que en este tramo se encuentran losas de geometría optimizada se pueden atribuir dichas grietas a la pérdida de capacidad para soportar las cargas a las cuales están siendo sometidas.

De la Calzada izquierda solamente se tiene información del km 61.000 al 64.800, en este tramo de análisis existe una evidente frecuencia alta de áreas que presentan grietas lineales (3.15 %), además se observa que las áreas de afectación han sido predominantemente clasificadas con una severidad alta. Al comparar con la Calzada derecha, se observa que existe un mayor deterioro en la Izquierda y que, a su vez, presenta una condición más crítica.

La regularidad o rugosidad superficial de un pavimento hace referencia a las irregularidades de la superficie de este. Esta es una de las características más influyentes en la sensación de confort y seguridad que experimenta un usuario, por lo tanto, resume la evaluación funcional del pavimento. Las irregularidades también impactan directamente en efectos dinámicos como la transmisión de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento, favoreciendo así al deterioro y aumento en el costo de una intervención: sin embargo, las fallas estructurales muchas veces también inciden en la superficie.

El Carril externo (considero de baja velocidad), es el que ha acumulado la mayor cantidad de cargas dinámicas y se refleja en el alto deterioro superficial. Principalmente en la zona que abarca km 87.000 hasta el km 101.000 se observan los mayores IRIs de toda la Calzada derecha, y puede ser causado por la influencia de los vehículos pesados de las empresas que se encuentran cercanas a esta zona. El estado de la capa de rodadura y la funcionalidad de la pista en los sectores críticos se ve afectado por la presencia de las patologías mencionadas anteriormente y el aumento puntos que indican un escalonamiento medio y de hecho existen más que superan este límite y pasan a ser de severidad alta.

La serviciabilidad es originalmente la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento, este parámetro también se basa en los datos de rugosidad y los daños superficiales del mismo. Es importante mencionar que los parámetros iniciales y finales de PSI son elegidos por el diseñador y son únicos para cada proyecto, por sus características y según el fin de este. No se tiene información de los parámetros elegidos para el diseño original de la Autopista Escuintla – Puerto Quetzal, por lo tanto, no se puede realizar una comparación de la serviciabilidad presente del proyecto versus el parámetro final. Sin embargo, actualmente en las rehabilitaciones y reconstrucciones de rutas centroamericanas, en Guatemala, se espera que la vía alcance un IRI de 3.5 – 4.0 m/km al final de su vida útil, esto se traduce a un índice de serviciabilidad final de 2 – 2.20.

La serviciabilidad de la Calzada derecha se puede dividir en dos zonas, la primera abarca del km 61.000 hasta el km 87.190 presenta índices promedios en un intervalo de 3.83 – 4.05 con los cuales se puede afirmar que conserva una serviciabilidad buena y es candidato a alguna metodología de CPR para el mantenimiento de las losas que tengan algún defecto o falla y así poder extender su vida útil. Ahora bien, la segunda zona, km 87.190 al km 101.000, presenta una serviciabilidad de regular con promedio como 2.83 y 3.06. Por lo tanto, esta última zona deberá ser rehabilitada con procedimientos más profundos. En el sector evaluado de la Calzada izquierda se obtuvo valores de serviciabilidad que oscilan de 2.6 – 3.7, la

intervención puede ser superficial como profunda, se necesita tener la información completa del tramo para poder realizar una decisión. La evaluación estructural tiene como objetivo determinar la capacidad portante del sistema estructural que compone un pavimento, esta evaluación permite establecer la necesidad de una intervención y que tipo de problema de esta índole se debe resolver durante el procedimiento.

Del análisis de las deflexiones de la Calzada derecha que el subtramo del km 68.040 hasta el 87.430 se caracteriza por ser el más largo y el que presenta un promedio de deflexión más bajo con 146.63 micrómetros. El sector más crítico es el que se encuentra del km 87.430 al km 97.770 con un promedio de 205.90  $\mu m$ , este comportamiento puede verse afectado ya sea por la subrasante o por las capas del pavimento. La Calzada izquierda presenta deflexiones más críticas en el sector del km 63.420 – km 73.560 con un valor promedio de 284 micrómetros. En el resto del tramo presenta deflexiones más bajas y que se encuentran en un intervalo desde 191 hasta 262 m. En general, la Calzada izquierda presenta deflexiones más altas que la Calzada derecha, lo que indica que la primera necesitará una intervención más profunda que la última para poder recuperar su capacidad estructural.

La Calzada derecha de la autopista Escuintla – Puerto Quetzal, con un tránsito vehicular en la misma dirección, del km 61.000 al km 64.020 tiene como capa de rodadura losas de geometría optimizada de 1.80 m por 1.80 m con un espesor promedio de 20 cm, a partir del km 64.020 la esta capa se compone por losas de geometría convencional con unas dimensiones promedio de 3.60 m por 3.60 m y un espesor promedio de 29 cm. Como capa de base, en toda su longitud, cuenta con un material estabilizado que varía en espesor; además, cuenta con una tercera capa que cumple con las características de subbase común o un mejoramiento de subrasante.

El módulo de elasticidad permite relacionar la carga aplicada con la deformación que se produce en un material, en las losas de pavimentos permite definir la rigidez y la capacidad de transmitir las cargas que producen los neumáticos. Las losas de geometría optimizada y las losas de geometría convencional hasta el km 80.240, presentan módulos de elasticidad bastante similar con valores que oscilan entre 29,400 – 39,300 MPa. Es desde el km 83.580 hasta el km 101.000, que se da un descenso de los módulos con un promedio de 25,000 MPa.

La Calzada izquierda tiene como capa de rodadura, en toda la longitud del tramo, losas de geometría optimizada con de 1.80 m por 1.80 m y un espesor promedio de 14 cm, esta capa es la que a partir del km 64.600 se encuentra con un alto deterioro, con losas desde parcial hasta completamente fracturadas. Como segunda capa del km 61.000 al km 73.500 se encuentra una mezcla asfáltica en caliente con un espesor promedio de 5 cm; a partir del km 73.500 y hasta el km 101.000 como segunda capa se ubican losas de geometría convencional con un espesor promedio de 20 cm. Por debajo de estas capas existe una base estabilizada, y por debajo de esta una subbase o mejoramiento de subrasante.

La capa de rodadura a partir del km 73.500 forma parte de un sistema de refuerzo o capa adherida con las losas de geometría convencional que se encuentran en la capa inferior. Este tramo de la calzada presenta altos deterioros superficiales a partir del inicio de este tipo de estructura además de una capa de rodadura que demanda una reconstrucción. Sin embargo, presenta bajas deflexiones, lo cual puede ser indicador que en algún momento la adherencia entre la capa de rodadura y la capa de concreto hidráulico inferior haya fallado y, de esta manera, se impidiera transmitir correctamente las cargas al resto de la

estructura, absorbiendo un alto porcentaje y resultando en el detrimento de esta. Además, la falla del concreto puede estar relacionado sistema de losas cortas empleados, el incremento de esquinas y bordes debido al incremento de juntas aunado a su espesor deficiente y un incremento en los pesos de los camiones que han transitado el proyecto.

Los módulos de elasticidad correspondientes a la primera capa se pueden evidenciar claramente tres zonas, la primera (km 60.730 – km 64.180) tiene un módulo promedio de 31,176 MPa, valor esperado de este tipo de material. La segunda (km 64.180 – km 73.610) se observa un descenso considerable en el módulo a un valor de 14,806 MPa, menos de la mitad del módulo de la primera zona, pero aún representan un nivel de capacidad estructural que aporta al pavimento. La tercera (km 73.610 -km 101.100) y este presenta valores muy bajos que indican la con una capacidad estructural casi nula; esto indica que en esta zona del tramo las losas de concreto hidráulico han perdido su aporte estructural y se encuentra en un estado crítico.

Para los módulos de la segunda capa se obtuvo que del km 60.700 al km 73.500 (concreto asfáltico) el material alcanza un módulo de elasticidad promedio de 405 MPa a 20°C; por lo tanto, concreto asfáltico presenta un aporte bajo a la estructura. El resto del tramo presenta una losa de concreto hidráulico de geometría convencional que alcanza módulos de elasticidad de 14,000 a 20,000 MPa, los resultados indican que esta capa aún ofrece un aporte estructural considerablemente alto a la estructura y es la responsable que las deflexiones en este tramo del proyecto sean considerablemente bajas.

Los resultados obtenidos para el módulo de reacción de la subrasante indican que el soporte de la subrasante para la Calzada derecha es clasificado como alto en toda la longitud del tramo, mientras que un tercio de la subrasante de la Calzada izquierda (km 75.500 – km 91.480) tiene un soporte alto y el resto (km 60.900 – km 75.500, km 91.180 – km 101.100) un soporte alto. Por lo que se puede concluir que el proyecto en general se encuentra construido en una subrasante adecuada y con una buena respuesta al ser sometida a esfuerzos.

## **10.5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO**

Ya que se presentó y analizó la información relacionada con el estado del pavimento, tanto visual como funcional y estructuralmente, se definieron cuatro subtramos de intervención en la Calzada derecha y tres subtramos en la Calzada izquierda. Para la definición de los mismo se tomaron distintos filtros de asociación, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Tipo de losa de concreto en la capa de rodadura (losa de geometría optimizada o convencional).
- Material en las capas inferiores a la de rodadura.
- Cambios significativos en la respuesta estructural (módulos de elasticidad) de las distintas capas de pavimento, especialmente en la de rodadura, en las deflexiones centrales, en la rugosidad del pavimento, entre otros.

A continuación, se presenta un cuadro con un resumen de las características de cada uno de los subtramos seleccionados para cada calzada, con el objetivo de poder tener la información más útil de manera más concisa y poder determinar qué tipo de intervención puede solucionar las deficiencias que presentan. Es importante volver a mencionar que se carece de la información del perfilómetro inercial y de evaluación visual con cámaras de la sección de la Calzada izquierda que abarca desde el km 64.800 – 101.000, esto debido al alto deterioro del pavimento.

Subtramo de análisis		T1	T2	T3	T4	
<b>Datos generales</b>						
Estacionamiento	<i>Inicial</i>	(km)	61.000	64.000	87.000	97.800
	<i>Final</i>	(km)	64.000	87.000	97.800	101.000
	<i>Distancia</i>	(km)	3.000	23.000	10.800	3.200
<b>Evaluación visual</b>						
Porcentajes de afectación	<i>Grietas de Esquina</i>		0.063%	0.001%	0.001%	0.005%
	<i>Grietas Lineales</i>		0.885%	0.489%	0.147%	0.022%
	<i>Grietas en Bloque</i>			0.154%	0.033%	0.030%
	<i>Desportillamiento de Esquina</i>		0.046%	0.001%	0.001%	0.003%
	<i>Desportillamiento de Junta</i>		0.016%	0.321%	0.309%	0.088%
	<i>Descascaramiento</i>				0.004%	
	<i>Desintegración</i>			1.837%	0.765%	0.117%
	<i>Baches</i>		0.003%	0.019%	0.095%	0.004%
<i>Pulimiento</i>		0.015%	0.272%	1.541%	0.203%	
<b>Evaluación funcional</b>						
<i>Índice Internacional de Rugosidad (IRI)</i>		(m/km)	2.18	2.08	3.34	3.52
<i>Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)</i>			3.83	3.93	2.95	2.83
<b>Estructura de pavimento</b>						
Espesores de capas	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría optimizada</i>	(cm)	20.00	N/A	N/A	N/A
	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría convencional</i>	(cm)	N/A	29.00	29.00	29.00
	<i>Capa 2: Base Estabilizada</i>	(cm)	22.00	20.00	20.00	22.00
	<i>Capa 3: Mejoramiento de subrasante / Subbase</i>	(cm)	14.00	20.00	16.00	16.00
<b>Evaluación estructural</b>						
<i>Deflexión Central</i>		( $\mu$ m)	166.07	156.35	205.90	178.46
Módulos de elasticidad por capa	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría optimizada</i>	(MPa)	30,547	N/A	N/A	N/A
	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría convencional</i>	(MPa)	N/A	34,399	26,818	24,778
	<i>Capa 2: Base Estabilizada</i>	(MPa)	3,590	3,349	1,890	2,264
	<i>Capa 3: Mejoramiento de subrasante / Subbase</i>	(MPa)	178	190	174	165

<i>Módulo de Reacción de la Subrasante</i>	(pci)	514	584	488	488
<i>Módulo de Resiliencia de la Subrasante (Mr)</i>	(MPa)	91.80	100.06	82.46	90.70
<i>Módulo de Pavimento (Ep)</i>	(MPa)	1,993	2,228	1,603	1,793

Cuadro 24: Subtramos de análisis de la Calzada derecha

Subtramo de análisis			T1	T2	T3
<b>Datos generales</b>					
Estacionamiento	<i>Inicial</i>	(km)	61.000	64.800	73.500
	<i>Final</i>	(km)	64.800	73.500	101.000
	<i>Distancia</i>	(km)	3.800	8.700	27.500
<b>Evaluación visual</b>					
Porcentajes de afectación	<i>Grietas de Esquina</i>		0.054%	N/A	N/A
	<i>Grietas Lineales</i>		3.146%	N/A	N/A
	<i>Desportillamiento de Esquina</i>		0.011%	N/A	N/A
	<i>Desportillamiento de Junta</i>		0.053%	N/A	N/A
	<i>Baches</i>		0.397%	N/A	N/A
	<i>Pulimiento</i>		0.124%	N/A	N/A
<b>Evaluación funcional</b>					
<i>Índice Internacional de Rugosidad (IRI)</i>		(m/km)	2.50	N/A	N/A
<i>Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)</i>			3.29	N/A	N/A
<b>Estructura de pavimento</b>					
Espesores de capas	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría optimizada</i>	(cm)	14.00	14.00	14.00
	<i>Capa 2: Concreto asfáltico</i>	(cm)	5.00	5.00	N/A
	<i>Capa 2: Losas geometría convencional</i>	(cm)	N/A	N/A	20.00
	<i>Capa 3: Base Estabilizada</i>	(cm)	19.00	20.00	25.00
	<i>Capa 4: Mejoramiento de subrasante / Subbase</i>	(cm)	22.00	20.00	12.00
<b>Evaluación estructural</b>					
<i>Deflexión Central (Dfo)</i>		( $\mu$ m)	219.78	284.01	217.86
Módulos de elasticidad por capa	<i>Capa 1 (rodadura): Losas geometría optimizada</i>	(MPa)	31,176	14,806	5,887
	<i>Capa 2: Concreto asfáltico</i>	(MPa)	1,991	1,991	N/A
	<i>Capa 2: Losas geometría convencional</i>	(MPa)	N/A	N/A	15,578
	<i>Capa 3: Base Estabilizada</i>	(MPa)	1,704	2,035	2,464
	<i>Capa 4: Mejoramiento de subrasante / Subbase</i>	(MPa)	891	92	264
<i>Módulo de Reacción de la Subrasante</i>		(pci)	142	142	166
<i>Módulo de Resiliencia de la Subrasante (Mr)</i>		(MPa)	77.22	63.88	79.80
<i>Módulo de Pavimento (Ep)</i>		(MPa)	1,616	1,173	1,606

Cuadro 25: Subtramos de análisis de la Calzada izquierda

### **10.5.1. Calzada derecha**

#### **Subtramo 1 (CA-09 Sur, km 61.000 – km 64.000)**

La restauración del pavimento de concreto hidráulico (CPR) es factible cuando existen áreas limitadas de deterioro/pérdida de calidad de conducción debido a problemas en las juntas y grietas. La ventaja de la CPR es que contiene técnicas diseñadas específicamente para reparar o prevenir los daños presentes en el pavimento de hormigón. La CPR de un proyecto puede contar con más de una técnica y el beneficio es que repara las zonas aisladas de peligro que deben ser atendidas sin destruir la integridad estructural de la losa. Además, cabe mencionar que este tipo de procedimientos es más económico que la reconstrucción de la vía.

Este subtramo presenta una adecuada respuesta estructural en la capa de rodadura (losas de geometría optimizada), una rugosidad adecuada, sin embargo, se ve principalmente afectado por la presencia de grietas lineales. Por lo tanto, para todas las losas con grietas longitudinales y/o transversales de severidad alta o con un ancho mayor a 1/2 pulgada, será necesario la sustitución de la losa en donde se encuentra el deterioro. El mismo procedimiento se debe llevar a cabo en las losas con dos o más esquinas rotas. De esta manera, se puede llevar a cabo la reparación a largo plazo de juntas estructural y/o funcionalmente deterioradas. Por otro lado, para todas aquellas losas que presenten grietas de menor severidad, desportillamiento en juntas y esquinas, y/o baches se puede llevar a cabo la sustitución parcial (a mediana profundidad) de la losa con el objetivo de repararlas y mejorar la condición de la superficie.

#### **Subtramo 2 (CA-09 Sur, km 64.000 – km 87.000)**

Este subtramo cuenta con el IRI más bajo con respecto al resto del tramo de la Calzada derecha. Además, la capa de concreto hidráulico de rodadura cuenta con una buena respuesta estructural, por lo que la transmisión de cargas dinámicas entre losas y hacia capas inferiores es adecuada. Por otro lado, se ve afectado principalmente por la desintegración de la capa de rodadura, debido a que se trata de un deterioro superficial se recomienda llevar a cabo un pulido o trituración con diamante. Este procedimiento tiene como objetivo restaurar o mejorar la calidad de marcha de un pavimento eliminando las irregularidades del perfil. Para aquellas losas que presenten agrietamiento, también se puede llevar a cabo una reparación a mediana profundidad con el objetivo de removerlas. En general, es el tramo subtramo menos crítico con respecto al resto.

#### **Subtramo 3 y 4 (CA-09 Sur, km 64.000 – km 87.000)**

Estos subtramos de análisis presentan un incremento considerable en la rugosidad de la superficie, además de una inferior capacidad estructural en la capa de rodadura, un descenso en promedio de 10,000 MPa, y la capa de base estabilizada por debajo de la anterior. Esto coincide con un aumento en la frecuencia y en la severidad del escalonamiento presente, lo cual indica que la capacidad de transferencia de carga es menor en estas zonas. Además, la

evaluación visual indica que la patología predominante en ambos subtramos es el pulimiento de los agregados.

El problema del escalonamiento puede resolverse mediante un pulido de la superficie, que además mejora la rugosidad y textura de las secciones que cuentan con pulimiento. También es recomendable la estabilización de las losas, que consiste en llenar vacíos pequeños debajo de la losa de concreto en caso de que un desnivel en las capas inferiores sea la causa de la diferencia en el nivel de las losas de rodadura. Adicionalmente, se puede llevar a cabo un sellado de juntas con el objetivo de evitar la intrusión de agua y materiales incompresibles a través de las mismas - esto puede causar la erosión de las capas inferiores; y para evitar la intrusión de materiales incompresibles en las juntas, estos provocan desconchamientos o desportillamiento al reducir el espacio lateral disponible para la expansión térmica.

### **10.5.2. Calzada izquierda**

#### **Subtramo 1 (CA-09 Sur, km 61.000 – km 64.800)**

El subtramo de análisis 1 de la Calzada izquierda se ve principalmente por grietas lineales, longitudinales y transversales, de una severidad alta. Sin embargo, esta patología no se presenta en todo el subtramo, por lo tanto, se propone la sustitución de las losas dañadas, esto a su vez permite reparar el deterioro de las juntas. Si en dado caso las grietas no muestran ser muy graves, se puede llevar a cabo una reparación a mediana profundidad de las losas en las que se presenten.

#### **Subtramo 2 (CA-09 Sur, km 64.800 – km 73.500) y Subtramo 3 (CA-09 Sur, km 73.500 – km 101.000)**

Debido a la alta severidad del deterioro que existen en estos subtramos, hecho evidenciado en la baja capacidad estructural de la capa de rodadura existente - módulo de elasticidad de 14,806 y 5,887 MPa en los subtramos 2 y 3 respectivamente. Esta característica no permite una transferencia efectiva de las cargas dinámicas hacia las losas adyacentes o capas inferiores. Por lo tanto, es necesario realizar una rehabilitación estructural en toda la longitud de estos subtramos por medio de la eliminación total de las losas de hormigón que conforman la capa de rodadura de estos.

Se propone un reciclado del concreto debido a que este procedimiento pretende romper y retirar las losas de concreto para luego moler el hormigón, tratarlo para eliminar cualquier contaminante y finalmente, almacenarlo para su pronto uso. Este material puede ser utilizado para fabricar la nueva mezcla a colocar, en este caso es beneficioso debido a que se obtendría bastante material considerando la longitud del proyecto.

El reciclaje de concreto permite ahorrar entre 20% y 30% el costo de los materiales debido a que el procedimiento de rotura y trituración del hormigón existente tiene como producto un agregado que puede ser utilizado en la nueva mezcla a colocar. Además, es una opción sostenible, especialmente en rutas como la de Escuintla - Puerto Quetzal donde no se tienen bancos de materiales cercanos. El transporte, mina o extracción de materiales

vírgenes es un procedimiento costoso y abrasivo para el medio ambiente; además, estas acciones también pueden llegar a retrasar el calendario de construcción.

Sin embargo a la hora de utilizar un material de reciclado para la producción de una mezcla nueva de hormigón, es necesario tener en cuenta las propiedades ingenieriles del material triturado y esto, a su vez, puede llevar a modificar el diseño de la mezcla de concreto hidráulico (ej. utilización de aditivos químicos y/o minerales, diferentes proporciones de los componentes de la mezcla, entre otros) o cambiar las características estructurales del pavimento (ej. cambio en el espesor requerido). Para que sea efectivo utilizar un RCA para una mezcla nueva, el material reciclado debe cumplir con las mismas especificaciones que el agregado virgen.

Los procedimientos anteriormente mencionados están respaldados por la normativa guatemalteca “Especificaciones Generales para construcción de Carreteras y Puentes” (Libro Azul), además establecen el procedimiento adecuado y aceptado por la Dirección General de Caminos para la recepción de una rehabilitación de concreto de cemento hidráulico. Dentro de las secciones de interés se encuentran las siguientes:

- Sección 502.06 Reparación de espesor parcial.
- Sección 502.07 Reparación de juntas.
- Sección 502.08 Reparación de grietas.
- Sección 502.12 Fresado superficial con disco de diamante.
- Sección 502.13 Fracturado del pavimento de concreto.

## **10.6. PROPUESTA PARA MONITOREO DEL PROYECTO**

El objetivo de realizar un monitoreo constante de la red vial es tener un banco de datos, alimentado por las mediciones periódicas de los distintos parámetros que caracterizan al pavimento y que determinan su comportamiento. Las mediciones realizadas permiten conocer el estado en el que se encuentra el proyecto, es decir, se puede determinar en qué parte del ciclo de la vida útil se encuentra; a su vez, permite determinar las acciones y prioridades en cuanto a la reparación de este, con el objetivo de mantener en buenas condiciones la vía y no intervenirla hasta que su capacidad estructural y funcional estén seriamente comprometidas. Al mismo tiempo, un monitoreo constante sumado a las intervenciones realizadas en el momento correcto, permiten optimizar los recursos con los que se cuentan y aumentar la viabilidad económica de la ejecución de los proyectos.

Teniendo una base de datos se puede llegar a un análisis que se desglosa en las siguientes partes: análisis estratégico, con el fin de planificar estratégicamente los gastos en la red vial del país a mediano y largo plazo; análisis de programa, con el objetivo de asignar niveles de prioridades a proyectos que se encuentren bajo restricciones de presupuesto; finalmente, el análisis del proyecto, que pretende realizar evaluaciones para determinar el tipo de proyecto (conservación, mejoramiento, rehabilitación o reconstrucción) y la viabilidad económica para invertir en pavimentos.

La evaluación y la propuesta de intervención presentadas son para una ruta centroamericana, es decir una ruta principal, que representa la puerta comercial de Guatemala con la Cuenca del Pacífico y, en general, se trata de una vía que tiene un gran impacto en la actividad económica del país. Debido a la importancia de la vía evaluada, se deberían llevar a cabo la ejecución de mediciones anuales o bianuales para el monitoreo de esta. Sin embargo, primero se toma en cuenta que en cuenta la recepción del proyecto, una vez finalizada la intervención, se deben de cumplir con parámetros de aceptación establecidos por el diseñador y otros por normas como el *Libro Azul de Guatemala*, tanto para los materiales de construcción como para la funcionalidad y el servicio de este.

Guatemala dentro de su normativa para la construcción y control de calidad de pavimentos no cuenta con un límite máximo de valor de rugosidad para la recepción de un proyecto. Sin embargo, en otros países se han llevado a cabo proyectos para determinar valor del IRI inicial en la construcción de pavimentos. Tomando en cuenta el historial guatemalteco en este respecto se toma como referencia lo establecido por el Ministerio de Obras Públicas en Chile. Este establece que para un pavimento rígido se requiere un valor de  $IRI \leq 2.0$  en el 50% de los datos,  $IRI \leq 2.5$  m/km en el 85% de los datos y un  $IRI \leq 2.8$  m/km en el 99% de los datos (Badilla *et al.*, 2008). Según lo establecido por INVIAS (2006) se debe mantener un escalonamiento entre  $\pm 5$  mm, para que la severidad de esta patología sea baja y no afecte el desempeño de transmisión de cargas entre losas del pavimento. Es recomendado que el monitoreo funcional del pavimento sea llevado a cabo dos veces al año con presentación de resultados a cada 200 m, de esta manera se puede crear la curva de servicio del proyecto con suficiente información.

El *Libro Azul* en la Sección 401.18 cuenta con las especificaciones de deflexiones máximas permisibles aceptables en un pavimento de concreto asfáltico; sin embargo, similar información no se encuentra para las disposiciones de un pavimento de concreto hidráulico. Las mismas establecidas en esta normativa no se pueden adoptar en el último tipo de pavimento debido a que la rigidez de este es superior y, por lo tanto, las deflexiones del concreto son menores. Así pues, el monitoreo del proyecto con Deflectómetro de impacto, provee información acerca la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento por medio de los módulos de elasticidad. En general se espera que el módulo de un concreto hidráulico se encuentre en un rango entre 19,600 MPa y 53,900 MPa. El monitoreo del proyecto con este equipo pretende verificar que el material permanezca en este rango de respuesta para el buen desempeño del pavimento, así como también analizar su detrimento con el paso del tiempo, el aumento de las cargas de tránsito y/u otros factores. Estas mediciones pueden monitorear que la transmisión de carga entre losas esté por encima del 80%. Es recomendable que las mediciones se hagan anualmente en intervalos de 200m.

Debido a que el tramo de estudio presenta varias zonas con pulimiento y otras patologías relacionadas con la textura del pavimento y considerando que este es un parámetro crítico en la comodidad, seguridad de los usuarios, además de necesario para la conservación de carreteras, es recomendable que se realicen monitoreos relacionados con este factor. El monitoreo de la micro y macro textura del pavimento tiene como especial objetivo verificar que el pavimento tenga una adecuada capacidad de evacuar el agua de la interfaz rueda-pavimento y el coeficiente de rozamiento del pavimento, es decir, la adecuada adherencia entre la rueda y el pavimento. Esta medición se puede hacer mediante equipos como mu meter, ensayos de permeabilidad, entre otros, y se recomendaría llevarlos a cabo una vez al año.

- Se logró identificar que las principales patologías que se encuentran en la Calzada derecha del tramo de estudio incluyen la desintegración de la capa de concreto, pulimiento y grietas lineales; dentro de las causas de estos deterioros se encuentran la fatiga de las losas por cargas excesivas y detrimento de la calidad del material utilizado en su construcción. Por otro lado, en la Calzada izquierda se logró establecer que la patología más predominante son las grietas lineales, que a su vez han causado fracturas múltiples en las partes más críticas de este tramo. Además, se determinó que el estado de la capa de rodadura y la funcionalidad de la pista en los sectores críticos se ve afectado por la presencia de las patologías mencionadas anteriormente y el aumento puntos que indican un escalonamiento medio y de hecho existen más que superan este límite y pasan a ser de severidad alta.
- Se estableció que la evaluación de estructuras de pavimento existente por medio de ensayos no destructivos se divide en dos partes:
  - La primera consta de la evaluación funcional del pavimento que pretende estudiar las irregularidades de la superficie puesto que es la característica más influyente en el confort y seguridad de los usuarios al transitar la vía. Esta evaluación se puede llevar a cabo mediante el Perfilómetro Inercial, cuya información procura parámetros de medición como el Índice Internacional de Rugosidad, el Índice de Serviciabilidad Presente y el Escalonamiento.
  - La segunda consta de la evaluación estructural del pavimento, esta pretende determinar la capacidad portante del sistema que compone al pavimento. En este caso, la metodología de evaluación se hace mediante el Falling Weight Deflectometer, que permite establecer las deflexiones a varias distancias y, por medio del retrocálculo, detalla el desempeño estructural del proyecto.
  - Por último, el Georadar funciona como un ensayo no destructivo complementario, no menos importante, que permite establecer los espesores de las distintas capas que conforman la totalidad de la estructura de pavimento.
- En la evaluación funcional del tramo de estudio se logró obtener que la Calzada derecha

tiene valores de PSI que indican una serviciabilidad buena y es candidato a alguna metodología de CPR para el mantenimiento de las losas que tengan algún defecto o falla y así poder extender su vida útil. Por otro lado, en la Calzada izquierda se obtuvo valores de serviciabilidad menores que indican la necesidad de una intervención más profunda.

- En la evaluación estructural se llegó a la conclusión que, en general, la Calzada izquierda presenta deflexiones más altas que la Calzada derecha, lo que indica que la primera necesitará una intervención más profunda que la última para poder recuperar su capacidad estructural.
- Además, se logró determinar que la capa de rodadura de la Calzada derecha consta de losas de geometría optimizada y las losas de geometría convencional con módulos de elasticidad bastante similares, los cuales indican una respuesta ante cargas dinámicas aceptable.
- Se logró detectar que una sección de la capa de rodadura de la Calzada izquierda forma parte de un sistema de refuerzo o capa adherida con las losas de geometría convencional que se encuentran en la capa inferior. Este tramo de la calzada presenta altos deterioros superficiales y módulos de elasticidad considerablemente bajos en la capa de rodadura, lo que puede indicar una falla en la adherencia entre capas.
- Se identificaron distintas metodologías para la reconstrucción de pavimentos de concreto hidráulico. Entre ellos se encuentra el reciclado de hormigón, el rublizado y otros procedimientos de intervención como: fresado con dientes de diamante, sellado de juntas, remoción de losa, e intervenciones a mediana profundidad.
- Se logró proponer soluciones para la intervención de la estructura de pavimento actual de la autopista, dividida en subtramos de análisis que comparten características superficiales, estructurales y niveles de deterioro. Las intervenciones propuestas se dirigen específicamente a las necesidades de cada uno de los subtramos.
- Se logró plantear bases el monitoreo constante del proyecto una vez finalizada la reparación que incluyen: mediciones bianuales de IRI con reportes a cada 200m, evaluación anual con FWD en intervalos de 200 m para determinar las deflexiones del pavimento, los módulos de elasticidad de la capa de rodadura y el porcentaje de transmisión de carga entre losas.

- Aun cuando los ensayos no destructivos otorgan un panorama amplio acerca de la funcionalidad y de la capacidad estructural de un pavimento, siempre es recomendable llevar ensayos de laboratorio que complementen las características de los materiales que conforman el pavimento, incluyendo sus espesores y las propiedades que los hacen capaces de reaccionar ante cargas dinámicas.
- Debido a que la zona que presenta un mayor deterioro es en la que se encuentra una capa adherida de pavimento hidráulico con pavimento hidráulico, sería recomendable indagar en este tipo de intervenciones para que en próximas ocasiones tener una metodología que asegure la integridad del pavimento.
- Como para todo pavimento, las cargas de los camiones son un factor que afecta directamente al desempeño del mismo, se recomienda que una vez realizadas las intervenciones necesarias en el tramo de estudio se lleve a cabo un estudio de pesos y dimensiones, así como de la frecuencia con la que distintos tipos de camiones circulan el proyecto. Esto tendría como objetivo asegurar que esta vía, como otras en Guatemala, no estén siendo sub-diseñadas para las sollicitaciones actuales de carga en el país.
- Algunos de los procedimientos de intervención para el tramo de estudio han sido probados con éxito a nivel internacional, sin embargo, tanto el reciclado de pavimento como el rublizado deben ser adaptados a las condiciones y disponibilidad de Guatemala. Por esta razón es recomendable realizar un tramo de prueba o estudio para establecer protocolos y metodologías de construcción, así como también para verificar la calidad de materiales y las decisiones pertinentes al diseño de pavimento con estos procedimientos. Con el objetivo de conocer y verificar el tipo de intervención antes de proceder con un tramo de tanta importancia y que falle por no prevenir situaciones que el estudio pueda sacar a la luz.
- Se recomienda la evaluación y el monitoreo de los pavimentos se lleve a cabo con ensayos no destructivos y ensayos complementarios en todos los proyectos de rehabilitación, así como en los proyectos nuevos. La Dirección General de Caminos podría recabar esta información con el objetivo de tener una base de datos alimentada constantemente que

permita establecer la prioridad de los proyectos. Así la intervención de las carreteras se realiza en momentos adecuados, antes de que su curva de serviciabilidad demande una reconstrucción, así el presupuesto individual de cada proyecto no sea exageradamente elevado y permitiendo mantener una red vial en mejores condiciones.

- Debido a que el presente trabajo de graduación no tomó en cuenta el estudio de la micro y macro textura en el pavimento, se recomienda profundizar en este tipo de evaluación y en la importancia que tiene conocer estas características del pavimento para su correcto desempeño. Esto especialmente en áreas donde exista una alta precipitación y, por lo tanto, la evacuación de agua y la adecuada adherencia entre rueda-superficie sean aún más críticas.

- [1] AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: AASHTO.
- [2] Abad, Luis; Sangurima, Álvaro (enero 2018) Análisis de Correlación del Desempeño no Estructural y Funcional de la Vía Cuenca - Molleturo - Naranjal, en el Tramo Puente Tamarindo - Jesús María. Tesis de la Universidad de Cuenca. Extraído de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec>
- [3] ACPA (2009) Recycling Concrete Pavements. Engineering Bulletin EB043P. American Concrete Pavement Association, Rosemont, IL.
- [4] Alfonso Montejo Fonseca (1998) Ingeniería en Pavimentos. Extraído de: [https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_-\\_Alfonso\\_Montejo\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_-_Alfonso_Montejo_Fonseca)
- [5] American Concrete Pavement Association, ACPA (1998) Rubblizing of concrete pavements: a discussion of its use. Extraído de: <http://metiebar.acpa.org/>
- [6] ASTM, Standard Practices for Simulating Vehicular Response in Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface. American Society for Testing and Materials ASTM E1170-92, 1995.
- [7] Badilla, Gustavo; Elizondo, Fabián; Barrantes, Roy (noviembre 2008) Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo de IRI. Extraído de: <https://docplayer.es>
- [8] Bhattacharya, B., M. Zola, and S. Rawool (2008) Evaluation of Rapid Strength Concrete Slab Repairs. Sacramento: California Department of Transportation.
- [9] Blake, T. (2008). A comparison of nondestructive testing backcalculation techniques for rigid and flexible pavements (Pregrado). University of Arkansas, Arkansas, Estados Unidos.
- [10] CASTRO, Hemyson Amaral, MONTEIRO, Patrick Olbera, RAMOS, Rogério Go-

mes, SOUZA, Jairo Andrade, SANTOS, Anderson Alves (diciembre 2016). Inferencia en cuanto a la aplicación de pavimento de asfalto en la carretera BA-120, Tramo de la BR-415, Barro Preto-BA. Extraído de: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/ingenieria-civil/aplicacion-de-pavimentacao>

[11] Chang, C. (2008). Evaluación de pavimentos: Criterios y Aplicaciones. *Revistavial*, 59.

[12] Concrete Construction Staff (s.f.) CPR (concrete pavement restoration): the band-aid that works. Extraído de: [https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/cpr-concrete-pavement-restoration-the-band-aid-that-works\\_o](https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/cpr-concrete-pavement-restoration-the-band-aid-that-works_o)

[13] Daniel Violini y Mariano Pappalardi (s.f.) Patologías en pavimentos de hormigón a edad temprana. Extraído de: [http://www.cavellaneda.com.ar/pdf\\_publicaciones/CA\\_ca\\_publicacion\\_006pdf\\_9.pdf](http://www.cavellaneda.com.ar/pdf_publicaciones/CA_ca_publicacion_006pdf_9.pdf)

[14] Darter, M. I., and T. Biel (January 2016) "Survival of JPCP in Utah." Presentación en el 15th Annual Concrete Pavement Workshop del Capítulo de Utah perteneciente a la American Concrete Pavement Association, Salt Lake City, UT.

[15] Darter, Michael (november 2017) Concrete repair best practices: a series of case studies. Extraído de: [https://www.igga.net/wp-content/uploads/2018/08/Concrete\\_Repair\\_Best\\_Practices\\_MODOT\\_Nov\\_2017.pdf](https://www.igga.net/wp-content/uploads/2018/08/Concrete_Repair_Best_Practices_MODOT_Nov_2017.pdf)

[16] Decker, Dale S. y Hansen, Kent R. (January 2005) Design and construction of HMA overlays on rubblized PCC pavements: State of the practice. Extraído de: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec087.pdf>

[17] Dynatest International (2008) Dynatest 5051 Mark III/IV Road Surface Profiler, Test Systems. Versión 2.5.0 del Manual de Propietario.

[18] Escobar, K., García, A., y Guzmán, C. (2007). Análisis Comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)". Universidad del Salvador. Extraído de: <https://docplayer.es>

[19] Escobar, Kerin; García, Alberto; Guzmán, Carlos (diciembre 2007) Análisis comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la viga Benkelman y el Deflectómetro de impacto (FWD). Extraído de: <https://docplayer.es>

[20] F. Caro, G. Peña (18 de mayo, 2012) Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica. Extraído de: <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/intekhnia/article/viewFile/461/749>

[21] FHWA (2002) Formal Policy on the Use of Recycled Materials. Federal Highway Administration, Washington, DC. Extraído de: <http://www.fhwa.dot.gov/legregs/directives/policy/recmatmemo.htm>

[22] Freeman, Thomas E. (june 1994) Evaluation of a Concrete Pavement Restoration Project in Virginia. Extraído de: [http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/94-R16.pdf](http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/94-R16.pdf)

[23] Gustavo A. Badilla Vargas (s.f.) Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo del índice internacional (IRI): aspectos y consideraciones importantes. Extraído de: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/imagenes/publicaciones/cila-05-09.pdf>

[24] Hans Sebastián López Chaparro (2015) análisis comparativo entre diferentes metodologías de diseño para estructuras de pavimento implementando los parámetros de diseño requeridos para el corredor Mulaló – Loboguerrero. Extraído de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13950/ARTICULO%20HANS.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

[25] Higuera Sandoval, Carlos (2009) Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. ISSN 0121- 1129. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, 2010, vol. 19, No. 28.

[26] Hoang, Long (septiembre 2017) Research on the Correlation Between International Roughness Index (IRI) and Present Serviceability Index (PSI), Recommendations on Evaluation Rates in Vietnam's Conditions. International Journal of Engineering Research Technology (IJERT). ISSN: 22780181, Vol. 6 No. 09. Extraído de: <https://www.ijert.org/research>

[27] Ignacio Sánchez S. y Hernán de Solminihaq T. (junio 1989) El IRI: un indicador de la regularidad superficial. Revista de Ingeniería de Construcción No 6. Extraído de: <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/320/264>

[28] Instituto de Estructuras y Transporte (s.f.) Procedimiento de ensayo con Georradar en pavimentos. Extraído de: <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/3728/Procedimiento%20de%20Ensayo%20con%20GPR%20-%20LCCF.pdf>

[29] Instituto de Estructuras y Transporte (s.f.) Procedimiento para medida de deflexiones en pavimentos mediante el Deflectómetro de impacto (FWD). Extraído de: <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/3728/Procedimiento%20FWD.pdf>

[30] INVE-758-07 (2007) Método de extracción de testigos en pavimentos terminados y otras obras estructurales. Extraído de: [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-758-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-758-07.pdf)

[31] INVIAS. (2002). Valores típicos de módulos de capas de pavimentos. Extraído de: <https://www.invias.gov.co/>

[32] Javier Morlaes Olivares (2004) Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo. Extraído de: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI\\_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[33] Juan Carlos Onofre Calderón, Julio César Sánchez Pérez y Walter Santiago Viana (abril 2008) Determinación del Índice de Rugosidad Internacional de pavimentos usando el perfilómetro Romdas Z-250. Extraído de: <http://ri.ues.edu.sv/4385/1/Determinaci%C3%B3n%20del%20indice%20de%20rugosidad%20internacional%20de%20pavimentos%20usando%20el%20perfilometro%20ROMDAS%20Z-250.pdf>

[34] Leonardo Ramos Pérez (marzo de 2018) Estudio del índice de regularidad internacional en vías pavimentadas mediante el uso del perfilómetro láser Romdas. Extraído de: <http://>

tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/11734/RAMOS\_LEONARDO\_VIAS\_PAVIMENTOS\_FILOMETRO\_LASER.pdf?equence=1&isAllowed=y

[35] Luis Altamirano Kauffmann (2007) Deterioro en pavimentos rígidos. Extraído de: <https://docplayer.es>

[36] Luis Sánchez Díaz y Johan Machuca Oliveros (abril 2012) estudio de las fallas en los pavimentos rígidos para el mantenimiento y rehabilitación de las vías principales del municipio de Tamalameque César. Extraído de: <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/782/1/27914.pdf>

[37] Marco Montavalvo Guevara (mayo 2015) Pavimentos rígidos reforzados con fibras de acero versus pavimentos tradicionales. Extraído de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6117>

[38] Mauricio Pradena Miquel (diciembre 2006) Análisis de Regularidad Superficial en Caminos Pavimentados. Extraído de: <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127619380002.pdf>

[39] Michael W: Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D. O. Paterson (1986). World Bank Technical Paper Number 46 “Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements”. ISSN 0253-7494, No. 46.

[40] Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2010) Reglamento para el Control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones, Acuerdo Gubernativo 379-2010. Extraído de: <https://www.caminos.gob.gt/Descargas/Reglamentos/Reglamento%20para%20el%20Control%20de%20Peso%20y%20Dimensiones.pdf>

[41] Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Unidad de Conservación Vial COVIAL (2019) Mapas de la Red Vial de Guatemala: Escuintla. Extraído de: [http://www.covial.gob.gt/mapas/05\\_ESCUINTLA.pdf](http://www.covial.gob.gt/mapas/05_ESCUINTLA.pdf)

[42] Ministerio de Transporte Instituto Nacional de Vías, INVIAS (octubre 2006) Estudio del estado actual de las obras de la Red Nacional de Carreteras: Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos. Extraído de: <https://www.invias.gov.co>

[43] Miranda, R. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos (Pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

[44] Mohammad Zahidul, Islam Bhuiyan, Faisal HJ. Ali, Firas A. Salman (abril 2015) Application of recycled concrete aggregates as alternative granular infills in hollow segmental block systems. Extraído de: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.006>

[45] Morales O., Javier (2004) Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo. Extraído de: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI\\_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[46] Morales O., Javier P. (05 de enero, 2005) Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto utilizando sobrecapas de refuerzo. Extraído de: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI\\_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1343/ICI_129.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[47] Pérez Loarca, Karla (octubre 2005) Uso del perfilómetro inercial con sensores láser para la determinación del IRI y sus aplicaciones en la ingeniería vial. Extraído de: <http://>

biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\_2544\_C.pdf

[48] Pérez, Alfonso; Garnica, Paul; Gómez, José Antonio; Itandehui, Guadalupe (2004) Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. Extraído de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt252.pdf>

[49] Sánchez, F. (2014). Sobre el Índice de estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales. Cámara Colombiana de la Infraestructura: Bogotá.

[50] Snyder, Mark B. (september 2018) Concrete pavement recycling and the use of recycled concrete aggregate (RCA) in concrete paving mixtures. Extraído de: [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2019/02/RCA\\_TB1\\_introduction.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2019/02/RCA_TB1_introduction.pdf)

[51] Thenoux y Gaete (2012) Evaluación técnica del pavimento y comparación de métodos de diseño de capas de refuerzo asfáltico. Extraído de: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/364/pdf>

[52] UNAM (s.f.) Diseño y conservación de pavimentos rígidos. Extraído de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/504/A6%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20R%C3%ADgidos.pdf?sequence=6>

[53] Wienrank, Charles J. y Lippert, David L. (January 2005) Illinois performance study of pavement rubblization. Extraído de: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec087.pdf>

[54] Won, M. (2007) Use of Crushed Concrete as Aggregates in Continuously Reinforced Concrete Pavement. Paper presented at the International Conference on Best Practices for Concrete Pavements, October 21–23, Recife, Pernambuco, Brazil.



1. **Deflexión:** medida de las deformaciones elásticas que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo, estado del pavimento y sus alrededores.
2. **Ensayo no destructivo:** aquellos que no alteran la distribución de esfuerzos del pavimento y cuya ejecución no requiere alterar el pavimento existente.
3. **Escalonamiento:** parámetro que representa la diferencia, ya sea positiva o negativa, del nivel de los bordes de las juntas transversales y/o longitudinales entre dos losas de concreto hidráulico.
4. **Estratigrafía:** detalle del tipo y espesor de los materiales que conforman una estructura de pavimento.
5. **Falling Weight Deflectometer:** equipo de medición que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad, a través de una masa suspendida que se eleva y luego se deja caer sobre una placa que se ha situado en la superficie del pavimento.
6. **Ground Penetrating Radar:** también conocido como georadar, equipo de medición que permite auscultar el pavimento en toda su profundidad, o parcialmente, para determinar espesores de las capas del pavimento e identificar defectos de este. Basado en el coeficiente dieléctrico de los materiales.
7. **Índice Internacional de Rugosidad:** parámetro universal de la medida de la regularidad o rugosidad superficial de un pavimento.
8. **Índice de Serviciabilidad Presente:** parámetro de la condición de la carretera, la serviciabilidad es la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento, en este se incluye se incluyen, dependiendo del tipo de pavimento, mediciones de ahuellamiento, agrietamiento, baches e irregularidades del pavimento, entre otros.
9. **Módulos de elasticidad:** parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación.

10. **Módulo de pavimento:** es el módulo de respuesta elástico del pavimento, en la totalidad de sus capa, ante las cargas dinámicas.
11. **Módulos de resiliencia de subrasante:** valor medido o estimado en la parte superior del suelo (subrasante) donde se asienta las capas del pavimento
12. **Patologías:** daños que se pueden presentar en un pavimento rígido pueden dividirse en cuatro categorías generales: grietas, deterioro de las juntas, deterioro superficial y otros deterioros.
13. **Perfilómetro:** vehículo con un instrumento que mide los perfiles longitudinales en ambas huellas de rodadura al conducir a lo largo de una carretera, donde la referencia inercial se consigue a través de acelerómetros verticales.
14. **Perfil longitudinal:** serie de elevaciones en puntos separados por una distancia pequeña en el sentido longitudinal del pavimento.
15. **Rublizado de concreto:** procedimiento destructivo que rompe una losa de hormigón existente en pequeños fragmentos in situ.
16. **Reciclado de concreto:** procedimiento constructivo que implica la rotura, eliminación, trituración y procesamiento de hormigón endurecido para producir un agregado de hormigón reciclado, un material granular que generalmente se puede utilizar como sustituto del agregado virgen en diversas aplicaciones.
17. **Restauración de pavimentos de hormigón:** una serie de técnicas de ingeniería que repara áreas aisladas de deterioro en un pavimento de hormigón.
18. **Retrocálculo:** metodología de evaluación estructural no destructiva que utiliza la respuesta del sistema pavimento-subrasante para establecer sus características estructurales.
19. **Rugosidad:** desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica.
20. **Serviciabilidad:** nivel de servicio que presta un pavimento durante su periodo de vida útil.