

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y
FUNCIONAL DE LA VÍA CUENCA - MOLLETURO - NARANJAL, EN
EL TRAMO PUENTE TAMARINDO - JESÚS MARÍA”

Tesis de grado previa a la obtención del Título de
Ingeniero Civil

Autores:

Luis Miguel Abad Regalado

C.I. 0302618319

Alvaro Marcelo Sangurima Armijos

C.I. 0105466734

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez., PhD

C.I. 0102857885

Enero - 2018



RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza la evaluación del estado funcional y estructural del tramo comprendido entre las abscisas 107+000 a 117+000 de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal. En función de este análisis se busca determinar si existe una relación entre las características funcional y estructural en dicha vía. Para la evaluación funcional se ha partido de la obtención del Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual se basa en la observación directa de patologías presentes en la superficie del pavimento; mientras que, la evaluación estructural parte de la determinación del módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de hormigón. Para llevar a cabo este análisis se ha utilizado el deflectómetro de impacto FWD, cuyos resultados permiten la evaluación del estado estructural mediante el procedimiento del método AASHTO, adicionalmente, se utilizó el software Elmod 6 para obtener un segundo análisis del módulo de elasticidad de la losa de hormigón. Los resultados de este trabajo muestran, en cuanto a la evaluación funcional, que el tramo de vía analizado se encuentra en su totalidad en buenas condiciones, con un índice PCI igual a 72. Por otra parte, la evaluación estructural determinó que el módulo de reacción de la subrasante califica como Alto y Muy Alto, permitiendo confirmar que la vía se encuentra en buen estado estructural. De la misma manera, el cálculo del módulo de elasticidad dio como resultado valores que se encuentran dentro del rango adecuado. Finalmente, tras realizar una serie de correlaciones entre los parámetros funcionales y estructurales no fue posible encontrar una relación directa entre ellos.

PALABRAS CLAVE: Índice de Condición del Pavimento, módulo de reacción de la subrasante, módulo de elasticidad, evaluación funcional, evaluación estructural, correlación.



ABSTRACT

In the present degree work, we perform the evaluation of the functional and structural conditions of the section between the abscissas 107 + 000 to 117 + 000 of the track Cuenca - Molleturo - Naranjal. Based on this analysis, it is sought to determine if there is a relationship between the functional and structural characteristics in said track. The functional evaluation has been based on obtaining the Condition Index of the Pavement (PCI), which is based on the direct observation of present pathologies on the surface of the pavement; whereas, the structural evaluation starts from the determination of the reaction modulus of the subgrade and the modulus of elasticity of the concrete slab. To carry out this analysis the FWD impact deflectometer has been used, whose results allow the evaluation of the structural condition by means of the AASHTO method, in addition, the Elmod 6 software was used to obtain a second analysis of the modulus of elasticity of the slab of concrete. The results of this work show, in terms of the functional evaluation, that the section of the analyzed route is in its entirety in good conditions with a PCI index equal to 72. On the other hand, the structural evaluation determined that the reaction module of the subgrade qualifies as High and Very High, allowing to confirm that the track is in good structural condition. In the same way, the calculation of the modulus of elasticity resulted in values that are within the appropriate range. Finally, after making a series of correlations between the functional and structural parameters it was not possible to find a direct relationship between them.

KEY WORDS: Pavement Condition Index, reaction modulus of the subgrade, modulus of elasticity, functional evaluation, structural evaluation, correlation.



Índice general

Dedicatoria	17
Agradecimientos	18
1. Introducción	19
1.1. Antecedentes	20
1.2. Alcance	21
1.3. Justificación	21
1.4. Zona de estudio	22
1.5. Objetivos	22
1.5.1. General	22
1.5.2. Especificos	22
1.6. Metodología	24
2. Marco teórico	25
2.1. Conceptos generales	25
2.2. Evaluación funcional	26
2.2.1. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)	27
2.2.2. Índice de Serviciabilidad (PSI)	27
2.2.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI)	27
2.3. Evaluación estructural	30
2.3.1. Viga Benkelman	31
2.3.2. Deflectómetro Lacroix	31
2.3.3. Deflectómetro de Impacto (FWD)	32
2.3.3.1. Localización de los ensayos	33



2.3.3.2.	Ubicación de los sensores	34
2.3.3.3.	Análisis del cuenco de deflexión	34
2.3.3.4.	Procesamiento de información FWD	36
2.3.4.	Método AASHTO 1993	37
2.3.5.	Software ELMOD 6	38
2.3.6.	Parámetros estructurales	39
2.3.6.1.	Módulo de reacción de la subrasante	39
2.3.6.2.	Módulo de elasticidad	40
2.4.	Secciones homogéneas	41
2.5.	Análisis de correlación	41
2.5.1.	Análisis de regresión	42
2.5.2.	Correlación	42
2.6.	Relación entre parámetros del desempeño del pavimento	43
2.6.1.	Relación entre parámetros funcionales	44
2.6.2.	Relación entre parámetros funcionales y estructurales	44
3.	Materiales y Métodos	46
3.1.	Evaluación funcional - PCI	46
3.1.1.	Unidades de muestreo	47
3.1.2.	Selección de las unidades de muestreo a inspeccionar	48
3.1.3.	Levantamiento visual de daños en el pavimento	49
3.1.4.	Equipo	49
3.1.5.	Cálculo del PCI de las unidades de muestreo	49
3.1.6.	Cálculo del PCI en el tramo de pavimento analizado	51
3.2.	Evaluación estructural – FWD	51
3.3.	Método AASHTO	53
3.3.1.	Módulo de reacción de la subrasante	53
3.3.1.1.	Ejemplo de aplicación	54
3.3.2.	Módulo de elasticidad	57
3.3.2.1.	Ejemplo de aplicación	58
3.4.	ELMOD 6	59
3.4.1.	Ejemplo de aplicación	61
3.5.	Secciones homogéneas	64



3.6. Análisis de correlación	67
4. Análisis de resultados	68
4.1. Evaluación funcional	68
4.1.1. Inventario de deterioros	68
4.1.2. Índice de condición del pavimento	71
4.2. Evaluación estructural	74
4.2.1. Módulo de reacción de la subrasante por el método AASHTO	74
4.2.2. Módulo elástico de la losa de concreto por el método AASHTO	76
4.2.3. Módulos de elasticidad utilizando el programa ELMOD 6	77
4.2.4. Módulos de elasticidad: Método AASHTO vs Software EL- MOD 6	79
4.3. Análisis de correlación entre estado funcional y estructural	79
4.3.1. Alternativa 1: PCI vs Módulo de reacción de la subrasante . .	80
4.3.2. Alternativa 2: PCI vs Módulo de elasticidad de la losa de hor- migón	81
4.3.3. Alternativa 3: PCI de 3 losas vs Módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de concreto .	81
4.3.4. Alternativa 4: Módulo de reacción de la subrasante vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto para un PCI de 3 losas constante	83
5. Conclusiones y recomendaciones	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Recomendaciones y posibles investigaciones	86
5.2.1. Recomendaciones	86
5.2.2. Posibles investigaciones	87
Bibliografía	88
A. Formatos para el registro de datos propuestos por la ASTM D6433	93
A.1. Formato para el registro de patologías presentes en pavimentos flexibles.	93
A.2. Formato para el registro de patologías presentes en pavimentos rígidos.	94



B. Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional.	95
C. PCI para cada unidad de muestro	100
D. Seccionas homogeneas	102
E. Módulo de reacción de la subrasante	106
F. Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el método AASHTO.	110
G. Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el software ELMOD 6 para un sistema bicapa.	114
H. Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el software ELMOD 6 para un sistema de 3 capas.	118
I. PCI para unidades de muestro compuestas por 3 losas.	122
J. Datos crudos obtenidos en la evaluación estructural con el deflectómetro de impacto.	124
K. Anexo fotográfico: Evaluación funcional y estructural del pavimento.	126



Índice de figuras

1.1. La figura (a) muestra la ubicación y todo el recorrido de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal y la figura (b) indica el tramo de vía evaluado entre las abscisas 107+000 y 117+000, ubicada en medio del puente Río Tamarindo y Jesús María. Fuente: Google Earth.	23
2.1. Deflectómetro de impacto del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.	33
2.2. Deflexiones normalizadas con respecto a la ubicación de los geófonos (Quintus y Simpson, 2002).	35
2.3. Modelo de resorte elástico propuesto por Westergaard.	40
2.4. Valores de r y sus implicaciones.	43
3.1. Unidades de muestreo evaluadas y no evaluadas.	48
3.2. Ubicación de los puntos evaluados.	52
3.3. Interfaz gráfica del programa ELMOD 6 de ingreso de datos generales.	60
3.4. Espesores de capa en todo el largo del tramo analizado.	61
3.5. Interfaz gráfica para estimar los módulos de elasticidad de cada capa.	62
3.6. Datos de las deflexiones cargados en el software ELMOD 6.	63
3.7. Datos generales del pavimento cargados en el software ELMOD 6.	64
3.8. Espesores de capa en todo lo largo del tramo analizado.	64
3.9. Interfaz gráfica del programa ELMOD 6 con los valores reales ingresados.	65
3.10. Errores medios cuadráticos que presenta el programa.	66
3.11. Concepto del método de las diferencias acumulativas.	66
4.1. Fisuras estructurales que presenta un pavimento rígido.	69
4.2. Losa dividida y punzonamiento presentes en el pavimento rígido.	70



4.3. PCI de las unidades de muestreo comprendido entre las abscisas 107+000 y 117+000.	72
4.4. Determinación de las secciones homogéneas.	73
4.5. PCI promedio agrupado por secciones homogéneas.	73
4.6. Módulo de reacción de la subrasante.	75
4.7. Módulo de reacción de la subrasante.	76
4.8. Modelo para el retrocálculo en ELMOD 6.	78
4.9. Módulo de elasticidad de la losa de concreto para un sistema bicapa.	78
4.10. Correlación entre los módulos de elasticidad AASHTO vs ELMOD 6.	79
4.11. PCI vs Módulo de reacción de la subrasante.	80
4.12. Correlación entre PCI vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto.	81
4.13. Correlación del PCI con el módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de concreto.	82
4.14. Módulo de reacción de la subrasante vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto.	83
K.1. Fisuras estructurales que presenta un pavimento rígido.	127
K.2. Ensayos realizados con el deflectómetro.	128



Índice de Tablas

2.1. Escala de calificación de la serviciabilidad (Corros et al., 2009)	28
2.2. Patologías en los pavimentos rígidos (Vázquez Varela, 2002).	30
2.3. Disposición de los sensores según la SHRP para 9 sensores (Schmalzer, 2009).	34
2.4. Módulos semilla típicos propuestos por la guía AASHTO (Guillén Pérez, 2009).	39
2.5. Módulos típicos de materiales para conformar capas de pavimento (University of California Pavement Research Center, 2008)	41
2.6. Clasificación según el grado de correlación (Montgomery y Runger, 2011)	42
3.1. Índice de Condición del Pavimento (PCI) - Escala de calificación (ASTM D6433, 2011).	47
3.2. Datos exportados por el deflectómetro.	55
3.3. Espesores de la estructura del pavimento (Trujillo, 2014).	60
4.1. Porcentaje de losas afectadas por grietas de esquina y lineales.	69
4.2. Porcentaje de losas afectadas.	70
4.3. Módulos de elasticidad para cada sección homogénea.	77
B.1. Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (1/4) .	96
B.2. Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (2/4) .	97
B.3. Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (3/4) .	98
B.4. Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (4/4) .	99
C.1. PCI para cada unidad de muestro con su respectivo abscisado.	101



D.1. Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (1/3)	103
D.2. Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (2/3)	104
D.3. Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (3/3)	105
E.1. Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (1/3)	107
E.2. Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (2/3)	108
E.3. Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (3/3)	109
F.1. Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (1/3)	111
F.2. Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (2/3)	112
F.3. Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (3/3)	113
G.1. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (1/3)	115
G.2. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (2/3)	116
G.3. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (3/3)	117
H.1. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (1/3)	119
H.2. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (2/3)	120
H.3. Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (3/3)	121
I.1. PCI para unidades de nuestro compuestas por 3 losas	123



J.1. Datos crudos obtenidos en la evaluación estructural con el deflectómetro de impacto 125



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo Luis Miguel Abad Regalado en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL DE LA VÍA CUENCA – MOLLETURO – NARANJAL EN EL TRAMO PUENTE TAMARINDO – JESÚS MARÍA”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de Enero del 2018

Luis Miguel Abad Regalado

C.I: 0302618319



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo Luis Miguel Abad Regalado, autor del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL DE LA VÍA CUENCA – MOLLETURO – NARANJAL EN EL TRAMO PUENTE TAMARINDO – JESÚS MARÍA”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de Enero del 2018

Luis Miguel Abad Regalado

C.I: 0302618319



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo Alvaro Marcelo Sangurima Armijos en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL DE LA VÍA CUENCA – MOLLETURO – NARANJAL EN EL TRAMO PUENTE TAMARINDO – JESÚS MARÍA”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de Enero del 2018

Alvaro Marcelo Sangurima Armijos

C.I: 0105466734



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo Alvaro Marcelo Sangurima Armijos, autor del trabajo de titulación “ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL DE LA VÍA CUENCA – MOLLETURO – NARANJAL EN EL TRAMO PUENTE TAMARINDO – JESÚS MARÍA”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de Enero del 2018

Alvaro Marcelo Sangurima Armijos

C.I: 0105466734



Dedicatoria

A mi hijo Mateo y mi esposa María del Carmen por acompañarme durante este largo camino. A mis padres Miguel e Isabel por todo el apoyo brindado a lo largo de mis estudios, creer en mí y brindarme su apoyo incondicional. A mis hermanas Elizabeth, Fernanda y Karina por haberme brindado la confianza y seguridad de salir adelante.

Luis Miguel

A Dios por permitirme llegar a este punto. A mi padre Eduardo por enseñarme el valor de la perseverancia y el camino a la superación. A mi madre Rebeca por ser la persona que me ayudo a crecer y estar siempre conmigo en todo momento. A mis hermanos William y Mónica por el apoyo que siempre me brindaron.

Alvaro



Agradecimientos

Creemos justo expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Jaime Bojorque Iñiguez, PhD. por dedicar su tiempo y esfuerzo en la tutoría de este proyecto, por su apoyo absoluto e incondicional y por sus consejos, sugerencias y correcciones a lo largo de toda la realización de esta tesis. De la misma forma, queremos agradecer a la Ing. Janneth Lojano coordinadora del Departamento de Geotecnia del Ministerio de Transporte y Obras Públicas por brindarnos las facilidades para llevar a cabo este proyecto.

Luis Miguel y Alvaro



Capítulo 1

Introducción

Durante la vida útil de una vía, el pavimento está expuesto a diversos factores naturales como lluvia, variaciones de temperatura, cambios volumétricos y a las cargas producidas por el tráfico, los cuales deterioran gradualmente el pavimento (Montejo Fonseca, 2006). Este deterioro provoca disminución en el nivel de servicio, por lo que, debe ser evaluado de forma certera para programar obras de conservación y mejoramiento que permitan prolongar la vida de la estructura al menor costo posible.

Existen principalmente dos tipos de evaluaciones de pavimentos, el primero corresponde a la evaluación funcional, la cual establece el estado superficial de la vía mediante la evaluación de la calidad de rodaje del pavimento (Corros et al., 2009), la cual, a pesar de estar asociada a la capacidad estructural, no necesariamente es un indicativo estructural ya que, pueden existir sectores con buena transitabilidad y sin embargo ostentar una estructura débil que con el paso de las cargas vehiculares se fatigará y presentará agrietamientos severos. Las diferentes fallas que presenta la capa de rodadura se evalúan mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI – por sus siglas en inglés). Esta metodología consiste en evaluar el pavimento mediante una inspección visual con la finalidad de registrar distintas patologías presentes a lo largo de la vía, éstas dependen del tipo, cantidad y severidad de las fallas presentes (ASTM D6433, 2011).

El segundo tipo de evaluación es la estructural, tradicionalmente se han empleado métodos destructivos para determinar esta condición, tales como perforaciones, las



cuales alteran el comportamiento del pavimento (Jiménez Sánchez, 1998). Esta metodología es cara, lenta, altera el equilibrio del sistema al perforar y es invasiva, lo que produce alteraciones físicas en los materiales. En la actualidad, se presenta una alternativa no destructiva, la cual determina la capacidad estructural de un pavimento sin alterar su estructura, y se puede realizar en cualquier momento de su vida de servicio (Rondon y Reyes, 2015). Una de las herramientas más utilizadas para determinar el estado estructural de un pavimento es el Deflectómetro de Impacto (FWD – por sus siglas en inglés), el cual imparte una carga que simula el paso de un vehículo estándar provocando un cuenco de deflexiones en el paquete estructural. Posteriormente las deflexiones generadas son registradas y procesadas por métodos de retrocálculo (Higuera Sandoval, 2009).

La información obtenida mediante la determinación del Índice de Condición del Pavimento podría ser complementada, en especial con la medición de deflexiones, con la finalidad de establecer posibles correlaciones entre la condición superficial del pavimento y su deflexión superficial.

1.1. Antecedentes

La vía Cuenca – Molletudo – Naranjal forma parte de la red vial estatal del Ecuador y conecta dos ciudades importantes, Guayaquil y Cuenca, por lo cual es de gran importancia para el desarrollo comercial y turístico de ambas ciudades. Cuenta con una tasa de circulación vehicular alta, el Tráfico Promedio Diario Anual del 2010 (TPDA) es 3.056 automotores (Clavijo, 2011), tiene una longitud de 118 km y está constituida por pavimento combinado, conformado por pavimento flexible y una capa de concreto hidráulico colocada en el 2014. La carretera en Cuenca tiene una altura de 2761 msnm, asciende hasta 4155 msnm en solo 29 km y desciende en la región de la costa hasta la cota 25.2 msnm.

Al ser una vía importante y de gran afluencia de tráfico, es imprescindible que su estado se mantenga en buenas condiciones, por lo cual, en este trabajo se analizará la condición funcional del pavimento, de modo que sirva de guía a las autoridades competentes y permita mantener un estado ideal para el desarrollo comercial y turístico de la zona.



1.2. Alcance

Con este trabajo se determinará la condición funcional del tramo de vía comprendido entre las abscisas 107+000 (Gasolinera PDV) y 117+000 (Jesús María), mediante inspecciones visuales con el fin de determinar el Índice de Condición del Pavimento. Paralelamente, se evaluará el estado estructural del pavimento utilizando un Deflectómetro de Impacto (FWD), y los datos serán procesados por un método de análisis inverso planteado por la AASHTO 1993. Para completar el análisis se utilizará el software ELMOD, que al igual que el método AASHTO 1993 trabaja mediante un proceso de análisis inverso. Este software emplea elementos finitos, teoría elástica lineal y el método de la teoría de espesores. Como parte complementaria a este trabajo, los datos obtenidos en el análisis estructural y funcional serán contrastados con el fin de encontrar una posible correlación entre estos valores. La correlación entre el índice estructural y el funcional se la determinará por métodos de diseño experimental, buscando factores que relacionan ambos criterios. Estos valores permitirán tomar decisiones sobre el mantenimiento a ser efectuado en la vía considerando su desempeño estructural y funcional.

1.3. Justificación

Durante décadas el único indicador utilizado para determinar el estado de una vía en el Ecuador ha sido el grado de deterioro que percibe el usuario, es decir, esperar que las carreteras se encuentren intransitables, generando molestias a los conductores. Para evitar estas incomodidades, alargar la vida útil de los vehículos, favorecer la economía del país y principalmente mejorar las características de la vía, es necesario determinar el estado funcional y estructural del pavimento, esto ayudará a planificación y ejecución de programas de mantenimiento.

El análisis funcional es un procedimiento mucho más económico y se lo realiza en menor tiempo comparado con el análisis estructural, de ahí que poder contar con correlaciones entre estos dos indicadores permitirá tener una evaluación más eficiente, y de este modo tener un sistema de vías en funcionamiento aceptables.



1.4. Zona de estudio

El tramo de estudio está ubicado entre las abscisas 107+000 (Gasolinera PDV) y 117+000 (Jesús María) de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal, se encuentra en la provincia del Guayas. La temperatura en la zona varía desde los 15 hasta los 35,5°C aproximadamente (Trujillo, 2014). El pavimento de la vía inicialmente fue construido con pavimento flexible, pero debido a su baja capacidad y al prematuro deterioro, se optó por realizar una rehabilitación whitetopping, ésta consiste en colocar una sobrecapa de concreto sobre la carpeta asfáltica. El espesor de la capa colocada fue de 20 cm. La Figura 1.1a muestra la trayectoria de toda la vía y la Figura 1.1b indica la ubicación del proyecto.

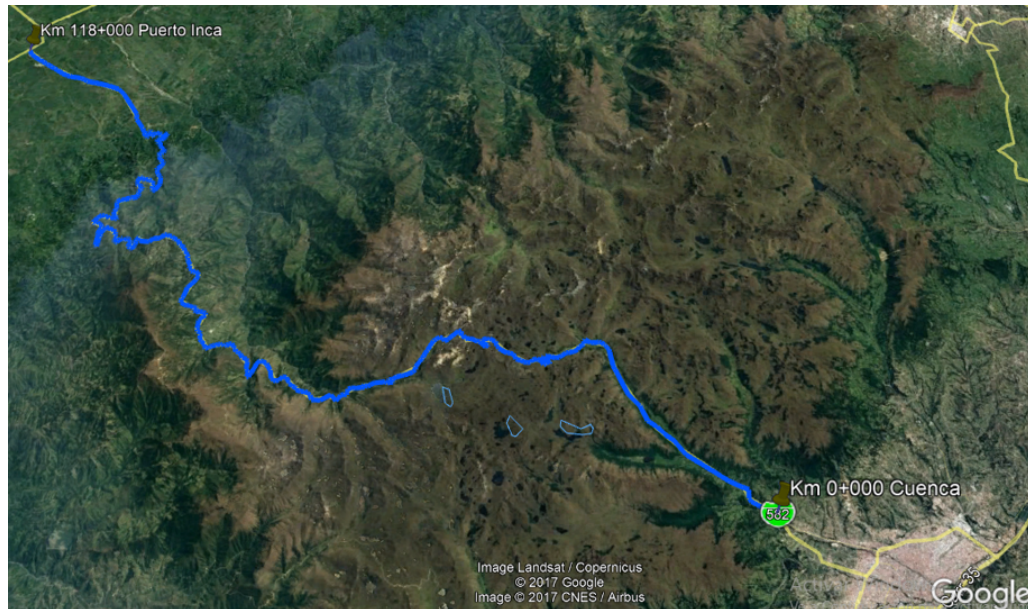
1.5. Objetivos

1.5.1. General

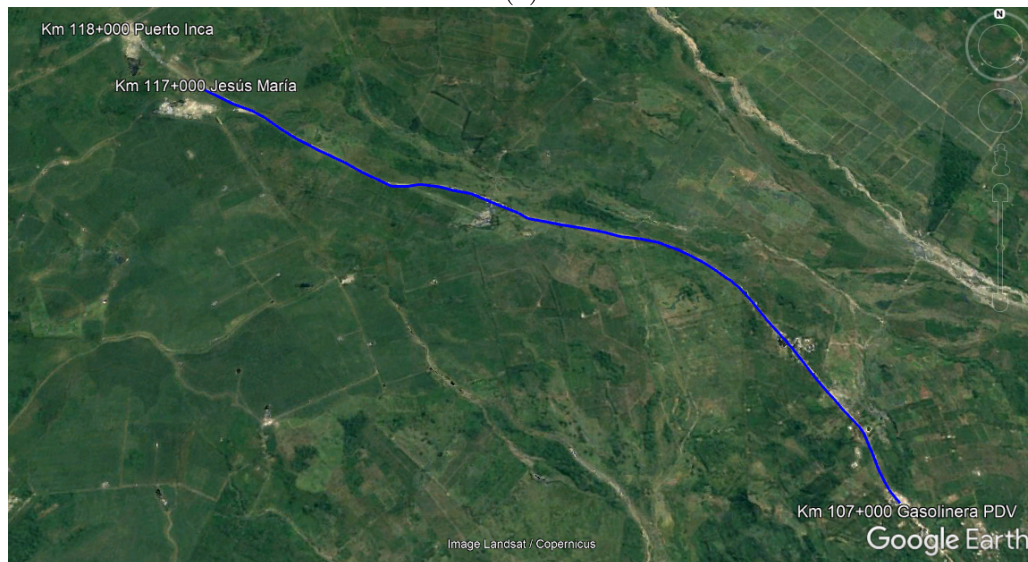
- Evaluar el estado funcional y estructural del pavimento de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal en el tramo Río Tamarindo – Jesús María y analizar una posible relación entre ambos indicadores.

1.5.2. Especificos

- Evaluar el estado funcional del pavimento de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal en el tramo Río Tamarindo – Jesús María a través del índice de condición del pavimento.
- Analizar el estado estructural del pavimento de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal en el tramo Río Tamarindo – Jesús María en función de ensayos no destructivos (FWD).
- Establecer en lo posible, una correlación entre los datos obtenidos en la evaluación funcional y estructural del pavimento.



(a)



(b)

Figura 1.1: La figura (a) muestra la ubicación y todo el recorrido de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal y la figura (b) indica el tramo de vía evaluado entre las abscisas 107+000 y 117+000, ubicada en medio del puente Río Tamarindo y Jesús María. Fuente: Google Earth.



1.6. Metodología

Para desarrollar el presente trabajo, primero se determinará el estado funcional del pavimento, para lo cual, se utilizará como bibliografía base la norma ASTM D6433, este documento presenta el método con la que se debe registrar y procesar los datos obtenidos en la inspección de campo. Para esta inspección no se requiere ningún equipo especial, ya que se trata de una evaluación enteramente manual. En campo se registrará el tipo, cantidad y severidad de las patologías presentes en cada losa de hormigón. Las losas a evaluarse deben estar agrupadas en unidades de muestreo. Se procesará y determinará el Índice de Condición del Pavimento (PCI) para cada unidad de muestreo.

Después de realizar la evaluación funcional, se procederá a determinar el estado estructural, para esto, se utilizará un Deflectómetro de Impacto (FWD). Este es un equipo que a través de un golpe al pavimento simula el paso de un vehículo estandarizado, este golpe genera deflexiones en la estructural del pavimento, las cuales son registradas por el deflectómetro a través de geófonos. Para realizar las mediciones se empleará como guía el documento ASTM D4695. Los datos obtenidos serán procesados a través del método AASHTO 1993 y el software ELMOD 6.

En base a los resultados obtenidos, se analizará y correlacionará los datos de las evaluaciones funcional y estructural con el fin de determinar, en caso de existir, una relación, y de esta manera establecer posibles conclusiones y recomendaciones respectivas.



Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan conceptos generales sobre los pavimentos, su clasificación, composición, procedimientos de rehabilitación, así como los métodos de evaluación del estado del pavimento.

2.1. Conceptos generales

Es necesario empezar definiendo al pavimento como el conjunto de capas superpuestas horizontalmente, asentadas sobre el terreno natural previamente preparado (subrasante). Su función es transmitir los esfuerzos generados por las cargas repetidas del tránsito, así como también, proporcionar una superficie de rodamiento expedita, resistente a la acción del tráfico y de factores externos (Sanchez Sabogal, 1982). Se puede clasificar los pavimentos como flexibles, rígidos y compuestos. Un pavimento flexible generalmente está compuesto por una capa de rodadura de material bituminoso que se asienta sobre capas granulares inferiores llamadas base y subbase. Un pavimento rígido fundamentalmente está constituido por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre una capa granular o directamente sobre el terreno natural (Montejo Fonseca, 2006). Mientras que un pavimento compuesto está constituido por una estructura de pavimento flexible sobre la cual se coloca una sobrecarpeta de concreto hidráulico, o también puede ser un pavimento rígido sobre el cual se coloca una capa de rodadura de hormigón asfáltico. Este tipo de pavimento es muy caro y usado rara vez como construcción nueva, generalmente este tipo de estructura se



observa en pavimentos rehabilitados (Orell, 2009).

Existen diferentes técnicas de rehabilitación de los pavimentos entre los que se tienen: i) colocar una capa de rodadura de asfalto sobre un pavimento flexible (AC¹ sobre AC), o sobre un pavimento rígido (AC sobre PCC², JPCP³ o JRCP⁴) y ii) también se suele colocar una capa de hormigón hidráulico sobre un pavimento rígido (PCC sobre JPCP, JRCP o CRCP⁵), o sobre un pavimento flexible PCC sobre AC (AASHTO, 1993). Esta última es denominada rehabilitación whitetopping. Es una tecnología de rehabilitación que consiste en colocar una capa de concreto hidráulico sobre la capa de rodadura de un pavimento flexible en estado de deterioro. Este método mejora la capacidad estructural, ya que, la sobrecapa de concreto reacciona estructuralmente como si estuviera construida sobre una base fuerte, lo que disminuye fallas como la pérdida de soporte, bombeo, escalonamiento y grietas de esquina. También elimina defectos superficiales como ahuellamiento y desplazamiento (Harrington y Fick, 2014).

Con el fin de determinar el estado de un pavimento se realizan evaluaciones, estas evaluaciones son diagnósticos que se realizan sobre el pavimento y mediante los cuales se determina la vida útil del pavimento. Las evaluaciones pueden ser funcional y estructural.

2.2. Evaluación funcional

Los usuarios perciben la funcionalidad de una vía, es decir la seguridad y confort que sienten al transitar por una vía, por lo que, es de gran importancia garantizar adecuados estados durante la vida útil de una vía. Por tal motivo, para conocer las condiciones superficiales del pavimento se utilizan indicadores o parámetros del estado del pavimento como el índice de rugosidad internacional, índice de serviciabilidad y el índice de condición del pavimento.

La evaluación funcional describe las características que tiene una vía y califica el uso que ésta brinda al tráfico. Para evaluar la funcionalidad de una vía existen

¹AC: Hormigón Asfáltico

²PCC: Hormigón de Cemento Portland

³JPCP: Pavimento Articulado de Concreto Simple

⁴JRCP: Pavimento Articulado de Hormigón Armado

⁵CRCP: Pavimento de Hormigón Continuamente Armado



varios índices los cuales se presentan a continuación:

2.2.1. Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

La característica que refleja el grado de comodidad del usuario al circular por una vía es la regularidad. El índice de rugosidad internacional simula la respuesta de un vehículo al circular por una carretera a 80 km/h. Este índice es recomendable expresarlo en m/km, mm/m o pendiente multiplicada por mil para no manejar valores muy pequeños. Mediante una escala única de valores se puede calificar al pavimento, empezando desde 0, que representa una superficie perfectamente uniforme, hasta 12, siendo un camino intransitable (Corros et al., 2009).

2.2.2. Índice de Serviciabilidad (PSI)

El índice de serviciabilidad (PSI – por sus siglas en inglés) indica la condición de un pavimento en función de la seguridad y confortabilidad que brinda a los usuarios en un determinado momento. El PSI es un indicador que califica el estado superficial de un pavimento en una escala de valoración que va desde 0 (para un pavimento con condición superficial muy pobre) hasta 5 (para un pavimento con condición superficial perfecta) (Corros et al., 2009).

Este parámetro permite definir las prioridades para desarrollar programas de mantenimiento. Por esta razón fue incluido por la American Association of State Highway and Transporting Officials (AASHTO) en los procedimientos de diseños nuevos y rehabilitación de pavimentos. Generalmente, para el diseño de pavimentos nuevos se adopta un PSI inicial de 4.5 (para pavimentos rígidos) y un PSI final de 2.0. La Tabla 2.1 presenta la escala de valoración del PSI, en la cual también, califica y describe el estado superficial del pavimento según su calificación.

2.2.3. Índice de Condición del Pavimento (PCI)

En la actualidad el Índice de Condición del Pavimento (PCI – por sus siglas en inglés) presenta la metodología más completa para la evaluación y calificación de los pavimentos. Para determinar este índice se emplea la norma *ASTM D6433-11. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*



Tabla 2.1: Escala de calificación de la serviciabilidad (Corros et al., 2009)

Calificación		Descripción
Numérica	Cualitativa	
5.0 – 4.0	Muy Buena	Solo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para calificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasifican como muy buenos.
4.0 – 3.0	Buena	Los pavimentos de esta categoría proporcionan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un nivel de deterioro superficial, como desprendimiento leve de material en los bordes de la losa y fisuras menores.
3.0 – 2.0	Regular	La calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en los pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamientos, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamientos, escalonamiento y bombeo.
2.0 – 1.0	Mala	Los pavimentos se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad del tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden presentar grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y ahuellamiento; y ocurre en un 50 % o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye pérdida de material en las juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
1.0 – 0	Muy Mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los cambios se pueden pasar a velocidades reducidas y considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75 % o más de la superficie.

(comúnmente conocida como Método PCI). Se trata de un proceso enteramente manual, el cual, determina el estado de la superficie de un pavimento a partir de



inspecciones viales. Es una metodología de fácil aplicación y no necesita herramientas sofisticadas. Para la evaluación se registra el tipo, cantidad y severidad de las patologías presentes en el pavimento.

- El tipo especifica la degradación que presenta la superficie de un pavimento.
- La severidad representa la intensidad del deterioro en función de su progresión.
- La cantidad hace mención a la longitud o área que se encuentra damnificada por cada deterioro (para pavimentos rígidos la calificación de la extensión será representada por el número de veces que se repita dicha falla en una o varias losas).

Estas patologías generalmente se clasifican en dos grupos: funcionales y estructurales, siendo estas últimas las que afectan de manera negativa el rendimiento del paquete estructural del pavimento, disminuyendo la capacidad de respuesta frente a cargas externas. Por otro lado, las fallas funcionales ocasionan deterioros en la calidad de la superficie, afectando en el confort o serviciabilidad de la vía de manera considerable (Huang, 2004).

La clasificación de las patologías que se pueden presentar en un pavimento rígido se muestran en la Tabla 2.2.

Según el estudio realizado en Wisconsin (Wen et al., 2010), las patologías que comúnmente se presentan en un pavimento con rehabilitación whitetopping son:

- **Grietas de esquina:** es comúnmente observada cuando el límite de fatiga del concreto se excede. Esta patología es directamente influenciada por la resistencia del concreto que a su vez es influenciado por la capa de asfalto subyacente.
- **Grietas longitudinales y transversales:** al igual que las grietas de esquina, esta falla se presenta cuando el límite de fatiga es excedido y también se puede dar por la posible presencia de vacíos bajo la losa.
- **Fallas de borde:** existen hipótesis de que la patología se genera debido a las altas tensiones verticales introducidas cerca de las juntas longitudinales.

Tabla 2.2: Patologías en los pavimentos rígidos (Vázquez Varela, 2002).

Fallas presentes en pavimentos rígidos	Fallas de superficie	Asentamientos Baches Bombeo Escalonamiento Fisuras ligeras Superficie pulida
	Grietas o agrietamientos	Longitudinales Transversales Diagonales De Esquina De Borde Sinuosa Losa dividida Punzonamiento
	Fallas en juntas	Desplazamiento Pérdida de materiales Pérdida de adherencia concreto/sello Falta de cohesión en el material de sello Extrusión del materia de sello

- **Descascaramiento de las juntas:** se pueden presentar por micro fisuras generadas por la carga de tráfico aplicada en un hormigón a temprana edad o debido a la trituración del material localizado en los bordes.

2.3. Evaluación estructural

Existen métodos para determinar la condición estructural de un pavimento, tradicionalmente se han empleado métodos destructivos para determinar esta condición, tales como perforaciones, las cuales alteran el comportamiento del pavimento (Jiménez Sánchez, 1998). Esta metodología es cara, lenta, altera el equilibrio del sistema al perforar y es destructiva, lo que produce alteraciones físicas en los materiales. En la actualidad se presenta una alternativa no destructiva, la cual determina la capacidad estructural de un pavimento sin alterar su estructura y se puede realizar en cualquier momento de su vida de servicio (Rondon y Reyes, 2015).



Los métodos no destructivos se basan en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie del pavimento y proporcionan información que se usa para la evaluación estructural de pavimentos nuevos o en servicio. Estas mediciones se realizan utilizando equipos portátiles como la Viga Benkelman, el Deflectómetro Lacroix y el Deflectómetro de Impacto (FWD) (Montejo Fonseca, 2006).

A partir de las deflexiones provocadas en el pavimento se puede determinar los siguientes parámetros:

- Módulo de elasticidad de cada capa de la estructura del pavimento
- Rigidez general del paquete estructural del pavimento
- Eficiencia de transferencia de carga en juntas de pavimentos rígidos
- Módulo de reacción de la subrasante
- Espesor efectivo, número estructural o soporte del suelo.

2.3.1. Viga Benkelman

Es un instrumento sencillo de operación manual y es probablemente el método más usado para medir deflexiones en pavimentos flexibles debido a su versatilidad, simpleza y precio bajo. En pavimentos rígidos no es común debido a la poca carga que este proporciona al pavimento. Este aparato consiste básicamente en una palanca simple sujeta a un marco de aluminio ligero o de madera, una punta de sondeo y un medido que detecta la deflexión bajo la carga aplicada (un eje estándar) (Jiménez Sánchez, 1998).

2.3.2. Deflectómetro Lacroix

Es un deflectómetro de registro automático, cuenta con dos vigas Benkelman montadas en un vehículo (una a cada lado). Registra las deflexiones mientras viaja a 1.8 km/h. Inicialmente la punta de sondeo de las vigas descansa sobre el pavimento delante del eje trasero del vehículo en tres puntos ubicados fuera de la zona de influencia de la carga. A medida que el vehículo avanza registra las deflexiones hasta que los ejes lleguen al nivel de las puntas de sondeo de las vigas. Estas son



levantadas y llevadas nuevamente hacia adelante sin interrumpir su movimiento y se repite el procedimiento para tener una nueva medida. Puede tomar 2000 mediciones individuales por jornada de trabajo (Jiménez Sánchez, 1998).

2.3.3. Deflectómetro de Impacto (FWD)

Es un equipo basado en impulsos de carga las cuales son transmitidas al pavimento por una masa que golpea desde cierta altura a un plato colocado sobre la superficie del pavimento. El equipo cuenta con sensores de medición que modelan un cuenco de deflexiones generado por el impacto de carga para luego calcular las propiedades del pavimento utilizando diversos métodos computacionales. La transmisión de la carga a la estructural es similar a un vehículo estándar. A continuación, se presenta una breve definición de los elementos principales que conforman el deflectómetro (ASTM D4695, 2003):

- **Sistema de instrumentación:** Es el encargado de procesar los datos obtenidos en el ensayo de deflectometría, consta de un computador, el cual controla el funcionamiento de los otros elementos, también registra y procesa los datos obtenidos por los geófonos.
- **Plato de carga:** Es un disco metálico capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. La placa debe estar construida adecuadamente para permitir mediciones de la superficie del pavimento en el centro del plato.
- **Celda de carga:** Es un instrumento capaz de medir con precisión la carga que se aplica perpendicular al plato de carga. Debe ser resistente al agua y a los golpes que puede recibir durante la prueba o el traslado del equipo.
- **Generador de impacto:** es el encargado de generar la caída libre de una masa. Se debe evitar en lo posible, la fricción de la masa con el sistema guía, y se debe revisar que la masa descienda de forma perpendicular a la superficie del pavimento.
- **Transductor de deflexiones:** el deflectómetro de impacto tiene dos tipos de medición. La primera situada encima de la placa de carga llamada célula de

carga que mide la fuerza impartida al pavimento y la segunda los sensores de deflexión (geófonos) que mide el cuenco generado por el impacto de la carga. Estas deflexiones son registradas por el transductor de deflexiones.

En el presente trabajo se evaluará la estructura de un pavimento compuesto utilizando el Deflectómetro de Impacto FWD PRIMAX 2100 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. En la Figura 2.1 se presenta el deflectómetro utilizado.



Figura 2.1: Deflectómetro de impacto del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

La aplicación del ensayo FWD implica una serie de factores a ser tomados en cuenta, previo y durante la puesta en marcha del experimento, como, por ejemplo, la localización de los ensayos, la ubicación de los sensores, el análisis del cuenco de deflexión y el procesamiento de la información obtenida por el deflectómetro. Todos estos elementos se describen a continuación.

2.3.3.1. Localización de los ensayos

La frecuencia longitudinal de los ensayos depende mucho de la extensión de la o las zonas a evaluar, por lo que la ASTM D9465 sugiere que a nivel de red (cuando se trata de una o varias redes viales) se deberá ensayar entre 200 m a 500 m, y a nivel



de proyecto (cuando se evalúa ciertos tramos de una red vial) se ensayará cada 50 a 200 m. Esta distancia va a depender de la condición superficial que se presente en el pavimento.

La variación transversal dependerá del estado superficial del pavimento. Para evaluar el pavimento se recomienda colocar el deflectómetro en el centro geométrico de la losa. Mientras que para determinar la transferencia de carga se debe colocar el plato a un lado de la junta y en el centro de la losa con respecto al eje transversal (ASTM D4695, 2003).

2.3.3.2. Ubicación de los sensores

Generalmente, el espaciamiento de los sensores que registran las deflexiones suelen estar dispuestos a criterio del ingeniero de campo, pero la SHRP (Strategic Highway Research Program) recomienda el siguiente espaciamiento que se presenta en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Disposición de los sensores según la SHRP para 9 sensores (Schmalzer, 2009).

Sensor de deflexión	Espaciamiento
D1	0 mm
D2	203 mm (8")
D3	305 mm (12")
D4	457 mm (18")
D5	610 mm (24")
D6	914 mm (36")
D7	1219 mm (48")
D8	1524 mm (60")
D9	-305 mm (-12")

El sensor D9 está en sentido opuesto a los otros 8, esto se debe a que, es usado para evaluar la transferencia de carga en las juntas.

2.3.3.3. Análisis del cuenco de deflexión

Todos los cuencos generados por el deflectómetro deben ser normalizados a la deflexión ubicada directamente bajo la carga. Las deflexiones normalizadas se dividen en cuatro tipos de cuencos y se presentan en la Figura 2.2.

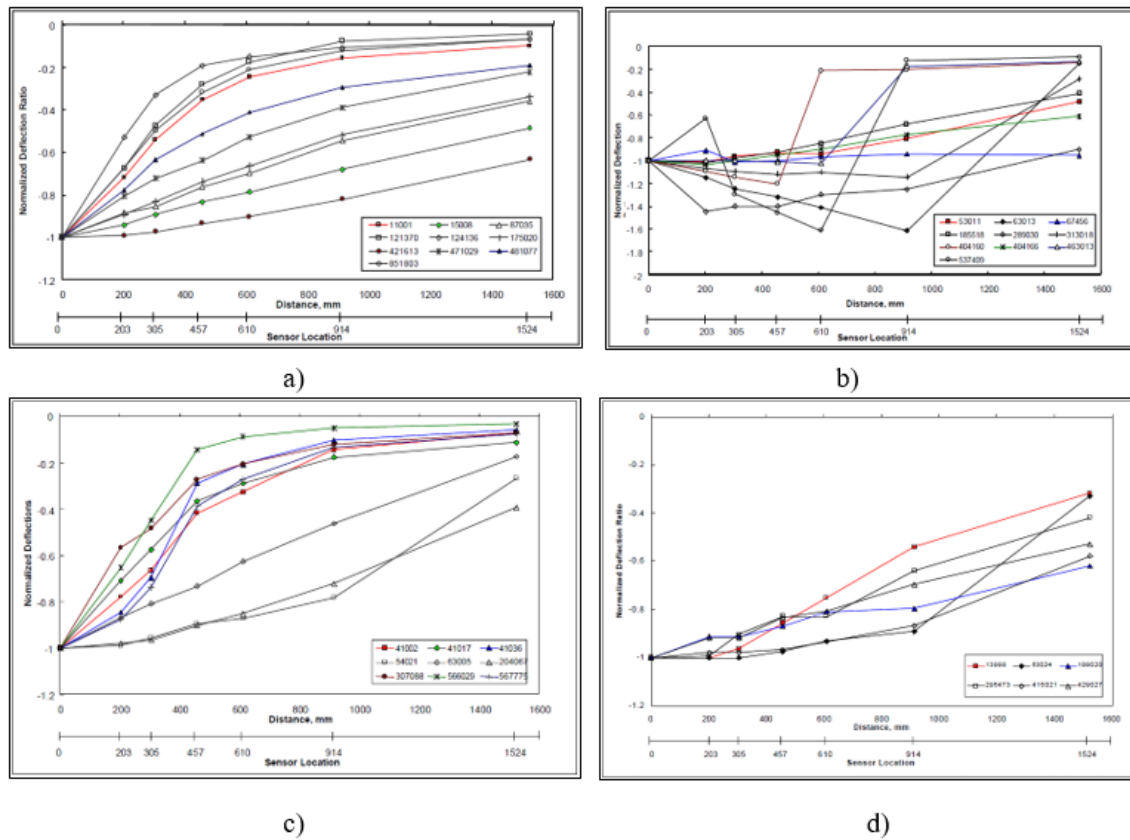


Figura 2.2: Deflexiones normalizadas con respecto a la ubicación de los geófonos (Quintus y Simpson, 2002).

Según la Figura 2.2, se tiene:

- (a) Presenta un cuenco de deflexión normalizada típico, el cual, generalmente presenta un porcentaje de error bajo.
- (b) Muestra un cuenco tipo I donde ciertas deflexiones medidas en algunos sensores son mayores a la deflexión medida directamente debajo de la carga. Comúnmente este comportamiento se da cuando hay presencia de huecos bajo la losa, una pérdida de soporte, etc. Este tipo de cuenco presenta mayores términos de error. Cuando se presentan estos cuencos se recomienda no considerarlos en el análisis de retrocálculo.
- (c) Presenta un cuenco de deflexión tipo II, este se genera habitualmente en pavi-



mentos flexibles cuando se tiene una capa rígida sobre la subrasante. Se observa una disminución significativa en las deflexiones medidas entre dos sensores adyacentes. El error está cerca de un 2% por sensor.

- (d) Muestra un cuenco de deflexión tipo III. En estos cuencos, la deflexión medida en un sensor adyacente (pero más alejado de la carga) es igual o mayor que la deflexión más cercana a la carga. Este comportamiento se da en pavimentos rígidos y por razones similares al cuenco de deflexión tipo I. Este tipo de cuenco no se recomienda utilizar para el análisis de retrocálculo.

2.3.3.4. Procesamiento de información FWD

Es el procedimiento mediante el cual se determina los diferentes parámetros del pavimento por medio de la medición de deflexión sobre la superficie del pavimento. Para estimar los módulos elásticos de cada capa a partir del cuenco de deflexiones existen varios métodos y programas. Hou (1977) desarrolló una solución para un sistema de más de dos capas. Este método consiste en buscar un conjunto de valores de módulo de capa que minimice la suma de las diferencias cuadradas entre las deflexiones calculadas y las deflexiones medidas. Muchos programas de retrocálculo utilizan este enfoque (Von Quintus et al., 2015).

Los métodos de retrocálculo se clasifican en 6 categorías (Lee et al., 2010; Von Quintus et al., 2015):

- **Método iterativo:** Para estimar el módulo de elasticidad de cada capa este procedimiento asume primero un conjunto inicial de valores de módulo para luego calcula repetidas veces las deflexiones teóricas hasta que se aproxime con las deflexiones medidas.
- **Método de base de datos:** Mediante la interpretación lineal de las deflexiones medidas y las deflexiones teóricas este método encuentra un conjunto de valores de módulo.
- **Método de espesor equivalente o de Odemark:** Este método reduce un sistema multicapa a un sistema equivalente con menos capas (generalmente tres o menos). El método de espesor equivalente utiliza los métodos iterativos o de base de datos para encontrar un conjunto adecuado de valores de módulo.



- **Método de cálculo directo o solución de forma cerrada:** Este método utiliza puntos específicos del cuenco de deflexión para calcular directamente los módulos de elasticidad de cada capa. Este método proporciona una solución única para cada cuenco de deflexión. La desventaja de este método es que la solución está limitada a tres o menos capas. El modelo Hogg utiliza el método de cálculo directo para pavimentos flexibles.
- **Método de Boussinesq con rueda simple:** El método de Boussinesq, ampliamente utilizado en la mecánica de suelos, presenta la primera aproximación a la compresión de la presencia de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en suelo semiinfinito, isótropo, donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones, es decir tiene un comportamiento elástico lineal; Boussinesq presentó las soluciones para estos parámetros, originalmente estas ecuaciones presentadas eran solo aplicadas para una carga puntual, pero mediante métodos de integración, la ecuación se desarrolló para cargas distribuidas.
- **Otros métodos:** Se han desarrollado nuevos métodos como el uso de redes neuronales (ANNs), algoritmos genéricos y métodos dinámicos de retrocálculo.

En este estudio para procesar los datos obtenidos en la evaluación estructural por el deflectómetro se usará el método AASHTO el cual utiliza el método de Boussinesq para determinar el módulo de elasticidad de la losa de concreto, mientras que con el software ELMOD 6 se puede utilizar: métodos de elementos finitos, la teoría elástica lineal, el método de espesores equivalentes, entre otros, dependiendo el modo de retroanálisis que se utilice.

2.3.4. Método AASHTO 1993

Esta metodología se basa en conceptos de Boussinesq con la suposición de un sistema bicapa, es decir, modela el pavimento como un conjunto de dos capas, una corresponde a la subrasante y otra corresponde a todas las capas sobre la subrasante. Este método permite determinar el valor del radio de rigidez relativa, módulo de elasticidad de la losa y el módulo de reacción de la subrasante (AASHTO, 1993).

2.3.5. Software ELMOD 6

Debido a la gran cantidad de ensayos que se realizan al evaluar una vía, y por ende al gran número de cuencos de deflexión generados, es necesario el uso de programas computacionales para el facilitar el manejo de datos y cálculo de los diferentes parámetros del pavimento. ELMOD 6 fue desarrollado por Ullidtz, Lytton & Michalak y distribuido por Dynatest. Es un programa que utiliza un método aproximado basado en las ecuaciones de Boussinesq y en el método de Odemark de espesores equivalentes para estimar los módulos de capa (Casia Boza, 2015). ELMOD 6 utiliza tres modos de retroanálisis: Ajuste del cuenco de deflexión, radio de curvatura y FEM/LET/MET.

- **Ajuste del cuenco de deflexión:** Como parámetros de entrada el método requiere módulos de elasticidad estimados de cada capa del pavimento (módulos semilla). A partir de estos valores se genera un cuenco de deflexiones teórico, el cual, es comparado y ajustado con los cuencos obtenidos en campo (los módulos se incrementan o disminuyen en un 10 % típicamente), y si el error en cualquiera de estos cuencos es menor que el cuenco original, se considera una mejor solución. Este proceso se itera hasta que se encuentre un mínimo de error entre los cuencos de deflexión calculados y de medición. El método puede analizar hasta 5 capas. En la Tabla 2.4 se muestra los módulos de elasticidad semilla para diferentes tipos de materiales que suelen constituir la estructura del pavimento.
- **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.
- **FEM/LET/MET:** En este método, el análisis de retrocálculo puede desarrollarse por: Método de Elementos Finitos (FEM), Método de Espesor Equiva-



Tabla 2.4: Módulos semilla típicos propuestos por la guía AASHTO (Guillén Pérez, 2009).

Material	Módulo semilla	
	psi	MPa
Concreto asfáltico	500.000	3.500
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

lente (MET) o Teoría Elástico Lineal (LET). FEM hace uso de una versión modificada de un programa de elementos finitos axial simétrica, desarrollado originalmente por Wilson en la Universidad de California (Duncan, Monismith, y Wilson, 1968). LET utiliza el programa WESLEA (programa elástico lineal multicapa que permite el análisis de una estructura de pavimento, incluyendo los efectos de los sistemas de carga complejas) y MET es similar al método ajuste del cuenco de deflexión, pero con un uso más sencillo de los factores donde ELMOD aplica factores de ajuste directamente en las respuestas calculadas. MET utiliza los factores de ajuste de Odermark, estos son aplicados directamente en los espesores de capa. Por esta razón, los módulos retroanalizados pueden ser diferentes.

2.3.6. Parámetros estructurales

2.3.6.1. Módulo de reacción 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 base). Este módulo puede ser determinado a través de los siguientes métodos:

- Correlación con el tipo de suelo y otras propiedades o ensayos del suelo

- Desempeño del ensayo del plato de carga
- Ensayos de deflexión y retrocálculo

Al determinar las correlaciones con otras propiedades del suelo se utilizan ábacos lo que hace que el método no sea muy preciso. El ensayo del plato de carga es poco usado debido a su alto costo y a que demanda mucho tiempo. Por estas razones, en la actualidad se determina con mayor frecuencia el módulo de reacción utilizando métodos de retrocálculo empleando datos obtenidos de ensayos de deflexión (AASHTO, 1993). En la Figura 2.3 se muestra un esquema basado en la suposición de que la subrasante no transmite esfuerzos de corte y que la reacción de la subrasante es igual a la deflexión de la subrasante multiplicada por una constante k .

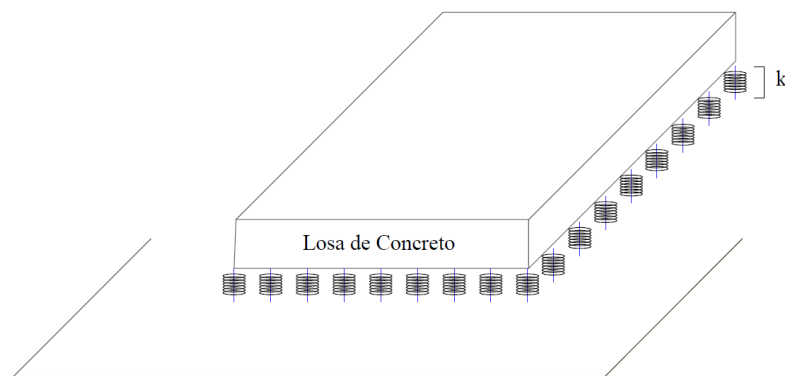


Figura 2.3: Modelo de resorte elástico propuesto por Westergaard.

2.3.6.2. 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. En los pavimentos de hormigón armado, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de retracción del hormigón, son los que rigen el estado de esfuerzos en las armaduras (AASHTO, 1993). En la Tabla 2.5 se muestra el rango de elasticidad para diferentes materiales que usualmente constituyen la estructura del pavimento.



Tabla 2.5: Módulos típicos de materiales para conformar capas de pavimento (University of California Pavement Research Center, 2008)

Material	Rango (MPa)
Mezcla asfáltica en caliente (a 20°C)	3.000 - 4.000
Concreto con cemento portland	14.000 - 56.000
Materiales estabilizados	35 - 14.000
Materiales no estabilizados	35 - 690

2.4. Secciones homogéneas

Al realizar una evaluación se obtiene una gran cantidad de valores, estas series de medición deben dividirse en partes de valores similares para resumir la información que contienen y para generar secciones viales que se manejen de manera significativa como unidades en un sistema de pavimentos. En la actualidad se dispone de muchos métodos para seccionar series de valores, la AASHTO 1993 presenta en el Anexo J el método de las diferencias acumuladas, el cual, compara las secuencias de sumas acumulativas reales en una serie de mediciones con las sumas que se hubiera obtenido al sumar los promedios, es decir, el método busca secciones en las cuales se minimice la suma de los errores al cuadrado con respecto a la serie de datos.

El método también se aplica en series de mediciones discontinuas y nunca constantes, que en realidad son una serie de mediciones de las características del pavimento, que se adaptan fácilmente a una implementación computarizada.

2.5. Análisis de correlación

El propósito de este tema es proporcionar los conceptos básicos para extraer de una fuente extensa de datos las características principales de una relación que existe entre ellos y no es de fácil obtención, para esto, se utilizan técnicas que permitan ajustar una ecuación al conjunto de datos con el propósito de obtener una ecuación empírica de predicción dentro del rango de confiabilidad (Montgomery y Runger, 2011), y por lo tanto, brindar un modelo teórico ajustable para este caso de estudio.

2.5.1. Análisis de regresión

El análisis de regresión es una de las herramientas estadísticas más usadas para asociar variables que no estén relacionadas de una manera no determinística (Canavos, 2001). En este trabajo se presenta la situación en la que solo hay una variable independiente X y una variable dependiente Y , es decir un análisis de regresión. Este análisis presenta el promedio de todos valores correspondientes a un x de cualquier variable. Este promedio es cuantificado por un coeficiente de determinación R^2 , el cual se define como el coeficiente que indica el porcentaje del ajuste que se ha conseguido con el modelo, es decir, el porcentaje de variación de Y que se explica a través del modelo lineal que se ha determinado mediante el comportamiento de la variable X . A mayor porcentaje, mejor es el modelo para predecir el comportamiento de la variable Y (Montgomery y Runger, 2011).

2.5.2. Correlación

El parámetro que determina la interdependencia de dos variables aleatorias X y Y se denomina coeficiente de correlación r , el cual es igual a la raíz del coeficiente de determinación y se encuentra entre -1 y 1 . Un valor de -1 indica una relación lineal negativa perfecta en las variables analizadas, mientras que un valor de 1 indica una relación lineal positiva perfecta entre las dos variables (Canavos, 2001). La Tabla 2.6 presenta el grado de correlación según el rango en el que se encuentre.

Tabla 2.6: Clasificación según el grado de correlación (Montgomery y Runger, 2011)

Correlación perfecta	$r = 1$	$r = -1$
Correlación excelente	r entre 0.9 y 1	r entre -1 y -0.9
Correlación aceptable	r entre 0.8 y 0.9	r entre -0.9 y -0.8
Correlación regular	r entre 0.6 y 0.8	r entre -0.8 y -0.6
Correlación mínima	r entre 0.3 y 0.6	r entre -0.6 y -0.3
Ausencia de correlación	r entre 0 y 0.3	r entre -0.3 y 0

En la Figura 2.4 se observa algunos de los supuestos que se acaban de enunciar para distintos valores de r . La Figura 2.4a muestra que los puntos siguen una tendencia lineal con una inclinación de 45° , esto implica que se tiene una correlación lineal positiva. Cuando los puntos siguen una tendencia lineal, pero con una inclinación

de 135° como se muestra en la figura 2.4b se tiene una correlación lineal negativa. La ausencia de correlación se presenta cuando los puntos están dispersos formando una nube de puntos como muestra la figura 2.4c, es decir, no presentan una forma definida (Montgomery y Runger, 2011).

Cabe recalcar que r es solo capaz de descubrir la presencia de relación de tipo lineal, por lo que en la figura 2.4d no es adecuado usar r como indicador de la fuerza de esa relación, ya que los puntos no siguen una tendencia lineal, pero si presentan una tendencia curva. En este caso, para determinar la correlación se debe transformar los modelos no lineales en lineales, para esto se debe utilizar funciones linealizables (Martínez Bencardino, 2012).

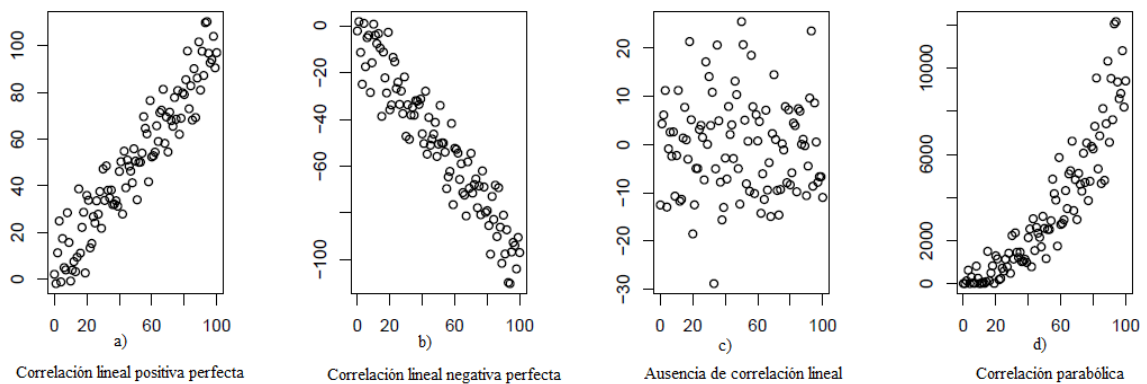


Figura 2.4: Valores de r y sus implicaciones.

2.6. Relación entre parámetros del desempeño del pavimento

En la actualidad se ha buscado optimizar la manera de evaluar los pavimentos tanto funcional como estructuralmente, por lo que, se ha tratado de encontrar relaciones entre los distintos indicadores del estado del pavimento. En esta sección se presentan algunos de los de los tipos de estudios realizados:

2.6.1. Relación entre parámetros funcionales

Un estudio realizado por Mubaraki (2016) en Arabia Saudita ha relacionado el IRI con la densidad de fisuras (CRA), con el ahuellamiento (RUT) y con la erosión de la capa de rodadura (RAV). Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que las tres relaciones presentan un R^2 muy cercano a 0.400 lo que representa que existe una correlación mínima. Al final se concluyó que las relaciones entre el IRI y los otros factores no son lo suficientemente fuertes como para que se utilice el IRI como medida sustitutiva para la condición del pavimento.

Otro estudio realizado por Suryoto et al. (2016) analizó una relación entre el IRI y el PCI, los resultados mostraron que existe una relación lineal entre estos índices igual a $PCI = 0.966 + 10.9919 \cdot IRI$, esto muestra que existe una correlación positiva entre los dos métodos, presentando un R^2 igual a 0.953 lo que indica una buena correlación.

Otro trabajo fue realizado por Hoang (2017) en Vietnam, en esta investigación se descubrió que el PSI y el IRI presentan una relación de R^2 , la cual varía entre 0.8542 a 0.9405, en este caso se considera aceptable utilizar PSI como medida sustitutiva del índice de rugosidad internacional (IRI), y de esta manera optimizar la evaluación de la calidad del pavimento de concreto asfáltico.

2.6.2. Relación entre parámetros funcionales y estructurales

En el año 2009, Flora investigó en el estado de Indiana la relación entre el IRI y ensayos de deflectometría. De este estudio se demostró que hay muy poca correlación estadística entre la deflexión central generada por el deflectómetro de impacto (FWD) y el IRI. Además, un estudio de Nueva Jersey por Zaghoul (1998) determinó que las decisiones basadas únicamente en la condición funcional fueron significativamente diferentes del resultado obtenido con las pruebas de deflexión. Estos resultados muestran que, en muchos casos, los indicadores funcionales son independientes de la condición estructural del pavimento (Bryce et al., 2013), sin embargo, se considera que el deterioro funcional de un pavimento se puede deber a un mal desempeño estructural del mismo.

Un estudio realizado en Iowa por White et al. (2016) determinó que existe una



relación entre el módulo de reacción de la subrasante y PCI, presentando una correlación excelente con un R^2 mayor a 0,95. También se determinó que existe una relación entre el CBR y PCI mostrando una fuerte tendencia exponencial no lineal con PCI con R^2 mayor a 0,95.

En base a estos estudios se ha considerado pertinente buscar una correlación del desempeño funcional y estructural de una vía de la región, en este caso particular de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal tramo Puente Tamarindo - Jesús María.



Capítulo 3

Materiales y Métodos

En la presente sección se desarrollan los métodos utilizados para determinar los parámetros funcionales y estructurales presentes en los pavimentos, así como también, el método para seccionar tramos de vía con características similares. Finalmente, se describen los métodos de correlación con los que se busca definir una posible relación entre el estado funcional y estructural.

3.1. Evaluación funcional - PCI

El índice PCI se desarrolló para ser aplicado en carreteras, calles y estacionamientos, con el fin de proveer al ingeniero un método estándar para determinar la necesidad de mantenimiento y reparación en función de la condición del pavimento. Para determinar el PCI se requiere realizar una inspección visual en campo, con la cual se identificarán las patologías, clasificándolas de acuerdo con su tipo, severidad y extensión. La norma ASTM D6433-11 sugiere un formato para registrar los datos, tanto para pavimentos rígidos como para pavimentos flexibles, los mismos que se presentan en el Anexo A. El valor del índice PCI varía entre 0 para pavimentos fallados y un valor máximo de 100 para pavimentos en excelentes condiciones. En la Tabla 3.1 se presenta los rangos del PCI con su respectiva descripción cualitativa.



Tabla 3.1: Índice de Condición del Pavimento (PCI) - Escala de calificación (ASTM D6433, 2011).

Rango	Calificación
85 - 100	Excelente
70 - 85	Muy Bueno
55 - 70	Bueno
40 - 55	Regular
25 - 40	Malo
10 - 25	Muy Malo
0 - 10	Fallado

3.1.1. Unidades de muestreo

Para evaluar un pavimento se debe dividir el tramo de estudio en unidades de muestreo, generalmente se recomienda inspeccionar todas las unidades de muestreo, pero, de no ser posible, el número mínimo de unidades de muestreo n se determina a partir de la Ecuación 3.1.

$$n = \frac{Ns^2}{\left(\frac{e^2}{4}\right)(N - 1) + s^2} \quad (3.1)$$

donde:

n = Número mínimo de unidades de muestra a evaluar

e = Error aceptable al estimar la sección del PCI ($e = 5\%$)

s = Desviación estándar del PCI entre las unidades de muestra

N = Número total de las unidades de muestreo en la sección

Para iniciar la inspección se asume una desviación estándar de 10 para pavimentos flexibles y 15 para pavimentos rígidos (ASTM D6433, 2011). Si la vía ya ha sido evaluada se recomienda utilizar la desviación estándar real de la inspección anterior. Si el número de unidades de muestreo es menor que 5 se recomienda evaluar todas las unidades del tramo.

Para pavimentos con capa de rodadura de hormigón hidráulico y losas con longitud menor a 7.60 m, se recomienda que el área de la unidad de muestreo esté en el rango de 20 ± 8 losas (ASTM D6433, 2011).

3.1.2. Selección de las unidades de muestreo a inspeccionar

Se recomienda que las unidades de muestreo estén espaciadas a igual distancia a lo largo de la sección, y que, la primera unidad se determine utilizando muestreo aleatorio sistemático (al azar). El intervalo de espaciado i de las unidades a evaluar se calcula con la Ecuación 3.2, redondeando la respuesta al número entero inferior (ejm., 4.8 se redondea a 4).

$$i = \frac{N}{n} \quad (3.2)$$

donde:

N = Número total de unidades de muestreo disponibles

n = Número mínimo de unidades de muestreo a evaluar

La primera unidad de muestreo a inspeccionar se seleccionará al azar de las unidades de muestra de 1 a i . Las unidades de muestreo dentro de la sección que son incrementos sucesivos del intervalo i después de la primera unidad seleccionada al azar también son inspeccionados, es decir: si $i = 4$, la primera unidad de muestreo a inspeccionar puede estar entre 1 y 4. En el caso de que la primera unidad de muestreo sea 1, las subsiguientes unidades de muestreo a inspeccionar serían 5, 9, 13, etc. La Figura 3.1 presenta un esquema que explica las unidades de muestreo que deben ser evaluadas según lo determinado en la Ecuación 3.2.

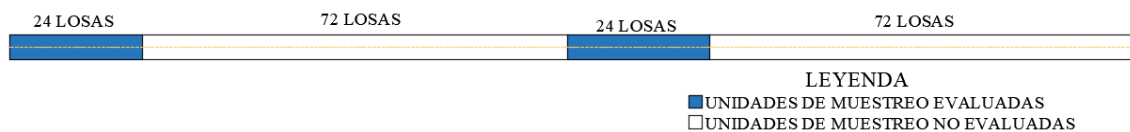


Figura 3.1: Unidades de muestreo evaluadas y no evaluadas.

Si se presentan unidades de muestreo que contengan una patología que se muestre una sola vez en todo el tramo inspeccionado y no sea evaluado, se recomienda registrar estas unidades como unidades de muestreo adicional. Cuando se incluyen estas unidades, el cálculo del PCI cambia levemente.



3.1.3. Levantamiento visual de daños en el pavimento

Una de las primeras actividades a realizar durante la inspección de una carretera con el fin de evaluar la severidad de su deterioro es el levantamiento visual de daños, donde el ingeniero es el responsable de realizar las actividades que se listan a continuación:

- Se examina la unidad de muestreo correspondiente para determinar el tipo, cantidad y severidad de las patologías empleando el Manual de Daños.
- Se registra los datos recolectados en el formato que presenta el Anexo A.2.
- Se utiliza una hoja para cada unidad de muestro.

3.1.4. Equipo

Como parte del equipo necesario para evaluar la superficie del pavimento se necesita:

- Odómetro
- Cinta métrica
- Manual de daños del PCI ([ASTM D6433, 2011](#))

3.1.5. Cálculo del PCI de las unidades de muestreo

Una vez recolectados los datos de campo, se procede a calcular el índice PCI. El procedimiento para determinar este índice es diferente para pavimentos con capa de rodadura asfálticas y de concreto de cemento Portland. Como la vía analizada presenta un tratamiento whitetopping, se describirá el procedimiento para determinar el PCI en pavimentos rígidos.

1) Cálculo de los Valores Deducidos

- Para cada unidad de muestreo se contabilizará el número de losas en las cuales se repite la patología y severidad.



- Se procederá a dividir el número de losas en las que reincide la patología y severidad para el número total de losas de la unidad. Este valor representa la densidad por unidad de muestreo y se expresa en porcentaje.
- Se determinarán los *Valores Deducidos* para cada tipo de daño y nivel de severidad utilizando los ábacos presentes en el Anexo X4. *Deduct value curves for concrete* presentes en el ASTM D6433-11.

2) Cálculo del número Admisible Máximo de Deducidos (m)

- En el caso que no exista ningún Valor Deducido o exista tan solo uno, se utilizará el Valor Deducido Total en lugar del mayor Valor Deducido Corregido (valor que se obtendrá más adelante).
- Se ordenan los valores deducidos de cada patología de mayor a menor.
- Utilizando la Ecuación 3.3 se determina el Número Máximo Admisible de Valores Deducidos.

$$m_i = 1,00 + \frac{9}{98}(100 - HDV_i) \quad (3.3)$$

con:

m_i =Número máximo admisible de valores deducidos,inculuyendo la fracción.

HDV_i = El mayor valor deducido para la unidad de muestreo i.

- Si el número de valores deducidos es mayor a m_i , estos se reducirán a m_i , incluyendo la parte fraccionaria. Si el número de valores deducidos es menor, se utilizarán todos.

3) Cálculo del Máximo Valor Deducido Corregido

- Se determinará el número de valores deducidos mayores a 2.
- Se sumarán todos los Valores Deducidos individuales.



- A partir de estos valores, se emplea el ábaco pertinente al tipo de pavimento analizado, el cual contiene las curvas de correcciones para determinar el *Máximo Valor Deducido Corregido* (CDV – por sus siglas en inglés).

4) Cálculo del PCI

- El PCI de cada unidad de muestreo se determinará restando de 100 al máximo CDV determinado.

3.1.6. Cálculo del PCI en el tramo de pavimento analizado

Al existir varias unidades de muestreo en un tramo de pavimento, el índice PCI de todo el tramo analizado será igual al promedio de todos los PCI calculados en las diferentes unidades. Sin embargo, si durante el análisis de las unidades de muestreo, se usan una o varias unidades adicionales, entonces, el valor del índice PCI será calculado en base al promedio ponderado, utilizando la Ecuación 3.4.

$$PCI_S = \frac{(N - A) * PCI_R + (A * PCI_A)}{N} \quad (3.4)$$

donde:

PCI_S = PCI de todo el tramo analizado

PCI_R = PCI promedio de las unidades de muestro aleatorias

PCI_A = PCI promedio de las unidades de muestreo adicionales

N = Número total de unidades de muestreo del tramo analizado

A = Número adicional de unidades de muestro

3.2. Evaluación estructural – FWD

Para determinar el estado estructural del pavimento se utiliza el Deflectómetro de Impacto, este equipo brinda un método eficiente de evaluación, ya que, realiza ensayos no destructivos, con el fin de registrar las deflexiones producidas en la superficie del pavimento generadas al dejar caer una carga sobre un plato asentado en el pavimento.

El deflectómetro está acoplado a un remolque que se debe conectar a un vehículo. Para usar el equipo se debe proceder de la siguiente manera (ASTM D4694, 1996):

- Se coloca el deflectómetro sobre la zona de prueba deseada, el equipo debe estar detenido.
- Con ayuda de un software que incluye el equipo, se desciende el plato y los sensores sobre la superficie del pavimento, al mismo tiempo, la masa que genera el golpe sobre el plato se eleva a una altura, tal que, al caer imparta la fuerza deseada.
- Al caer, la masa genera desplazamientos verticales en el pavimento, esta información es registrada por los geófonos. Se debe registrar mínimo tres golpes para asegurar que la repetitividad de la medición este dentro de un rango aceptable de variación. La diferencia entre mediciones debe ser menor al 3% para cada sensor.
- Se levanta el plato y los geófonos, y se avanza al siguiente punto.

Al tratarse de un pavimento rígido los golpes son impartidos en el centro geométrico de la losa y en las juntas para determinar la transferencia de carga. Para el presente estudio se realizaron pruebas generales a nivel de proyecto, por lo que, cada prueba se realizó a 200 m metros carril y 100 metros eje como se ilustra en la Figura 3.2.

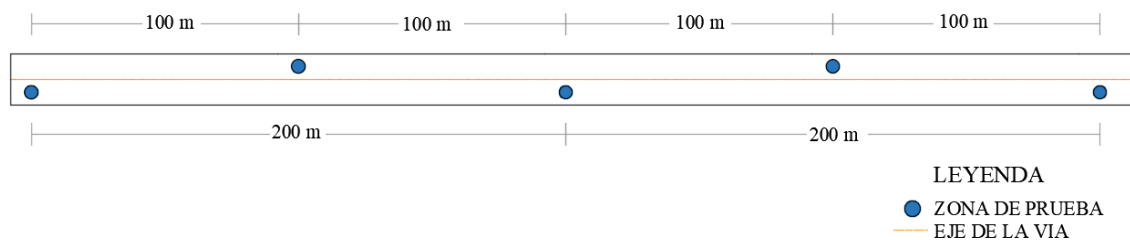


Figura 3.2: Ubicación de los puntos evaluados.

Se recomienda verificar que el lugar donde se realice las pruebas esté limpio y sin material suelto de tal forma que asegure un adecuado asiento de la placa de carga.



3.3. Método AASHTO

3.3.1. Módulo de reacción de la subrasante

Con los datos obtenidos se procede a determinar el radio de rigidez relativa y a partir de este se determinará el módulo de reacción de la subrasante. El suplemento de la AASHTO *Guide of pavement Structures 'Part II, - Rigid Pavement Design and Rigid Pavement Joint Design'* presenta las siguientes ecuaciones para determinar el módulo de reacción de la subrasante.

Para calcular el área de cada cuenco de deflexiones se usa la Ecuación 3.5:

$$AREA_7 = 4 + 6 \left(\frac{d_8}{d_0} \right) + 5 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{18}}{d_0} \right) + 9 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + 18 \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{60}}{d_0} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

d_i = deflexión a una distancia i en pulgadas del centro de plato de carga

d_0 = deflexión en el centro del plato de carga

Para determinar el radio de rigidez relativa se asume una losa infinita, es decir, que la losa no está limitada por juntas y se usa la siguiente expresión:

$$l_{est} = \left[\frac{\ln \left(\frac{60 - AREA_7}{289,708} \right)}{-0,698} \right]^{-2,566} \quad (3.6)$$

A continuación, se determina un valor aproximado del módulo de reacción de la subrasante:

$$k_{est} = \frac{Pd_0^*}{d_0(l_{est})^2} \quad (3.7)$$

donde:

l_{est} = radio de rigidez relativo estimado en pulgadas.

P = carga aplicada en libras.

d_0^* = coeficiente adimensional de deflexión en el centro del plato de carga.

El coeficiente adimensional de deflexión se determina a través de la siguiente Ecuación:

$$d_0^* = 0,124e^{[-0,14707e^{(-0,07565l_{est})}]} \quad (3.8)$$

A continuación, se calculan los valores de ajuste para una losa de dimensiones finitas:

$$AF_{d_0} = 1 - 1,15085e^{-0,71878\left(\frac{L}{l_{est}}\right)^{0,80151}} \quad (3.9)$$

$$AF_l = 1 - 0,89434e^{-0,61662\left(\frac{L}{l_{est}}\right)^{1,04831}} \quad (3.10)$$

Si la longitud de la losa es menor o igual que 2 veces el ancho se utiliza la Ecuación 3.11, pero si la losa es mucho más grande que 2 veces su ancho se debe utilizar la Ecuación 3.12.

$$Si \quad L_l \leq 2L_w, \quad L = \sqrt{L_l * L_w} \quad (3.11)$$

$$Si \quad L_l \geq 2L_w, \quad L = \sqrt{2} * L_l \quad (3.12)$$

Por último, el valor ajustado k se establece a partir de la siguiente Ecuación:

$$k = \frac{k_{est}}{AF_l^2 * AF_{d_0}} \quad (3.13)$$

El módulo de reacción estático es la mitad del módulo dinámico calculado mediante el procedimiento antes indicado.

3.3.1.1. Ejemplo de aplicación

A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo del módulo de reacción de la subrasante aplicando el método AASHTO para la abscisa 107+104 en el carril izquierdo, sentido Cuenca - Naranjal.

La Tabla 3.2 presenta los datos de deflexiones por geófono, obtenidos mediante el uso del deflectómetro de impacto. Las deflexiones se encuentran en micromilímetros, el espaciamiento de los geófonos desde el centro del plato de carga es de: 0, 8, 12, -12, 24, 36, 48, 60, 72 y 84 pulgadas, también se incluyen los valores de fuerza ejercida sobre el pavimento en kN.

Tabla 3.2: Datos exportados por el deflectómetro.

Drop	D(0)	D(8)	D(12)	D(-12)	D(24)	D(36)	D(48)	D(60)	D(72)	D(84)	KPa	kN
1	121.1	110.4	102.7	108.8	87.8	71.3	52.1	39.6	33.6	24.9	926	65.46
2	119.7	108.5	101.3	107.3	86.4	70.2	51.3	38.9	33.6	24.4	911	64.37
3	118.6	107.9.4	100.7	106.6	85.7	69.9	51.3	39.1	33.3	24.9	906	64.06

Como se aprecia en la Tabla 3.2 se han realizado tres golpes por cada ensayo, según la norma ASTM D4695 es recomendable utilizar el tercer golpe impartido por el deflectómetro en el pavimento en cada zona de prueba, ya que, al posicionar el deflectómetro los dos primeros golpes sirven para acomodar los tacones de goma sobre los cuales se asienta la masa al caer, y de este modo evitar un registro erróneo de datos.

- Primero se calcula el área del cuenco de deflexión mediante la Ecuación 3.5. En esta Ecuación es necesario un valor para d_{18} , para esto se realizó una interpolación lineal entre las deflexiones d_{12} y d_{24} , como se muestra a continuación:

$$d_{18} = d_{24} + \frac{(d_{12} - d_{24})}{2} = 85,7 + \frac{(100,7 - 85,7)}{2} = 93,2 \mu m$$

Con el valor d_{18} se procede a calcular el área del cuenco de deflexiones:

$$\begin{aligned}
 AREA_7 = & 4 + 6 \left(\frac{107,9}{118,6} \right) + 5 \left(\frac{100,7}{118,6} \right) + 6 \left(\frac{93,2}{118,6} \right) + 9 \left(\frac{85,7}{118,6} \right) + 18 \left(\frac{69,9}{118,6} \right) \\
 & + 12 \left(\frac{39,1}{118,6} \right) = 39,49 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

- Para calcular el radio de rigidez relativo se hace uso de la Ecuación 3.6:

$$l_{est} = \left[\frac{\ln \left(\frac{60-39,49}{289,708} \right)}{-0,698} \right]^{-2,566} = 30,61 \text{ in}$$

- Para calcular el módulo de reacción de la subrasante es necesario calcular k_{est} a partir de la Ecuación 3.7. Sin embargo, es necesario primero calcular d_0^* utilizando la Ecuación 3.8, de la siguiente manera:

$$d_0^* = 0,124e^{[-0,14707e^{(-0,07565*30,61)}]} = 0,1227 \text{ in}$$

Con este valor se obtiene un valor aproximado del módulo de reacción de la subrasante:

$$k_{est} = \frac{14401,33 * 0,1227}{118,6 * (30,61)^2} = 404,02 \text{ pci}$$

- Una vez obtenido el valor aproximado del módulo de reacción de la subrasante, se procede a calcular los valores de ajuste para una losa de dimensiones finitas de acuerdo a las Ecuaciones 3.9 y 3.10. Al igual que en el paso anterior, primero se obtiene un valor de L en base a las Ecuaciones 3.11 y 3.12, como $L_l \leq 2L_w$ se procede a utilizar la Ecuación 3.11.

$$L = \sqrt{3,8 * 4,5} = 4,14 \text{ m} = 162,80 \text{ in}$$

Por lo tanto:

$$AF_{d_0} = 1 - 1,15085e^{-0,71878 \left(\frac{162,80}{30,61} \right)^{0,80151}} = 0,925$$

$$AF_l = 1 - 0,89434e^{-0,61662 \left(\frac{162,80}{30,61} \right)^{1,04831}} = 0,974$$

Finalmente, se obtiene el valor del módulo de reacción corregido con la Ecuación 3.13:



$$k = \frac{404,02}{0,974^2 * 0,925} = 459,49 \text{ pci}$$

El módulo de reacción estático es la mitad del módulo de reacción dinámico, por lo tanto, se tiene que k es igual a 229.74 pci.

3.3.2. Módulo de elasticidad

Para determinar el modulo elástico de la losa de hormigón de un pavimento rígido se debe despejar E_{PCC} de la siguiente Ecuación propuesta por la guía AASHTO:

$$l_k = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC} * D_{PCC}^3}{12(1 - u_{PCC}^2)k}} \quad (3.14)$$

donde:

E_{PCC} = módulo elástico de la losa de hormigón

D_{PCC} = espesor de la losa de hormigón

u_{PCC} = módulo de Poisson de la losa de hormigón (0.15 valor típico)

k = módulo de reacción de la subrasante

l_k = radio de rigidez relativa

El radio de rigidez relativa y el módulo de reacción de la subrasante que se utilizan en la Ecuación 3.14, vienen dados por las Ecuaciones 3.15 y 3.17 respectivamente:

$$l_k = \left[\frac{\ln \left(\frac{36 - AREA}{1812,279133} \right)}{-2,559340} \right] \quad (3.15)$$

El área del cuenco de deflexiones representado por el parámetro AREA viene dado por la Ecuación 3.16:

$$AREA = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 * \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad (3.16)$$

En la ecuación anterior d_0 representa la deflexión bajo el centro del plato de carga y el resto de parámetros d_i representan las deflexiones a cierta distancia i.

$$k = \left(\frac{P}{8d_0 l_k^2} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln \left(\frac{a}{2l_k} \right) + \gamma - 1,25 \right] \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\} \quad (3.17)$$

con:

P = carga aplicada en libras

γ = constante de Euler (0.57721566490)

a = radio del plato de carga

3.3.2.1. Ejemplo de aplicación

Para realizar el ejemplo de cálculo del módulo de elasticidad de la losa de concreto se hace uso de los datos tomados por el deflectómetro y mostrados en la Tabla 3.2. A continuación, se detallan los pasos seguidos para obtener el módulo de elasticidad de la losa de concreto.

- Inicialmente, y como se mencionó en la sección 3.2, es de gran importancia validar los datos, es decir que la diferencia entre mediciones sea menor al 3%.
- Mediante la Ecuación 3.16 se calcula el cuenco de deflexión, tras aplicar los valores de la Tabla 3.2 se obtiene lo siguiente:

$$AREA = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{100,7}{118,6} \right) + 2 * \left(\frac{85,7}{118,6} \right) + \left(\frac{69,9}{118,6} \right) \right] = 28,39 \text{ in}^2$$

- Con el resultado obtenido del ÁREA y la Ecuación 3.15, se calcula el radio de rigidez relativa.

$$l_k = \left[\frac{\ln \left(\frac{36-28,39}{1812,279133} \right)}{-2,559340} \right] = 28,08 \text{ in}$$

- Luego se calcula el módulo de reacción dinámico de la subrasante con la Ecuación 3.17, como se muestra a continuación:

$$k = \left(\frac{14401,33}{8 * 0,00467 * 28,08^2} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln \left(\frac{5,91}{2 * 28,08} \right) + 0,5772 - 1,25 \right] \left(\frac{5,91}{28,08} \right)^2 \right\}$$

$$k = 478,91 \text{ pci}$$

- Por último, se calcula el módulo de elasticidad a partir de la Ecuación 3.14

$$28,08 = \sqrt[4]{\frac{E_{PCC} * 8^3}{12(1 - 0,15^2)478,91}}$$

Despejando la Ecuación anterior, se obtiene:

$$E_{PCC} = 47026,71 \text{ MPa}$$

3.4. ELMOD 6

La estructura a evaluar consta de un pavimento flexible sobre el cual se ha colocado una capa de hormigón hidráulico, por lo que, para analizar la estructura se asume que se trata de un pavimento rígido sobre una capa de material granular estabilizado y dos capas de material granular debajo. ELMOD 6 es un software capaz de considerar hasta 5 capas mediante el método de *cuenco de deflexión*.

Para procesar los datos con el software, primero se debe verificar que las deflexiones sean decrecientes a medida que se alejan del plato de carga del deflectómetro, también se debe validar los datos, es decir, verificar que no presenten cuencos de deflexión como los presentados en la Figura 2.2a y 2.2d. A continuación, se ingresan los datos al programa, se debe tener presente que ELMOD 6 fue desarrollado por Dynatest y la licencia educativa que se usa en este trabajo para procesar los datos funciona con un formato de datos diferente al manejado por el deflectómetro de esta evaluación (de la empresa Carl Bro), por lo que es necesario cambiar el formato de los datos. Esto fue posible con la ayuda de técnicos de Dynatest, contacto realizado vía correo electrónico.

Como parámetros de entrada el programa solicita ingresar los espesores y módulos semilla de cada capa de la estructura del pavimento. La Figura 3.3 presenta una captura de pantalla del programa donde se muestra los valores de entrada ingresados.

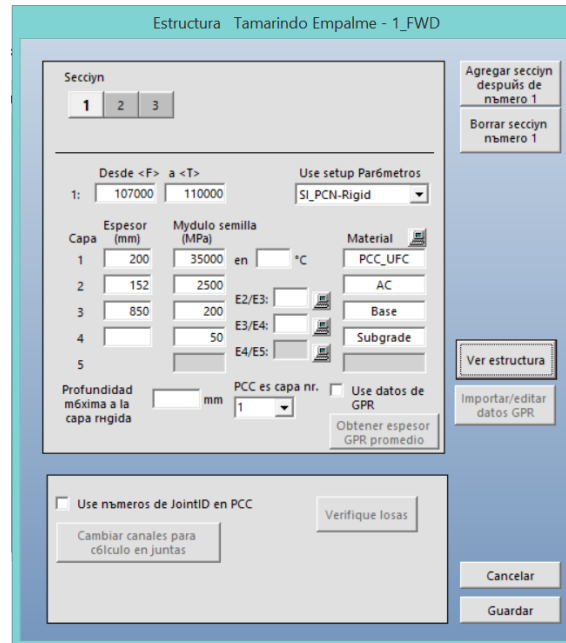


Figura 3.3: Interfaz gráfica del programa ELMOD 6 de ingreso de datos generales.

En muchos casos, la vía analizada presenta diferentes espesores de capa en distintos tramos. El software permite el ingreso de espesores por tramos. La Tabla 3.3 muestra los espesores para cada capa y la Figura 3.4 presenta un esquema que brinda el programa de los espesores de capa para cada tramo.

Tabla 3.3: Espesores de la estructura del pavimento (Trujillo, 2014).

Abscisa	Espesor del material (cm)		
	107+000 - 110+000	110+000 - 114+000	114+000 - 117+004
Losa de concreto	20	20	20
Material asfáltico	15.2	17.7	15.3
Material granular	85	80	75

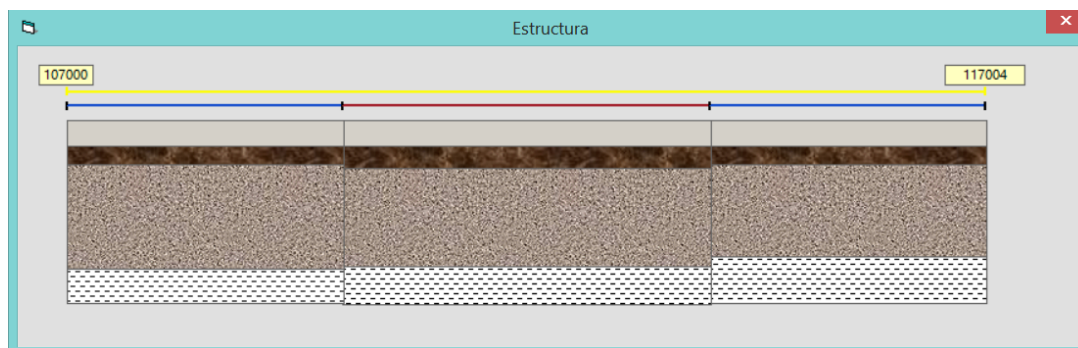


Figura 3.4: Espesores de capa en todo el largo del tramo analizado.

Posteriormente, se evalúa las deflexiones utilizando el tercer golpe impartido por el deflectómetro en el pavimento en cada zona de prueba. De igual manera, en el software se evalúa el tercer golpe, ya que como se mencionó en el ejemplo de aplicación de la sección 3.3.2.1, al posicionar el deflectómetro los dos primeros golpes sirven para acomodar los tacones de goma sobre los cuales se asienta la masa al caer, y de este modo evitar un registro erróneo de datos. Otro parámetro que se puede ingresar es la temperatura de la capa de rodadura, pero ya que se trata de una losa de concreto hidráulico, es posible despreciar este valor por que no afecta en gran medida a los cálculos. Por último, se usa la opción *ajuste de deflexiones* y el programa brinda datos de los módulos de elasticidad.

En la figura 3.5 se muestra una captura de pantalla del programa donde se observa que fueron ingresados algunos parámetros de la vía, necesarios para el análisis de retrocálculo.

Se realizará el análisis mediante la opción ajuste al cuenco de deflexión debido a que los parámetros ingresados son simples y los resultados brindan un menor error medio cuadrático (EMC), este valor refleja el error entre la diferencia calculada por el cuenco generado por la carga sobre el pavimento y el cuenco calculado según los módulos semilla ingresados.

3.4.1. Ejemplo de aplicación

A continuación, se presenta un ejemplo de uso del software ELMOD 6, para el cual se ha hecho uso de los valores presentados en la Tabla 3.2. Una vez obtenidos

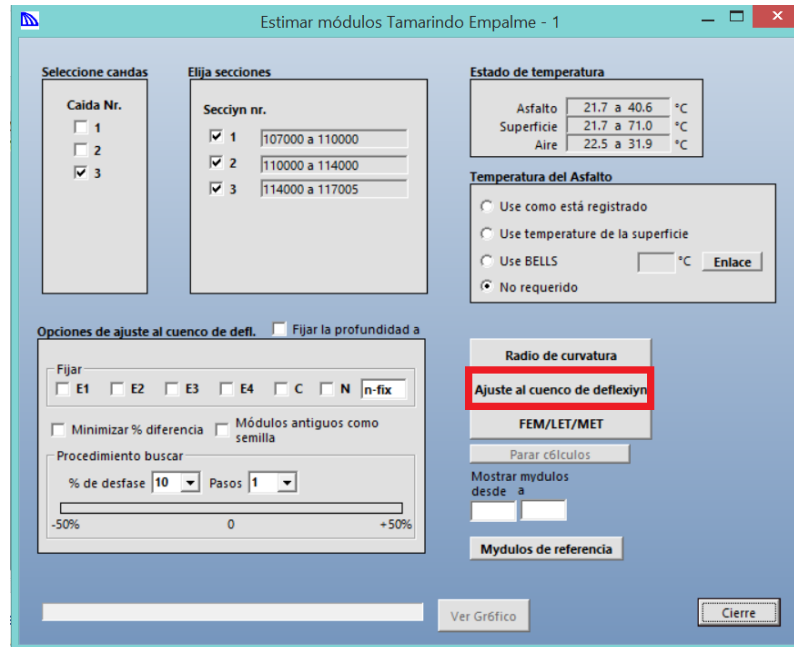


Figura 3.5: Interfaz gráfica para estimar los módulos de elasticidad de cada capa.

los datos generados por el deflectómetro, se procede a cargarlos al software ELMOD 6, mismos que se presentan el formato de la Figura 3.6.

A partir de este punto se deben realizar los siguientes pasos:

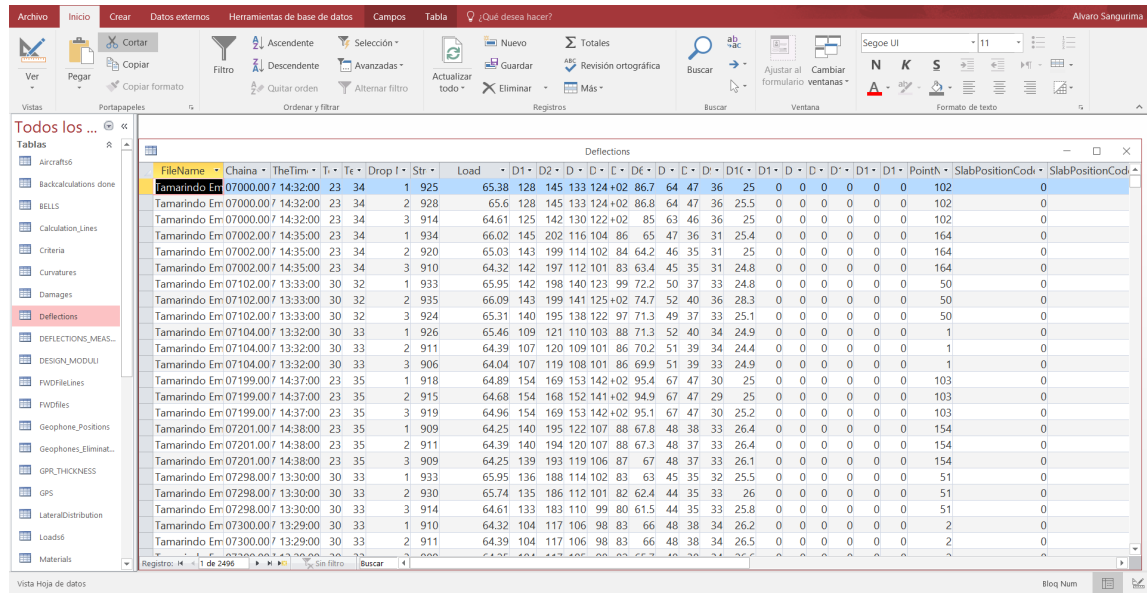
1. Definir el espesor y los módulos de semilla de las capas de la estructura de pavimento.

Para definir estos parámetros se ingresa a la pestaña *Structure*. En este caso se realiza el análisis de retrocálculo para un modelo de 2 capas, una la losa de hormigón de 20 cm de espesor y la otra una combinación de todas las capas por debajo de la losa de hormigón.

En la opción *Thickness* se define el espesor de las capas, en la opción *Seed Modulus* se define los módulos de semilla de cada capa y en la opción *Material* se define los distintos tipos de material de cada capa.

En la opción *Section* se define los tramos con secciones homogéneas en la estructura, en este caso se tiene 3 secciones homogéneas.

2. Para calcular el módulo de elasticidad:



The screenshot shows the ELMOD 6 software interface with a data table titled 'Deflections'. The table has columns for 'FileName', 'Chaina', 'TheTim', 'Tr', 'Te', 'Drop I', 'Str', 'Load', and various displacement components (D1 to D14), 'PointN', 'SlabPositionCod', and 'SlabPositionCod'. The data rows represent different simulation cases for 'Tamarindo Em' at various time points and drop heights.

FileName	Chaina	TheTim	Tr	Te	Drop I	Str	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	PointN	SlabPositionCod	SlabPositionCod
Tamarindo Em 07000.00 / 14:32:00	23	34	1	925	65.38	128	145	133	124	+02	86.7	64	47	36	25	0	0	0	0	0	0	0	102	0
Tamarindo Em 07000.00 / 14:32:00	23	34	2	928	65.6	128	145	133	124	+02	86.8	64	47	36	25.5	0	0	0	0	0	0	0	102	0
Tamarindo Em 07000.00 / 14:32:00	23	34	3	914	64.61	125	142	130	122	+02	85	63	46	36	25	0	0	0	0	0	0	0	102	0
Tamarindo Em 07002.00 / 14:35:00	23	34	1	934	66.02	145	202	116	104	86	65	47	36	31	25.4	0	0	0	0	0	0	0	164	0
Tamarindo Em 07002.00 / 14:35:00	23	34	2	920	65.03	143	199	114	102	84	64.2	46	35	31	25	0	0	0	0	0	0	0	164	0
Tamarindo Em 07002.00 / 14:35:00	23	34	3	910	64.32	142	197	112	101	83	63.4	45	35	31	24.8	0	0	0	0	0	0	0	164	0
Tamarindo Em 07102.00 / 13:33:00	30	32	1	933	65.95	142	198	140	123	99	72.2	50	37	33	24.8	0	0	0	0	0	0	0	50	0
Tamarindo Em 07102.00 / 13:33:00	30	32	2	935	66.09	143	199	141	125	102	74.7	52	40	36	28.3	0	0	0	0	0	0	0	50	0
Tamarindo Em 07102.00 / 13:33:00	30	32	3	924	65.31	140	195	138	122	97	71.3	49	37	33	25.1	0	0	0	0	0	0	0	50	0
Tamarindo Em 07104.00 / 13:32:00	30	33	1	926	65.46	109	121	110	103	88	71.3	52	40	34	24.9	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tamarindo Em 07104.00 / 13:32:00	30	33	2	911	64.39	107	120	109	101	86	70.2	51	39	34	24.4	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tamarindo Em 07104.00 / 13:32:00	30	33	3	906	64.04	107	119	108	101	86	69.9	51	39	33	24.9	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Tamarindo Em 07199.00 / 14:37:00	23	35	1	918	64.89	154	169	153	142	+02	95.4	67	47	30	25	0	0	0	0	0	0	0	103	0
Tamarindo Em 07199.00 / 14:37:00	23	35	2	915	64.68	154	168	152	141	+02	94.9	67	47	29	25	0	0	0	0	0	0	0	103	0
Tamarindo Em 07199.00 / 14:37:00	23	35	3	919	64.96	154	169	153	142	+02	95.1	67	47	30	25.2	0	0	0	0	0	0	0	103	0
Tamarindo Em 07201.00 / 14:38:00	23	35	1	909	64.25	140	195	122	107	88	67.8	48	38	33	26.4	0	0	0	0	0	0	0	154	0
Tamarindo Em 07201.00 / 14:38:00	23	35	2	911	64.39	140	194	120	107	88	67.3	48	37	33	26.4	0	0	0	0	0	0	0	154	0
Tamarindo Em 07201.00 / 14:38:00	23	35	3	909	64.25	139	193	119	106	87	67	48	37	33	26.1	0	0	0	0	0	0	0	154	0
Tamarindo Em 07298.00 / 13:30:00	30	33	1	933	65.95	136	188	114	102	83	63	45	35	32	25.5	0	0	0	0	0	0	0	51	0
Tamarindo Em 07298.00 / 13:30:00	30	33	2	930	65.74	135	186	112	101	82	62.4	44	35	33	26	0	0	0	0	0	0	0	51	0
Tamarindo Em 07298.00 / 13:30:00	30	33	3	914	64.61	133	183	110	99	80	61.5	44	35	33	25.8	0	0	0	0	0	0	0	51	0
Tamarindo Em 07300.00 / 13:29:00	30	33	1	910	64.32	104	117	106	98	83	66	48	38	34	26.2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Tamarindo Em 07300.00 / 13:29:00	30	33	2	911	64.39	104	117	106	98	83	66	48	38	34	26.5	0	0	0	0	0	0	0	2	0

Figura 3.6: Datos de las deflexiones cargados en el software ELMOD 6.

Se ingresa a la pestaña *Moduli*.

En la opción *Select Drops* se selecciona el casillero 3 donde se especifica que se trabajara con el tercer golpe.

Se selecciona *Minimise % difference* para reducir el valor del error mínimo cuadrado (RMS).

Finalmente, se selecciona la opción *Deflection Basin Fit* para calcular los módulos de elasticidad de cada capa.

3. Para evaluar el error mínimo cuadrado.

Una vez calculado el módulo de elasticidad se verifica que el error medio cuadrático sea menor al 4%, para esto se ingresa en la pestaña *Plot*, luego en la pestaña *Backcalculation* y en *Deflection Comparisons*. La Figura 3.10, muestra el gráfico de las deflexiones, así como la forma tabular.

En la columna RMS de la Figura 3.10 se verifica el error de cada punto evaluado. Si el error es mayor al 4% se debe cambiar el módulo de semilla de las capas. Para el análisis final se minimizó el error medio cuadrático con un módulo de semilla de 26000 Mpa para la losa de concreto y 300 MPa para la capa combinada.

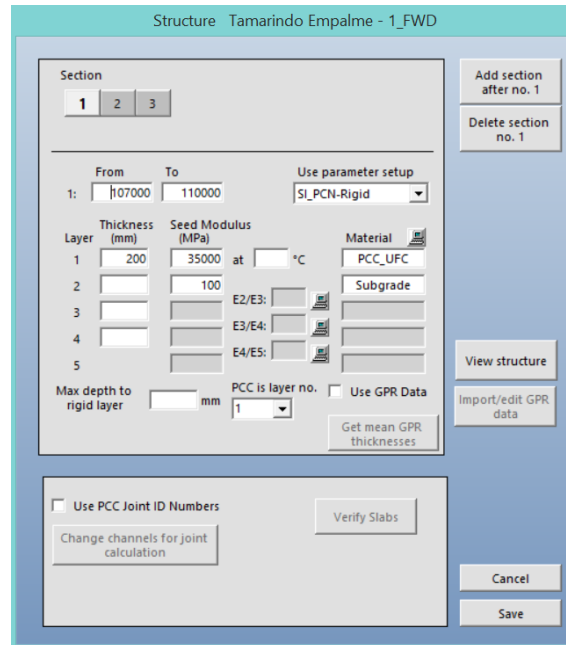


Figura 3.7: Datos generales del pavimento cargados en el software ELMOD 6.

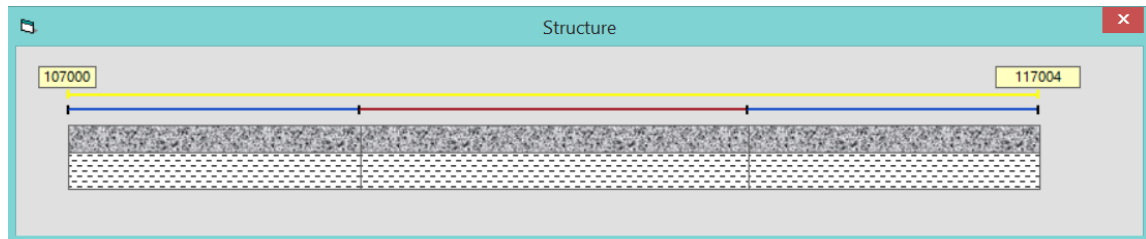


Figura 3.8: Espesores de capa en todo lo largo del tramo analizado.

3.5. Secciones homogéneas

Para analizar los datos de la evaluación tanto estructural como funcional de los 10 km, se utiliza el método de diferencias acumuladas donde para determinar las secciones homogéneas se aplica la Ecuación 3.18:

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{L_p} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.18)$$

con:

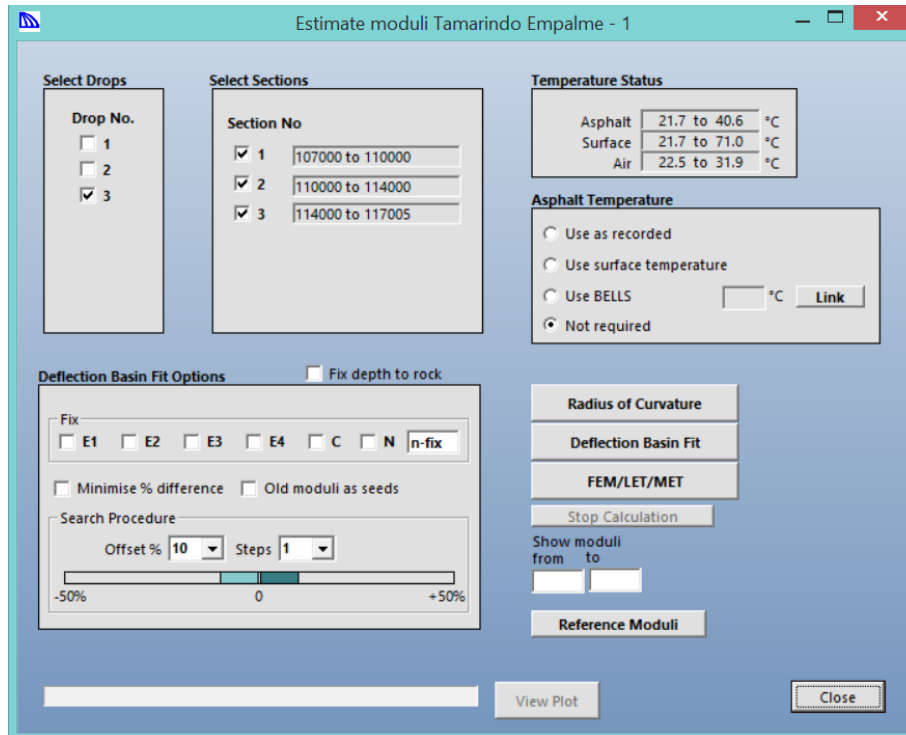


Figura 3.9: Interfaz gráfica del programa ELMOD 6 con los valores reales ingresados.

$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i) * x_i}{2} = \tilde{r}_i * x_i \quad (3.19)$$

donde:

n : La n -ésima medida de respuesta

n_t : Número total de medidas de respuesta del pavimento tomadas en el proyecto

r_i : Valor de respuesta del pavimento de la i -ésima medida

\tilde{r}_i : Promedio de los valores de respuesta del pavimento entre la prueba ($i-1$) y la i -ésima

L_p : Longitud total del proyecto

x_i : Distancia horizontal de la diferencia acumulada

Al graficar Z_x se observa los puntos de los cambios de dirección, estos se dan donde la pendiente cambia de signo. En la Figura 3.11a se presentan las secciones homogéneas de una serie de datos, en la Figura 3.11b se muestran las sumas acumu-

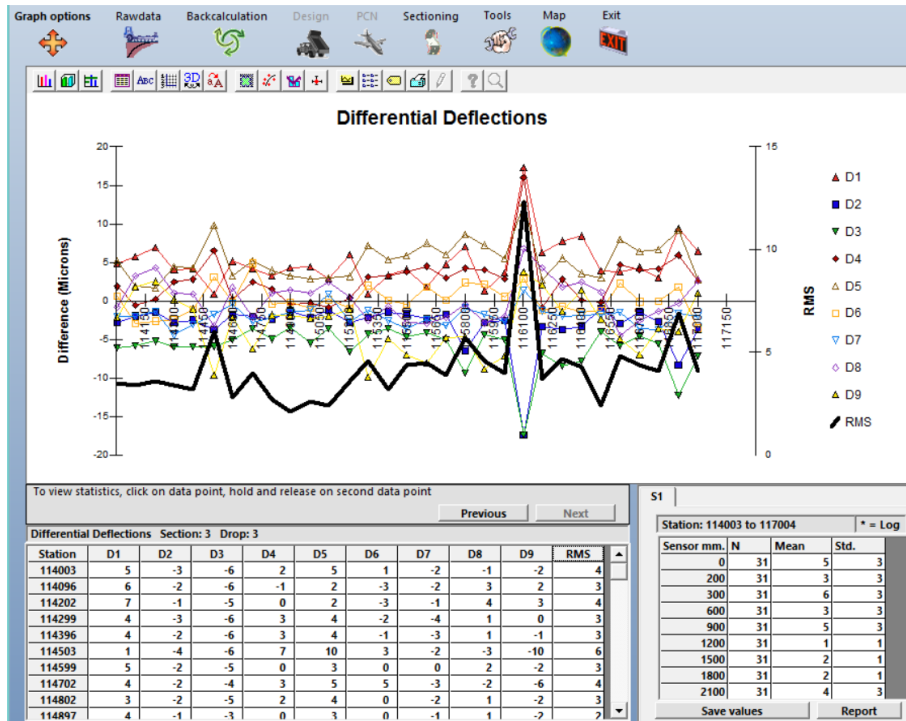


Figura 3.10: Errores medios cuadráticos que presenta el programa.

lativas reales de una serie de mediciones y las sumas de los promedios, y por último en la figura 3.11c se ven los picos, los cuales indican en donde termina una sección y empieza otra.

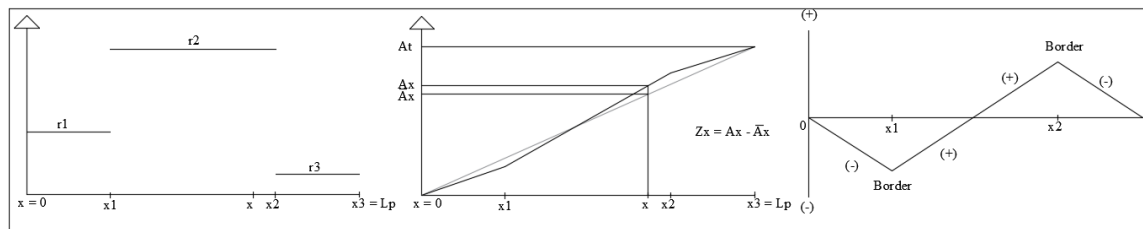


Figura 3.11: Concepto del método de las diferencias acumulativas.



3.6. Análisis de correlación

Como parte de la metodología propuesta, en este trabajo se realiza la correlación entre: i) el PCI y el módulo de elasticidad de la losa de concreto y ii) el PCI y el módulo de reacción de la subrasante, para lo cual se hace uso del software Excel. Concretamente, lo que se busca es encontrar una posible relación entre los parámetros estructurales y funcionales que permita optimizar y simplificar el proceso de análisis y evaluación de la vía.



Capítulo 4

Análisis de resultados

En capítulo se incluye la evaluación funcional y estructural del pavimento, se observan los resultados mediante el software descrito previamente y se examina posibles correlaciones entre los datos.

4.1. Evaluación funcional

Tras realizar una inspección visual de la zona de estudio se pudo constatar que en los dos primeros kilómetros, la vía se encuentran en buenas condiciones y la presencia de fallas es mínima, mientras que, en los siguientes ocho kilómetros el pavimento presenta varias patologías como: grietas lineales y de esquina en su mayoría. Se observó que la vía ya ha recibido mantenimiento, específicamente sellado de grietas. Otro aspecto importante fue que el carril derecho en el sentido Cuenca – Naranjal se encuentra más deteriorado que el izquierdo. En el Anexo B se presentan los datos levantados en campo en relación a las fallas presentes en la capa de rodadura.

4.1.1. Inventario de deterioros

Del total de losas que componen el tramo de vía en estudio, el 56.56 % presenta algún deterioro, siendo la fisura transversal la más común. La Figura 4.1 muestra las patologías más frecuentes encontradas en la superficie del pavimento estudiado; siendo estas grietas de esquina, transversales y longitudinales.

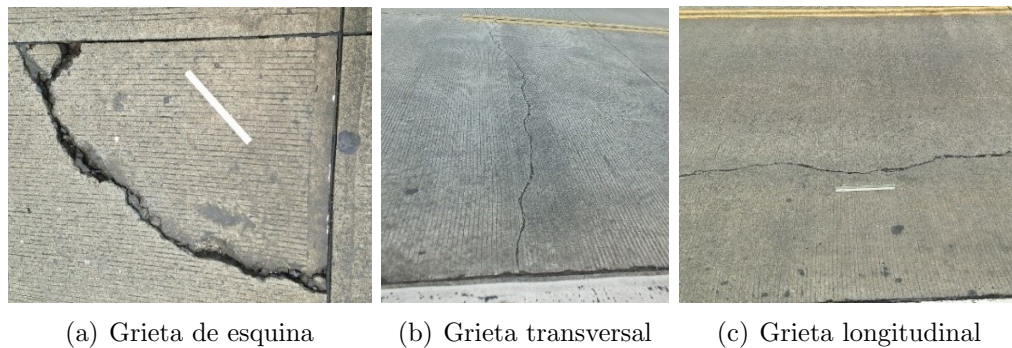


Figura 4.1: Fisuras estructurales que presenta un pavimento rígido.

A manera de resumen la Tabla 4.1 muestra el porcentaje de grietas presentes en el tramo de estudio, clasificadas por su tipo y severidad. De acuerdo a la norma ASTM D6433, las grietas transversales y longitudinales son consideradas como "grietas lineales".

Tabla 4.1: Porcentaje de losas afectadas por grietas de esquina y lineales.

	Severidad			Total (%)
	Baja	Media	Alta	
Grietas de esquina	22.8	2.2	0.1	25.16
Grietas lineales	9.6	2.1	0.6	12.28

La presencia de grietas lineales (longitudinales y transversales) puede deberse a varios factores: i) el espesor de la losa es insuficiente para soportar las cargas, ii) el mal posicionamiento de las barras de transferencia de carga o iii) por un aserrado tardío de la junta. Mientras que, la presencia de grietas de esquina se debe principalmente a la falta de apoyo de la losa originado por erosión de la base o por deficiente transmisión de cargas entre las juntas (Simo, 1990).

Además de estos tres tipos de deterioros, se encontraron otros no tan comunes, como la losa dividida y el punzonamiento. Ambas patologías presentan grietas que dividen a la losa en cuatro partes o más, la diferencia entre estas es que en el punzonamiento todas las fisuras coinciden en un punto, por lo que, cuando se presenta esta patología existe un hueco bajo la losa el cual coincide con el punto de concordancia de las fisuras. A diferencia de las losas divididas, en el punzonamiento las fisuras nacen de un mismo punto y se generan porque existe un vacío bajo la losa y el espesor

de la misma es insuficiente. La Figura 4.2 muestra estas patologías y la Tabla 4.2 presenta el porcentaje y severidad de las losas afectadas por dichas patologías.

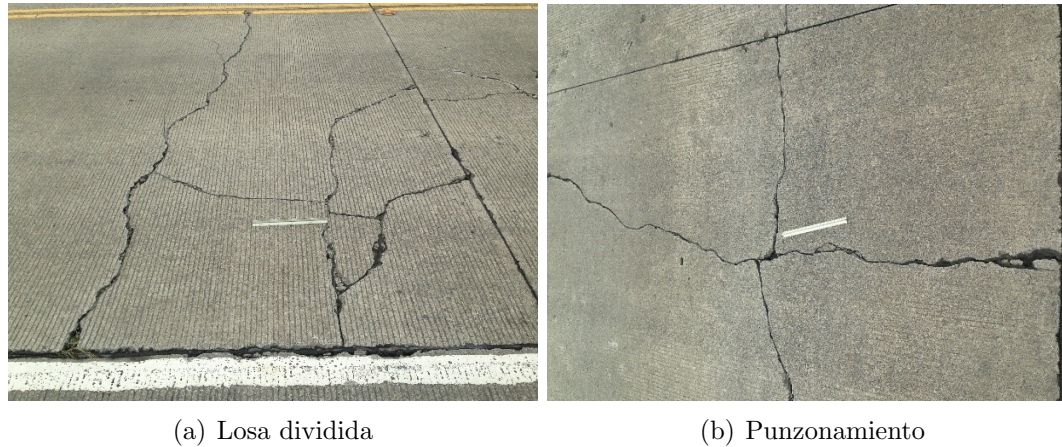


Figura 4.2: Losa dividida y punzonamiento presentes en el pavimento rígido.

Tabla 4.2: Porcentaje de losas afectadas.

	Severidad			Total (%)
	Baja	Media	Alta	
Losas divididas	10.2	0.6	0.1	10.9
Punzonamiento	0.5	0	0	0.5

Generalmente, un pavimento rígido presenta losas divididas cuando i) el espesor de la capa de hormigón hidráulico es insuficiente, ii) las condiciones de apoyo son deficientes, o iii) cuando existe bombeo a través de las juntas y grietas (Simo, 1990).

Una última patología presente en el pavimento es el pulimento de áridos, con un porcentaje de losas afectadas de 4.28%. Este tipo de deterioro se encontró principalmente en losas que conforman las curvas de la vía y en lugares donde la vía se conecta con caminos secundarios. Esta patología se presenta debido a que en estos lugares la capa de rodadura está sometida a una mayor fricción con los neumáticos de los vehículos.

4.1.2. Índice de condición del pavimento

Al analizar el tramo de vía comprendido entre las abscisas 107+000 a 117+000, habiendo evaluado todas las losas en los cinco primeros kilómetros y muestreando los cinco kilómetros siguientes, se obtuvo un PCI de 72 calificando a la vía como Muy Buena. En el Anexo C se presenta el PCI para cada unidad de muestreo.

En los primeros 5 km se determinó el PCI para 50 unidades de muestreo, es decir, cada unidad abarca aproximadamente 100 metros de longitud de vía. Mientras que para los siguientes 5 km se realizó un muestreo, para lo cual, se utilizó la Ecuación 3.1. Asumiendo los valores recomendados en la norma ASTM D 6433. Al aplicar la Ecuación, se determinó que el número mínimo de unidades de muestreo a evaluar es de 28 unidades para unidades de muestreo conformadas por 24 losas. Normalmente se debió recolectar los datos por muestreo de los diez kilómetros, sin embargo, debido a un requerimiento presentado por petición del ingeniero encargado se registró las patologías de todas las losas de los primeros cinco kilómetros.

El intervalo de espaciado de las unidades a muestrear se obtiene dividiendo el número total de unidades de muestreo de toda la sección para el número de unidades de muestreo a evaluar, de acuerdo con la Ecuación 3.2, obteniendo un resultado de 4 unidades.

Una vez evaluado y determinado el PCI para cada unidad de muestreo, se debe verificar que la desviación estándar de los datos obtenidos sea menor que la desviación estándar asumida en la Ecuación 3.1, si esto no se cumple, se deben tomar unidades de muestreo adicionales. En este caso, la desviación estándar que presentan los PCI de las unidades de muestreo es 8.96 menor que la asumida en la Ecuación 3.1 (15 para pavimentos rígidos).

Por último, se determinó el PCI global del tramo de vía analizado utilizando la Ecuación 3.4, cabe acotar que no se registró ninguna unidad de muestreo adicional. La Figura 4.3 presenta el valor del PCI para cada unidad de muestreo según el abscisado de la vía.

Se observa que en el tramo comprendido por las abscisas 107+000 a 109+000 la vía presenta un PCI alto comprendido entre 80 y 100, lo que indica que la vía se encuentra en muy buenas condiciones. Mientras que para el tramo que se presenta entre las abscisas 109+000 a 117+000 se observa que el PCI está más disperso, hay

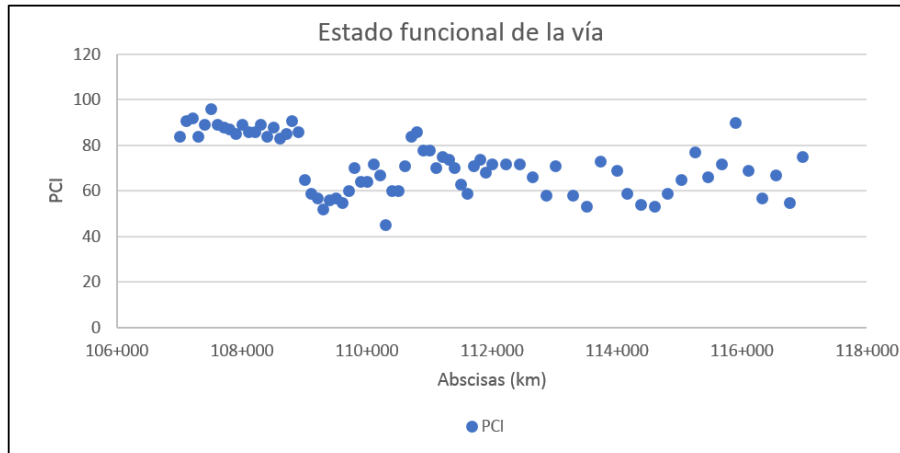


Figura 4.3: PCI de las unidades de muestreo comprendido entre las abscisas 107+000 y 117+000.

tramos donde el pavimento presenta un PCI de 88 y en otros donde el PCI es 45.

Para intervenir una vía, el MTOP¹ suele clasificar a las vías por secciones homogéneas dependiendo del estado superficial que presenten. Se utilizó el método de diferencias acumuladas para agrupar los datos en secciones homogéneas. La Figura 4.4 muestra un pico pronunciado (cambio de pendiente), el cual se considera como un punto donde termina una sección y empieza otra, el cual se presenta en la abscisa 109+000. En el anexo D se presenta un ejemplo para el cálculo de las secciones homogéneas.

Se pueden considerar como cambio de sección otros picos presentes en la Figura 4.4, pero al ser vías intervenidas por tramos, se deben evitar secciones homogéneas pequeñas, por lo que, estos picos pueden ser despreciados. El MTOP generalmente brinda tratamientos de mantenimiento para tramos no menores a dos kilómetros.

En la figura 4.5 se aprecian las dos secciones determinadas, el PCI de las unidades comprendidas entre las abscisas 107+000 a 109+000 tienen un valor promedio de 87, mientras que, para el tramo que comprende la abscisa 109+000 a la 117+000 el valor PCI promedio es de 66. Para el primer tramo Jugo (1991) recomienda un mantenimiento preventivo rutinario, para lo cual se puede hacer: limpieza del sistema de obras de drenaje, corte de la vegetación cercana a la vía, reparaciones de los

¹MTOP: Ministerio de Transporte y Obras Públicas

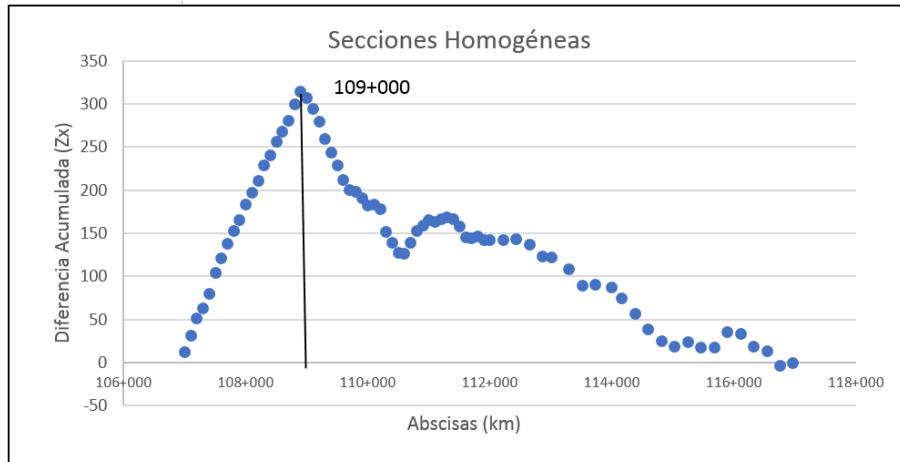


Figura 4.4: Determinación de las secciones homogéneas.

defectos puntuales de la plataforma entre otros, mientras que, para el segundo tramo se recomienda realizar un mantenimiento preventivo rutinario y/o periódico, el cual consta de un sellado de grietas, sello asfáltico localizado, bacheo de emergencia, entre otros (Jugo, 1991).

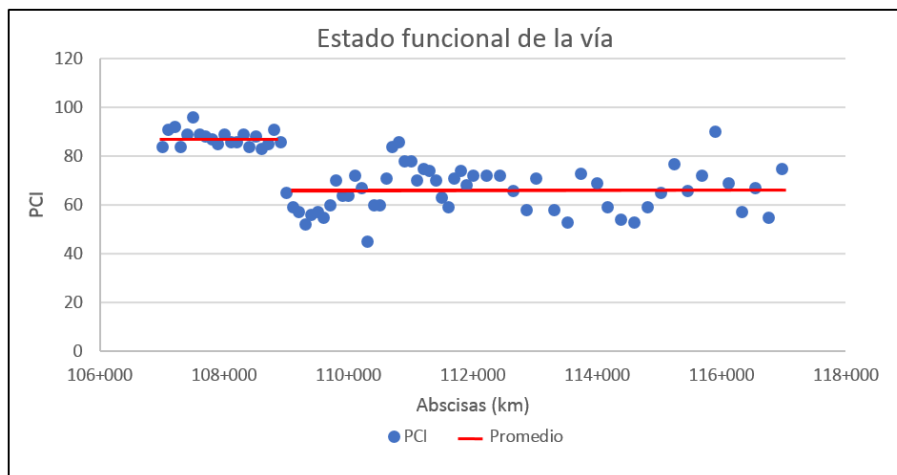


Figura 4.5: PCI promedio agrupado por secciones homogéneas.



4.2. Evaluación estructural

Para realizar el estudio se empleó un deflectómetro que cuenta con 9 geófonos espaciados desde el centro del plato de carga hacia el frente, a distancias de 0, 200, 300, 600, 900, 1200, 1500 y uno hacia atrás a una distancia de -300 milímetros. Los espaciamientos cumplen con lo recomendado por la SHRP que se presenta en la Tabla 3, a excepción del sensor ubicado a 450 milímetros del centro del plato de carga, el cual fue retirado y colocado a -300 milímetros para ser usado en los ensayos de transferencia de carga.

En cada zona de prueba se realizaron tres golpes para validar los datos, es decir, para que los datos se puedan utilizar, la diferencia entre mediciones debe ser menor al 3% en cada sensor. También se debe verificar que las deflexiones sean decrecientes como se muestra en la Figura 3a, en otras palabras, que la deflexión registrada en el primer sensor sea mayor a la deflexión registrada por el segundo sensor y así sucesivamente. Estas dos validaciones fueron comprobadas en el programa Excel y se cumple satisfactoriamente en todos los sensores y en todas las pruebas realizadas.

Para cada zona de prueba la ASTM D4695-03 recomienda aplicar una carga entre 7 y 105 kN, normalmente se aplica una carga de 40 kN, pero en este caso se aplicó una carga de 65 kN debido a que se trata de un pavimento rígido (JPCP). Es importante mencionar que se realizaron golpes únicamente al centro de la losa debido a limitaciones de tiempo. Se realizaron tres golpes en cada punto de ensayo y cada ensayo se realizó cada 200 metros carril (100 metros con respecto al eje de la vía).

4.2.1. Módulo de reacción de la subrasante por el método AASHTO

Siguiendo el procedimiento mencionado en la sección 3.3.1 se determinó el módulo de reacción de la subrasante. Debido a las características del equipo de medición y las características de las muestras, se tomaron las siguientes consideraciones:

- De acuerdo con la Ecuación 5, para determinar el área del cuenco se debe ingresar la deflexión en el geófono ubicado a 450 mm del centro del plato de carga. Al no contar con este sensor se procedió a interpolar linealmente

las deflexiones entre los geófonos ubicados a 300 mm (12") y 600 mm (18") respectivamente.

- Al aplicar la Ecuación 7 se desprecia el factor de normalización, por lo que, no fue necesario normalizar la carga aplicada en el ensayo, al tratarse de medidas adimensionales.
- Se utilizó la Ecuación 11 para determinar el módulo de reacción de la subrasante, ya que las losas tienen una longitud de 4.50 metros y un ancho de 3.80 metros, dando una relación de 1.18 la cual es menor a 2.

La Figura 4.6 muestra los módulos de reacción de la subrasante que presenta la vía en la trayectoria del tramo evaluado. En la imagen ya se ha caracterizado por unidades homogéneas aplicando la metodología antes mencionada, la cual dió como resultado dos tramos de agrupación, el primero entre las abscisas 107+000 a 114+000 con un valor promedio de 264 pci y el segundo entre las abscisas 114+000 a 117+000 un valor promedio de 184 pci.

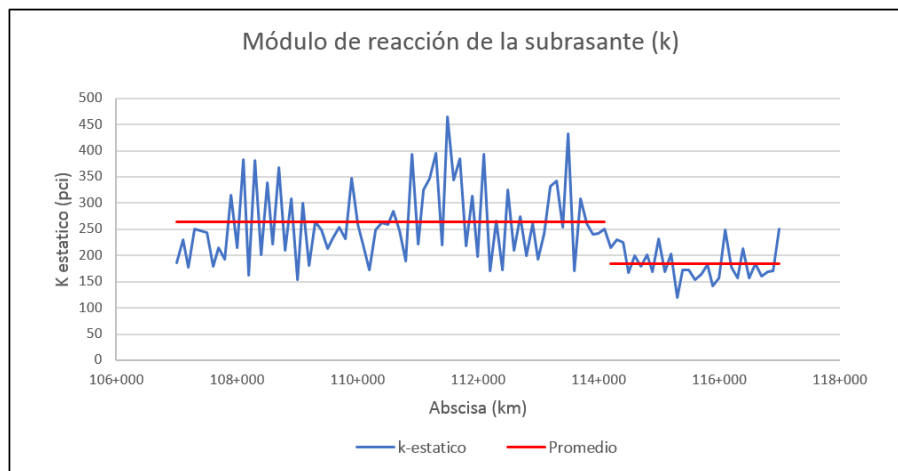


Figura 4.6: Módulo de reacción de la subrasante.

Según la Tabla 8.13 del libro de Ingeniería de Pavimentos de Montejó Fonseca (2006) el módulo de subrasante que presenta el primero tramo tiene un soporte Muy Alto y en el segundo corresponde a un soporte Alto. En el Anexo E se incluyen los valores calculados para cada muestra.

4.2.2. Módulo elástico de la losa de concreto por el método AASHTO

Para determinar el módulo de elasticidad de la losa de hormigón hidráulico se aplicó el procedimiento propuesto en la sección 3.3.2. Es importante mencionar que para el módulo de Poisson se utilizó un valor de 0.15, que es el recomendado para losas de concreto por la AASHTO. En el Anexo F se muestran los resultados obtenidos para cada punto donde se realizó el ensayo. Los resultados obtenidos se agruparon en secciones homogéneas para ilustrar de mejor manera los resultados.

En la Figura 4.7 se muestran los módulos elásticos de la losa de concreto que presenta la vía en la trayectoria del tramo evaluado. Al igual que en la sección anterior, la imagen presenta los datos caracterizados por unidades homogéneas, diferenciándose 8 secciones. En la Tabla 4.3 se presentan los módulos de elasticidad promedio para cada sección con su respectivo abscisado.

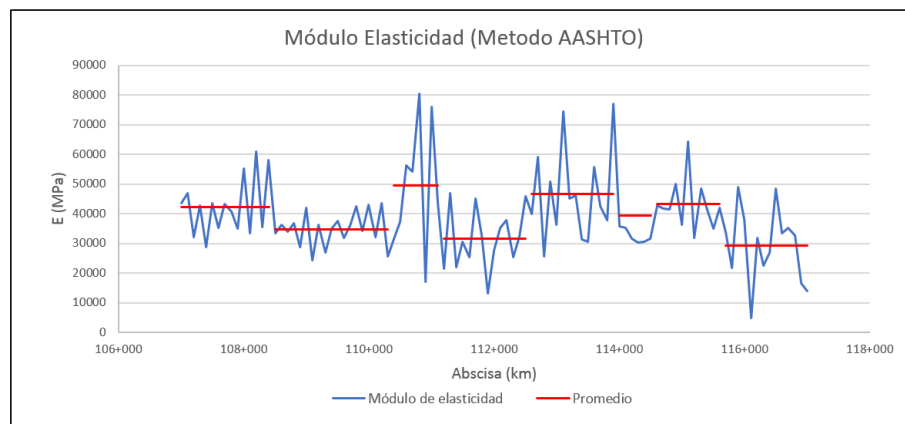


Figura 4.7: Módulo de reacción de la subrasante.

Al comparar los valores obtenidos en la Tabla 9 con los recomendados por el Centro de investigación de pavimentos de la Universidad de California presentes en la Tabla 2.5, se aprecia que la mayoría de los módulos de elasticidad están dentro del rango de aceptación. Aquellos que quedan fuera de los rangos son valores que se cree han sido tomados en losas con un cierto nivel de deterioro por lo que se registraron valores altos de deflexión.



Tabla 4.3: Módulos de elasticidad para cada sección homogénea.

Abscisado		Módulo de elasticidad (MPa)
Inicio	Fin	0
107+000	108+400	42390
108+500	110+300	34803
110+400	111+100	49597
111+200	112+500	31610
112+600	113+900	46682
114+000	114+500	39467
114+600	115+600	43241
115+700	117+000	29269

4.2.3. Módulos de elasticidad utilizando el programa ELMOD 6

Se utilizó el software ELMOD 6, presentado en la sección 3.4, para determinar el módulo de elasticidad de la capa de concreto y del resto de la estructura del pavimento, es decir, se modeló al pavimento como un sistema bicapa como se muestra en la Figura 4.8. Existen algunas limitaciones para el cálculo posterior de los módulos de capa. Varias estructuras de pavimento pueden dar como resultado el mismo cuenco de deflexión y el proceso puede producir cualquiera de estas soluciones. El manual del software sugiere utilizar este modelo, ya que así se elimina el problema de contar con un mismo cuenco de deflexión para diferentes estructuras de pavimento. Trabajar de esta manera brinda datos confiables.

Como parámetros de entrada se necesitan los módulos semilla para el concreto y para el resto de la estructura. Estos valores fueron variando en el rango recomendado en la Tabla 2.4 con el fin de encontrar los módulos que minimicen el error medio cuadrático (EMC). Los módulos semilla utilizados fueron 26000 MPa para la losa de hormigón y 300 MPa para el resto de la estructura.

Con estos módulos semilla se obtuvo un EMC menor al 4% en casi todos los puntos evaluados, lo que es importante ya que, según el manual LPPT solo son válidos los módulos de elasticidad que presenten un EMC menor al 4%. En el Anexo G se presentan los módulos de elasticidad calculados con el software ELMOD 6.

La Figura 4.9 presenta los módulos de elasticidad de la losa de concreto para un

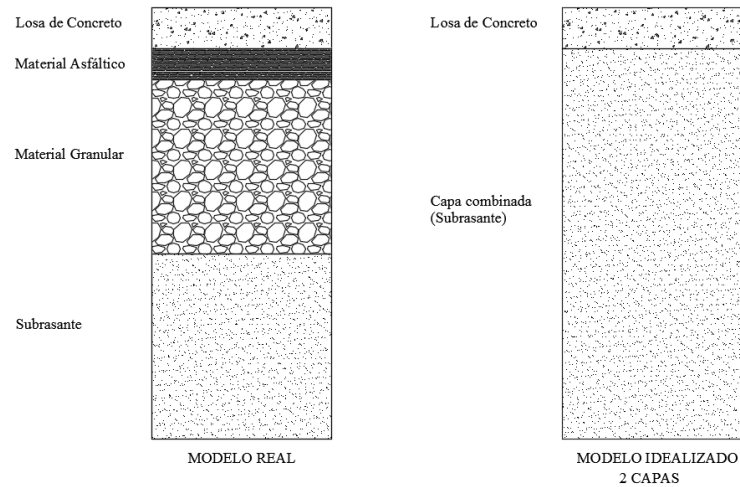


Figura 4.8: Modelo para el retrocálculo en ELMOD 6.

El sistema bicapa, se observan los módulos agrupados en secciones homogéneas.

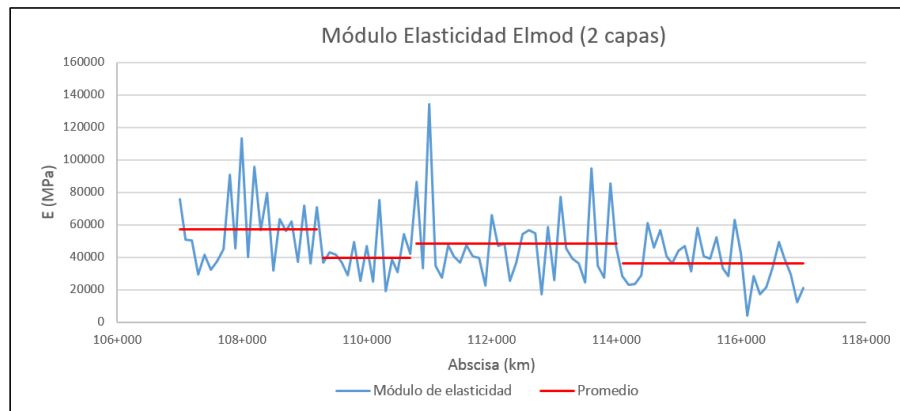


Figura 4.9: Módulo de elasticidad de la losa de concreto para un sistema bicapa.

Durante el estudio también se analizaron los módulos de elasticidad utilizando un sistema de 3 capas (losa de hormigón, capa de asfalto y resto de la estructura), sin embargo, los módulos obtenidos se encontraron fuera del rango especificado en la Tabla 2.5 a pesar de presentar un EMC bajo. Los valores obtenidos al analizar como un sistema de 3 capas se presentan en el Anexo H.

4.2.4. Módulos de elasticidad: Método AASHTO vs Software ELMOD 6

Para obtener una visión global de los resultados obtenidos tanto con el método AASHTO como con el Software ELMOD 6, en esta sección se comparan los módulos de elasticidad obtenidos con cada uno de ellos. Al realizar la correlación entre estos se obtiene un porcentaje de ajuste R^2 igual a 0.51, como se aprecia en la Figura 4.10. De acuerdo con la Tabla 2.6 de la sección 2.4.2, esto corresponde a un valor de $r = 0.71$, lo cual implica que existe una correlación regular y como se observa en la Figura 4.10, las mediciones tomadas siguen un mismo patrón, verificándose que los resultados de cada método son similares.

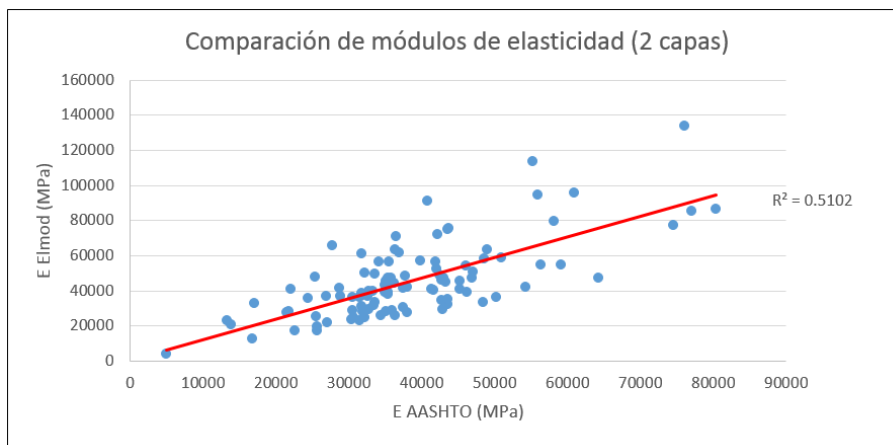


Figura 4.10: Correlación entre los módulos de elasticidad AASHTO vs ELMOD 6.

4.3. Análisis de correlación entre estado funcional y estructural

Con el objetivo de determinar un indicador que relacione el estado funcional con el estado estructural del pavimento, se han llevado a cabo métodos de diseño experimental que permitan encontrar factores que relacionen ambos criterios. A continuación, se presentan una serie de alternativas llevadas a cabo y los resultados obtenidos en cada una.

4.3.1. Alternativa 1: PCI vs Módulo de reacción de la subrasante

Como parte del estudio realizado se obtuvieron 100 ensayos estructurales (mediante golpes con el deflectómetro), mismos que luego de aplicar una serie de fórmulas, de acuerdo con el método AASHTO, se convirtieron en valores del módulo de reacción de la subrasante.

Para encontrar una posible correlación entre el módulo de reacción de la subrasante y los valores del PCI, es necesario tener el mismo número de muestras para ambos estudios (100 en este caso, de acuerdo a los valores tomados para determinar el módulo de reacción de la subrasante). En el estudio del PCI se tomaron 50 muestras en los primeros 5 km y 28 muestras en los restantes 5 km (estas últimas de acuerdo a la norma ASTM). Para obtener las 100 muestras requeridas, se decidió tomar 22 unidades de muestreo adicionales en el segundo tramo de estudio, de esta forma se equiparán tanto el número de muestras de los parámetros estructurales, como de los funcionales.

En la Figura 4.11 se presenta el resultado de relacionar el PCI con el módulo de reacción de la subrasante. Se puede apreciar que el porcentaje de ajuste R^2 es igual a 0.004, lo cual implica un $r = 0,06$, o lo que es lo mismo, una ausencia de correlación (de acuerdo con la Tabla 2.6 de la sección 2.4.2). Lo cual se confirma al observar que la gráfica corresponde a una nube de puntos ya que para un mismo valor del PCI, existe más de un módulo de reacción de la subrasante o viceversa.

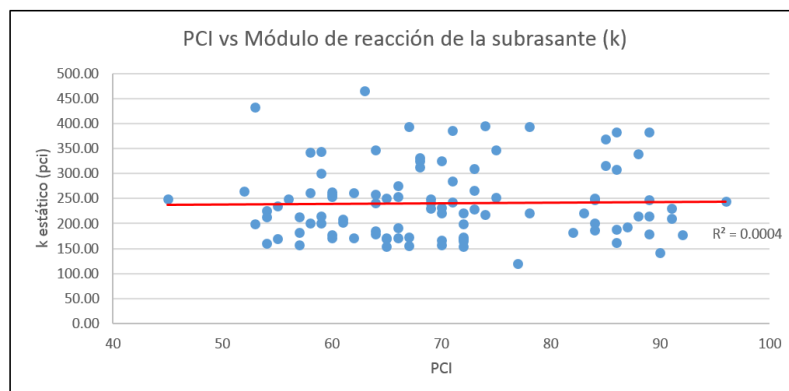
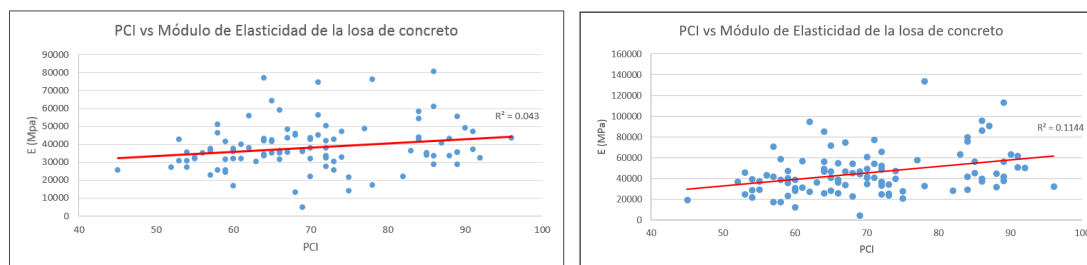


Figura 4.11: PCI vs Módulo de reacción de la subrasante.

4.3.2. Alternativa 2: PCI vs Módulo de elasticidad de la losa de hormigón

En esta segunda alternativa se relacionan el PCI y el módulo de elasticidad de la losa de hormigón, obtenido con el método AASHTO (Figura 4.12a) y con el software ELMOD 6 (Figura 4.12b). En la Figura 4.12a se tiene un coeficiente de determinación R^2 igual 0.043, el cual es mucho menor al obtenido en la Figura 4.12b, igual a 0.114. Esto implica una correlación nula, lo cual se confirma al observar las figuras mencionadas. A pesar de que existe una correlación regular entre el módulo de elasticidad obtenido tanto con el método AASHTO como con el software ELMOD 6, se encuentra una relación levemente mayor entre el PCI y el módulo de elasticidad obtenido con el software ELMOD 6, donde las muestras tienen menor dispersión.



(a) PCI vs E; Método AASHTO

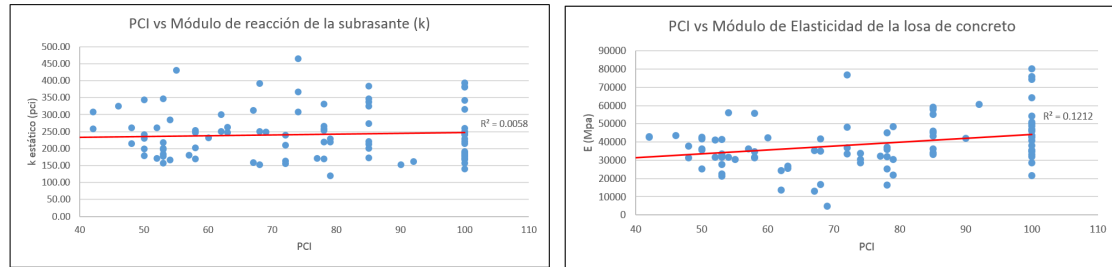
(b) PCI vs E; Software ELMOD 6

Figura 4.12: Correlación entre PCI vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto.

4.3.3. Alternativa 3: PCI de 3 losas vs Módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de concreto

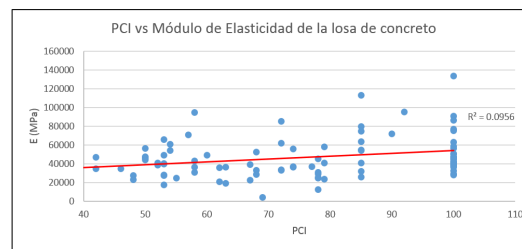
En este punto se repiten los análisis del PCI contra el módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad, sin embargo, en esta ocasión se utilizan unidades de muestreo de 3 losas adyacentes. Las losas corresponden a los lugares donde se golpeó con el deflectómetro, la anterior y la siguiente. Se realizó de esta manera debido a que se consideró que el PCI determinado en cada unidad de muestreo considera un área grande en comparación a la distancia en la que se genera el cuenco

de deflexiones, mientras que, si se considera un PCI para un área menor, la relación entre estos podría ser mayor. En la Figura 4.13 se presenta las figuras donde se relaciona el PCI con los parámetros estructurales previamente determinados.



(a) PCI vs Módulo de reacción de la subrasante

(b) PCI vs E; Método AASHTO



(c) PCI vs E; Software ELMOD 6

Figura 4.13: Correlación del PCI con el módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de concreto.

Una vez más no fue posible encontrar una correlación significativa entre el parámetro funcional y los estructurales. Como se observa en la Figura 4.13, existe más de un valor estructural para cada valor de un parámetro funcional, el ejemplo más claro es la gráfica lineal que se genera para un PCI de 100, donde existen varios valores de módulos de reacción de la subrasante y módulos de elasticidad de la losa de concreto (AASHTO y ELMOD 6).

El hecho de obtener como resultado varios valores estructurales para un mismo PCI, implica que un pavimento puede estar en perfectas condiciones superficialmente pero su valor estructural puede cambiar. Este aspecto debería investigarse, como posible tema de tesis.

4.3.4. Alternativa 4: Módulo de reacción de la subrasante vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto para un PCI de 3 losas constante

En este punto se realizó una comparación entre el módulo de elasticidad de la losa de concreto (E) contra el módulo de reacción de la subrasante (k), ambos obtenidos con el método AASHTO, para los puntos donde se obtuvo un PCI excelente, es decir, de 100. Se realizó el mismo procedimiento para valores de PCI pobres, es decir, entre 40 y 55. Los resultados se muestran en la Figura 4.14a y 4.14b respectivamente.

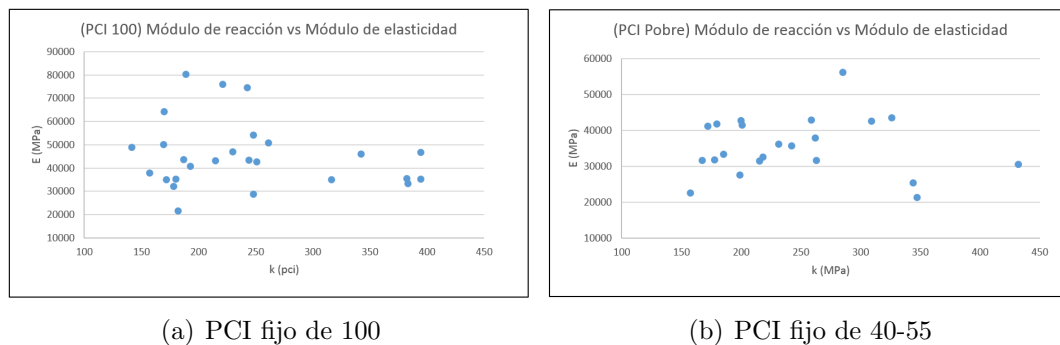


Figura 4.14: Módulo de reacción de la subrasante vs Módulo de elasticidad de la losa de concreto.



Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se presentan las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas al finalizar el análisis funcional y estructural de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal en el tramo Puente Río Tamarindo – Jesús María comprendido entre las abscisas 107+000 a 117+000.

5.1. Conclusiones

En este trabajo se realizó la evaluación funcional y estructural para el tramo de la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal sector Puente Río Tamarindo – Jesús María, que consiste en 10 km, con la finalidad de buscar una posible relación entre estos parámetros. Se realizó un estudio de la bibliografía existente y los métodos y metodologías más utilizados en la actualidad para las evaluaciones funcional y estructural.

Para evaluar el estado funcional de la vía, se determinó el Índice de Condición del Pavimento (PCI), para lo cual se recorrió el tramo de estudio y se observó las características patológicas de la vía, encontrándose grietas transversales, longitudinales, losas divididas, punzonamiento como las más comunes; además se observó pérdida de sello, bacheo, pulimento.

Tras aplicar la norma ASTM D 6433 para el estudio funcional, se identificaron dos secciones características. Los dos primeros kilómetros (107+000 a 109+000) presentan un PCI entre 80 y 100 lo que indica que el pavimento en esta sección se califica como Excelente; mientras que, los ocho siguientes kilómetros (109+000 a 117+000)



presentan un PCI que varía entre 45 y 88, calificándola como Bueno. Al aplicar un promedio del tramo completo, se concluye que la vía tiene un PCI de 72, lo cual la califica como Muy Bueno. Si bien existen zonas con gran cantidad de fallas, las mismas no son de gran severidad, la mayor parte de la vía analizada se encuentra en buenas condiciones, sin embargo, se recomienda reparar las fallas para evitar accidentes de tránsito y mejorar la calidad de viaje de los usuarios que transitan por la zona, y prevenir un deterioro mayor de la estructura del pavimento.

Para la evaluación estructural, se utilizó el deflectómetro de impacto FWD PRIMAX 2100 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, con el cual se realizó ensayos cada 200 metros carril (100 metros eje de la vía), en total se realizaron 100 ensayos y en cada ensayo se impartieron 3 golpes. Con los resultados obtenidos se utilizó el Método AASHTO y se determinaron los parámetros estructurales: módulo de reacción efectivo de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de concreto hidráulico. Este último parámetro también fue obtenido con ayuda del software ELMOD 6 con el fin de validar los cálculos.

La evaluación estructural mostró que el módulo de reacción de la subrasante califica como Alto y Muy Alto, permitiendo confirmar que la vía se encuentra en buen estado estructural. De la misma manera, el cálculo del módulo de elasticidad devolvió como resultado valores que se encuentran dentro del rango correcto según la literatura.

Para buscar una posible relación entre el estado funcional y estructural, como hipótesis se consideró que mientras menor el PCI, menor módulo de reacción de la subrasante o módulo de elasticidad de la losa de concreto, lo que implicaría que la presencia de fallas en la superficie del pavimento representaría un mal soporte del suelo o de la losa. Para intentar demostrar dicha hipótesis, se realizó un estudio que permita descubrir posibles relaciones entre los estados funcional y estructural, presentándose cuatro alternativas de correlación: i) correlación entre el PCI vs el módulo de reacción de la subrasante, ii) PCI vs módulo de elasticidad de la losa de hormigón, este último obtenido con el método AASHTO y el software ELMOD 6, iii) PCI de 3 losas continuas (para disminuir la longitud de análisis) vs módulo de reacción de la subrasante y el módulo de elasticidad de la losa de hormigón y iv) módulo de reacción de la subrasante vs módulo de reacción de la losa de hormigón



para un PCI constante. En todas estas alternativas se obtuvo como resultado una serie de gráficas que representan nubes de puntos dispersas, lo cual implica que no existe una relación entre los parámetros estructurales y el PCI (funcional) en este estudio.

Sin embargo, no se descarta la posibilidad de una posible correlación por la influencia de otros factores externos, como factores climáticos, deficientes materiales, procesos constructivos o información que no se dispone. Conscientes de que existen muchas variables que pueden afectar el comportamiento de la vía, se requieren más recursos que permitan realizar análisis más complejos y completos.

5.2. Recomendaciones y posibles investigaciones

5.2.1. Recomendaciones

Luego de realizar este trabajo se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- Cuando se realiza la evaluación estructural es conveniente evitar cualquier tipo de vibración o carga externa que afecte a los valores de las deflexiones tomadas por el deflectómetro.
- Sería conveniente analizar otras vías o ampliar el tramo de estudio, de modo que se puedan obtener datos que permitan brindar un análisis más completo.
- Es recomendable realizar ensayos en los bordes y esquinas de la losa para de esta manera disponer de una evaluación estructural completa, y poder analizar la transferencia de carga que existe entre losas.
- De preferencia, se recomienda no realizar ensayos en aquellas zonas donde exista una alta presencia de patologías, debido a que las diferentes fallas pueden ser producto de diferentes causas lo cual sería difícil de analizar. También es conveniente evitar las zonas donde existan presencia de alcantarillas, todo esto con el objetivo de evitar registro de datos erróneos.



5.2.2. Posibles investigaciones

- Una posible línea de investigación es aplicar el mismo estudio presentado en este trabajo, pero, empleando diferentes índices funcionales como IRI, PSI, entre otros y los parámetros estructurales, tanto en pavimentos rígidos como flexibles.
- Ampliar el estudio que permita descubrir porqué para un mismo PCI existen diferentes valores de módulo de reacción de la subrasante y módulo de elasticidad de la losa de hormigón.
- Realizar un estudio que emplee técnicas informáticas como minería de datos y predicciones basados en los datos tomados por el deflectómetro de impacto, factores climáticos, temporales y de flujo de tráfico para optimizar el proceso de mantenimiento de la vía. Sin embargo, esto requiere de mucha mayor información que en muchos casos no está disponible.



Bibliografía

- AASHTO, ed. *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO, Washington, D.C., 1993. ISBN 978-1-56051-055-0. URL <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>.
- ASTM D4694. Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. Inf. téc., American Society Testing for Materials, West Conshohocken, PA, 1996.
- ASTM D4695. Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. Inf. téc., American Society Testing for Materials, West Conshohocken, PA, 2003.
- ASTM D6433. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. Inf. téc., American Society Testing for Materials, West Conshohocken, PA, 2011. URL <http://www.cee.mtu.edu/~balkire/CE5403/ASTMD6433.pdf>.
- James Bryce, Gerardo Flintsch, Samer Katicha, y Brian Diefenderfer. Developing a Network-Level Structural Capacity Index for Structural Evaluation of Pavements. Final Contract RC00021, Virginia Tech Transportation Institute, Virginia, 2013.
- George C Canavos. *Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos*. McGraw-Hill, México, 2001. ISBN 978-968-451-856-8. OCLC: 934098821.
- Juan Casia Boza. *Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles usando el Deflectómetro de Impacto en la Carretera Tarma - La Merced*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo - Perú, 2015. URL http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/413/TCIV_22.pdf?sequence=1&isAllowed=y.



Gonzalo Clavijo. La vía Cuenca - Molleturo - Naranjal. 2011. URL <https://www.elmercurio.com.ec/269538-la-via-cuenca-molleturo-naranjal/>.

Maylin Corros, Ernesto Urbáez, y Gustavo Corredor. Manual de Evaluación de Pavimentos. "Maestría en vías terrestres. Modulo III. Diseño de pavimentos I. Evaluación de Pavimentos. 2009. URL <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-de-evaluacion1.pdf>.

Richard Guillén Pérez. *Metodología y Aplicación del Retrocálculo del Deflectómetro de Impacto (FWD) en Pavimentos Flexibles, Caso Practico: Carretera Abancay - Chalhuanca*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Peru, 2009. URL http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4250/1/guillen_pr.pdf.

Dale Harrington y Gary Fick. Guia para Capas de Refuerzo con Hormigon: Soluciones Sustentables para Capas de Refuerzo y Rehabilitacion de Pavimentos Existentes. Inf. Téc. ACPA TB021.03P, National Concrete Pavement Technology Center, Washington, D.C., 2014. URL http://www.cptechcenter.org/technical-library/documents/Overlays_3rd_edition_Spanish.pdf.

Carlos Hernando Higuera Sandoval. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. 19:73–92, 2009. ISSN 0121-1129. URL <http://www.redalyc.org/pdf/4139/413940761006.pdf>.

Long Hoang. Research on the Correlation Between International Roughness Index (IRI) and Present Serviceability Index (PSI), Recommendations on Evaluation Rates in Vietnam's Conditions. pág. 7, 2017.

Yang H. Huang. *Pavement analysis and design*. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2nd ed ed^{ón}, 2004. ISBN 978-0-13-142473-9.

Elias Jiménez Sánchez. *Evaluación Estructural no Destructiva de Pavimentos*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Chihuahua, Sanfandila, 1998. URL <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt107.pdf>.

Augusto Jugo. Técnicas de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos. Inf. téc., Caracas, Colombia, 1991.



- Ying Lee, Hsiang Ker, Chia Lin, y Pei Wu. Study of Backcalculated Pavement Layer Moduli from the LTPP Database. 13(2):145–159, 2010. ISSN 1560-6686. URL <http://mail.tku.edu.tw/yinghaur/lee/papers/tkjse-v13-n2-lee%20001.pdf>.
- Ciro Martínez Bencardino. *Estadística y muestreo*. Ecoe Ediciones, Bogotá (Colombia), 2012. ISBN 978-958-648-702-3. OCLC: 881002693.
- Alfonso Montejó Fonseca. *Ingeniería de pavimentos*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2006. ISBN 978-958-97617-8-6.
- Douglas C. Montgomery y George C. Runger. *Applied statistics and probability for engineers*. Wiley, Hoboken, NJ, 5th ed ed^{ón}., 2011. ISBN 978-0-470-05304-1.
- Muhammad Mubarak. Highway subsurface assessment using pavement surface distress and roughness data. pág. 10, 2016.
- Eduardo Orell. *Rehabilitación de pavimentos asfálticos con capas delgadas de hormigón "Whitetopping"*. Tesis Doctoral, Universidad Austral de Chile, Valdivia - Chile, 2009. URL <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmficio.66r/doc/bmficio.66r.pdf>.
- Von Quintus y Simpson. Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II: Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid Pavements. Inf. Téc. FHWA-RD-01-113, U.S Department of Transportation, Washington, D.C., 2002. URL <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/01113/01113.pdf>.
- Hugo Rondon y Fredy Reyes. *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño*. Macro - Ecoe ediciones, Bogotá, Colombia, primera ed^{ón}., 2015. ISBN 978-612-304-263-9.
- Fernando Sanchez Sabogal. *Fundamentos Teóricos. Guías para el Diseño*. Bogotá, Colombia, primera ed^{ón}., 1982.
- Peter Schmalzer. LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements, Version 4.1. Inf. Téc. FHWA-HRT-06-132, U.S Department of Transporta-



- tion, Washington, D.C., 2009. URL <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/06132/06132.pdf>.
- Luis Simo. Identificación de Fallas en Pavimentos y Técnicas de Reparación (Catálogo de fallas). Inf. téc., Bogotá, Colombia, 1990. URL <http://mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>.
- Suryoto, Dendy Siswoyo, y Ary Setyawan. The evaluation of functional performance of national roadway using three types of pavement assessments methods. pág. 8, 2016.
- Isaac Trujillo. Evaluación funcional y estructural de la vía Cuenca - Molleturo - Puerto Inca. Inf. téc., Quito, Ecuador, 2014.
- Harold Von Quintus, Chetana Rao, y Lynne Irwin. Long-Term Pavement Performance Program Determination of In-Place Elastic Layer Modulus: Backcalculation Methodology and Procedures. Inf. Téc. FHWA-HRT-15-036, U.S Department of Transportation, Washington, D.C., 2015. URL <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/15036/15036.pdf>.
- Luis Ricardo Vázquez Varela. Pavement Condition Index (PCI). Para Pavimentos Asfálticos y de Concreto en Carreteras. 2002. URL <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manual-pci1.pdf>.
- Haifang Wen, Xiaonjun Li, y Wilfung Martono. Performance Assessment of Wisconsin's Whitetopping and Ultra-thin Whitetopping Projects. Informe Tecnico 10-03, Department of Civil and Environmental Engineering Washington State University, Wisconsin, 2010. URL <http://wisconsindot.gov/documents2/research/08-10-final-report.pdf>.
- David White, Pavana Vennapusa, Yang Zhang, y Alex Johnson. Improving the Foundation Layers for Concrete Pavements: Assessment of Seasonal Variations in Concrete Pavement Foundation Layers – Multiple Test Sections in Iowa. Inf. Téc. DTFH 61-06-H-00011 Work Plan 18, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 2016. URL



http://www.intrans.iastate.edu/research/documents/research-reports/improving_foundation_layers_IA_Seasonal_Variations_w_cvr.pdf.



Apéndice A

Formatos para el registro de datos propuestos por la ASTM D6433

A.1. Formato para el registro de patologías presentes en pavimentos flexibles.

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT										SKETCH:		
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____								
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____								
1. Alligator Cracking		6. Depression			11. Patching & Util Cut Patching			16. Shoving				
2. Bleeding		7. Edge Cracking			12. Polished Aggregate			17. Slippage Cracking				
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking			13. Potholes			18. Swell				
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off			14. Railroad Crossing			19. Weathering/Raveling				
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking			15. Rutting							
DISTRESS SEVERITY	QUANTITY								TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	

A.2. Formato para el registro de patologías presentes en pavimentos rígidos.

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT								SKETCH:		
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____						
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____						
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving				
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking				
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell				
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling				
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting						
DISTRESS SEVERITY	QUANTITY							TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE



Apéndice B

Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional.

Tabla B.1: Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (1/4)

RESUMEN EVALUACIÓN CARRIL IZQUIERDO - DERECHO																					
ABSCISA	Grietas de esquina			Losa Dividida			Escala			Sello de junta			Grieta lineal			Parcheo (grande)			Parcheo (pequeño)		
	Inicio	Final	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	
107+000	107+100	4	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+100	107+200	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+200	107+300	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+300	107+400	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+400	107+500	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+500	107+600	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
107+600	107+700	2	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+700	107+800	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+800	107+900	1	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
107+900	108+000	4	1	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+000	108+100	-	1	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+100	108+200	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+200	108+300	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+300	108+400	1	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+400	108+500	-	1	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+500	108+600	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+600	108+700	2	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+700	108+800	2	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+800	108+900	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
108+900	109+000	1	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
109+000	109+100	2	1	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla B.2: Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (2/4)

RESUMEN EVALUACIÓN CARRIL IZQUIERDO - DERECHO																							
ABSCISA		Grietas de esquina			Losa Dividida			Escala			Sello de junta			Grieta lineal			Parcheo (grande)			Parcheo (pequeño)			
Inicio	Final	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	
109+100	109+200	4	-	-	13	-	-	-	-	-	X	-	-	22	1	-	-	-	-	-	-	-	
109+200	109+300	6	2	-	15	-	-	-	-	-	X	-	-	18	3	-	-	-	-	-	-	-	
109+300	109+400	5	1	-	20	-	-	-	-	-	X	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	
109+400	109+500	7	3	-	14	-	-	-	-	-	X	-	-	15	2	-	-	-	-	-	-	-	
109+500	109+600	7	4	1	13	-	-	-	-	-	X	-	-	11	1	-	-	-	-	-	-	-	
109+600	109+700	4	2	-	17	-	-	-	-	-	X	-	-	19	1	-	-	-	-	-	-	-	
109+700	109+800	12	3	-	4	3	1	-	-	-	X	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	
109+800	109+900	6	1	1	4	-	-	-	-	-	-	X	-	16	1	-	1	-	-	-	-	-	
109+900	110+000	11	6	-	4	-	-	-	-	-	-	X	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+000	110+100	9	4	-	7	-	-	-	-	-	-	X	-	13	3	-	-	-	-	-	-	-	
110+100	110+200	8	-	-	4	1	-	-	-	-	-	X	-	13	2	-	-	-	-	-	-	-	
110+200	110+300	10	1	1	4	-	-	-	-	-	-	X	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+300	110+400	10	1	-	14	1	-	-	-	-	-	X	-	12	4	-	-	-	-	-	-	-	
110+400	110+500	13	-	-	9	-	-	-	1	-	-	-	X	13	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+500	110+600	10	1	-	12	-	-	-	-	-	-	-	X	12	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+600	110+700	12	-	-	4	-	-	-	1	-	-	-	X	6	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+700	110+800	4	1	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+800	110+900	4	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	
110+900	111+000	7	-	-	-	-	-	-	4	1	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	
111+000	111+100	7	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	
111+100	111+200	5	2	-	4	-	-	-	2	-	-	-	X	23	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla B.3: Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (3/4)

RESUMEN EVALUACIÓN CARRIL IZQUIERDO - DERECHO																											
ABSCISA	Grietas de esquina			Losa Dividida			Escala			Sello de junta			Grieta lineal			Parcheo (grande)			Parcheo (pequeño)								
	Inicio	Final	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H						
111+200	111+300	1	1	-	-	-	1	1	-	X	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+300	111+400	2	2	-	1	-	-	-	-	X	-	-	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+400	111+500	6	3	-	2	1	-	1	-	X	-	-	13	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+500	111+600	3	1	3	3	2	-	-	-	X	-	-	17	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+600	111+700	4	1	-	20	1	1	-	-	X	-	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+700	111+800	1	-	-	2	-	-	-	-	X	-	-	18	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+800	111+900	-	-	-	2	-	-	-	-	-	X	-	22	5	-	-	-	-	-	-	-	-					
111+900	112+000	2	-	-	6	-	-	-	-	-	X	-	18	4	-	-	-	-	-	-	-	-					
112+000	112+054	-	-	-	1	1	-	-	-	-	X	X	8	5	-	-	-	-	-	-	-	-					
112+216	112+270	1	-	-	3	-	-	-	-	-	X	X	8	1	1	-	-	-	-	-	-	-					
112+432	112+486	-	1	-	4	-	-	-	-	-	X	X	3	4	1	-	-	-	-	-	-	-					
112+648	112+702	1	1	2	3	1	-	-	-	-	X	X	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-					
112+864	112+918	-	-	-	11	1	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
113+080	113+134	-	-	-	6	-	-	-	-	-	X	X	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
113+188	113+242	6	3	-	4	-	-	-	-	-	X	X	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
113+512	113+566	13	1	1	4	-	-	-	-	-	X	X	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
113+728	113+782	3	-	-	3	1	-	-	-	-	X	X	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-					
113+944	113+998	2	-	-	5	-	-	-	-	-	X	X	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-					

Tabla B.4: Recopilación de los datos obtenidos en la evaluación funcional (4/4)

ABSCISA		Grietas de esquina			Losa Dividida			Escala			Sello de junta			Grieta lineal			Parcheo (grande)			Parcheo (pequeño)		
Inicio	Final	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
114+160	114+214	3	2	-	5	-	-	-	-	-	X	X	X	9	1	-	-	-	-	-	-	-
114+376	114+430	5	1	3	3	-	1	-	-	-	X	X	X	3	1	-	-	-	-	-	-	-
114+592	114+646	10	-	2	5	-	-	-	-	-	X	X	X	5	2	-	-	-	-	-	-	-
114+808	114+862	5	1	-	1	1	-	-	-	-	X	X	X	10	-	-	-	-	-	-	-	1
115+024	115+078	5	-	-	4	-	-	-	-	-	X	X	X	10	-	-	-	-	-	-	-	-
115+240	115+294	2	-	1	1	-	-	-	-	-	X	X	X	6	-	-	-	-	-	-	-	-
115+348	115+402	4	-	1	6	-	-	-	-	-	X	X	X	4	-	-	-	-	-	-	-	-
115+672	115+726	5	2	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	8	-	-	-	-	-	-	-	-
115+888	115+942	1	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	3	-	-	-	-	-	-	-	-
116+104	116+158	5	2	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	10	-	-	-	-	-	-	-	-
116+320	116+374	2	2	-	7	1	-	-	-	-	X	X	X	8	1	-	-	-	-	-	-	-
116+536	116+590	2	-	-	3	-	-	-	-	-	X	X	X	9	-	-	-	-	-	-	-	-
116+752	116+806	1	-	-	8	3	-	-	-	-	X	X	X	7	-	-	-	-	-	-	-	-
116+968	117+022	1	-	-	2	-	-	-	-	-	X	X	X	8	4	-	-	-	-	-	-	-



Apéndice C

PCI para cada unidad de muestro



Tabla C.1: PCI para cada unidad de muestro con su respectivo abscisado.

Inicio	Final	<i>PCI</i>	Inicio	Final	<i>PCI</i>	Inicio	Final	<i>PCI</i>
107+000	107+100	84	110+400	110+500	60	113+836	113+890	62
107+100	107+200	91	110+500	110+600	60	113+890	113+944	64
107+200	107+300	92	110+600	110+700	71	113+944	113+998	69
107+300	107+400	84	110+700	110+800	84	114+052	114+106	65
107+400	107+500	89	110+800	110+900	86	114+160	114+214	59
107+500	107+600	96	110+900	111+000	78	114+268	114+322	73
107+600	107+700	89	111+000	111+100	78	114+376	114+430	54
107+700	107+800	88	111+100	111+200	70	114+484	114+538	70
107+800	107+900	87	111+200	111+300	75	114+592	114+646	53
107+900	108+000	85	111+300	111+400	74	114+700	114+754	64
108+000	108+100	89	111+400	111+500	70	114+808	114+862	59
108+100	108+200	86	111+500	111+600	63	114+916	114+970	72
108+200	108+300	86	111+600	111+700	59	114+970	115+024	69
108+300	108+400	89	111+700	111+800	71	115+024	115+078	65
108+400	108+500	84	111+800	111+900	74	115+132	115+186	61
108+500	108+600	88	111+900	112+000	68	115+240	115+294	77
108+600	108+700	83	112+000	112+054	72	115+348	115+402	65
108+700	108+800	85	112+108	112+162	67	115+456	115+510	66
108+800	108+900	91	112+216	112+270	72	115+564	115+618	72
108+900	109+000	86	112+324	112+378	73	115+672	115+726	72
109+000	109+100	65	112+432	112+486	72	115+780	115+834	82
109+100	109+200	59	112+486	112+540	68	115+888	115+942	90
109+200	109+300	57	112+540	112+594	61	115+996	116+050	70
109+300	109+400	52	112+648	112+702	66	116+104	116+158	69
109+400	109+500	56	112+756	112+810	58	116+212	116+266	60
109+500	109+600	57	112+864	112+918	58	116+320	116+374	57
109+600	109+700	55	112+972	133+026	66	116+428	116+482	54
109+700	109+800	60	113+080	113+134	71	116+536	116+590	67
109+800	109+900	70	113+188	113+242	68	116+590	116+644	64
109+900	110+000	64	113+296	113+350	58	116+698	116+752	54
110+000	110+100	64	113+404	113+458	66	116+752	116+806	55
110+100	110+200	72	113+512	113+566	53	116+860	116+914	60
110+200	110+300	67	113+620	113+674	62	116+968	117+022	75
110+300	110+400	45	113+728	113+782	73			
PCI PROMEDIO: 74								



Apéndice D

Secciones homogéneas



Tabla D.1: Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (1/3).

Abscisa (km)	Intervalo de distancia	Distancia acumulada	Módulo de reacción de la subrasante (k)	Intervalo Promedio	Área intervalo	Área acumulada	Diferencia acumulada (Zx)
107+000	100,00	107000,00	186,70	186,70	18669,80	18669,80	-25965309,18
107+100	100,00	107100,00	229,74	208,22	20822,14	39491,94	-25968771,13
107+200	100,00	107200,00	177,96	203,85	20385,14	59877,08	-25972670,08
107+300	100,00	107300,00	250,53	214,24	21424,31	81301,39	-25975529,87
107+400	100,00	107400,00	247,77	249,15	24914,89	106216,28	-25974899,07
107+500	100,00	107500,00	243,79	245,78	24578,13	130794,41	-25974605,03
107+600	100,00	107600,00	179,75	211,77	21177,19	151971,60	-25977711,94
107+700	100,00	107700,00	214,76	197,26	19725,74	171697,33	-25982270,29
107+800	100,00	107800,00	192,74	203,75	20375,27	192072,60	-25986179,12
107+900	100,00	107900,00	315,99	254,37	25436,72	217509,32	-25985026,49
108+000	100,00	108000,00	214,37	265,18	26518,32	244027,64	-25982792,26
108+100	100,00	108100,00	382,87	298,62	29861,95	273889,60	-25977214,40
108+200	100,00	108200,00	162,68	272,77	27277,22	301166,81	-25974221,28
108+300	100,00	108300,00	382,05	272,36	27236,29	328403,10	-25971269,09
108+400	100,00	108400,00	200,73	291,39	29138,65	357541,75	-25966414,52
108+500	100,00	108500,00	338,78	269,75	26975,31	384517,07	-25963723,30
108+600	100,00	108600,00	221,18	279,98	27997,84	412514,91	-25960009,55
108+700	100,00	108700,00	368,12	294,65	29464,61	441979,52	-25954829,03
108+800	100,00	108800,00	210,61	289,36	28936,39	470915,91	-25950176,73
108+900	100,00	108900,00	308,04	259,33	25932,72	496848,64	-25948528,10
109+000	100,00	109000,00	153,89	230,97	23096,52	519945,16	-25949715,67
109+100	100,00	109100,00	300,19	227,04	22703,87	542649,03	-25951295,89
109+200	100,00	109200,00	181,49	240,84	24084,12	566733,15	-25951495,87
109+300	100,00	109300,00	264,33	222,91	22291,12	589024,27	-25953488,84
109+400	100,00	109400,00	248,41	256,37	25636,92	614661,19	-25952136,01
109+500	100,00	109500,00	213,62	231,01	23101,47	637762,66	-25953318,64
109+600	100,00	109600,00	234,46	224,04	22403,90	660166,56	-25955198,82
109+700	100,00	109700,00	253,94	244,20	24419,90	684586,46	-25955063,01
109+800	100,00	109800,00	232,43	243,18	24318,44	708904,90	-25955028,67
109+900	100,00	109900,00	347,21	289,82	28982,18	737887,08	-25950330,58
110+000	100,00	110000,00	258,51	302,86	30286,20	768173,27	-25944328,48
110+100	100,00	110100,00	220,79	239,65	23965,10	792138,37	-25944647,47
110+200	100,00	110200,00	173,13	196,96	19696,01	811834,39	-25949235,55

Tabla D.2: Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (2/3).

Abscisa (km)	Intervalo de distancia	Distancia acumulada	Módulo de reacción de la subrasante (k)	Intervalo Promedio	Área intervalo	Área acumulada	Diferencia acumulada (Zx)
110+300	100,00	110300,00	248,70	210,92	21091,59	832925,98	-25952428,06
110+400	100,00	110400,00	262,60	255,65	25565,12	858491,09	-25951147,03
110+500	100,00	110500,00	258,36	260,48	26048,07	884539,16	-25949383,05
110+600	100,00	110600,00	284,85	271,61	27160,59	911699,76	-25946506,55
110+700	100,00	110700,00	247,68	266,26	26626,26	938326,02	-25944164,39
110+800	100,00	110800,00	188,87	218,28	21827,58	960153,60	-25946620,89
110+900	100,00	110900,00	393,03	290,95	29095,10	989248,70	-25941809,89
111+000	100,00	111000,00	220,98	307,00	30700,44	1019949,14	-25935393,54
111+100	100,00	111100,00	325,89	273,43	27343,38	1047292,52	-25932334,25
111+200	100,00	111200,00	346,97	336,43	33642,66	1080935,18	-25922975,69
111+300	100,00	111300,00	394,48	370,72	37072,28	1118007,46	-25910187,50
111+400	100,00	111400,00	220,52	307,50	30749,87	1148757,33	-25903721,72
111+500	100,00	111500,00	464,92	342,72	34271,91	1183029,24	-25893733,90
111+600	100,00	111600,00	343,83	404,37	40437,32	1223466,56	-25877580,67
111+700	100,00	111700,00	385,49	364,66	36465,81	1259932,38	-25865398,95
111+800	100,00	111800,00	218,21	301,85	30184,96	1290117,34	-25859498,08
111+900	100,00	111900,00	313,35	265,78	26577,76	1316695,10	-25857204,41
112+000	100,00	112000,00	198,65	256,00	25599,79	1342294,90	-25855888,71
112+100	100,00	112100,00	394,06	296,36	29635,59	1371930,49	-25850537,21
112+200	100,00	112200,00	170,09	282,08	28207,74	1400138,22	-25846613,57
112+300	100,00	112300,00	266,30	218,20	21819,93	1421958,16	-25849077,73
112+400	100,00	112400,00	172,22	219,26	21926,00	1443884,16	-25851435,82
112+500	100,00	112500,00	325,22	248,72	24871,87	1468756,03	-25850848,04
112+600	100,00	112600,00	209,29	267,26	26725,74	1495481,77	-25848406,39
112+700	100,00	112700,00	275,03	242,16	24216,16	1519697,92	-25848474,33
112+800	100,00	112800,00	200,45	237,74	23773,97	1543471,89	-25848984,46
112+900	100,00	112900,00	260,79	230,62	23061,70	1566533,58	-25850206,85
113+000	100,00	113000,00	192,19	226,49	22648,59	1589182,17	-25851842,36
113+100	100,00	113100,00	242,39	217,29	21728,83	1610911,00	-25854397,63
113+200	100,00	113200,00	332,10	287,24	28724,35	1639635,34	-25849957,37
113+300	100,00	113300,00	342,18	337,14	33713,73	1673349,07	-25840527,74
113+400	100,00	113400,00	254,31	298,24	29824,17	1703173,24	-25834987,66
113+500	100,00	113500,00	431,99	343,15	34314,76	1737488,01	-25824956,99
113+600	100,00	113600,00	170,92	301,45	30145,26	1767633,27	-25819095,82



Tabla D.3: Determinación de secciones homogéneas para el módulo de reacción de la subrasante en el tramo 107+000 a 117+000 (3/3)

Abscisa (km)	Intervalo de distancia	Distancia acumulada	Módulo de reacción de la subrasante (k)	Intervalo Promedio	Área intervalo	Área acumulada	Diferencia acumulada (Zx)
113+700	100,00	113700,00	309,11	240,01	24001,15	1791634,42	-25819378,76
113+800	100,00	113800,00	261,65	285,38	28537,89	1820172,31	-25815124,96
113+900	100,00	113900,00	240,97	251,31	25131,20	1845303,50	-25814277,86
114+000	100,00	114000,00	241,95	241,46	24146,23	1869449,73	-25814415,72
114+100	100,00	114100,00	251,14	246,55	24654,62	1894104,35	-25814045,20
114+200	100,00	114200,00	215,13	233,14	23313,79	1917418,14	-25815015,50
114+300	100,00	114300,00	229,55	222,34	22234,19	1939652,33	-25817065,40
114+400	100,00	114400,00	225,89	227,72	22771,95	1962424,28	-25818577,54
114+500	100,00	114500,00	167,02	196,45	19645,28	1982069,56	-25823216,36
114+600	100,00	114600,00	199,59	183,30	18330,45	2000400,01	-25829170,00
114+700	100,00	114700,00	179,61	189,60	18959,98	2019359,99	-25834494,11
114+800	100,00	114800,00	200,86	190,23	19023,32	2038383,31	-25839754,89
114+900	100,00	114900,00	169,07	184,97	18496,61	2056879,92	-25845542,37
115+000	100,00	115000,00	231,18	200,13	20012,63	2076892,55	-25849813,83
115+100	100,00	115100,00	169,68	200,43	20043,24	2096935,80	-25854054,68
115+200	100,00	115200,00	202,29	185,99	18598,76	2115534,56	-25859740,00
115+300	100,00	115300,00	119,94	161,12	16111,50	2131646,07	-25867912,59
115+400	100,00	115400,00	171,75	145,85	14584,56	2146230,62	-25877612,13
115+500	100,00	115500,00	171,69	171,72	17172,15	2163402,77	-25884724,07
115+600	100,00	115600,00	153,86	162,78	16277,69	2179680,46	-25892730,47
115+700	100,00	115700,00	164,54	159,20	15920,24	2195600,70	-25901094,33
115+800	100,00	115800,00	182,07	173,30	17330,36	2212931,06	-25908048,06
115+900	100,00	115900,00	141,31	161,69	16168,99	2229100,05	-25916163,17
116+000	100,00	116000,00	157,17	149,24	14924,11	2244024,16	-25925523,15
116+100	100,00	116100,00	249,57	203,37	20336,81	2264360,96	-25929470,43
116+200	100,00	116200,00	177,69	213,63	21362,69	2285723,66	-25932391,83
116+300	100,00	116300,00	157,32	167,50	16750,32	2302473,98	-25939925,60
116+400	100,00	116400,00	213,33	185,33	18532,55	2321006,54	-25945677,14
116+500	100,00	116500,00	156,52	184,93	18492,66	2339499,19	-25951468,57
116+600	100,00	116600,00	184,93	170,72	17072,42	2356571,61	-25958680,25
116+700	100,00	116700,00	160,04	172,48	17248,43	2373820,04	-25965715,91
116+800	100,00	116800,00	169,19	164,62	16461,52	2390281,57	-25973538,48
116+900	100,00	116900,00	170,96	170,07	17007,50	2407289,06	-25980815,07
117+000	100,00	117000,00	251,44	211,20	21120,19	2428409,25	-25983978,98



Apéndice E

Módulo de reacción de la subrasante



Tabla E.1: Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (1/3)

Ec. 3.5	Ec. 3.6				Ec. 3.7	Ec. 3.11	Ec. 3.9	Ec. 3.10	Ec. 3.13	k (pci)/2
Area7 (in)	lest (in)	P (libras)	do (in)	do* (in)	kest (pci)	L	AF do	AF I	k (pci)	K estático (pci)
39,487	30,606	14401,329	0,005	0,123	404,025	162,804	0,926	0,974	459,49	229,745
38,586	29,346	14453,035	0,005	0,123	447,184	162,804	0,933	0,978	501,057	250,528
38,865	29,727	14583,425	0,005	0,123	433,241	162,804	0,931	0,977	487,586	243,793
39,458	30,564	14554,199	0,005	0,123	377,872	162,804	0,926	0,975	429,528	214,764
35,894	26,044	14720,559	0,005	0,122	584,16	162,804	0,949	0,987	631,987	315,993
34,474	24,533	14509,237	0,004	0,122	717,726	162,804	0,957	0,99	765,732	382,866
34,996	25,072	14484,508	0,004	0,122	712,749	162,804	0,954	0,989	764,095	382,047
35,266	25,358	14630,635	0,004	0,122	630,371	162,804	0,953	0,988	677,561	338,781
34,727	24,792	14576,68	0,004	0,122	688,496	162,804	0,955	0,989	736,232	368,116
35,285	25,378	14668,853	0,005	0,122	573,07	162,804	0,953	0,988	616,085	308,042
34,175	24,233	14684,589	0,005	0,122	564,208	162,804	0,958	0,99	600,379	300,189
35,557	25,672	14592,417	0,006	0,122	490,395	162,804	0,951	0,988	528,659	264,329
38,014	28,59	14599,161	0,006	0,122	384,577	162,804	0,937	0,98	427,24	213,62
37,72	28,214	14345,126	0,005	0,122	459,064	162,804	0,938	0,981	507,88	253,94
35,472	25,58	14608,154	0,004	0,122	644,727	162,804	0,952	0,988	694,43	347,215
37,862	28,395	14650,868	0,006	0,122	398,351	162,804	0,938	0,981	441,586	220,793
35,741	25,875	14702,574	0,006	0,122	460,517	162,804	0,95	0,987	497,409	248,704
37,901	28,445	14502,493	0,005	0,122	465,875	162,804	0,937	0,981	516,727	258,364
40,218	31,692	14621,642	0,004	0,123	429,738	162,804	0,92	0,971	495,354	247,677
30,214	20,73	14630,635	0,005	0,121	758,292	162,804	0,973	0,996	786,055	393,027
37,432	27,853	14608,154	0,004	0,122	591,43	162,804	0,94	0,982	651,772	325,886
36,598	26,849	14441,794	0,003	0,122	723,455	162,804	0,945	0,985	788,957	394,479
32,842	22,959	14560,944	0,004	0,121	882,978	162,804	0,964	0,993	929,839	464,919
36,472	26,702	14617,146	0,004	0,122	708,02	162,804	0,946	0,985	770,978	385,489
29,98	20,548	14504,741	0,007	0,121	605,247	162,804	0,974	0,996	626,69	313,345
34,954	25,028	14551,951	0,004	0,122	735,456	162,804	0,954	0,989	788,122	394,061
35,558	25,674	14513,734	0,005	0,122	494,053	162,804	0,951	0,988	532,61	266,305
37,374	27,781	14574,432	0,004	0,122	590,679	162,804	0,941	0,983	650,444	325,222
40,272	31,776	14529,47	0,004	0,123	476,697	162,804	0,92	0,971	550,061	275,031
39,881	31,184	14596,913	0,004	0,123	455,369	162,804	0,923	0,973	521,57	260,785
42,235	35,054	14540,711	0,004	0,123	402,124	162,804	0,902	0,959	484,78	242,39
37,443	27,866	14590,169	0,004	0,122	620,907	162,804	0,94	0,982	684,355	342,178
33,529	23,603	14531,718	0,004	0,121	816,233	162,804	0,961	0,992	863,979	431,989
37,245	27,622	14453,035	0,004	0,122	562,358	162,804	0,941	0,983	618,215	309,107
42,604	35,735	14596,913	0,004	0,123	395,947	162,804	0,898	0,956	481,947	240,974
37,253	27,633	14536,215	0,005	0,122	456,849	162,804	0,941	0,983	502,283	251,141
36,807	27,094	14623,891	0,006	0,122	419,925	162,804	0,944	0,984	459,099	229,549
38,713	29,518	14374,351	0,007	0,123	297,524	162,804	0,932	0,978	334,032	167,016
39,925	31,25	14698,078	0,006	0,123	313,364	162,804	0,923	0,972	359,213	179,607



Tabla E.2: Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (2/3)

Ec. 3.5	Ec. 3.6				Ec. 3.7	Ec. 3.11	Ec. 3.9	Ec. 3.10	Ec. 3.13	k (pci)/2
Area7 (in)	lest (in)	P (libras)	do (in)	do* (in)	kest (pci)	L	AF do	AF I	k (pci)	K estático (pci)
41,725	34,149	14626,139	0,005	0,123	284,02	162,804	0,907	0,962	338,145	169,072
43,16	36,804	14644,123	0,005	0,123	274,543	162,804	0,892	0,952	339,369	169,685
43,022	36,533	14241,714	0,007	0,123	194,824	162,804	0,894	0,953	239,879	119,939
39,424	30,515	14558,696	0,006	0,123	302,265	162,804	0,926	0,975	343,382	171,691
39,526	30,662	14574,432	0,007	0,123	289,164	162,804	0,926	0,974	329,084	164,542
42,189	34,971	14684,589	0,006	0,123	234,713	162,804	0,902	0,959	282,629	141,315
25,267	17,325	14551,951	0,012	0,12	490,192	162,804	0,985	0,999	499,137	249,569
37,748	28,249	14628,387	0,008	0,122	284,29	162,804	0,938	0,981	314,642	157,321
41,915	34,482	14524,974	0,006	0,123	261,741	162,804	0,905	0,961	313,047	156,523
39,869	31,166	14626,139	0,007	0,123	279,523	162,804	0,923	0,973	320,087	160,044
35,524	25,636	14736,296	0,009	0,122	317,285	162,804	0,951	0,988	341,926	170,963
39,956	31,297	14527,222	0,006	0,123	325,548	162,804	0,922	0,972	373,396	186,698
38,376	29,065	14605,906	0,007	0,122	318,672	162,804	0,934	0,979	355,916	177,958
36,006	26,169	14619,394	0,006	0,122	457,483	162,804	0,949	0,986	495,539	247,769
39,2	30,195	14671,101	0,006	0,123	317,671	162,804	0,928	0,976	359,501	179,751
39,263	30,284	14623,891	0,006	0,123	340,267	162,804	0,928	0,975	385,482	192,741
40,543	32,197	14468,772	0,005	0,123	369,568	162,804	0,917	0,969	428,746	214,373
42,208	35,006	14529,47	0,005	0,123	270,063	162,804	0,902	0,959	325,357	162,678
40,512	32,149	14421,562	0,005	0,123	346,257	162,804	0,918	0,969	401,452	200,726
38,019	28,597	14513,734	0,005	0,122	398,152	162,804	0,937	0,98	442,353	221,176
38,506	29,239	14342,878	0,005	0,123	376,397	162,804	0,933	0,979	421,224	210,612
40,97	32,88	14432,802	0,006	0,123	262,949	162,804	0,914	0,967	307,776	153,888
39,232	30,241	14736,296	0,006	0,123	320,576	162,804	0,928	0,976	362,986	181,493
37,341	27,741	14673,349	0,005	0,122	451,36	162,804	0,941	0,983	496,818	248,409
37,283	27,669	14367,607	0,005	0,122	426,336	162,804	0,941	0,983	468,916	234,458
38,811	29,653	14653,116	0,005	0,123	413,403	162,804	0,931	0,977	464,857	232,429
38,609	29,377	14414,817	0,004	0,123	461,263	162,804	0,932	0,978	517,018	258,509
40,593	32,276	14664,356	0,006	0,123	298,159	162,804	0,917	0,969	346,255	173,127
36,63	26,886	14662,108	0,005	0,122	481,408	162,804	0,945	0,985	525,196	262,598
39,612	30,786	14558,696	0,004	0,123	499,828	162,804	0,925	0,974	569,696	284,848
43,349	37,18	14421,562	0,004	0,123	303,912	162,804	0,89	0,951	377,749	188,875
42,328	35,224	14671,101	0,004	0,123	365,732	162,804	0,901	0,958	441,963	220,981
32,72	22,848	14650,868	0,005	0,121	659,532	162,804	0,964	0,993	693,934	346,967
35,546	25,661	14453,035	0,007	0,122	409,16	162,804	0,951	0,988	441,037	220,519
33,347	23,429	14785,754	0,005	0,121	650,57	162,804	0,962	0,992	687,654	343,827
37,668	28,148	14473,268	0,006	0,122	394,756	162,804	0,939	0,982	436,42	218,21
36,79	27,075	14426,058	0,007	0,122	363,475	162,804	0,944	0,984	397,302	198,651
39,803	31,068	14583,425	0,006	0,123	297,437	162,804	0,924	0,973	340,188	170,094
38,903	29,78	14468,772	0,007	0,123	305,853	162,804	0,93	0,977	344,43	172,215



Tabla E.3: Módulos de reacción de la subrasante con sus respectivos valores de cada ecuación (3/3)

Ec. 3.5	Ec. 3.6				Ec. 3.7	Ec. 3.11	Ec. 3.9	Ec. 3.10	Ec. 3.13	k (pci)/2
Area7 (in)	lest (in)	P (libras)	do (in)	do* (in)	kest (pci)	L	AF do	AF l	k (pci)	K estático (pci)
38,932	29,819	14619,394	0,005	0,123	371,529	162,804	0,93	0,977	418,585	209,293
37	27,325	14572,184	0,007	0,122	365,815	162,804	0,943	0,984	400,898	200,449
39,208	30,207	14551,951	0,006	0,123	339,602	162,804	0,928	0,976	384,373	192,187
37,654	28,13	14399,081	0,004	0,122	600,9	162,804	0,939	0,982	664,194	332,097
36,377	26,591	14491,253	0,005	0,122	467,596	162,804	0,947	0,985	508,612	254,306
41,363	33,53	14506,989	0,005	0,123	289,533	162,804	0,91	0,965	341,831	170,916
37,778	28,287	14455,283	0,005	0,122	472,622	162,804	0,938	0,981	523,301	261,65
37,45	27,875	14648,62	0,005	0,122	438,996	162,804	0,94	0,982	483,902	241,951
37,705	28,195	14448,539	0,006	0,122	388,99	162,804	0,939	0,981	430,269	215,135
36,952	27,268	14338,382	0,006	0,122	412,49	162,804	0,943	0,984	451,779	225,89
39,873	31,172	14412,569	0,005	0,123	348,57	162,804	0,923	0,973	399,186	199,593
39,385	30,458	14527,222	0,005	0,123	353,858	162,804	0,927	0,975	401,72	200,86
37,882	28,421	14518,23	0,005	0,122	416,972	162,804	0,937	0,981	462,361	231,18
38,004	28,577	14599,161	0,006	0,122	364,233	162,804	0,937	0,98	404,581	202,291
40,305	31,828	14542,959	0,006	0,123	297,493	162,804	0,919	0,971	343,504	171,752
40,912	32,787	14421,562	0,006	0,123	263,229	162,804	0,914	0,967	307,725	153,863
36,729	27,002	14430,554	0,007	0,122	333,378	162,804	0,945	0,984	364,13	182,065
40,427	32,017	14439,546	0,006	0,123	271,577	162,804	0,918	0,97	314,335	157,168
39,112	30,071	14626,139	0,006	0,123	314,484	162,804	0,929	0,976	355,37	177,685
37,064	27,402	14612,65	0,006	0,122	389,011	162,804	0,943	0,984	426,66	213,33
38,487	29,214	14471,02	0,006	0,123	330,585	162,804	0,933	0,979	369,85	184,925
39,122	30,085	14572,184	0,007	0,123	299,393	162,804	0,929	0,976	338,374	169,187
34,487	24,547	14637,379	0,006	0,122	471,299	162,804	0,956	0,99	502,881	251,441



Apéndice F

Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el método AASHTO.



Tabla F.1: Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (1/3)

	Ec. 3.16	Ec. 3.15			Ec. 3.17	k (pci) / 2	Ec. 3.14	
Abscisa	Area (in)	lk (in)	P (libras)	do (in)	k (pci)	K estatico (pci)	Ec (psi)	Ec (Mpa)
107+000	28,396	28,079	14401,329	0,005	478,911	239,455	6820645,705	47026,715
107+100	27,858	26,572	14453,035	0,005	543,884	271,942	6211879,51	42829,418
107+200	27,976	26,89	14583,425	0,005	528,004	264,002	6324105,873	43603,192
107+300	28,328	27,88	14554,199	0,005	453,008	226,504	6270347,855	43232,544
107+400	26,653	23,722	14720,559	0,005	701,944	350,972	5092968,637	35114,796
107+500	25,855	22,146	14509,237	0,004	877,366	438,683	4835047,518	33336,492
107+600	26,028	22,469	14484,508	0,004	883,836	441,918	5161284,793	35585,82
107+700	26,245	22,89	14630,635	0,004	770,852	385,426	4848001,458	33425,807
107+800	26,107	22,62	14576,68	0,004	824,323	412,162	4944607,958	34091,885
107+900	25,941	22,306	14668,853	0,005	738,132	369,066	4186511,595	28864,993
108+000	25,569	21,629	14684,589	0,005	704,979	352,49	3534756,183	24371,296
108+100	26,309	23,016	14592,417	0,006	607,743	303,872	3907188,24	26939,125
108+200	28,197	27,501	14599,161	0,006	415,393	207,697	5443337,613	37530,506
108+300	27,236	25,021	14345,126	0,005	581,468	290,734	5221179,689	35998,781
108+400	26,177	22,756	14608,154	0,004	811,172	405,586	4983738,898	34361,684
108+500	27,334	25,254	14650,868	0,006	501,754	250,877	4675460,633	32236,179
108+600	26,291	22,98	14702,574	0,006	581,331	290,666	3714340,702	25609,488
108+700	27,276	25,115	14502,493	0,005	595,258	297,629	5425750,893	37409,25
108+800	28,456	28,257	14621,642	0,004	538,85	269,425	7870619,297	54266,031
108+900	23,312	18,25	14630,635	0,005	970,785	485,392	2467038,227	17009,636
109+000	27,039	24,567	14608,154	0,004	757,064	378,532	6318201,647	43562,484
109+100	26,738	23,903	14441,794	0,003	909,179	454,59	6799568,705	46881,394
109+200	24,84	20,414	14560,944	0,004	1110,864	555,432	4419708,855	30472,832
109+300	26,713	23,849	14617,146	0,004	884,177	442,089	6552676,162	45179,129
109+400	23,29	18,222	14504,741	0,007	763,893	381,947	1929466,723	13303,21
109+500	25,836	22,111	14551,951	0,004	937,818	468,909	5135119,956	35405,42
109+600	25,957	22,334	14513,734	0,005	649,339	324,67	3701587,588	25521,558
109+700	27,36	25,314	14574,432	0,004	709,429	354,715	6674251,716	46017,364
109+800	28,35	27,944	14529,47	0,004	614,131	307,065	8578957,524	59149,853
109+900	28,027	27,028	14596,913	0,004	603,596	301,798	7379759,798	50881,673
110+000	29,277	30,957	14540,711	0,004	513,918	256,959	10812701,22	74550,98
110+100	27,083	24,666	14590,169	0,004	789,309	394,654	6694170,685	46154,7
110+200	25,034	20,725	14531,718	0,004	1052,552	526,276	4448563,804	30671,78
110+300	27,281	25,127	14453,035	0,004	677,654	338,827	6188797,164	42670,271



Tabla F.2: Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (2/3)

	Ec. 3.16	Ec. 3.15			Ec. 3.17	k (pci) / 2	Ec. 3.14	
Abscisa	Area (in)	lk (in)	P (libras)	do (in)	k (pci)	K estatico (pci)	Ec (psi)	Ec (Mpa)
110+400	29,323	31,124	14596,913	0,004	520,049	260,025	11180352,13	77085,845
110+500	27,352	25,297	14536,215	0,005	543,699	271,85	5101264,941	35171,997
110+600	27,24	25,031	14623,891	0,006	490,889	245,444	4415171,75	30441,55
110+700	28,321	27,858	14374,351	0,007	333,604	166,802	4603273,935	31738,469
110+800	28,838	29,453	14698,078	0,006	352,291	176,146	6073397,416	41874,618
110+900	29,292	31,011	14626,139	0,005	343,567	171,784	7279163,723	50188,087
111+000	29,84	33,134	14644,123	0,005	337,831	168,916	9328995,372	64321,184
111+100	30,136	34,416	14241,714	0,007	219,211	109,605	7045583,973	48577,611
111+200	28,403	28,1	14558,696	0,006	355,689	177,844	5080557,203	35029,223
111+300	28,377	28,022	14574,432	0,007	345,369	172,685	4878986,337	33639,44
111+400	29,783	32,9	14684,589	0,006	264,794	132,397	7107307,715	49003,181
111+500	19,932	14,735	14551,951	0,012	666,627	333,313	719997,462	4964,21
111+600	27,308	25,192	14628,387	0,008	356,194	178,097	3286727,571	22661,198
111+700	29,404	31,423	14524,974	0,006	314,438	157,219	7023407,032	48424,706
111+800	28,621	28,762	14626,139	0,007	327,527	163,764	5135125,855	35405,46
111+900	26,084	22,576	14736,296	0,009	407,176	203,588	2423411,801	16708,843
112+000	28,843	29,468	14527,222	0,006	366,695	183,347	6334650,986	43675,898
112+100	28,205	27,524	14605,906	0,007	354,915	177,457	4666791,029	32176,404
112+200	26,846	24,138	14619,394	0,006	536,389	268,195	4171554,731	28761,869
112+300	28,312	27,831	14671,101	0,006	373,129	186,564	5128925,984	35362,714
112+400	28,632	28,793	14623,891	0,006	376,017	188,008	5921105,54	40824,602
112+500	29,074	30,241	14468,772	0,005	418,305	209,152	8014987,209	55261,413
112+600	30,074	34,139	14529,47	0,005	283,793	141,897	8831526,169	60891,253
112+700	29,576	32,074	14421,562	0,005	347,964	173,982	8437144,352	58172,085
112+800	27,87	26,604	14513,734	0,005	459,16	229,58	5269925,745	36334,873
112+900	28,01	26,981	14342,878	0,005	441,082	220,541	5355468,646	36924,671
113+000	29,194	30,661	14432,802	0,006	301,871	150,935	6112242,21	42142,443
113+100	28,395	28,074	14736,296	0,006	371,263	185,632	5283845,673	36430,848
113+200	27,348	25,286	14673,349	0,005	541,786	270,893	5073989,097	34983,937
113+300	27,2	24,936	14367,607	0,005	523,233	261,616	4634658,148	31954,856
113+400	28,102	27,235	14653,116	0,005	488,964	244,482	6162997,276	42492,387
113+500	27,716	26,201	14414,817	0,004	577,873	288,937	6239711,445	43021,313
113+600	28,95	29,82	14664,356	0,006	348,59	174,295	6315324,58	43542,647
113+700	26,819	24,077	14662,108	0,005	598,105	299,052	4604928,394	31749,876



Tabla F.3: Módulo de elasticidad de la losa de concreto. Método AASHTO (3/3)

	Ec. 3.16	Ec. 3.15			Ec. 3.17	k (pci) / 2	Ec. 3.14	
Abscisa	Area (in)	lk (in)	P (libras)	do (in)	k (pci)	K estatico (pci)	Ec (psi)	Ec (Mpa)
113+800	28,19	27,482	14558,696	0,004	625,237	312,619	8170537,431	56333,895
113+900	30,229	34,835	14421,562	0,004	345,638	172,819	11660789,33	80398,344
114+000	29,709	32,603	14671,101	0,004	426,065	213,033	11029308,45	76044,435
114+100	24,522	19,923	14650,868	0,005	861,606	430,803	3110214,04	21444,179
114+200	26,222	22,843	14453,035	0,007	514,14	257,07	3207195,098	22112,84
114+300	25,367	21,279	14785,754	0,005	785,543	392,772	3689709,884	25439,664
114+400	27,547	25,772	14473,268	0,006	469,7	234,85	4747387,018	32732,094
114+500	27,507	25,674	14426,058	0,007	403,73	201,865	4018947,467	27709,678
114+600	28,663	28,891	14583,425	0,006	343,319	171,66	5480226,119	37784,844
114+700	28,226	27,585	14468,772	0,007	355,748	177,874	4719329,522	32538,644
114+800	28,25	27,652	14619,394	0,005	431,225	215,612	5776045,585	39824,448
114+900	26,967	24,405	14572,184	0,007	456,903	228,452	3713490,859	25603,628
115+000	28,122	27,29	14551,951	0,006	414,908	207,454	5271846,455	36348,116
115+100	27,054	24,601	14399,081	0,004	782,206	391,103	6563695,331	45255,104
115+200	27,046	24,583	14491,253	0,005	545,855	272,928	4567174,728	31489,574
115+300	29,802	32,979	14506,989	0,005	299,235	149,618	8109017,893	55909,732
115+400	27,333	25,252	14455,283	0,005	591,003	295,501	5505141,215	37956,627
115+500	27,567	25,822	14648,62	0,005	510,5	255,25	5200118,129	35853,566
115+600	27,413	25,444	14448,539	0,006	476,182	238,091	4572465,099	31526,049
115+700	27,287	25,142	14338,382	0,006	484,068	242,034	4431389,02	30553,364
115+800	28,472	28,304	14412,569	0,005	421,688	210,844	6200606,907	42751,696
115+900	28,486	28,347	14527,222	0,005	407,81	203,905	6032657	41593,722
116+000	27,69	26,133	14518,23	0,005	492,008	246,004	5257555,666	36249,585
116+100	27,653	26,039	14599,161	0,006	437,531	218,765	4608434,314	31774,049
116+200	28,849	29,486	14542,959	0,006	345,955	172,977	5991057,174	41306,901
116+300	29,197	30,672	14421,562	0,006	300,291	150,146	6088796,182	41980,788
116+400	26,723	23,871	14430,554	0,007	424,769	212,384	3159775,457	21785,893
116+500	28,84	29,458	14439,546	0,006	320,118	160,059	5522597,815	38076,987
116+600	27,895	26,671	14626,139	0,006	398,37	199,185	4618138,745	31840,958
116+700	26,901	24,259	14612,65	0,006	494,347	247,173	3922215,157	27042,732
116+800	28,177	27,444	14471,02	0,006	374,043	187,022	4861262,281	33517,237
116+900	28,266	27,7	14572,184	0,007	352,419	176,21	4753215,194	32772,278
117+000	22,927	17,772	14637,379	0,006	883,591	441,796	2019545,444	13924,281



Apéndice G

Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el software ELMOD 6 para un sistema bicapa.

Tabla G.1: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (1/3)

Abscisado	E de la losa de concreto	E del resto de la estructura	EMC
107+000	75717,223	71,266	3
107+100	51016,501	171,055	2,4
107+200	50356,056	67,261	4,1
107+300	29331,716	316,081	2,2
107+400	41714,871	113,373	4,1
107+500	32499,853	298,617	2,4
107+600	37767,887	133,313	3,1
107+700	44877,777	175,792	2,4
107+800	90897,839	41,722	3,8
107+900	45350,13	183,179	2,9
108+000	113503,577	62,692	2,6
108+100	40065,542	235,16	2,9
108+200	95618,461	56,724	1,9
108+300	56578,696	187,941	3,2
108+400	79732,875	60,312	3,7
108+500	31819,169	276,135	2,8
108+600	63554,16	85,355	3,5
108+700	56225,253	156,24	3,1
108+800	61950,726	90,209	3,5
108+900	37138,714	226,073	4,3
109+000	71966,558	63,594	3,3
109+100	36012,67	164,6	4,5
109+200	70793,718	64,352	3,7
109+300	36764,937	156,113	4,1
109+400	43235,482	160,062	3,3
109+500	41769,731	119,605	3,7
109+600	37366,005	173,202	3,6
109+700	29107,746	301,097	2,8
109+800	49239,807	160,732	2,8
109+900	25694,242	398,572	2,7
110+000	47059,287	220,729	2,9
110+100	24982,711	266,568	3,4
110+200	75048,183	75,379	3,5
110+300	19358,824	290,186	3,9

Tabla G.2: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (2/3)

Abscisado	E de la losa de concreto	E del resto de la estructura	EMC
110+400	38920,023	185,471	3,6
110+500	30752,438	307,503	3
110+600	54504,456	285,727	2,1
110+700	41956,552	316,081	2,2
110+800	86502,041	141,668	1,8
110+900	33115,924	167,045	6,6
111+000	134007,041	90,843	2
111+100	34928,257	389,93	2,7
111+200	27688,238	249,647	5,1
111+300	47367,036	351,468	2,5
111+400	40752,847	98,001	6
111+500	36568,35	311,13	3,3
111+600	47585,613	126,502	4,6
111+700	40809,655	372,002	2,3
111+800	39813,625	140,829	3,3
111+900	22821,94	141,505	8,2
112+000	65820,926	43,31	4,3
112+100	47045,985	264,459	3,3
112+200	48670,714	98,96	3,3
112+300	25369,585	287,641	5
112+400	36926,488	118,077	3,4
112+500	54491,345	222,874	2,4
112+600	56844,737	105,558	3,1
112+700	54859,495	331,725	2,2
112+800	17232,102	248,656	4,6
112+900	58858,33	293,178	3,3
113+000	25966,173	242,329	2,9
113+100	77131,895	291,9	2,6
113+200	45519,024	369,621	3
113+300	38973,248	398,448	2,5
113+400	36388,538	150,312	3,3
113+500	24767,497	472,886	2,9
113+600	94707,483	53,51	2
113+700	34579,577	317,515	2,4

Tabla G.3: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un sistema bicapa a la estructural del pavimento (3/3)

Abscisado	E de la losa de concreto	E del resto de la estructura	EMC
113+800	27571,814	323,704	2,9
113+900	85539,832	288,546	2,6
114+000	47043,636	128,177	3,3
114+100	28506,816	239,516	3
114+200	23203,195	258,949	3,1
114+300	23664,806	218,938	3,6
114+400	28819,719	179,418	3,3
114+500	61030,857	53,653	3,8
114+600	46069,085	161,153	2,9
114+700	56477,245	92,525	2,9
114+800	40509,801	158,538	2,7
114+900	36271,279	221,845	2,6
115+000	44257,912	144,853	2,9
115+100	47012,807	229,984	2,1
115+200	31143,076	171,528	3,5
115+300	57975,322	73,352	2,8
115+400	40853,146	140,95	2,6
115+500	39042,3	121,99	3,2
115+600	52476,271	92,701	2,9
115+700	33302,652	140,087	3,3
115+800	28258,163	133,818	5,8
115+900	63172,108	80,524	2,9
116+000	42083,607	117,166	3,3
116+100	4178,382	245,78	14,2
116+200	28303,772	209,855	3,9
116+300	17459,112	190,393	4,6
116+400	21816,008	252,041	4,2
116+500	33719,537	208,35	2,4
116+600	49318,797	80,17	3,5
116+700	39310,577	115,983	3,4
116+800	29482,924	152,929	3,3
116+900	12488,353	202,086	7
117+000	20978,988	183,75	3,9



Apéndice H

Módulos de elasticidad de la losa de concreto obtenidos utilizando el software ELMOD 6 para un sistema de 3 capas.



Tabla H.1: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (1/3)

Abcisado	E de la losa de concreto	E de la capa asfáltica	E del resto de la estructura	RMS
107+000	50034,578	203,566	99,345	2,7
107+100	38131,486	419,515	124,473	2,2
107+200	33242,386	182,237	95,592	4
107+300	27460,76	545,359	155,488	2,1
107+400	26629,317	299,176	130,109	3,7
107+500	27056,788	571,993	152,891	2,3
107+600	30379,528	265,915	123,102	2,9
107+700	35427,893	398,302	122,641	2,4
107+800	57525,867	97,691	114,07	3,5
107+900	29292,249	483,977	154,932	2,5
108+000	84065,191	112,774	156,273	2,6
108+100	27750,551	572,627	189,708	2,6
108+200	66795,174	143,597	98,999	1,9
108+300	36972,185	495,232	179,067	2,9
108+400	58133,822	131,57	125,324	3
108+500	23726,721	593,442	178,363	2,6
108+600	42112,618	212,949	134,523	2,9
108+700	32985,898	458,089	170,467	2,7
108+800	42112,618	207,194	142,365	3,2
108+900	24407,871	585,944	138,797	3,5
109+000	52141,297	161,27	87,283	3,3
109+100	22704,997	424,955	143,21	3,8
109+200	43846,091	173,251	113,841	3,5
109+300	25227,774	376,665	140,498	3,7
109+400	31924,035	369,852	137,379	3
109+500	29432,403	291,09	119,677	3,5
109+600	26629,317	405,19	129,752	3,2
109+700	22577,281	586,61	159,939	2,6
109+800	36163,27	377,339	132,433	2,3
109+900	21140,509	718,67	200,701	2,5
110+000	37971,433	507,311	137,545	2,7
110+100	22723,129	461,689	143,8	3
110+200	56389,656	188,547	93,325	3,5
110+300	17011,719	482,635	163,193	3,4



Tabla H.2: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (2/3)

Abcisado	E de la losa de concreto	E de la capa asfaltica	E del resto de la estructura	RMS
110+400	28030,86	429,747	140,722	3,2
110+500	27056,788	586,261	150,417	2,7
110+600	42969,561	620,605	178,509	1,7
110+700	42606,042	584,615	137,338	2,3
110+800	70970,099	345,747	116,457	1,8
110+900	15999,521	505,435	172,946	5,1
111+000	106140,078	232,555	114,501	2,2
111+100	33671,44	684,63	182,855	2,1
111+200	18207,137	545,247	185,302	4,3
111+300	35089,185	798,46	205,52	2,1
111+400	25297,851	276,535	107,422	5,2
111+500	25962,028	709,798	220,797	2,8
111+600	27056,788	373,565	163,475	3,9
111+700	33242,386	744,02	218,359	2
111+800	28030,86	350,386	115,673	3,1
111+900	12066,366	399,376	141,62	6,6
112+000	37558,494	125,744	108,844	4
112+100	31174,276	684,63	184,598	2,7
112+200	35801,637	239	100,829	3
112+300	14151,911	662,547	179,604	3,8
112+400	27736,217	261,319	109,849	3,3
112+500	37685,934	571,328	165,322	2,1
112+600	39660,163	266,165	123,235	2,7
112+700	40013,983	760,438	176,042	1,7
112+800	20124,883	364,153	120,302	4
112+900	30398,473	770,601	212,699	1,9
113+000	24880,928	429,747	119,127	2,9
113+100	44107,08	807,546	187,263	1,6
113+200	25580,016	879,851	224,89	2
113+300	29918,147	779,826	221,71	2
113+400	25227,774	358,472	144,846	3,2
113+500	17652,735	891,837	253,428	2,4
113+600	56082,226	139,517	125,867	2
113+700	27473,046	612,367	197,129	2,3



Tabla H.3: Módulos de elasticidad obtenidos con el software ELMOD considerando un de tres capas a la estructural del pavimento (3/3)

Abcisado	E de la losa de concreto	E de la capa asfáltica	E del resto de la estructura	RMS
113+800	27750,551	545,359	146,365	2,5
113+900	44692,541	920,13	173,496	1,3
114+000	35073,614	299,58	144,976	3,3
114+100	25726,049	354,678	249,749	3
114+200	18391,047	497,499	151,581	3,2
114+300	19412,772	437,076	141,528	3,7
114+400	20434,497	425,679	131,661	3,2
114+500	37901,356	152,57	94,539	3,3
114+600	37201,45	399,05	108,447	2,8
114+700	46568,98	190,984	117,806	2,9
114+800	32010,55	369,353	121,687	2,6
114+900	36357,929	418,516	115,322	2,3
115+000	30756,082	368,354	131,462	2,3
115+100	48363,615	471,074	108,952	1,8
115+200	23221,019	400,568	120,265	3,2
115+300	51351,278	160,199	75,376	2,5
115+400	32974,013	310,365	113,865	2,7
115+500	30057,081	279,329	110,533	3,1
115+600	41525,189	221,075	92,402	2,6
115+700	26438,197	306,588	107,797	3,1
115+800	20640,906	331,886	92,932	5,2
115+900	50159,978	199,113	85,647	2,6
116+000	33481,305	271,978	97,763	3
116+100	2865,733	360,438	232,414	9,5
116+200	18628,418	508,766	123,79	3,3
116+300	16054,168	323,387	112,563	4,3
116+400	18377,006	456,176	151,666	4,1
116+500	33308,275	404,858	105,268	2,3
116+600	35504,036	212,646	100,223	3,5
116+700	30249,97	279,512	96,56	3,1
116+800	24208,47	317,307	112,141	3,2
116+900	14800,233	325,209	87,993	6,5
117+000	16032,142	327,024	212,04	3,8



Apéndice I

PCI para unidades de muestro compuestas por 3 losas.

Tabla I.1: PCI para unidades de muestro compuestas por 3 losas

Abcisado	PCI	Abcisado	PCI	Abcisado	PCI
107+000	100	110+400	52	113+700	42
107+100	100	110+500	78	113+800	48
107+200	100	110+600	54	113+900	72
107+300	100	110+700	100	114+100	50
107+400	100	110+800	100	114+200	68
107+500	100	110+900	68	114+300	48
107+600	100	111+000	100	114+400	79
107+700	100	111+100	46	114+500	35
107+800	100	111+200	53	114+600	54
107+900	100	111+300	100	114+700	50
108+000	85	111+400	79	114+800	50
108+100	100	111+500	74	114+900	53
108+200	92	111+600	50	115+000	100
108+300	100	111+700	85	115+100	50
108+400	85	111+800	53	115+200	100
108+500	85	111+900	67	115+300	58
108+600	85	112+000	53	115+400	79
108+700	74	112+100	100	115+500	52
108+800	72	112+200	39	115+600	100
108+900	74	112+300	78	115+700	68
109+000	90	112+400	77	115+800	72
109+100	62	112+500	85	115+900	100
109+200	57	112+600	38	116+000	100
109+300	63	112+700	85	116+100	100
109+400	58	112+800	36	116+200	69
109+500	34	112+900	100	116+300	53
109+600	34	113+000	35	116+400	53
109+700	78	113+100	100	116+500	38
109+800	60	113+200	78	116+600	72
109+900	85	113+300	100	116+700	53
110+000	42	113+400	58	116+800	67
110+100	78	113+500	55	116+900	36
110+200	85	113+600	58	117+000	78
110+300	63				



Apéndice J

Datos crudos obtenidos en la evaluación estructural con el deflectómetro de impacto.

A continuación se muestra un extracto de los datos obtenidos con el deflectómetro de impacto. Para visualizar los datos completos acceder al archivo adjunto en el CD entregado junto con esta memoria.



Tabla J.1: Datos crudos obtenidos en la evaluación estructural con el deflectómetro de impacto

Abscisado [m]. 107104																
Carril Izquierdo. Sentido Cuenca - Naranjal																
Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	121.1	110.4	102.7	108.8	87.8	71.3	52.1	39.6	33.6	24.9	926	65.46	25.8	33.2	29.9	26.50
2	119.7	108.5	101.3	107.3	86.4	70.2	51.3	38.9	33.6	24.4	911	64.37	25.7	32.7	29.9	26.00
3	118.6	107.9	100.7	106.6	85.7	69.9	51.3	39.1	33.3	24.9	906	64.06	25.7	32.5	29.9	26.25
Abscisado [m]. 107300																
Carril Izquierdo. Sentido Cuenca - Naranjal																
Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	117.3	105.7	98.3	104.1	83.0	66.0	48.2	38.1	33.8	26.2	910	64.36	25.9	33.3	29.9	26.25
2	117.1	105.5	98.2	104.0	82.6	66.0	48.3	38.2	34.2	26.5	911	64.38	25.8	33.3	29.9	26.00
3	116.8	105.1	97.7	103.5	82.2	65.7	48.0	38.2	34.1	26.6	909	64.29	25.8	33.2	29.9	26.50
Abscisado [m]. 107499																
Carril Izquierdo. Sentido Cuenca - Naranjal																
Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	118.5	106.7	99.4	103.3	84.3	67.5	49.9	39.2	36.3	28.7	919	64.94	25.1	31.9	29.9	26.50
2	118.7	106.8	99.7	103.5	84.1	67.5	50.2	39.8	36.9	29.3	920	65.04	25.1	31.9	29.9	26.50
3	118.6	106.5	99.5	103.5	83.8	67.8	50.1	39.5	37.0	29.5	918	64.87	25.1	32.0	29.9	26.00
Abscisado [m]. 107699																
Carril Izquierdo. Sentido Cuenca - Naranjal																
Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	130.0	117.7	110.1	117.7	94.0	76.0	56.4	43.8	37.7	27.7	919	64.98	24.7	31.6	29.9	26.25
2	130.3	118.0	110.4	117.7	94.2	76.5	56.9	44.2	38.0	28.1	927	65.53	24.6	31.4	29.9	26.25
3	128.5	116.4	108.9	116.3	92.6	75.2	55.8	43.5	37.7	27.7	916	64.74	24.6	31.2	29.9	26.25



Apéndice K

Anexo fotográfico: Evaluación funcional y estructural del pavimento.



(a) Pulimento de áridos



(b) Grieta de esquina. Severidad Alta



(c) Punzonamiento. Severidad Media



(d) Grieta lineal (Transversal)



(e) Losa dividida. Severidad Media.

Figura K.1: Fisuras estructurales que presenta un pavimento rígido.



(a) Evaluación estructural utilizando el deflectómetro de impacto



(b) Sensores de medición de deflexiones (Geófonos). Vista superior.



(c) Sensores de medición de deflexiones (Geófonos). Vista lateral.



(d) Plato de carga asentado sobre el pavimento.



(e) Deflectómetro de impacto. Distribuido por Carl Bro.

Figura K.2: Ensayos realizados con el deflectómetro.