



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO
FLEXIBLE EN LA VÍA DE CONEXIÓN ENTRE LA
PANAMERICANA NORTE Y LA CALLE JULIA BERNAL,
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VIGA BENKELMAN
APLICANDO EL MÉTODO DEL RETROCÁLCULO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: MICHAEL ANTONIO ESPINOZA ESPINOZA

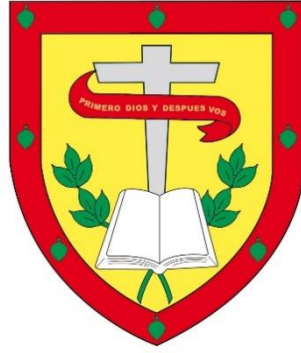
RAMIRO RÓMULO JINTIACH SHARUP

DIRECTOR: ING. MSC. PAOLA VERÓNICA DELGADO GARZÓN

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

“EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN
LA VÍA DE CONEXIÓN ENTRE LA PANAMERICANA NORTE Y LA
CALLE JULIA BERNAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VIGA
BENKELMAN APLICANDO EL MÉTODO DEL RETROCÁLCULO”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: MICHAEL ANTONIO ESPINOZA ESPINOZA

RAMIRO RÓMULO JINTIACH SHARUP

DIRECTOR: ING. MSC. PAOLA VERÓNICA DELGADO GARZÓN

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Michael Antonio Espinoza Espinoza y Ramiro Rómulo Jintiach Sharup portadores de las cédulas de ciudadanía N° 010753465-3 y 140084711-5. Declaramos ser autores de la obra: **“Evaluación de la superficie del pavimento flexible en la vía de conexión entre la panamericana norte y calle Julia Bernal, mediante el análisis de la viga Benkelman aplicando el método del Retrocálculo”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

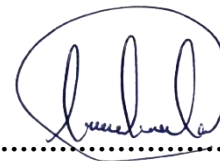
Cuenca, **09 de diciembre de 2022**



F:

Michael Antonio Espinoza Espinoza

C.I.: 010753465-3



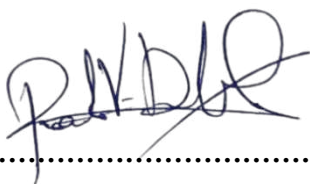
F:

Ramiro Rómulo Jintiach Sharup

C.I.: 140084711-5

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Michael Antonio Espinoza Espinoza y Ramiro Rómulo Jintiach bajo mi supervisión.


F:

Ing. Msc. Paola Verónica Delgado Garzón

CI: 010380197-3

DOCENTE - TUTOR

DEDICATORIA

A mis padres Sandra y Enrique quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me permitieron lograr una de mis grandes metas, gracias por enseñarme el ejemplo de perseverancia, valentía, y de no rendirme a pesar las facultades que se puedan presentar en el camino. Por todo su amor, apoyo y sacrificio serán siempre las personas más importantes en vida.

Mis hermanos Luis Enrique, María Belén, y Jean Carlo por su apoyo y cariño, durante todo este camino, por estar a mi lado en todo momento. Gracias por sus consejos, y palabras que me hicieron una mejor persona y me acompañaron a cumplir este sueño.

A mi enamorada Fernanda Antonella por ser compañera en este proceso y apoyarme en los momentos más difíciles y por brindar todo su amor cada día.

Michael

DEDICATORIA

A mis padres Eugenio y Elsa a quienes amo profundamente, les dedico este trabajo de titulación, por haberme brindado su comprensión y por creer en mí, por haberme dado la mano cada instante, una palabra de aliento para llegar a finalizar mi carrera, por sus consejos que me orientaron a tomar las mejores decisiones, por ser mi ejemplo a seguir, convirtiéndose en los pilares fundamentales para mi formación. Gracias mamá y papá, estas líneas no representan ni la mitad de lo que ustedes han hecho por mí y lo que significan para mí. A todos mis hermanos y hermanas que fueron mi fuente de luz a través de sus consejos y oraciones, y a mis abuelos Marcelo y Miguel, por ser mi luz y mi guía, a pesar que no están presentes físicamente, sus espíritus están siempre a mi lado como mis ángeles guardianes.

A mi novia Roció quien ha sido mi compañera y mi apoyo durante mi carrera, por amarme y aceptarme con mis defectos y virtudes, has sido mi aro de luz en este proyecto. Quiero dedicar desde lo más profundo de mi corazón a mi pequeño Sebastián quien paso a formar parte de mi vida, por ser mi fuente de inspiración para finalizar mi trabajo de titulación.

Ramiro

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por concederme la vida, salud y la sabiduría para poder ir avanzando en esta carrera y conseguir mi objetivo.

A mis padres, estoy eternamente agradecido por todo lo que hicieron para que pueda alcanzar este sueño, por su sacrificio, entrega y amor en cada uno de los escalones de esta carrera. Sin ustedes no hubiera sido posible nada esto.

A mis hermanos Luis Enrique, María Belén, y Jean Carlo por acompañarme durante esta etapa y brindarme su apoyo en los momentos más difíciles de mi carrera, por su ejemplo y por ser incondicionales conmigo.

A mi enamorada Fernanda Antonella por extenderme su mano en cada paso que doy, motivarme a seguir adelante y por su amor incondicional.

A cada uno de mis amigos por todas las experiencias que vivimos dentro y fuera de las aulas de clases, por todas las anécdotas que formaron parte de este logro y sobre todo por el apoyo en los momentos difíciles.

Finalmente, quiero brindar mi profundo agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca por abrirme las puertas y permitirme formar parte de esta respetada institución, a todos los docentes que me transmitieron sus conocimientos ciclo tras ciclo, en especial a la Ing. Paola Delgado como directora de tesis y al Ing. Cesar Maldonado como asesor metodológico quienes con sus conocimientos fueron guía para la elaboración de este trabajo de titulación. Al Ing. Marcos González por compartir sus conocimientos, amistad y ayuda no solo ente trabajo de titulación, sino durante toda la carrea.

Michael

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen del Cisne, por su infinita bondad, amor y sabiduría.

De igual forma, a mis padres Eugenio y Elsa, a quienes les debo toda mi vida, les agradezco el cariño, su amor y su ayuda incondicional, a ustedes que me supieron formar con valores y principios, lo que me ha permitido luchar por mis sueños buscando siempre el camino correcto. A mis hermanos Byron, Norma, Miriam, Milva y Claudio, por sus palabras de aliento que me motivaron a seguir esforzándome para alcanzar mi meta. A mi novia Rocio, por ser parte importante de este logro, por creer en mí, por su amor, paciencia en este proceso de aprendizaje.

Antes de celebrar quiero agradecer a esta noble y extraordinaria Universidad Católica de Cuenca por haberme abierto las puertas y permitido ser parte de su casa de estudios, llevando con orgullo su nombre a todos lados, y finalizo una parte de mi vida e inicio un nuevo viaje cargado de ilusiones y nuevas metas por alcanzar. A mis docentes de la carrera, quienes con paciencia impartieron sus conocimientos y experiencias, que motivaron a mantenerme firme y perseverante para terminar mi vida universitaria.

Por último, quiero agradecer a mi directora de tesis Ing. MSc. Paola Delgado y a nuestro asesor metodológico Ing. MSc. Cesar Maldonado, por su paciencia y haberme guiado con sus conocimientos en este proceso investigativo para la obtención de mi título académico. De manera especial quiero agradecer al Ing. Marcos González, por apoyarnos y ayudarnos en el proceso de investigación de campo.

Ramiro

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se pretende realizar una evaluación estructural del pavimento flexible en la ciudad de Cuenca, el cual se basa en el cálculo inverso o Retrocálculo; este proceso inicia con la recolección de datos de campo, a través de la viga Benkelman se realizan las mediciones deflectométricas correspondientes siguiendo el procedimiento indicado en la normativa “Standard test procedure for Benkelman beam deflection measurements”, con los datos obtenidos en el campo se realiza el cálculo del módulo de elasticidad (Esg) y CBR en términos de la subrasante mediante un proceso de simulación numérica. Se escogió como zona de estudio la superficie del pavimento flexible de la vía de conexión entre la Panamericana Norte y Calle Julia Bernal. Los resultados alcanzados de la evaluación estructural de la calzada con el método empleado revelaron que, es necesario realizar mantenimiento correctivo, debido a la cantidad de fallas existentes identificadas en la vía. La evaluación estructural empleando la viga Benkelman facilita conocer el estado de la superficie del pavimento y hacer inferencia para su mantenimiento o rehabilitación.

Palabras clave: Viga Benkelman, evaluación estructural, deflexión, retrocálculo.

ABSTRACT

In this research study, the objective is to carry out a structural analysis of the flexible pavement in the city of Cuenca, which is based on the inverse calculation or back-calculation; this process begins with field data gathering, through the Benkelman beam, the corresponding deflectometry measurements are carried out following the corresponding procedure specified in the regulations “Standard test procedure for Benkelman beam deflection measurements”, with the data collected in the field, the calculation of the modulus of elasticity (ESG) and CBR in terms of the subgrade is carried out through a process of numerical simulation. The flexible pavement surface of the connection road between the Panamericana Norte and Calle Julia Bernal was chosen as the study area. The results of the structural evaluation of the roadway with the method used revealed that corrective maintenance is necessary due to the number of identified road failures. Structural evaluation using the Benkelman beam makes it easier to determine the condition of the pavement surface and to make inferences for its maintenance or restoration.

Keywords: Benkelman beam, structural evaluation, deflection, back calculation.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD	I
CERTIFICACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
AGRADECIMIENTO.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XI
CAPITULO I.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. ALCANCE	5
1.5. OBJETIVOS	6
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.5.2 OBJETIVO ESPECIFICO	6
1.6. ZONA DE ESTUDIO.....	7

CAPITULO II	8
2. Marco teórico – METODOLÓGICO	8
2.1. Marco teórico.....	8
2.1.1 Definición de pavimento.....	8
2.1.2 Pavimentos asfálticos o flexibles	8
2.1.3 Fallas en pavimentos asfálticos o flexibles	9
2.1.4 Mantenimientos de pavimentos flexibles.....	9
2.1.5 Sobrecarpetas asfálticas	12
2.2. Materiales y estructuras que conforman un pavimento	13
2.2.1 Carpeta asfáltica.....	13
2.2.2 Base	13
2.2.3 Sub-base.....	13
2.2.4 Subrasante	14
2.3. Modelo de Hogg	14
2.3.1 Ecuación que resuelve Hogg.....	16
2.3.2 Características y utilización del modelo	19
2.4. Ensayo no destructivo.....	20
2.5. Deflexión	24
2.6. Viga Benkelman	25
CAPITULO III.....	27
3. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.....	27
3.1. Generalidades de evaluación estructural.....	27

3.2. Parámetros de evaluación	27
3.2.1 Longitud característica L_0	28
3.2.2 Módulo de elasticidad de la subrasante E_0	32
3.3. Medición de deflexiones.....	32
3.3.1 Equipo requerido.....	32
3.3.2 Frecuencia de medición	33
3.3.3 Procedimiento en campo.....	34
3.3.4 Temperatura	37
3.3.5 Proceso de cálculo de deflexiones.....	37
3.3.6 Predicción de temperatura.....	38
3.3.1 Corrección de deflexión por temperatura.....	39
3.4. Procesamiento y análisis del modelo de Hogg	41
3.5. Determinación y análisis del CBR.....	43
3.6. Análisis estadístico de resultados de evaluación	49
3.6.1 CBR	49
3.6.2 Deflexión característica.....	51
3.7. Alternativas de mantenimiento del pavimento flexible	53
CAPITULO IV.....	55
4. APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL AL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA VÍA DE CONEXIÓN ENTRE LA PANAMERICANA NORTE Y LA CALLE JULIA BERNAL.....	55
4.1. Generalidades de evaluación estructural.....	55

4.2. Procesamiento de datos.....	63
4.2.1 Deflectograma.....	71
4.3. Análisis e interpretación de resultados	75
CAPITULO V	84
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES.....	84
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS.....	90
ANEXO 1: Armado de la viga Benkelman	90
ANEXO 2: Desarrollo de medición de deflexiones	93
ANEXO 3: Vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal	98
ANEXO 4: Tipos de falla en el pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Alternativas de mantenimiento de pavimentos flexibles.	10
Tabla 2: Tipos de sobrecarpeta.	12
Tabla 3: Parámetros del modelo de Hogg	16
Tabla 4: Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación.	29
Tabla 5: Valores de coeficientes y variables de ajustes de curva.....	31
Tabla 6: Módulos típicos de materiales para integrar capas de pavimentos.	32

Tabla 7: Frecuencia de medición.	34
Tabla 8: Distancia del punto de ensayo.....	34
Tabla 9: Valores de A y B en función de la hora.	38
Tabla 10: Formato de lecturas y mediciones de campo.	41
Tabla 11: Formato de mediciones corregidas de campo.	41
Tabla 12: Clasificación CBR según MTC.	45
Tabla 13: Tipo de Subrasante según el valor de CBR.....	50
Tabla 14: Valor “t” y probabilidad de Ocurrencia de $D > D_c$	52
Tabla 15: Acción del pavimento a nivel subrasante.....	54
Tabla 16: Características de la Viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca. ..	55
Tabla 17: Predicción de la temperatura a 40mm del pavimento.	57
Tabla 18: Predicción de la temperatura a 40mm del pavimento.	59
Tabla 19: Deflexiones corregidas por temperatura.	61
Tabla 20: Longitud característica para una distancia de $r=40\text{cm}$	63
Tabla 21: Longitud característica para una distancia de $r=70\text{cm}$	65
Tabla 22: Longitud característica para una distancia de $r=100\text{cm}$	67
Tabla 23: Módulo de elasticidad y CBR.	69
Tabla 24: Calificación del CBR del pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.	76
Tabla 25: Valores estadísticos.....	79
Tabla 26: Alternativas de mantenimiento del pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.	7
Gráfico 2: Estructura básica de un pavimento flexible.	9
Gráfico 4: Comportamiento del pavimento flexible frente a cargas de tránsito.	14
Gráfico 5: Modelo de Hogg.	15
Gráfico 6: Instrumento FWD.	21
Gráfico 7: Curva de deflexiones.	22
Gráfico 8: Relación entre el modelo de Hogg y la viga Benkelman.	23
Gráfico 9: Curva de deflexiones.	24
Gráfico 10: Tipos de cuencos de deflexión.	25
Gráfico 11: Esquema y principio de operación de la viga Benkelman.	26
Gráfico 12: Partes de la viga Benkelman.	26
Gráfico 13: Punto de ubicación del extremo de la viga Benkelman.	35
Gráfico 14: Punto de ubicación del extremo de la viga Benkelman.	35
Gráfico 15: Procedimiento de medición de deflexión.	36
Gráfico 16: Medición de temperatura.	40
Gráfico 17: Modelo de carga.	42
Gráfico 18: Viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca.	55
Gráfico 19: Ubicación del punto a evaluar.	56
Gráfico 20: Deflectograma del pavimento evaluado en la Universidad Católica de Cuenca.	71
Gráfico 21: Deflexión pico de las abscisas 0+000 a 0+150.	72
Gráfico 22: Deflexión pico de las abscisas de 0+300 a 0+500.	73
Gráfico 23: Deflexión pico de las abscisas 1+000 a 1+150.	73

Gráfico 24: Deflexión pico de las abscisas 1+150 a 1+250	74
<i>Gráfico 25:</i> Deflexión pico de las abscisas 1+250 a 1+350	75
Gráfico 26: Diagrama de CBR.....	78
Gráfico 27: Diagrama de CBR.....	79
Gráfico 27: Esquema del ciclo de vida de un pavimento.....	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Viga Benkelman.....	90
Ilustración 2: Identificación de partes de la viga Benkelman.....	90
Ilustración 3: Unión del cuerpo fijo con el brazo móvil.....	91
Ilustración 4: Verificar que el vibrador tope los brazos móviles.....	91
Ilustración 5: Calibrar los extensómetros.....	92
Ilustración 6: Armado de la viga Benkelman.....	92
Ilustración 7: Calibración de la Viga Benkelman.....	93
Ilustración 8: Ubicación de la plomada en la parte trasera del camión.....	93
Ilustración 9: Ubicación de la viga debajo del eje vertical de las llantas.....	94
Ilustración 10: Colocación de marcas a diferentes distancias.....	94
Ilustración 11: Ubicación de la plomada en el punto de inicio.....	95
Ilustración 12: Toma de lecturas en la abscisa 0+000.....	95
Ilustración 13: Calibración de los extensómetros en cada abscisa.....	96
Ilustración 14: Verificación de la plomada en cada abscisa.....	96
Ilustración 15: Toma de lecturas en la abscisa 1+800.....	97
Ilustración 16: Finalización de levantamiento de lecturas de campo.....	97
Ilustración 17: Vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal.....	98

Ilustración 18: Abscisa 0+050 (Bacheos).....	99
Ilustración 19: Abscisa 0+100 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	99
Ilustración 20: Abscisa 0+350 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	100
Ilustración 21: Abscisa 0+400 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	100
Ilustración 22: Abscisa 0+450 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	101
Ilustración 23: Abscisa 0+700 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	101
Ilustración 24: Abscisa 1+050 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	102
Ilustración 25: Abscisa 1+100 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	102
Ilustración 26: Abscisa 1+200 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	103
Ilustración 27: Abscisa 1+300 (Bacheos y desgaste de la capa granular)	103
Ilustración 28: Abscisa 1+500.....	104
Ilustración 29: Abscisa 1+600.....	104
Ilustración 30: Abscisa 1+750.....	105

CAPITULO I

1.1.INTRODUCCIÓN

Las carreteras de comunicación constituyen la parte fundamental para el desarrollo de un país, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de la población y promover el crecimiento económico entre sectores. Por lo que es primordial conocer el estado estructural del pavimento, en estado de operación, para garantizar mayor comodidad, seguridad y menor tiempo de recorrido.

Para conservar el pavimento intacto con las características iniciales de operación, se plantean ciertas metodologías que nos facilitaran realizar una evaluación de la evolución de la estructura del pavimento e interpretar el estado en el que se encuentra, con el fin de determinar la deficiencia estructural y proporcionar el refuerzo estructural idóneo que requiera la vía, para seguir cumpliendo su función de diseño inicial, hasta llegar al final de su vida útil.

La evaluación estructural nos permite conocer y evaluar detalladamente el comportamiento de las distintas capas de un pavimento flexible, para determinar la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante. Por lo tanto, para el desarrollo de este análisis se consideró realizar la aplicación de los métodos: Viga Benkelman y el Método de Retrocálculo, los cuales son económicos, simples, rápidos, de fácil aplicación y sobre todo no destructivos. Puesto a que no se requieren muchos recursos y se puede desarrollar sin ningún problema, se ha considerado a la viga Benkelman para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una vía. Así también para cuantificar las necesidades de una rehabilitación en un tramo del pavimento se utiliza el método del Retrocálculo, el cual se basa de las deflexiones tomadas en la superficie de la carretera para interpretar esta información de forma cuantitativa, logrando con esto, comparar el sistema pavimento-subrasante con un modelo matemático.

Al realizar una evaluación estructural se obtiene ciertos parámetros del sistema como las deflexiones que experimenta la superficie del pavimento flexible al encontrarse sometido al efecto de una carga, el módulo de elasticidad y el CBR de la subrasante, los cuales son medidas mediante la Viga Benkelman e interpretadas por un modelo matemático. Se espera que, esta información sea de utilidad a los gobiernos locales, a fin de establecer planes de mantenimiento para los sistemas viales.

El presente trabajo de titulación se desarrolla con el objetivo de realizar una investigación y evaluación del método del Retrocálculo y la Viga Benkelman para el análisis estructural del pavimento flexible, tendiente a contar con una herramienta que permita determinar un plan de evaluación estructural requerido según la condición actual del pavimento, y a su vez realizar una aplicación de los métodos en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y Calle Julia Bernal.

1.2. ANTECEDENTES

La Agenda 2030, establece en su objetivo 11, lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Enmarcados en este objetivo, los estados buscan actualmente hallar soluciones sostenibles a problemáticas generadas por el crecimiento de las ciudades. Dentro de estas soluciones buscadas, uno de las intenciones es crear políticas públicas y planes que permitan gestionar de mejor manera el gasto público.

Siendo la vialidad un importante pilar para el fomento de la productividad, como lo establece la Normativa Ecuatoriana Vial, NEVI-12-MTOP, y como parte de los servicios públicos que competen a varios niveles de gobierno, esta normativa busca fomentar esta sostenibilidad, a través de la implementación de la conservación vial, tema que se analiza dentro de su tomo 6, dentro del cual se establecen algunos métodos de inspección e identificación de fallas y posibles soluciones para pavimentos rígidos y flexibles, así como para estructuras de puentes (*NEVI-12, 2013*).

Sin embargo, además de este catálogo propuesto en la Normativa, es necesario analizar y establecer otros procedimientos técnicos no destructivos, que permitan obtener datos del estado estructural de la vía y que lleven a darles soluciones en fases de operación tempranas, que se traduzcan como eficientes sistemas de conservación vial.

Con estos antecedentes, el presente trabajo de investigación busca establecer a través de una evaluación estructural del pavimento flexible, aplicando análisis de la viga Benkelman y método del Retrocálculo, una herramienta válida para el pronóstico del estado de las vías que permita implementar modelos eficientes de conservación vial.

1.3.JUSTIFICACIÓN

Cada año se realiza una gran inversión en el ámbito de la infraestructura vial, es por ello, que surge la necesidad dar mantenimiento de la rehabilitación de pavimentos flexibles, con el propósito de hacer más eficientes y económicos, obteniendo un funcionamiento adecuado para los usuarios. Es importante conocer y aplicar diferentes métodos para determinar los módulos estructurales de pavimentos flexibles, en base a diversas teorías y enfoques más apegados a las exigencias estructurales, sin descuidar el aspecto económico y tecnológico.

En el presente trabajo se realizará una evaluación estructural para el estudio y análisis de patologías de pavimentos flexibles, en base a la deflectometría derivada del estudio de la viga Benkelman, por otro lado, se busca evaluar las metodologías no tan costosas y destructivas como las que se propone en la presente investigación, buscando alcanzar mejores términos de funcionamiento, comodidad, desempeño y economía.

La gran mayoría de pavimentos de la Ciudad de Cuenca carecen de información del estado en el que se encuentra el paquete estructural, por lo cual, se plantean alternativas erróneas, sin considerar las condiciones reales de los pavimentos. Es de gran importancia realizar una valoración de la capa estructural del pavimento, esto nos permitirá conocer: estado y el deterioro de la superficie con el paso del tiempo, y nos proporcionan información para tomar decisiones de mantenimiento o recapeo de la vía, todo esto es con el objetivo de brindar a los ciudadanos un mejor servicio con un pavimento en óptimas condiciones para el tránsito de vehículos.

Uno de los parámetros mecánicos más importantes que se debe analizar es el módulo resiliente, primordial para el análisis y cálculo de los espesores que componen la estructura de un pavimento; por otro lado, se puede mantener el coeficiente estructural de aporte a cada una de las capas. De una manera objetiva se considera necesaria calcular el Mr.

1.4. ALCANCE

En este proyecto se realiza la evaluación de la superficie de un pavimento flexible de la ciudad de Cuenca, en base al análisis de deflexiones obtenidas por la aplicación de la viga Benkelman, basado en diferentes metodologías de la normativa AASHTO.

Esta evaluación servirá como una guía que se utilizará durante todo el proceso de referencia para futuras evaluaciones de pavimentos urbanos flexibles. Además, se verificó el adecuado funcionamiento de la viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca, lo que permite el uso del dispositivo y fomenta su uso en futuras evaluaciones estructurales. Este método aplica solo para pavimentos flexibles, ya que, el uso de la viga Benkelman no es idóneo para pavimentos rígidos (*Huang, 2004*).

1.5.OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación estructural del pavimento flexible, a través de un análisis de la viga Benkelman aplicando el método del Retrocálculo, proporcionando una alternativa de mantenimiento a las fallas que se presentan.

1.5.2 OBJETIVO ESPECIFICO

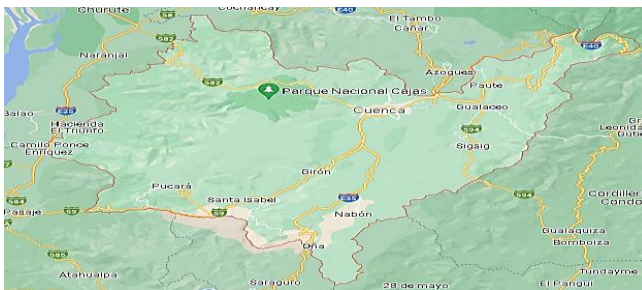
- Determinar la factibilidad de aplicación de la metodología de Viga Benkelman, para establecer el estado del paquete estructural del pavimento flexible.
- Determinar la factibilidad de aplicación de la metodología de Retrocálculo, con el fin de determinar el módulo de las capas de una estructura de pavimento flexible.
- Calcular el módulo de elasticidad y el CBR de la subrasante en base a los datos obtenidos por la Viga Benkelman.
- Revisar la aplicación de los dos métodos no destructivos en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y Calle Julia Bernal.

1.6. ZONA DE ESTUDIO

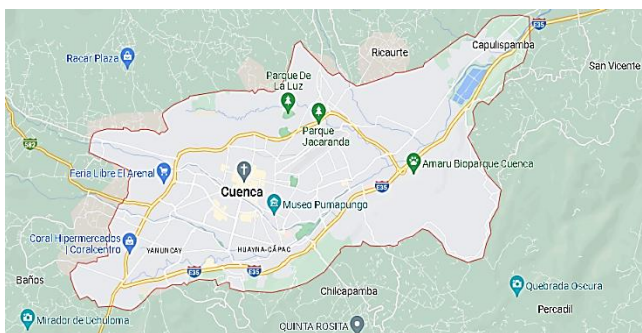
Se ha seleccionado como zona de estudio el tramo vial de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal, situada en la ciudad de Cuenca, provincia de Azuay. El cual se encuentra comprendida entre las coordenadas UTM (WGS84) 727899.00 E -9681811.00 N y 727213.00 E - 9682885.00 N. (Ver gráfico 1). La estructura del pavimento flexible está conformada por una subbase de 25 centímetros, una base de 25 centímetros y una carpeta de rodadura de aproximadamente 8 centímetros. La vía es de pavimento flexible y consta de una calzada de aproximadamente 6 metros de ancho, con dos carriles. Tiene una longitud de alrededor de 2 kilómetros. A pesar que el tránsito vehicular no es frecuente, se puede apreciar que existen una leve presencia de deterioros superficiales, los cuales indican una probable deficiencia estructural, tales como baches y grietas.

Gráfico 1: Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.

Provincia Azuay



Cantón Cuenca



Fuente: (Google Earth Pro, 2022).

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO – METODOLÓGICO

2.1. Marco teórico

2.1.1 *Definición de pavimento*

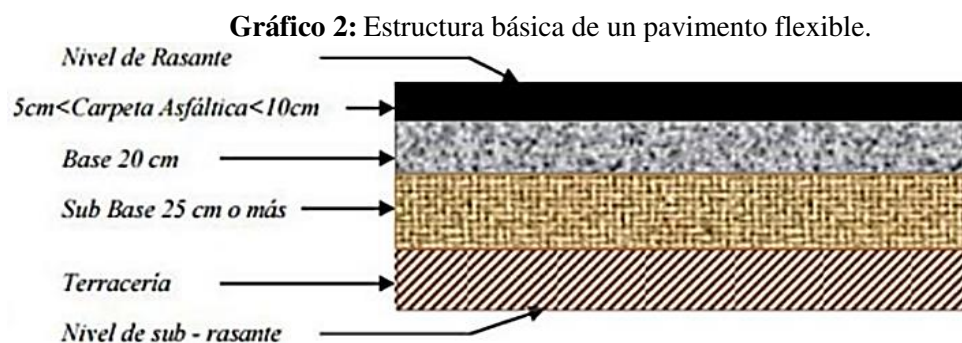
Se denomina pavimento al elemento estructural constituido por un conjunto de capas aplicadas relativamente horizontales, técnicamente diseñadas y construidas con materiales adecuados y debidamente compactados. Estas estructuras estratificadas se sostienen sobre la subrasante de una vía obtenida de los movimientos de tierras durante el proceso de exploración, deben resistir adecuadamente las cargas transmitidas por el peso vehicular durante el periodo para el cual fue diseñado la estructura del pavimento (*Montejo Fonseca, 2006*).

2.1.2 *Pavimentos asfálticos o flexibles*

Se lo denomina también como pavimento asfáltico, está constituido por una carpeta asfáltica de mezcla bituminosa con material granular, colocado en la superficie de rodadura en contacto directo con el tráfico vehicular, lo que permite deformaciones que se adaptan a las cargas. Tiene una estructura de varias capas, donde la carpeta asfáltica reposa sobre una base granular y sub base compactada mecánicamente.

La etapa inicial de construcción del pavimento flexible tiende a ser un poco más económica que la del pavimento rígido, la vida útil del pavimento está en el rango entre los 15 a 25 años para una vía pavimentada de baja intensidad de tránsito (*AASHTO, 1993*), por otro lado, su principal inconveniente es que requiere un mantenimiento constante para su preservación, caso contrario puede verse afectado por el constante tráfico que hay en la superficie. Una particularidad del pavimento flexible es la distribución de los esfuerzos generados en la superficie, en base a pequeñas deformaciones que se transmiten a las capas inferiores. Los esfuerzos se transmiten a las capas

inferiores (Base, sub base y subrasante) van disminuyendo en función a la profundidad (Apaza Chambilla, 2019).



Fuente: (Mora, 2017)

2.1.3 Fallas en pavimentos asfálticos o flexibles

Las fallas más comunes que se presentan en pavimentos flexibles son las fisuras como piel de cocodrilo que generan hundimientos y agrietamientos con el paso del tiempo, esto puede ser llevar al pavimento a un estado crítico debido a las filtraciones de agua. La segunda falla son los hundimientos con baches generados por la sobrecarga o por la ausencia de componentes compresibles. Las grietas tipo piel de cocodrilo con hundimientos y los desplazamientos laterales del pavimento se dan por la excesiva plasticidad de los componentes (JOSE HEREDIA & ASOCIADOS C.A., 2016).

Al igual que en distintos países en Ecuador se clasifican las fallas existentes en pavimentos flexible en: fisuras, deformaciones, pérdida de la capa de la estructura, daños superficiales y otros daños (Lemus Nájera, 2010).

2.1.4 Mantenimientos de pavimentos flexibles.

Las alternativas de mantenimiento de pavimentos flexibles están compuestas por varias actividades superficiales que se describe en la siguiente tabla.

Tabla 1: Alternativas de mantenimiento de pavimentos flexibles.

Actividades	Descripción
Sello de arena-asfalto	Esta actividad se refiere al recubrimiento de un pavimento asfáltico con un riego de un material bituminoso, seguido por la extensión y la compactación de una delgada capa de arena, con el fin de sellar de la superficie y mejorar temporalmente la fricción superficial.
Tratamiento superficial	Esta actividad se refiere a la aplicación de riegos de material bituminoso seguidos por la extensión y compactación de capas de agregado pétreo. Si solamente se aplican un riego y una capa de agregado pétreo, el tratamiento superficial se denomina simple, en tanto que, si el trabajo consiste en dos aplicaciones de un material bituminoso sobre una superficie preparada, seguidas sucesivamente por la extensión y compactación de sendas capas de agregado pétreo, se trata de un tratamiento superficial doble.
Lechada asfáltica y microaglomerado en frío	Esta actividad se refiere a la construcción de un sello de recubrimiento constituido por una mezcla de agregados pétreos, agua, emulsión asfáltica de rotura lenta, llenante mineral y, eventualmente, aditivos, mezcla que es elaborada y extendida por un equipo autopulsado, específico para este trabajo. Si la emulsión asfáltica empleada es convencional, la mezcla recibe el nombre de lechada asfáltica, y si es modificada con polímeros recibe el nombre de microaglomerado en frío.
Sello del Cabo	Esta actividad se refiere a la construcción de un sello asfáltico de protección compuesto por una primera capa que corresponde a un tratamiento superficial simple y, sobre éste, una capa de lechada asfáltica. La aplicación conjunta de estos dos tratamientos combina las principales características favorables de ambos: el tratamiento superficial aporta impermeabilización y resistencia al deslizamiento, mientras que la lechada aporta lisura, reduce el nivel del ruido de rodadura y evita el desprendimiento de partículas típico de los tratamientos superficiales.

<p>Microaglomerado en caliente</p>	<p>Esta actividad se refiere a la construcción de una capa de mezcla asfáltica de tipo discontinuo para capa de rodadura, preparada y colocada en caliente sobre un pavimento existente, con el fin de mejorar las condiciones de drenaje y de fricción superficial, a la vez que brindar al pavimento un aspecto rejuvenecido con una nueva superficie de rodamiento</p>
<p>Sobrecapa delgada</p>	<p>Esta actividad se refiere a la construcción de una capa de mezcla asfáltica de tipo denso en caliente para capa de rodadura, preparada y colocada en caliente sobre un pavimento existente estructuralmente sano, en un espesor no mayor de 40 mm, con el fin de retardar los síntomas de desintegración superficial o mejorar la resistencia al deslizamiento, a la vez que brindarle al pavimento un aspecto rejuvenecido con una nueva superficie de rodamiento.</p>
<p>Mezcla drenante</p>	<p>Esta actividad se refiere a la construcción de una capa asfáltica, empleando una mezcla elaborada en planta y en caliente con cemento asfáltico elaborado con polímero y con un agregado pétreo cuyo bajo contenido de agregado fino hace que su volumen de vacíos con aire luego de compactada sea muy alto, confiriéndole características drenantes y antideslizantes.</p>
<p>Fresado de pavimento asfáltico</p>	<p>Esta actividad se refiere a la molienda parcial o total de la capa de rodadura de un pavimento asfáltico para corregir sus perfiles longitudinal y transversal, molienda mediante la cual se remueven abultamientos, excesos de asfalto, grietas descendentes de poca profundidad y otras imperfecciones superficiales sin afectar las capas inferiores, dejando una superficie de macrotextura rugosa y nivelada de elevada resistencia al deslizamiento.</p>

Fuente: (INVIAS, 2016)

2.1.5 Sobrecarpetas asfálticas

También conocida como recapeo, este método de rehabilitación de la estructura del pavimento consiste en colocar una sobrecarpeta de mezcla asfáltica en frío, sobre una capa bituminosa de rodadura, el cual se encuentra en condiciones de deterioro extremo, impidiendo realizar mantenimientos rutinarios sobre ella. Este método se utiliza para solucionar fallas funcionales y estructurales (AASHTO, 1993).

Las sobrecarpetas asfálticas se fundamentan en la capacidad estructural de una sobrecarpeta ubicada en la parte superior de otro pavimento antiguo, esto debe lograr satisfacer la capacidad estructural necesaria para soportar el tráfico en los próximos años, logrando de esta forma aumentar su vida útil. En la siguiente tabla se muestran los tipos de Sobrecarpetas según AASHTO.

Tabla 2: Tipos de sobrecarpeta.

Sobrecarpeta	Pavimento Existente
Concreto asfáltico	Concreto asfáltico (CA)
Concreto asfáltico	Hormigón previamente fracturado o triturado
Concreto asfáltico	H. Simple, H. Reforzado con juntas o H. contínuam. Reforzado
Concreto asfáltico	CA s/H. Simple, H. Reforzado con juntas o H. contínuam. Reforzado
Hormigón Adherido	Hormigón
Hormigón no Adherido	Hormigón
Hormigón	Concreto asfáltico

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.2. Materiales y estructuras que conforman un pavimento

2.2.1 *Carpeta asfáltica*

Consiste en una capa delgada compuesta por una mezcla de material bituminoso de asfalto, con el afán de brindar una superficie de rodamiento adecuada. Su principal propósito es preservar la base de los esfuerzos destructivos del tránsito e impedir la filtración de agua a las capas inferiores. Se considera trascendente la determinación de un contenido óptimo de asfalto, que garantice que cumpla la carpeta con todo lo mencionado; por otro lado, el exceso de asfalto puede ser perjudicial y puede causar la pérdida de la estabilidad de la carpeta asfáltica y hacer que la superficie sea resbalosa (*Montejo Fonseca, 2006*).

2.2.2 *Base*

Es la capa que se ubica encima de la sub base y debajo de la carpeta asfáltica, su objetivo es soportar los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito, distribuir y transmitir las cargas a la sub base hasta llegar a la subrasante. Las bases están constituidas de materiales granulares como: gravas piedras trituradas, y mezclas naturales de agregados. Al ser una capa que contribuye a la resistencia es primordial utilizar mezclas bituminosas, mezclas estabilizadas con cemento portland con el propósito de garantizar una resistencia adecuada (*Timaná, 2012*).

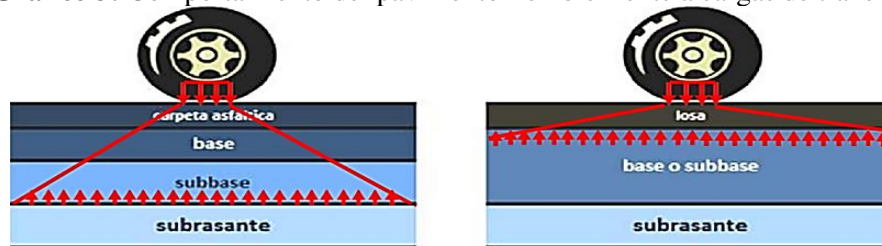
2.2.3 *Sub-base*

Es la capa de material de mejoramiento que se ubica sobre la subrasante y debajo de la base. La función de esta capa es transmitir los esfuerzos ocasionados por las cargas de tráfico producidos en la carpeta asfáltica hasta la subrasante. La sub base ayuda al drenaje del agua que ha logrado infiltrarse de las capas superiores, impide la ascensión capilar, debe eliminar en lo posible los cambios de volumen asociados a la humedad presente en la subrasante, evitando que se refleje en la superficie del pavimento (*Timaná, 2012*).

2.2.4 Subrasante

Esta capa ejerce de apoyo del pavimento posterior a haber realizado las acciones de relleno y corte para proceder a la compactación con una humedad óptima determinada previamente mediante ensayos. Una vez que se haya compactado de manera correcta se deberá tener una resistencia adecuada para las cargas de tránsito. La capacidad de la subrasante es de gran importancia ya que, el espesor del pavimento depende en gran parte de ella, mientras que si tiene una pésima capacidad es necesario reemplazar el suelo por uno de mayor calidad o estabilizar el suelo con algún aglomerante (cemento, cal) (Timaná, 2012).

Gráfico 3: Comportamiento del pavimento flexible frente a cargas de tránsito.



Fuente: (Mora, 2017).

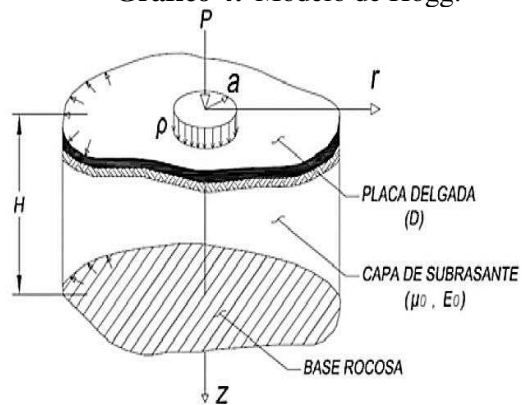
2.3. Modelo de Hogg

Este modelo analiza al pavimento en dos capas, la primera es una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión, está apoyada sobre una segunda capa elástica, áspera, y homogénea de espesor infinito o restringida por una base rígida. Las dos capas figuran al paquete estructural y a la subrasante del pavimento (Jiménez Lagos, 2014). Ver gráfico 4.

Antes de hablar de las soluciones propuestas por Hogg se debe tener en cuenta los requerimientos del modelo (ver tabla 1) y las siguientes suposiciones (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1970):

- El plano medio se confunde con la fibra neutra.
- Las secciones planas permanecen planas durante la deformación.
- Los esfuerzos normales que persiguen una deformación transversal pueden despreciarse.
- Los desplazamientos verticales de la fibra neutra de la placa satisfacen la ecuación de Lagrange para placas delgadas.

Gráfico 4: Modelo de Hogg.



Fuente: (Mora, 2017).

Tabla 3: Parámetros del modelo de Hogg.

Parámetros Básicos del Modelo	$D = \frac{E_p * hp^3}{12(1 - \mu_p^2)}$	Rigidez a la flexión de la placa ($t - m$)
	$L_o = \left(\frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}}$	Longitud característica (cm)
	E_{sg}	Módulo de elasticidad de la subrasante (kg/cm^2)
	μ_0	Módulo de Poisson de la subrasante (adimensional)
	H	Profundidad del estrato rocoso (cm)
Parámetros de Evaluación	L_o, E_{sg}, D	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas

Fuente: (Hoffman, 1997)

2.3.1 Ecuación que resuelve Hogg

Previamente se mencionó que Hogg planteó la ecuación diferencial en derivadas parciales como una posible solución para su modelo, la ecuación se presenta a continuación:

$$D\nabla^4 w = \rho - \sigma_z \quad (1)$$

$$\sigma_z = E_{sg} \left(\frac{dw}{dr} \right) \quad (2)$$

$$D = \frac{E_p t^3}{12(1 - \mu_p^2)}$$

Donde:

w = Desplazamiento vertical de la fibra neutra.

t = Espesor del pavimento.

E_p = Módulo de elasticidad del pavimento.

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la subrasante.

ρ = Suma de presiones verticales $\rho = p - \sigma_z$ o' $\rho = -\sigma_z$ en el exterior del círculo.

p = Presión del pavimento.

El matemático japonés Terazawa, planteo resolver el problema de Boussinesq a través de las series de Bessel, obteniendo:

$$w = \int_0^{\infty} W(k)J_0(Kr)dk \quad (3)$$

Entonces al sustituir (ecuación 3) en $\sigma_z = E_{sg} \left(\frac{dw}{dr} \right)$, obtenemos:

$$\sigma_z = -E_{sg} \int_0^{\infty} mW(m)J_0(mr)dm \quad (4)$$

Y si se escribe el término $\nabla^4 w$ en coordenadas polares se obtiene lo siguiente:

$$\nabla^4 w = \frac{1}{r} * \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} * \frac{d}{dr} \left(r * \frac{dw}{dr} \right) \right\} \right)$$

Así al remplazar la ecuación 4 en el término anterior se tiene:

$$\nabla^4 w = \int_0^{\infty} m^4 W(m)J_0(mr)dm \quad (5)$$

Si sustituimos tanto la ecuación 14 y 16 en $D\nabla^4 w = \rho - \sigma_z$, se obtiene:

$$p = \int_0^{\infty} (Dm^4 + E_{sg}m)W(m)J_0(mr)dm \quad (6)$$

Se sabe que “p” depende de $a(p = f(a))$, es decir $p = \frac{\text{peso del camión}}{\pi a^2}$; por lo tanto se puede expresar a través de las series de Bessel, como:

$$p = \int_0^{\infty} P(m)J_0(ma)dm$$

Al confrontar la ecuación 6 con la expresión anterior, se obtiene:

$$W(m) = \frac{P(m)}{Dm^4 + E_{sg}m}$$

Entonces, la transformada de Hankel p produce

$$P(m) = m \int_0^{\infty} \alpha f(\alpha)J_0(m\alpha)d\alpha$$

Si se reemplaza las dos expresiones anteriores en la ecuación 3, se obtiene:

$$w = \int_0^{\infty} \frac{m}{Dm^4 + E_{sg}m} \int_0^{\infty} \alpha f(\alpha)J_0(mr)d\alpha J_0(ma)dm$$

Al aplicar la transformada de Hankel a la expresión anterior resulta:

$$w = \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{Dm^4 + E_{sg}m} dm$$

Finalmente, al introducir las condiciones de fronteras idóneas a la expresión anterior se obtiene:

$$w(r) = \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)pa}{2(1 - \mu_0)E_{sg}} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right)J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (7)$$

Donde μ_0, L_0, E_0 y p se encuentran definidos en la tabla 1, “r” es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga, mientras que “ ϕ ” se expresa de la siguiente forma:

$$\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right) = \frac{\sinh m \cdot \cosh m + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{-\frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}} \quad (8)$$

2.3.2 Características y utilización del modelo

En este capítulo se precisa el motivo por el cual se eligió el “Modelo de Hogg” como modelo para realizar la evaluación estructural para pavimentos flexibles.

Los pavimentos tienen un comportamiento superficial y estructural, en el transcurso de su ciclo de vida, pueden producirse fallas superficiales (funcionales) y estructurales (en el paquete estructural); este tipo de fallas estructurales influyen directamente en el comportamiento funcional de un pavimento, incitando a que se produzca fallas superficiales, por la cual en este trabajo de titulación se espera proveer a las autoridades locales pertinentes al área vial, una herramienta de evaluación estructural a los pavimentos, para que posteriormente se pueda aplicar a la implementación de un plan de mantenimiento vial superficial, en aquellos pavimentos que se encuentren en etapa de operación o al final de su vida útil.

Estas fallas estructurales se producen principalmente por falta de cohesión entre los materiales que componen el paquete estructural “granular” esto impide que puedan soportar las cargas de tránsito, también son ocasionadas puesto a que la resistencia es baja o simplemente por el deterioro de la subrasante.

Las fallas se encuentran relacionadas con las deflexiones y deformaciones del pavimento y a su vez estas se relacionan con los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante, debido a esto la capacidad portante de la subrasante pasa a ser un indicador importante del comportamiento de un pavimento.

El modelo de Hogg es un método que nos permite caracterizar los materiales que componen el sistema pavimento-subrasante, a través de un análisis numérico e interpretación de curvas de deflexiones; en este método no es necesario conocer el espesor de las capas, por lo que resulta ser una gran ventaja puesto a que, en la mayoría de los pavimentos evaluados es complicado controlar o se desconoce el espesor y las deflexiones teóricas del método, en este caso se depende únicamente de un parámetro denominado a , longitud característica. En conclusión, el modelo de Hogg nos facilita calcular el módulo elástico de la subrasante, ubicado en un punto que se encuentra bajo una carga superficial, este dato nos permite hallar la capacidad portante (CBR) de la subrasante, esto es posible debido a que anteriormente se realizó mediciones de deflexiones en la superficie del pavimento; también nos facilita realizar una comparación de deflexiones entre el método de Hogg y algún ensayo destructivo aplicado.

2.4. Ensayo no destructivo

Los ensayos no destructivos consisten en realizar mediciones dentro o cerca de la superficie del pavimento sin modificar o dañar la estructura del mismo, relaciona los resultados con las propiedades del pavimento, y por medio de estas proporciona un diagnóstico del estado en el que se encuentra la estructura del pavimento, dichas mediciones pueden ser repetidas las veces que sea necesario lo que es una ventaja frente a los métodos destructivos (*Jiménez Lagos, 2014*). Hay varios tipos de ensayos no destructivos que implica el uso de propagación de ondas, radar de sondeo terrestre, impacto de martillo, entre otros (*Huang, 2004*).

El modelo de Hogg requiere de datos de entrada para su progresión, considerando las mediciones de deflexiones parte de estos datos. Se puede llevar a cabo la medición de deflexiones a nivel superficial con ensayos no destructivos, de esta forma se tiene un fiel reflejo del método pavimento-subrasante al poseer como prototipo de ensayo al mismo pavimento, sin destruirlo, de manera más eficiente, y sobre todo de manera más económica. Puede llevarse a cabo sin la necesidad de estudios previos y en cualquier momento. Las deflexiones obtenidas son una valiosa información de las condiciones estructurales en las que se encuentra el pavimento y la subrasante (Hoffman & Del Aguila, 1985).

En de los ensayos no destructivos se encuentra el “Falling Weight Deflectometer” (FWD), este instrumento mecánico electrónico nos posibilita medir las distintas deflexiones por peso impactado en una placa ubicada por encima del pavimento, este compuesto por 7 medidores de estructura, a pesar que el equipo es rápida, el precio es considerablemente alto (ver gráfico 5). La viga Benkelman forma parte de este tipo de ensayos, siendo un instrumento cuyo uso es manual, rápido, fácil de usar y bajo costo de adquisición.

Gráfico 5: Instrumento FWD.



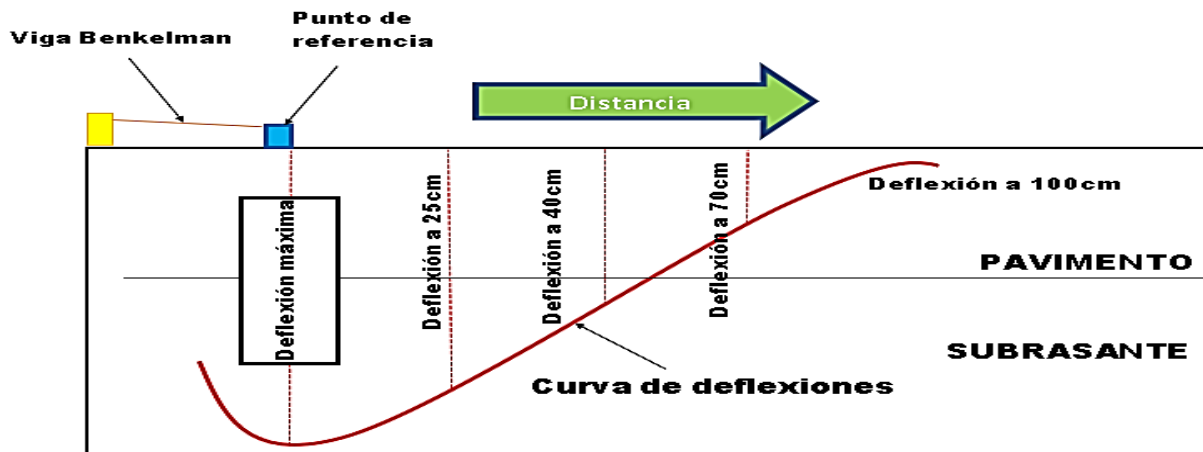
Fuente: (Salgado, 2016).

La viga Benkelman es considerado como un equipo aliado al momento de realizar una evaluación estructural, a través de este instrumento es posible medir las deflexiones a nivel de

superficie a cada distancia. Para lograr tomar estos datos es necesario aplicar una carga considerable, procedente de las llantas dobles del eje trasero simple de un camión. Los valores de deflexión son tomadas en un punto inicial de referencia y a cada distancia de acuerdo el camión vaya avanzando, a partir de estos datos se forma la denominada curva de deflexiones. En la figura 5, se puede apreciar cómo se va creando la curva de deflexiones.

Las deflexiones que se obtienen a través de la viga Benkelman, se adaptan al modelo matemático empleado en este trabajo. El modelo de Hogg utiliza como dato de partida la relación entre la deflexión a cierta distancia y la deflexión máxima; estos valores nos permiten calcular el módulo de elasticidad de la subrasante y la longitud característica, los cuales nos facilitan obtener ciertos parámetros estructurales que ayudan a ejecutar un correcto análisis de la situación estructural del pavimento. Estos parámetros pueden ser obtenidos de forma gráfica y numérica, por lo que para este trabajo de titulación se optó realizar el método numérico para el cálculo de los diferentes parámetros.

Gráfico 6: Curva de deflexiones.



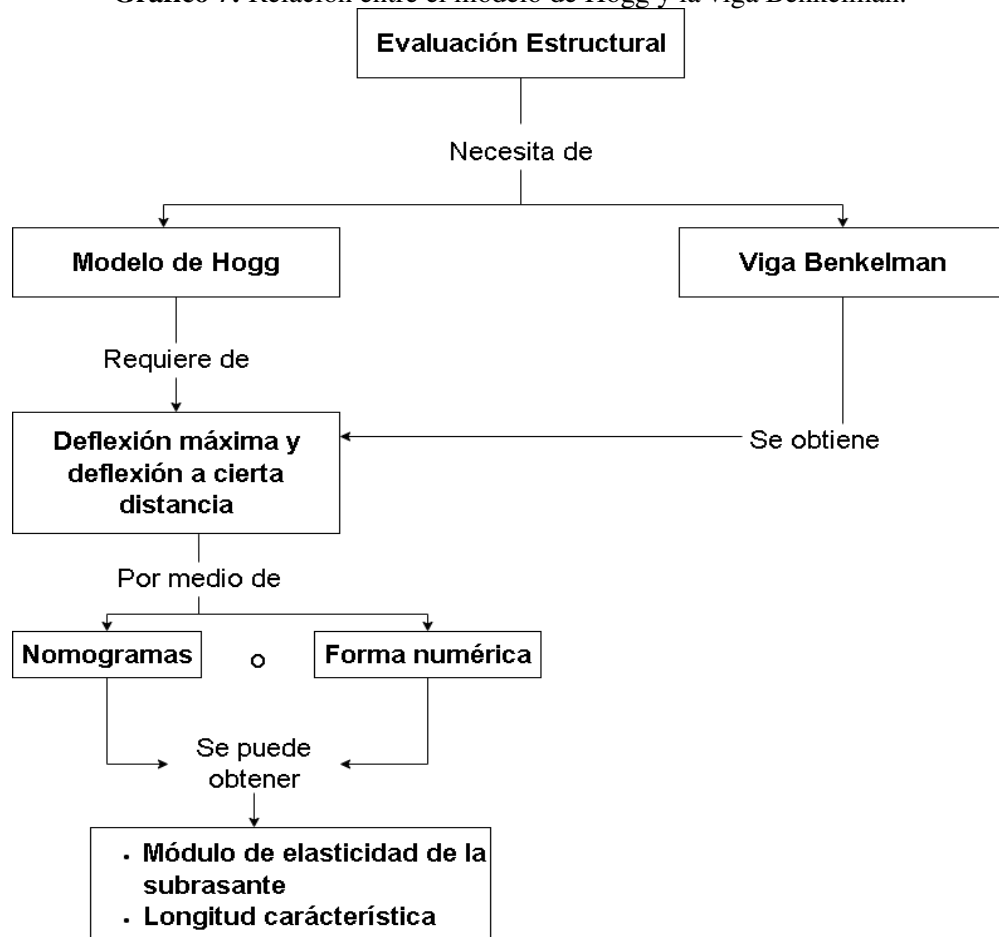
Fuente: *Elaboración propia.*

Los modelos matemáticos son utilizados generalmente para desarrollar una evaluación estructural de los pavimentos, los cuales requieren ciertos parámetros de entrada para que posteriormente puedan ser procesados en su metodología y finalmente se pueda alcanzar un correcto

análisis del pavimento. Para el caso del modelo de Hogg, estos parámetros pueden ser obtenidos a través de una variedad de deflectómetro, a pesar de ello, existe la desventaja que en algunos casos el modelo de carga es distinto al de Hogg, por lo que sería necesario realizar una corrección o correlación de los parámetros. Por otra parte, la viga Benkelman es el instrumento óptimo para el modelo de Hogg, debido a que es posible obtener estos parámetros tal como se requiere en el modelo, sin la obligación de realizar alguna corrección en los datos y sobre todo siguiendo un mismo modelo de carga.

A continuación, se presenta un esquema de la metodología del modelo de Hogg en la evaluación estructural.

Gráfico 7: Relación entre el modelo de Hogg y la viga Benkelman.

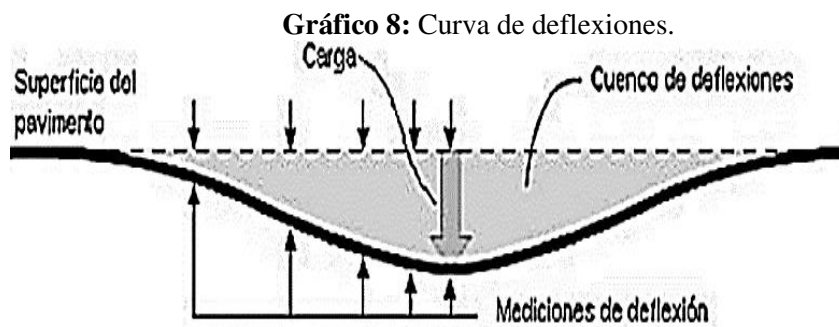


Fuente: *Elaboración propia.*

2.5. Deflexión

La medición de la deflexión de un pavimento representa la respuesta estructural ante la aplicación de cargas verticales externas, se conoce como desplazamiento vertical del conjunto estructural de un Paviment ante la aplicación de cargas, esta carga es producto del tránsito vehicular(Higuera-Sandoval, 2010).

Al momento de aplicar la carga en la superficie no se desplaza solo el punto de aplicación, generado por una deflexión máxima, sino que también se desplaza la zona alrededor del eje donde se aplicó la carga, esto se conoce como cuenco de deflexiones o curva.

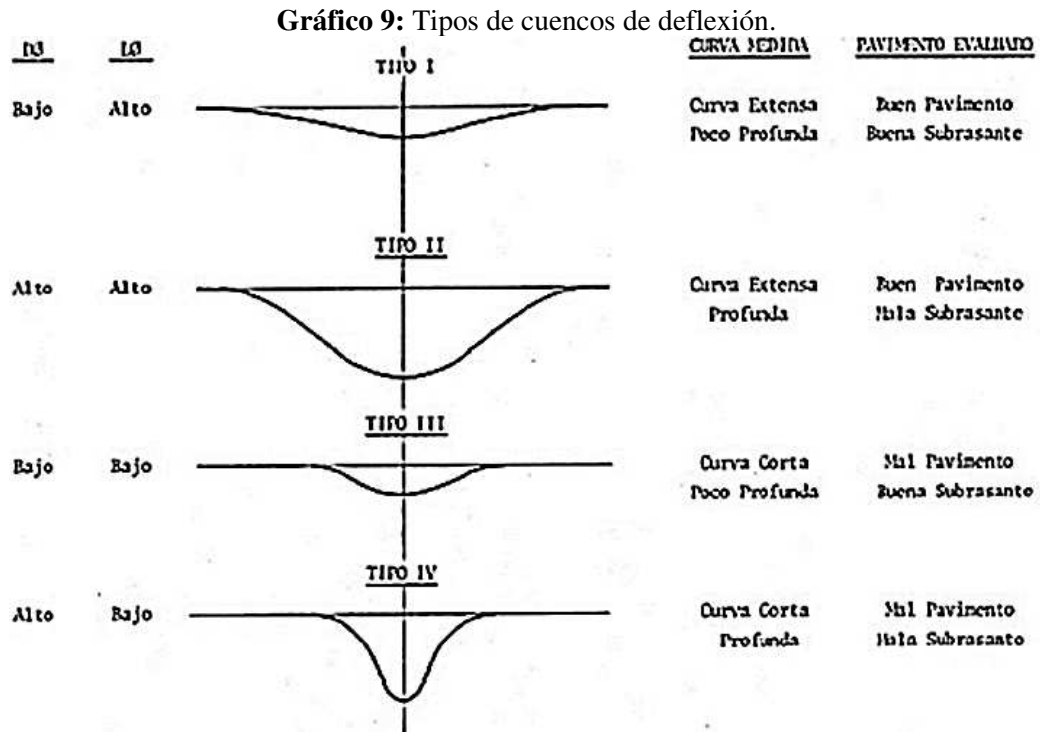


Fuente: (Bejarano, 2013)

La deflexión puede ser correlacionada con la capacidad estructural del pavimento, de tal modo que, si la deflexión es alta, la capacidad estructural del modelo del pavimento será deficiente, por otro lado, si la deflexión es baja, la capacidad estructural del modelo del pavimento será buena (Carrasco Cantos & Vizñay Reyes, 2019).

La grafica del cuenco de deflexiones nos indica información relevante sobre las características estructurales del pavimento y de la subrasante. Las deflexiones medidas hacia el extremo del cuenco manifiestan la condición de la subrasante, mientras que la medida en el centro de aplicación de carga indica la condición en la que se encuentra el pavimento evaluado (Bejarano, 2013).

En gráfico 9. Se puede observar la evaluación de la subrasante y el pavimento de acuerdo a la extensión (Lo) y profundidad máxima (Do) de la curva o cuenco.

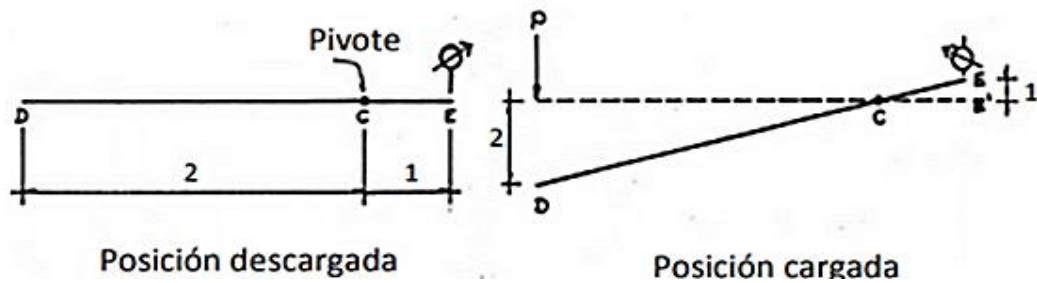


Fuente: (Bejarano, 2013)

2.6. Viga Benkelman

Se la considera como un equipo completamente mecánico y funcional bajo el principio de palanca, tal como se esquematiza en el gráfico 10. Posiciones de la viga Benkelman y los factores geométricos que afectan a la medición.

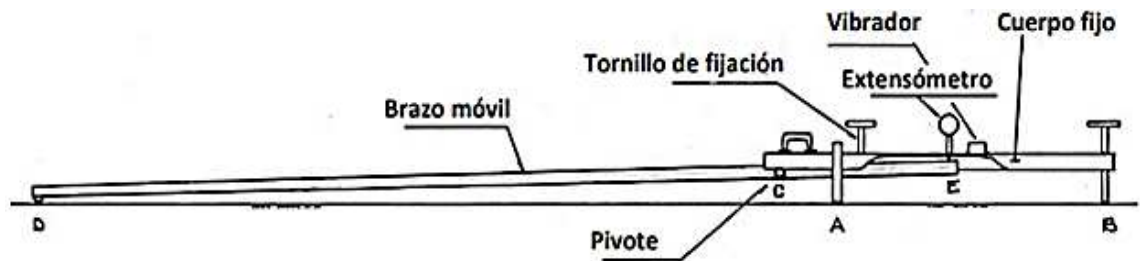
Gráfico 10: Esquema y principio de operación de la viga Benkelman.



Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

La viga Benkelman está constituida por dos partes, la primera es un cuerpo fijo que se ubica en la superficie del pavimento mediante tres apoyos, dos delanteros fijos en el punto “A” y otro regulable en el punto “B”. La segunda está constituida de un brazo móvil que se acopla a una articulación de giro o pivote en el punto “C”, uno de los extremos de este brazo (DE) se apoya sobre el pavimento en el punto “D” y el otro extremo en contacto con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical en el punto “E” (Hoffman & Del Aguila, 1985).

Gráfico 11: Partes de la viga Benkelman.



Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Algunos equipos poseen un vibrador incorporado que, al ser pulsado durante el ensayo, impide que el dial indicador se estanque ante cualquier obstrucción exterior que pueda influir en las lecturas de deflexión (Carrasco Cantos & Vizhñay Reyes, 2019).

CAPITULO III

3. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

3.1. Generalidades de evaluación estructural

En este trabajo de titulación se presenta principalmente la evaluación estructural del pavimento flexible empleando la viga Benkelman y utilizando como base matemática, el modelo de Hogg. Este modelo nos permite hallar el módulo de elasticidad de la subrasante y la longitud característica, los cuales son parámetros que pueden ser aplicados en relaciones ya establecidas en la teoría de pavimentos. De esta forma es posible obtener el CBR de la subrasante, el cual es un parámetro estructural primordial que nos facilita ejecutar un correcto análisis del estado del pavimento y precisar la necesidad de una intervención.

Hay diferentes metodologías para definir la condición estructural del pavimento, convencionalmente se han utilizado los métodos destructivos para hallar esta condición, por ejemplo, las perforaciones, esta alteran el comportamiento del pavimento (Jiménez Lagos, 2014). Esta metodología destructiva tiene múltiples desventajas como: ser cara, lenta, y modifica el equilibrio del sistema al perforar al pavimento, lo que produce alteraciones en los materiales. Actualmente hay metodologías no destructivas que permiten determinar la capacidad estructural del pavimento, con la ventaja de que no necesita estudios previos, no modifica su estructura, y que puede realizarse en cualquier momento de su vida de servicio (Reyes & Rondón, 2015).

3.2. Parámetros de evaluación

En el capítulo 2.3 se indicó que los parámetros de evaluación son: Módulo de Elasticidad (E_o), Longitud Característica (L_o) y Rigidez a la Flexión de la Placa (D). Sin embargo, en este caso el parámetro de rigidez a la flexión de la placa D , en vista que no tiene una relación con la con la

metodología que se aplica en esta tesis, no será necesario considerarla, por lo que en este trabajo se optó por obtener únicamente E_0 y L_0 . A continuación, se definirán dichos parámetros:

3.2.1 Longitud característica L_0

La longitud característica del cuenco de deflexiones, es un importante parámetro de evaluación que se calcula a través del modelo de Hogg, el cual se encuentra en función del módulo de elasticidad de la subrasante (E_{sg}), la rigidez a la flexión de la placa (D) y el módulo de Poisson (μ_0).

El valor de L_0 no solo se puede obtener de manera gráfica (nomogramas) sino también de manera manual por medios matemáticos. Este valor oscila de 15 a 80cm, si el valor de la longitud característica de 80cm representado por un pavimento rígido sobre una subrasante débil, mientras que, el valor de 15cm en un pavimento débil sobre una subrasante fuerte (*Balarezo Zapata, 2017*). En 1944 se desarrolló el modelo de Hogg, y en 1977 se obtuvo soluciones numéricas para la obtención de los parámetros de evolución, utilizando las siguientes ecuaciones (*Wiseman et al., 1977*).

Tabla 4: Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación.

Parámetros de Evaluación-Método Numérico	Ecuación	Ecuación
Módulo de elasticidad de la subrasante según Hogg.	$E_{sg} = \frac{I(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left(\frac{S_0}{S}\right) \left(\frac{P}{D_0 \alpha L_0}\right)$	A
Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.	$r_{50} = R \left(\frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left(\frac{1}{\alpha}\left(\frac{D_0}{D_R} - 1\right)\right)^{\frac{1}{\beta}} - B} \right)$	B
Longitud Característica de la curva de deflexión.	$L_0 = \frac{y_0 r_{50} + ((y_0 r_{50})^2 - 4mAr_{50})^{\frac{1}{2}}}{2}$ <p>Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$ entonces $L_0 = (y_0 - 2m)r_{50}$</p>	C
Relación entre la rigidez por la carga puntual y carga distribuida.	$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - \underline{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1\right)$ <p>Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$ entonces $\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1$</p>	D

Fuente: (Hoffman, 1997)

Donde:

E_{sg} =Módulo de elasticidad de la subrasante

μ_0 =Coeficiente de Poisson de la subrasante

S_0 =Rigidez teórica por carga puntual

S =Rigidez del pavimento= P/D_0

P =Carga aplicada

D_0 =Deflexión máxima

D_R =Deflexión a una distancia radial R

R =Distancia radial desde el punto inicial de carga

r_{50} =Distancia radial donde $\left(\frac{Dr}{Do}\right) = 0.5$

L_0 =Longitud característica

H =Espesor de la subrasante

I =Factor de Influencia

A = Radio de huella circular

α =Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 3

β =Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 3

B =Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla 3

γ_0 =Coeficiente para la longitud característica, ver tabla 3

m = Coeficiente para la longitud característica, ver tabla 3

\underline{m} =Coeficiente para la relación de rigideces, ver tabla 3

De la misma forma, el autor Wiseman especificó tres casos, en él se obtiene ciertos parámetros como la longitud característica, los coeficientes de ajuste de curva y para la relación de rigideces del modelo matemático de Hogg, esto nos facilita resolver las ecuaciones anteriores. Tanto el caso I y II fueron realizados para los valores de h/L_0 que son igual a 10, aunque con distintos datos de Poisson y en el caso III para cualquier dato del módulo de elasticidad con un valor infinito de h/L_0 . En la Tabla 3 se puede apreciar los tres casos trabajados por Wiseman.

Tabla 5: Valores de coeficientes y variables de ajustes de curva.

Ecuación	CASOS		I	II	I
					II
	Profundidad del estrato rígido	h/L_0	10	10	Infinito
	Coefficiente de Poisson	μ_0	0.50	0.40	Todos
A	Factor de influencia	l	0.1614	0.1689	0.1925
B	Valor de D_R/D_0		>0.70	>0.42 6	Todos
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$\frac{1}{\alpha}$	2.460	2.629	3.115
		$\frac{1}{\beta}$	0.592	0.548	0.584
		B	0	0	0
	Valor de D_R/D_0		<0.70	<0.42 6	
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$\frac{1}{\alpha}$	371.1	2283.4	
		$\frac{1}{\beta}$	0.219	0.2004	
		B	2	3	
	C	$L_0 = f(r_{50}, \alpha)$	y_0	0.620	0.602
n			0.183	0.192	0.180
D	$\frac{S_0}{S} = f\left(\frac{A}{L_0}\right)$	\underline{m}	0.52	0.48	0.44

Fuente: (Wiseman et al., 1977)

Se puede apreciar que el desarrollo numérico para hallar los parámetros de evaluación es posible si se considera $H/L_0=10$ y $H/L_0=Infinito$. La ventaja de utilizar el método numérico es que nos permite predecir una cierta distancia para el cual se cumple la relación $DR/D_0=0.5$. Esto nos facilita obtener de manera más exacta los resultados de los parámetros, puesto a que la longitud característica no se obtiene de manera gráfica.

3.2.2 *Módulo de elasticidad de la subrasante Eo*

El módulo de elasticidad es un parámetro del modelo de Hogg, conocida como la relación entre el esfuerzo y la deformación del material de la subrasante. También se define como la rigidez que tiene la subrasante ante una carga impuesta sobre ella.

Este parámetro representa la capacidad de un material de regresar a su estado original después de aplicarle una carga, en pavimentos flexibles, el módulo de elasticidad de las capas que lo conforman, así como el módulo de elasticidad o modulo resiliente de la subrasante, se consideran como parámetros esenciales para su evaluación y diseño. Mientras mayor sea el módulo de elasticidad de la subrasante será más rígida que una con un menor módulo de elasticidad (AASHTO, 1993). Para hallar dicho valor es indispensable contar con el valor de la longitud característica L_o , por lo cual se considera a este valor como el punto central de esta tesis.

En la Tabla 6 se detalla el rango de elasticidad para diferentes materiales que componen la estructura de un pavimento.

Tabla 6: Módulos típicos de materiales para integrar capas de pavimentos.

Material	Rango (MPa)
Mezcla asfáltica en caliente (a 20°C)	3000- 4000
Concreto con cemento Portland	14000-56000
Materiales estabilizados	35-14000
Materiales no estabilizados	35-690

Fuente: (University of California Pavement Research Center, 2008)

3.3. Medición de deflexiones

3.3.1 *Equipo requerido*

El equipo que se requiere para realizar las mediciones de deflexiones es:

- Deflectómetro viga Benkelman.
- Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm.
- Camión cargado, cuyo eje trasero tenga un peso 18000 libras y un par de llantas dobles con una presión de inflado de 75 a 85 psi.
- Vehículo auxiliar para transportar al personal y al equipo, se recomienda que sea una camioneta.
- Una balanza con capacidad de 10 toneladas para el pesaje del camión; si no se consigue la balanza, puede pesarse en alguna balanza de carga pesada, introduciendo en la balanza solo 2/3 del camión.
- Termómetro o sistema de termopares con escala de -10 °C a 50 °C.
- Manómetro, que disponga de una boquilla adecuada para medir la presión de inflado.
- Accesorios de seguridad como: cascos, conos y señales de seguridad.
- Accesorios de medición como: cinta métrica de 3m, plumones de punta gruesa, tiralíneas, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, termómetro, cincel punta, martillo, varilla de metal o de madera de 2m y alambre de amarre.

3.3.2 Frecuencia de medición

La Norma I.N.V.E 795-07 (capítulo 7) nos indica que la frecuencia de medición siempre dependerá del nivel de detalle que se requiera. En la tabla 5 se podrá apreciar en forma de resumen, la frecuencia de medición y también el número mínimo de mediciones por sección de pavimento uniforme necesarios dependiendo del tipo de ensayo.

Tabla 7: Frecuencia de medición.

Tipo de Ensayo	Frecuencia	Número mínimo
A nivel de red	Cada (200-500m)	7
A nivel general de proyecto	Cada (50-200m)	15
A nivel detallado de proyecto	Cada (10-50m)	/

Fuente: (I.N.V E-795-07, 2007)

3.3.3 Procedimiento en campo

Antes de iniciar con las mediciones de las deflexiones se tiene que definir los puntos donde se va a tomar las medidas. Se sugiere tomar los puntos cada 50 o 100 m de distancia alterando cada carril; estos puntos tienen que hallarse a una cierta distancia establecida previamente hacia la parte interna del carril desde el borde de la berma del pavimento. Se recomienda usar las distancias indicadas en la tabla 8 (MTC, 2016).

Tabla 8: Distancia del punto de ensayo.

Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2.70 m	0.45 m
3.00 m	0.60 m
3.30 m	0.75 m
3.60 m o más	0.90 m

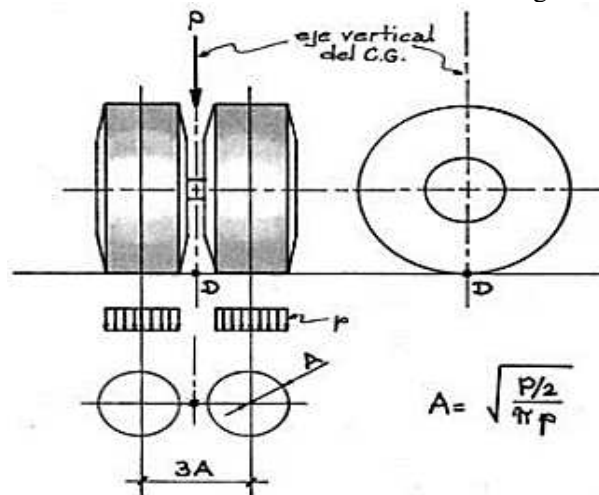
Fuente: (MTC, 2016)

Conociendo cuales los puntos definidos donde se efectuará las mediciones, la rueda dual de la volqueta deberá ser ubicado en el punto seleccionado, el extremo de la viga Benkelman se coloca debajo del eje vertical del centro de gravedad de las llantas dobles, se contempla como tolerancia un rango de 3 pulgadas alrededor del punto. Ver figura 12 (Balarezo Zapata, 2017).

Tanto la dificultad visual como operacional que se requiere para hacer coincidir el extremo de la viga con el eje de gravedad, se hará el siguiente trabajo:

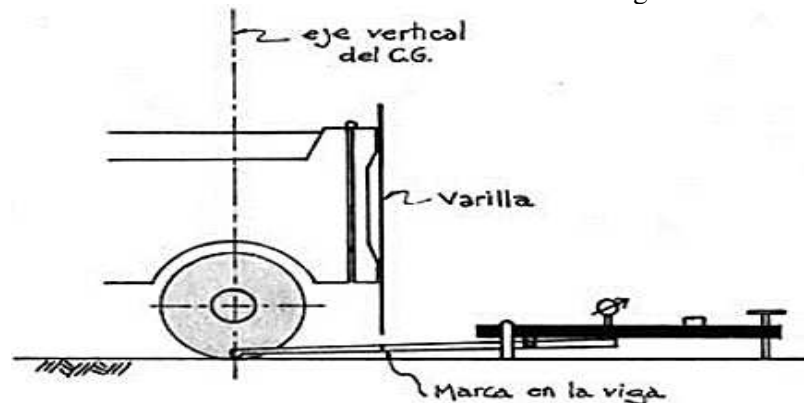
El extremo de la viga Benkelman se coloca en el eje de gravedad, pero en la parte de afuera de las llantas, de tal manera que, se pueda realizar una marca con una plomada adosada con una varilla de madera en la parte trasera del camión. La viga Benkelman tiene que estar alineada horizontalmente con la dirección de movimiento del camión.

Gráfico 12: Punto de ubicación del extremo de la viga Benkelman.



Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Gráfico 13: Punto de ubicación del extremo de la viga Benkelman.



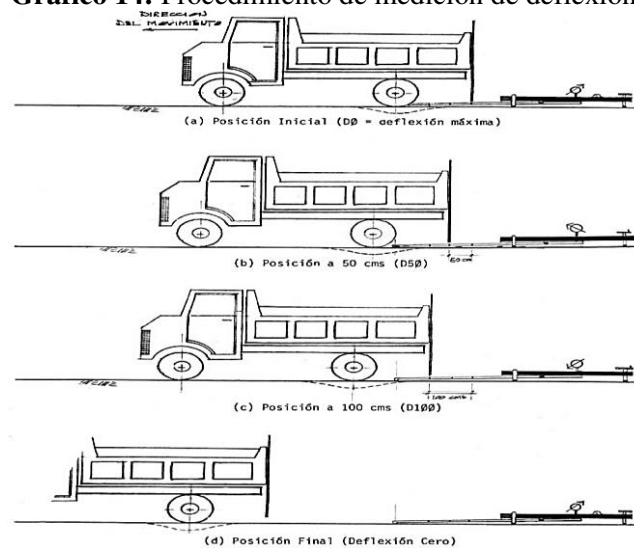
Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Se puede efectuar las mediciones a un mismo punto con diferentes distancias, puede ser cada 25, 30, 40, o 50 cm, se las domina como deflexiones adicionales. A la primera medición se la considera como la deflexión máxima, esta es tomada a una distancia cero y es la deflexión tomada en el punto que coincide con el eje de gravedad de los neumáticos dobles.

Con esta metodología de análisis es necesario tomar al menos 3 lecturas por cada punto, se puede tomar más lecturas con el propósito de obtener una gráfica del tipo de curva de deflexión o con el propósito de verificar. Como disposición se tendrá que la primera marca adicional se realice a una distancia tal que la medida de su deflexión sea la mitad o se encuentre en un rango de 35% al 65% de la deflexión máxima, la segunda marca adicional se efectuara al doble de la distancia de la primera marca adicional. Ver figura 14 (Balarezo Zapata, 2017).

Al momento de colocar las marcas adicionales se activa el extensómetro, se coloca el dial en cero mientras el camión arranca muy lentamente (1Km/h) se toman las medidas acordes a la varilla adosada en la parte trasera del camión vaya coincidiendo con la primera y segunda marca adicional, las lecturas se toman hasta el momento en el que el camión se haya alejado a una distancia considerable del punto cero (5 a 7 metros) y que el indicador del día este estático.

Gráfico 14: Procedimiento de medición de deflexión.



Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

Para realizar este trabajo de campo es necesario la participación de tres operadores. Un operador encargado de tomar las daciones y que dicte las lecturas, una persona que anote las mediciones y una persona que ayude a coordinar con el conductor del camión y de aviso al operador cuando la varilla adosada en el camión coincida con las marchas hechas en la viga Benkelman. Este levantamiento debe ser supervisado por un ingeniero que verifique las mediciones que se vayan obteniendo.

3.3.4 *Temperatura*

Para tomar la temperatura del pavimento a una cierta distancia, antes de iniciar con el ensayo se debe realizar un orificio de 20 a 50 milímetros de profundidad y es necesario que tenga un diámetro de aproximadamente 10 milímetros. Luego se procede a llenar con glicerina, a no menos de 10 minutos de iniciar el ensayo, se introduce un termómetro y se obtiene la temperatura (*I.N.V E-795-07, 2007*).

Otra alternativa para obtener la temperatura es medir a través de un termómetro de infrarrojo y mediante esta pronosticar la temperatura superficial del pavimento aplicando la norma (I.N.V.E-788-07) “Predicción de la temperatura de capas de pavimento asfáltico”.

3.3.5 *Proceso de cálculo de deflexiones*

Para calcular las deflexiones recuperables del pavimento, halladas mediante la viga Benkelman se realiza el siguiente proceso:

En el caso que la diferencia entre la lectura final e intermedia sea menor o igual a 0.03 milímetros, entonces se utilizara la siguiente ecuación para hallar la deflexión:

$$Dt = 2(F - Li) \tag{9}$$

Mientras, si la diferencia entre estas lecturas es mayor a 0.03 milímetros la deflexión se hallará con esta otra ecuación:

$$Dt = 2(F - Li) + 5.82(F - I) \quad (10)$$

3.3.6 Predicción de temperatura

Para la predicción de la temperatura se utiliza el método BELLS, según la norma (I.N.V.E-788-7), el cual menciona que este necesita ciertos parámetros como la temperatura superficial del pavimento, la temperatura máxima y mínima del día anterior, la hora del día y la profundidad a la cual se requiere calcular la temperatura (I.N.V E-795-07, 2007). Esta temperatura a una cierta profundidad (d) se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$T_D = 0.95 + 0.892 * IR + (\log(d) - 1,25)(-0.448 * IR + 0.621(1 - dia) + 1.83 * A) + 0.042 * IR * B \quad (11)$$

Donde:

T_D =Temperatura del pavimento en Celsius

IR =Temperatura superficial en Celsius

d =Profundidad a la cual se va predecir la temperatura en milímetros

$1 - dia$ =Promedio de las temperaturas alta y baja del día anterior en Celsius

A =Factor que depende de la hora del día, ver tabla 9

B =Factor que depende de la hora del día, ver tabla 9

Tabla 9: Valores de A y B en función de la hora.

Hora del día	A	B
0.0<h<3.0	$sen\{(h + 24 - 15.5) * 20\}$	$sen\{(h + 24 - 13.5) * 20\}$
3.0<h<5.0	$sen\{(h + 24 - 15.5) * 20\}$	-1
5.0<h<9.0	-1	-1
9.0<h<11.0	-1	$sen\{(h - 13.5) * 20\}$
11.0<h<24.0	$sen\{(h - 15.5) * 20\}$	$sen\{(h - 13.5) * 20\}$

Fuente: (I.N.V E-795-07, 2007)

3.3.1 Corrección de deflexión por temperatura

Una vez obtenida las distintas lecturas de campo a través de la Viga Benkelman, es necesario realizar el cálculo de una lectura final para cada estación, por lo que se debe restar las lecturas consecutivas acumulando las diferentes deflexiones desde una lectura final cero a cada una de las distancias, obteniendo como resultado final deflexiones a una cierta distancia. Por otro lado, es necesario tener en cuenta que las lecturas obtenidas en campo miden la restauración del pavimento, pero no sus deflexiones.

El principal factor climático que afecta a las deflexiones del pavimento es la temperatura, provocando en pavimentos asfálticos que se ablanden al ser sometidos a temperaturas altas, esto causa un incremento de las deflexiones en ellos. Por lo cual es necesario realizar una corrección de las deflexiones que se obtuvo en campo a una cierta temperatura. Los pavimentos flexibles que tengan un espesor de asfalto mayor a 5 cm sus deflexiones se ven afectados por el principal factor ambiental que es la temperatura, esto ocasiona que el pavimento aumente su magnitud a medida que se incrementa la temperatura.

De manera errónea, es posible que se disminuya la rigidez de las capas subyacentes, por lo que es importante realizar una corrección de las deflexiones de campo llevando los datos de las diferentes deflexiones a una temperatura de 20 °C, en base a la siguiente ecuación:

$$D_c = \frac{\text{Deflexiones de campo}}{\left[1 * 10^{-3} * \frac{1}{\text{cm}^\circ\text{C}} * e * (T - 20^\circ\text{C})\right] + 1} \quad (12)$$

Donde:

D_c = Deflexión corregida por temperatura.

e = Espesor teórico de la carpeta asfáltica en cm.

T = Temperatura del pavimento en ° C.

Estas mediciones de temperatura se llevan a cabo una vez en cada uno de los puntos, considerando que el pavimento tiene un espesor de asfalto mayor a 5 cm. Por lo cual se requiere realizar una perforación en el pavimento, el mismo que debe tener una profundidad de entre 3 a 5 cm aproximadamente. Antes de iniciar con el ensayo, el termómetro ya debe estar colocado cerca del punto cero, esto nos facilitara registrar los datos de temperatura una vez que se haya tomado la última lectura en campo. Es recomendable que se evite ciertas zonas húmedas o en algunos casos sombras que permitan obtener un valor de temperatura representativa del sitio. Se sugiere que estos datos se tomen en zonas que se encuentren cerca al borde del pavimento y al eje transversal de la llanta del camión, puesto a que, esto nos facilitara algún impedimento, pero sobre todo se ubica cerca del punto cero (*Balarezo Zapata, 2017*).

Gráfico 15: Medición de temperatura.



Fuente: (*Hoffman & Del Aguila, 1985*)

A continuación, en la tabla 10 se observa un formato que puede ser utilizado para registrar las lecturas y mediciones de campo. En la tabla 11 se muestra un formato para las mediciones corregidas de campo

Tabla 10: Formato de lecturas y mediciones de campo.

Estación (Km)	Carril	Lecturas de campo (mm)				Espesor de la carpeta asfáltica (cm)	Resultados			
		L25	L40	L70	L100		Deflexiones de campo (mm)			
							D25	D40	D70	D100
0+000	IZQUIERDO	0.030	0.050	0.070	0.100	8	0.200	0.140	0.100	0.060
0+050	DERECHO	0.050	0.080	0.100	0.150	8	1.464	1.073	0.722	0.391
0+100	IZQUIERDO	0.030	0.080	0.120	0.170	8	1.504	1.153	0.762	0.391

Fuente: *Elaboración Propia.***Tabla 11:** Formato de mediciones corregidas de campo.

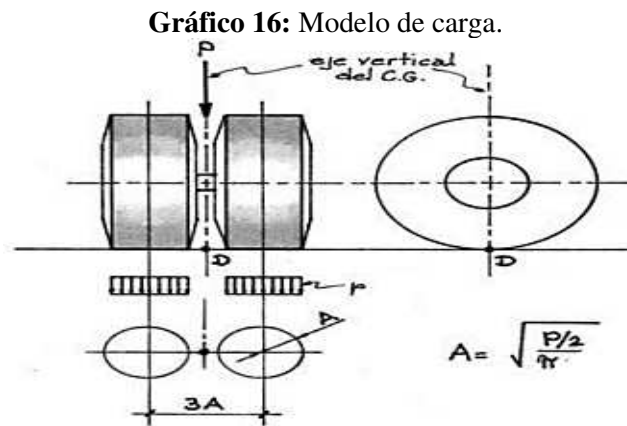
Estación (Km)	Deflexiones corregidas (mm)				Temperatura °C
	D25	D40	D70	D100	
0+000	0.202	0.142	0.101	0.061	18.50
0+050	1.475	1.081	0.728	0.394	19.04
0+100	1.516	1.163	0.768	0.394	18.97

Fuente: *Elaboración Propia.*

3.4. Procesamiento y análisis del modelo de Hogg

Para analizar y procesar los datos de deflexión obtenidas en campo, se utiliza el modelo matemático de Hogg por lo que es necesario plantear para el sistema, un modelo de carga. Los valores de deflexión medidas a través de la viga Benkelman se realiza con una carga aproximada de 18000 libras, los cuales provienen del eje trasero de un camión o volqueta de llanta doble, el mismo que

debe ser inflado con una precisión de entre 75 a 85 psi. Este modelo matemático considera que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, sobre una superficie circular de contacto con un radio A y una distancia 3A, esto asumido desde los centros de cada llanta (Ver Figura 16), Por lo que se puede apreciar la siguiente relación: (Balarezo, 2017):



Fuente: (Hoffman & Del Aguila, 1985)

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (13)$$

Donde:

A = Radio de huella

P = Carga sobre una llanta

p = Presión de inflado

Con la carga y presión de inflado, determinados anteriormente se tiene:

$$A = \sqrt{\frac{4500}{\pi(80)}} = 4.23in = 10.7cm$$

La variable H, en el modelo matemático de Hogg, es considerado como la profundidad finita y en algunos casos infinita de la subrasante del pavimento. Es primordial limitar esta variable al momento de realizar este proceso, puesto a que, la extensión de las diferentes curvas de deflexión es

infinitas, esto ocasiona que exista una contradicción con las deflexiones medidas. Para este modelo es recomendable que la variable de profundidad sea 10 veces igual a la longitud característica, es decir, $H/L_0=10$.

Es necesario mencionar que las distintas variables de evolución solo se pueden obtener de forma manual numérica y por medio de nomogramas. Se puede desarrollar una sistematización computacional que nos facilite la obtención de los parámetros por medio de estas dos formas. A continuación, se detalla el procedimiento de obtención de los parámetros de evaluación.

3.5. Determinación y análisis del CBR

Una vez obtenida la longitud característica " L_0 ", se puede hallar el valor de E_{sg} , de la siguiente manera:

Hallar el valor de relación entre la rigidez para carga puntual y la de carga distribuida en un área, para un cociente dado de A/L_0 , cuya expresión está dada por la ecuación D de la tabla 2.

$$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - \underline{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1\right) \quad (14)$$

$$\text{Si } \frac{A}{L_0} < 0.2, \text{ entonces } \left(\frac{S_0}{S}\right) = 1$$

Del ejemplo se tiene que:

$$\frac{D_R}{D_0} = \frac{0.34}{0.85} = 0.4 < 0.426$$

$$\underline{m} = 0.48 \text{ (Ver tabla 8)}$$

$$\frac{A}{L_0} = \frac{10.7}{15.1} = 0.708 > 0.2$$

Entonces:

$$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - 0.48 \left(\frac{10.7}{15.1} - 0.1\right) = 0.7078$$

Reemplazar los valores obtenidos en la ecuación A de la tabla 7:

$$E_{sg} = I \frac{(1 + u_0)(3 - 4u_0)}{2(1 - u_0)} \left[\frac{S_0}{S}\right] \left[\frac{P}{D_0 * L_0}\right] \quad (15)$$

Donde:

$$P = 4086 \text{ kg}$$

$$u_0 = 0.4$$

$$D_0 = 0.85 \text{ mm}$$

$$L_0 = 15.1 \text{ cm}$$

$$I = 0.1689 \text{ (Ver tabla 8)}$$

$$E_{sg} = 0.1689 * \frac{(1 + 0.4)(3 - 4 * 0.4)}{2(1 - 0.4)} [0.7078] \left[\frac{4086}{0.085 * 15.1}\right]$$

$$E_{sg} = 622.57 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Finalmente se aplica la ecuación 13 y se considera un “factor de subrasante” de 110, se obtiene:

$$E_{sg} = K * CBR \quad (16)$$

$$E_{sg} = \frac{622.57}{110} = 5.65\%$$

Así se obtiene de manera numérica un valor que puede soportar la subrasante, en función del análisis estructural utilizando Viga Benkelman. Este valor de soporte puede ser hallado tanto de la forma numérica o gráfica, cualquiera de estos dos métodos tiene como objetivo comparar los datos propuestos por el MTC o también conocido como el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, y de esta forma conocer el estado en que se encuentra el pavimento a través de su calificación.

Tabla 12: Clasificación CBR según MTC.

Categorías de la subrasante	CBR
S_0 = Subrasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
S_1 = Subrasante Pobre	De $CBR \geq 3\%$ A $CBR < 6\%$
S_2 = Subrasante Regular	De $CBR \geq 6\%$ A $CBR < 10\%$
S_3 = Subrasante Buena	De $CBR \geq 10\%$ A $CBR < 20\%$
S_4 = Subrasante Muy Buena	De $CBR \geq 20\%$ A $CBR < 30\%$
S_5 = Subrasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Fuente: (MTC, 2014).

En caso que la subrasante del pavimento obtenga una calificación baja, este deberá ser reforzada utilizando un espesor asfáltico o también se puede optar por la reconstrucción completa de la vía. Generalmente, en las varias ocasiones simplemente se plantea un espesor granular sin realizar un estudio profundo y sin conocer el estado estructural de la subrasante (Balarezo Zapata, 2017).

Hoffman, basándose en la teoría de capas elásticas y en diferentes consideraciones de diseño, plantea que, si un pavimento flexible es correctamente diseñado, los parámetros de módulo de elasticidad del Pavimento E_p y el módulo de elasticidad de la subrasante E_{sg} , tienen una cierta relación, esto nos da como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{E_p}{E_{sg}} = 3 \quad (17)$$

En base al concepto de la rigidez flexional y la teoría de láminas entre las placas del pavimento estudiado de espesor H_c , módulo de elasticidad E^* y el actual pavimento con módulo de elasticidad E_p y espesor H_{eq} (Hoffman, 1977), se obtiene lo siguiente:

$$E * (Hc)^3 = E_p (E_{eq})^3 \quad (18)$$

Reemplazando la ecuación 15 en 14, se obtiene:

$$\frac{H_{eq}}{H_c} = \left(\frac{1}{3} * \frac{E}{E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

Se considera al parámetro E^* , como un módulo de elasticidad equivalente presente en todas las capas que componen el pavimento sobre la subrasante. La suma entre el espesor de la carpeta asfáltica H_1 y el espesor granular H_2 nos da como resultado el total de todas las capas H_c . Se tiene un espesor equivalente H_{eq} , el cual es considerada como un espesor efectivo del pavimento estudiado.

La ecuación 16 nos facilita determinar si el espesor H_c calculado, es utilizable o si requiere ser reforzado en un pavimento con módulo de elasticidad E^* .

Para valores $\frac{H_{eq}}{H_c} \geq 1$ se considera que el pavimento es utilizable, caso contrario para valores distintos se requiere reforzar.

Ullidtz se basa el parámetro “espesor equivalente- H_E ”, relaciona matemáticamente las variables como la deflexión máxima D_0 , el módulo de elasticidad de la subrasante E_{sg} y el módulo de elasticidad equivalente del pavimento E^* , en las siguientes expresiones (*Wiseman et al., 1977*):

$$H_E = (0.9)(H_c) \left(\frac{E}{E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$D_0 = A + (B + C) \quad (21)$$

Siendo,

D_0 = Deflexión máxima

$$A = \frac{(1+u_0)P}{2\pi} \quad (22)$$

$$B = \frac{1}{E} * \left[\frac{2(1 - u_0)}{r} - \frac{1}{R_1} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_1}{R_1} \right)^2 \right) \right] \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{E_{sg}} * \left[\frac{1}{R_2} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_2}{R_2} \right)^2 \right) - \frac{1}{R_2} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_3}{R_3} \right)^2 \right) \right] \quad (24)$$

Donde:

$$r = 1.5 * A$$

$$Z_1 = H_C + 0.6 * \frac{A^2}{H_C}$$

$$R_1 = \sqrt{Z_1^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_2 = H_E + 0.6 * \frac{A^2}{H_E}$$

$$R_2 = \sqrt{Z_2^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_2 = (H_E + N * L_0) + 0.6 * \frac{A^2}{H_E + N * L_0}$$

$$R_3 = \sqrt{Z_3^2 + (1.5A)^2}$$

$N= 10$ para base rocosa de $\frac{H}{L_0} = 10$

$N= 100$ para base rocosa de $\frac{H}{L_0} = \text{infinito}$

$A=$ Radio de huella

$P=$ Carga total en la llanta

Siendo esto el proceso para la obtención del módulo de Elasticidad del Pavimento E^* y conocer el comportamiento de la subrasante, pero sobre todo si se requiere de algún tipo de refuerzo estructural en términos de estructura granular, para este caso se utilizará la ecuación 15.

Se considera que el análisis del estado de los pavimentos de las redes viales locales, no se realizan frecuentemente, y en ciertas ocasiones simplemente se dan mantenimientos superficiales sin tener en cuenta que la vía necesita una completa rehabilitación o en algunos casos sin ningún estudio se realiza un recapeo del pavimento sin que está presente carencias estructurales, estas decisiones generan gastos de partidas públicas que podrían optimizarse mejor. El recapeo del pavimento es considerado como una alternativa de mantenimiento, el cual consiste en proporcionar un refuerzo estructural a la superficie de rodadura con cierta emulsión asfáltica. Por lo que es posible que estos tipos de mantenimientos sean utilizados para rediseñar el pavimento tomando en consideración un tránsito futuro y la vida útil del mismo.

Entre los años de 1958 y 1960, la AASHTO o también conocida como American Association of State Highways and Transportation Officials, llevo a cabo el AASHO road test, en la ciudad de Ottawa -Illinois, el cual consistía en realizar diversas pruebas efectuadas con diferentes cargas de vehículos, con el objetivo de determinar el desgaste ocasionado en los pavimentos. Con esta información y ciertas mejoras dentro de los años 1972, 1973, 1986 y 1993, se propuso un método para hallar un refuerzo asfáltico útil por carencias estructurales, el cual relaciona el numero estructural del pavimento (SN_{eff}) con el número estructural que se desea igualar (SN_{req}), en el caso que exista una pérdida en la capacidad estructural del pavimento.

Es primordial mencionar que el análisis del número estructural efectivo (SN_{eff}), no es muy común en las diferentes evaluaciones estructurales de los pavimentos del Ecuador, sin embargo, este parámetro junto al CBR, cumplen un papel fundamental al momento de realizar un seguimiento del estado en el que se encuentra un pavimento, con el fin de plantear algún plan de mantenimiento correctivo a nivel de red local. También, la forma en que se obtiene este dato, se integra perfectamente

con lo que se propone en el presente trabajo de titulación, el de realizar una evaluación estructural de la subrasante del pavimento con la utilización de la Viga Benkelman, esto se realizara sin la necesidad de producir daños al pavimento, lo cual coincide con la filosofía de esta investigación.

3.6. Análisis estadístico de resultados de evaluación

Los datos que se obtienen a través de la evaluación estructural con viga Benkelman deben ser posteriormente analizados estadísticamente con el objetivo de conseguir valores característicos como el resultado final, de este modo es posible tomar decisiones sobre el estado del pavimento flexible.

Es cierto que no es posible hallar un proceso adecuado para un análisis estadístico certero o una herramienta estadística idónea; puesto a que esto depende normalmente de la capacidad de cada persona en la gestión de datos. Por lo cual se recomienda que, para un aprovechamiento máximo de cada dato y resultado hallado, se trabaje de la siguiente forma:

3.6.1 CBR

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), también conocido como el ensayo de Relación de Soporte de California, fue desarrollado por el Departamento de Transporte de California y empleado en todo el mundo, con la finalidad de obtener la capacidad de soporte de la subrasante, compactado en distintos niveles a una cierta humedad idónea. Por lo general este ensayo se utiliza para evaluar la calidad relativa de la subrasante, subbase y bases, a través de la norma ASTM D-1883.

La relación que existe entre el CBR y el Módulo Resiliente MR se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$M_R = 1500 \times CBR \quad (25)$$

Donde el módulo resiliente (MR) está en psi. Esta correlación provee mejores resultados con valores de CBR menores a 20. (Huang, 2004)

La subrasante se puede clasificar de acuerdo al valor de su CBR como se muestra en la Tabla 11 (MTC, 2014).

Tabla 13: Tipo de Subrasante según el valor de CBR.

Categorías de la subrasante	CBR
S0 = Subrasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
S1 = Subrasante Pobre	$3\% \leq CBR \leq 6\%$
S2 = Subrasante Irregular	$6\% \leq CBR \leq 10\%$
S3 = Subrasante Buena	$10\% \leq CBR \leq 20\%$
S4 = Subrasante Muy Buena	$20\% \leq CBR \leq 30\%$
S5 = Subrasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Fuente: (MTC, 2014)

Los datos de CBR pueden cambiar a lo largo del pavimento, en ciertas ocasiones es muy probable que se produzcan discontinuidades notables, los cuales pueden notarse gráficamente. Generalmente en el análisis de pavimentos, existe un concepto denominado homogeneidad.

La homogeneidad permite caracterizar tramos de pavimentos que tengan un valor de parámetro en común o que se mantengan homogéneos, a esta acción se le conoce como tramificación (Salgado, 2016). Cabe mencionar que los valores obtenidos no pueden variar significativamente, puesto a que debe existir una coherente variabilidad. La tramificación se utiliza en el estudio de pavimentos, el cual puede darse con parámetros como el CBR, clase, forma horizontal geométrica, entre otros que faciliten establecer distintos tramos de análisis del pavimento.

Los valores obtenidos de CBR en los distintos tramos deben tener la mayor continuidad posible, es decir debe existir una correcta agrupación de tal modo que no exista una notable discontinuidad.

Una vez que se haya tramificado, se opta por generar valores estadísticos como la media, mediana, desviación estándar y finalmente el percentil 80; y en base a estos resultados obtenidos tomar una decisión. A través de los valores de CBR, es posible efectuar una distribución normal, con el objetivo de comparar y verificar con los valores estadísticos anteriores, y así tomar las decisiones en función del estado del pavimento.

3.6.2 Deflexión característica

Las deflexiones características también prosiguen una distribución normal; en el momento que se necesita obtener un parámetro representativo que nos facilite realizar un correcto diseño de refuerzo, la deflexión característica es primordial puesto a que representa de mejor manera una sección del pavimento.

La División de Carreteras de California, nos sugiere emplear el percentil 80% para hallar la deflexión característica (D_c), mientras que el Instituto de Asfalto no recomienda realizarlo en función de probabilidad “ t ”, el mismo que manifiesta la probabilidad de presentar deflexiones que sean superiores a la D_c en la superficie total. Se puede observar en la Tabla 12 los datos de probabilidad “ t ” y la deflexión característica en el siguiente termino:

$$\text{Deflexión característica} = D_c = \text{Media} + t * \text{desviación estándar}$$

Tabla 14: Valor “t” y probabilidad de Ocurrencia de $D > D_c$.

Valor de diseño	Dc	Área $D > D_c$
50	\underline{X}	50
75	$\underline{X} + 0.674\sigma$	25
85	$\underline{X} + \sigma$	15
90	$\underline{X} + 1.3\sigma$	10
95	$\underline{X} + 1.645\sigma$	5
98	$\underline{X} + 2\sigma$	2
99	$\underline{X} + 2.23\sigma$	1
99.9	$\underline{X} + 3\sigma$	0.1

Fuente: *Elaboración Propia.*

El dato del percentil 80% que nos sugiere la División de Carreteras de California equivale a aproximadamente el dato de diseño de 85% del Instituto de Asfalto, para seleccionar estos valores se debe basar en la sensibilidad que indica trabajar estadísticamente, es decir al momento de trabajar con distintas dispersiones estadísticas que sean mayores o menores al percentil 80% se obtendrían resultados exagerados, esto causaría fallas en el análisis del pavimento.

Al igual que los parámetros que se mencionó anteriormente el uso debe ser para cada uno de los tramos o para todos los datos de forma general, teniendo en consideración que debe existir una coherencia en la variabilidad de los resultados de deflexión.

A pesar que esta tesis no se encuentra enfocado en el desarrollo de herramientas estadísticas, es posible obtener resultados idóneos con lo sugerido anteriormente, evitando así realizar pésimas calificaciones del estado en que se encuentra el pavimento flexible.

3.7. Alternativas de mantenimiento del pavimento flexible

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú (MTC), plantea las calificaciones que se derivan directamente de las investigaciones de AASHTO, los cuales son recomendadas para la construcción y rehabilitación del pavimento, esto nos ayuda a evitar trabajar en subrasantes que en un corto tiempo de funcionamiento se terminaran deteriorando. Estas calificaciones han sido utilizadas en varias investigaciones y comprobadas por diferentes empresas dedicadas a la conservación vial (*MTC, 2016*).

De esta forma se establece que al tener calificaciones que se encuentren dentro del rango de inadecuada y pobre, será necesario realizar una reconstrucción del pavimento desarrollando trabajos de mejoras en la subrasante, logrando así obtener una base optima. De la misma forma los datos de CBR que se encuentren dentro de la calificación de regular, buena, muy buena y excelente subrasante, nos indican que el pavimento se encuentra estructuralmente ubicado sobre una subrasante que no muestra problemas estructurales y cumple una función optima. En base a este análisis se puede determinar si existe la necesidad de realizar una rehabilitación o mantenimiento del pavimento. En La tabla 15 se indican las acciones que se debe tomar en cuenta en el pavimento a nivel de subrasante.

Tabla 15: Acción del pavimento a nivel subrasante.

Calificación MTC de la Subrasante	¿Se originan problemas estructurales en el pavimento?	Condición del Pavimento	Acción en el pavimento
Inadecuada $CBR < 3\%$	Si	Daño en toda la estructura	Reconstrucción del pavimento y mejoras en el terreno de fundación.
Pobre $3\% \leq CBR < 6\%$	Si	Con problemas estructurales	Reconstrucción del pavimento y mejoras en el terreno de fundación.
Regular $6\% \leq CBR < 10\%$	No	Estructura optima	Evaluar si existe carencia estructural
Buena $10\% \leq CBR < 20\%$	No	Estructura optima	Evaluar si existe carencia estructural
Muy Buena $20\% \leq CBR < 30\%$	No	Estructura optima	Evaluar si existe carencia estructural
Excelente $30\% \leq CBR$	No	Estructura optima	Evaluar si existe carencia estructural

Fuente: (MTC, 2016)

CAPITULO IV

4. APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL AL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA VÍA DE CONEXIÓN ENTRE LA PANAMERICANA NORTE Y LA CALLE JULIA BERNAL

4.1. Generalidades de evaluación estructural

Las mediciones de campo se llevaron a cabo utilizando la Viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca, el cual cuenta con las siguientes características:

Tabla 16: Características de la Viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca.

Relación de brazo	2:1
Dial de precisión	0.001 mm
Longitud de brazo de prueba del pivote al punto de prueba	2.44 m +/- 50 mm
Longitud de brazo desde el pivote hasta el extensómetro	1.22 m +/- 50 mm
Distancia desde el pivote hasta las patas delanteras	254 mm
Distancia desde el pivote hasta las patas posteriores	1.664 m

Fuente: *Elaboración Propia.*

Gráfico 17: Viga Benkelman de la Universidad Católica de Cuenca.



Fuente: *Elaboración Propia.*

Los puntos fueron tomados cada 50 metros, utilizando el método del bolillo, el cual consiste en ir alternando el carril izquierdo y derecho, haciendo un total de 37 puntos, los mismo que fueron evaluados a 60 centímetros desde la berma hacia dentro del carril. Este procedimiento de recolección de datos de deflexión en campo a través de la viga Benkelman se desarrolla basándose en la norma “Standart test procedure for Benkelman beam deflection measurements” (TNZ, 1997).

Gráfico 18: Ubicación del punto a evaluar.



Fuente: *Elaboración Propia.*

Para el método del retrocálculo se necesita de por lo menos tres lecturas, sin embargo, es posible tomar más lecturas con el objetivo de una correcta verificación de la subrasante a distintas distancias, el cual es bastante recomendable si se requiere obtener una idea gráfica del tipo de curvatura de deflexión que se genera en cada abscisa. Para esto se realiza la primera marca adicional a una distancia de modo que la lectura de deflexión que se obtenga en dicho punto sea la mitad de la deflexión máxima, la segunda, tercera y cuarta lectura adicional se realizan a distancias de 40, 70 y 100cm. Para la recolección de lecturas se ha seguido el procedimiento expuesto en la sección 3.3.3 y aplicando el proceso descrito en la sección 3.3.5, la deflexión recuperable del pavimento D en las distintas abscisas y distancias planteadas, para los 37 puntos de la subrasante. En la tabla 14 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en campo.

Tabla 17: Predicción de la temperatura a 40mm del pavimento.

Estación (Km)	Carril	Lecturas de campo (mm)				Espesor de la carpeta asfáltica (cm)	Resultados			
		L25	L40	L70	L100		Deflexiones de campo (mm)			
							D25	D40	D70	D100
0+000	IZQUIERDO	0.030	0.050	0.070	0.100	8	0.200	0.140	0.100	0.060
0+050	DERECHO	0.050	0.080	0.100	0.150	8	1.464	1.073	0.722	0.391
0+100	IZQUIERDO	0.030	0.080	0.120	0.170	8	1.504	1.153	0.762	0.391
0+150	DERECHO	0.020	0.040	0.080	0.110	8	0.220	0.180	0.140	0.060
0+200	IZQUIERDO	0.020	0.030	0.050	0.080	8	0.160	0.120	0.100	0.060
0+250	DERECHO	0.020	0.040	0.050	0.060	8	0.120	0.080	0.040	0.020
0+300	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.040	0.060	8	0.120	0.100	0.060	0.040
0+350	DERECHO	0.100	0.150	0.250	0.300	8	1.764	1.273	0.882	0.391
0+400	IZQUIERDO	0.050	0.100	0.130	0.180	8	1.524	1.133	0.742	0.391
0+450	DERECHO	0.060	0.100	0.140	0.200	8	1.797	1.328	0.898	0.469
0+500	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.050	0.070	8	0.140	0.120	0.080	0.040
0+550	DERECHO	0.020	0.040	0.070	0.100	8	0.200	0.160	0.120	0.060
0+600	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.040	0.060	8	0.120	0.100	0.060	0.040
0+650	DERECHO	0.020	0.050	0.070	0.090	8	0.180	0.140	0.080	0.040
0+700	IZQUIERDO	0.020	0.030	0.050	0.080	8	0.160	0.120	0.100	0.060
0+750	DERECHO	0.010	0.030	0.040	0.070	8	0.140	0.120	0.080	0.060
0+800	IZQUIERDO	0.050	0.100	0.140	0.160	8	0.320	0.220	0.120	0.040
0+850	DERECHO	0.070	0.100	0.130	0.150	8	0.300	0.160	0.100	0.040

0+900	IZQUIERDO	0.040	0.070	0.120	0.150	8	0.300	0.220	0.160	0.060
0+950	DERECHO	0.010	0.050	0.070	0.100	8	0.200	0.180	0.100	0.060
1+000	IZQUIERDO	0.020	0.040	0.090	0.100	8	0.200	0.160	0.120	0.020
1+050	DERECHO	0.010	0.030	0.040	0.080	8	1.091	0.838	0.566	0.313
1+100	IZQUIERDO	0.010	0.020	0.040	0.090	8	1.344	1.033	0.722	0.391
1+150	DERECHO	0.020	0.050	0.070	0.090	8	0.180	0.140	0.080	0.040
1+200	IZQUIERDO	0.040	0.120	0.150	0.190	8	1.311	0.998	0.606	0.313
1+250	DERECHO	0.010	0.030	0.040	0.060	8	0.120	0.100	0.060	0.040
1+300	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.060	0.100	8	1.131	0.878	0.606	0.313
1+350	DERECHO	0.030	0.050	0.070	0.090	8	0.180	0.120	0.080	0.040
1+400	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.060	0.090	8	0.180	0.160	0.120	0.060
1+450	DERECHO	0.010	0.020	0.040	0.060	8	0.120	0.100	0.080	0.040
1+500	IZQUIERDO	0.020	0.060	0.080	0.110	8	0.220	0.180	0.100	0.060
1+550	DERECHO	0.020	0.040	0.050	0.070	8	0.140	0.100	0.060	0.040
1+600	IZQUIERDO	0.030	0.040	0.060	0.090	8	0.180	0.120	0.100	0.060
1+650	DERECHO	0.010	0.020	0.050	0.060	8	0.120	0.100	0.080	0.020
1+700	IZQUIERDO	0.020	0.050	0.070	0.090	8	0.180	0.140	0.080	0.040
1+750	DERECHO	0.030	0.060	0.100	0.120	8	0.240	0.180	0.120	0.040
1+800	IZQUIERDO	0.010	0.030	0.060	0.080	8	0.160	0.140	0.100	0.040

Fuente: *Elaboración Propia.*

Para este proyecto se utilizó un termómetro infrarrojo portátil para medir la temperatura superficial del pavimento, para posteriormente con ayuda de la norma (*I.N.V E-795-07, 2007*), como se muestra en la sección 3.3.6 predecir la temperatura interna. Se ha decidido calcular la temperatura del pavimento a una profundidad aproximada de 40 milímetros. Considerando que la temperatura

máxima y mínima del día anterior fueron 24 °C y 11 °C, entonces en función de las temperaturas superficiales de cada punto y la hora en la que fueron tomadas, se calculó la temperatura interna del pavimento. En la tabla 15 se puede apreciar los resultados de los cálculos para los 37 puntos ensayados.

Tabla 18: Predicción de la temperatura a 40mm del pavimento.

Estación (Km)	Carril	Temperatura °C	(1-día) °C	Hora	Minutos	Hora decimal	A	B	T a 40 mm (°C)
0+000	IZQUIERDO	19	17.5	10	42	10.70	-1.00	0.52	18.50
0+050	DERECHO	19.2	17.5	10	45	10.75	-1.00	1.00	19.04
0+100	IZQUIERDO	19.33	17.5	10	47	10.78	-1.00	0.80	18.97
0+150	DERECHO	19.1	17.5	10	52	10.87	-1.00	-0.67	17.62
0+200	IZQUIERDO	18.78	17.5	10	55	10.92	-1.00	-0.99	17.14
0+250	DERECHO	18.78	17.5	10	58	10.97	-1.00	-0.39	17.61
0+300	IZQUIERDO	18.78	17.5	11	1	11.02	-0.99	0.56	18.37
0+350	DERECHO	19	17.5	11	4	11.07	-0.65	1.00	19.11
0+400	IZQUIERDO	19.2	17.5	11	6	11.10	-0.04	0.77	19.47
0+450	DERECHO	19.2	17.5	11	8	11.13	0.59	0.21	19.42
0+500	IZQUIERDO	19	17.5	11	9	11.15	0.82	-0.12	19.16
0+550	DERECHO	19.33	17.5	11	11	11.18	1.00	-0.71	19.04
0+600	IZQUIERDO	19.45	17.5	11	14	11.23	0.49	-0.98	18.58
0+650	DERECHO	19.45	17.5	11	15	11.25	0.18	-0.85	18.48
0+700	IZQUIERDO	19.8	17.5	11	16	11.27	-0.16	-0.63	18.69
0+750	DERECHO	19.82	17.5	11	19	11.32	-0.92	0.31	19.00

0+800	IZQUIERDO	20	17.5	11	21	11.35	-0.97	0.83	19.54
0+850	DERECHO	20	17.5	11	23	11.38	-0.61	1.00	19.91
0+900	IZQUIERDO	20.82	17.5	11	25	11.42	0.01	0.74	20.72
0+950	DERECHO	20.82	17.5	11	27	11.45	0.63	0.16	20.61
1+000	IZQUIERDO	21.05	17.5	11	29	11.48	0.98	-0.49	20.43
1+050	DERECHO	21.05	17.5	11	36	11.60	-0.51	-0.30	19.64
1+100	IZQUIERDO	21	17.5	11	38	11.63	-0.93	0.36	19.91
1+150	DERECHO	21	17.5	11	40	11.67	-0.95	0.86	20.34
1+200	IZQUIERDO	21.6	17.5	11	43	11.72	-0.27	0.90	21.28
1+250	DERECHO	21.9	17.5	11	46	11.77	0.67	0.11	21.39
1+300	IZQUIERDO	22.45	17.5	11	47	11.78	0.87	-0.22	21.61
1+350	DERECHO	22.78	17.5	11	49	11.82	0.99	-0.78	21.39
1+400	IZQUIERDO	23	17.5	11	51	11.85	0.68	-1.00	21.13
1+450	DERECHO	23	17.5	11	54	11.90	-0.25	-0.55	20.97
1+500	IZQUIERDO	23.08	17.5	12	2	12.03	-0.22	0.87	22.43
1+550	DERECHO	23.2	17.5	12	6	12.10	0.90	-0.27	22.13
1+600	IZQUIERDO	23.17	17.5	12	8	12.13	0.98	-0.81	21.63
1+650	DERECHO	23.2	17.5	12	13	12.22	-0.30	-0.51	21.12
1+700	IZQUIERDO	23.015	17.5	12	17	12.28	-1.00	0.72	21.73
1+750	DERECHO	23	17.5	12	25	12.42	0.92	-0.32	21.95
1+800	IZQUIERDO	23	17.5	12	28	12.47	0.83	-0.97	21.26

Fuente: *Elaboración Propia.*

Para la corrección por temperatura de las diferentes deflexiones se utiliza la ecuación 9, ya que es la más apta para realizar la corrección de cada una de las deflexiones medidas a distintas distancias del punto de ensayo. El espesor de la carpeta asfáltica de la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal es de 3 pulgadas o 8 centímetros y en relación a las temperaturas internas del pavimento, las deflexiones corregidas D son las que se indican en la tabla 16.

Tabla 19: Deflexiones corregidas por temperatura.

Estación (Km)	Deflexiones corregidas (mm)				Temperatura °C
	D25	D40	D70	D100	
0+000	0.202	0.142	0.101	0.061	18.50
0+050	1.475	1.081	0.728	0.394	19.04
0+100	1.516	1.163	0.768	0.394	18.97
0+150	0.224	0.184	0.143	0.061	17.62
0+200	0.164	0.123	0.102	0.061	17.14
0+250	0.122	0.082	0.041	0.020	17.61
0+300	0.122	0.101	0.061	0.041	18.37
0+350	1.777	1.282	0.888	0.394	19.11
0+400	1.530	1.138	0.745	0.393	19.47
0+450	1.805	1.334	0.903	0.471	19.42
0+500	0.141	0.121	0.081	0.040	19.16
0+550	0.202	0.161	0.121	0.060	19.04
0+600	0.121	0.101	0.061	0.040	18.58
0+650	0.182	0.142	0.081	0.040	18.48

0+700	0.162	0.121	0.101	0.061	18.69
0+750	0.141	0.121	0.081	0.060	19.00
0+800	0.321	0.221	0.120	0.040	19.54
0+850	0.300	0.160	0.100	0.040	19.91
0+900	0.298	0.219	0.159	0.060	20.72
0+950	0.199	0.179	0.100	0.060	20.61
1+000	0.199	0.159	0.120	0.020	20.43
1+050	1.094	0.841	0.567	0.314	19.64
1+100	1.345	1.034	0.723	0.391	19.91
1+150	0.180	0.140	0.080	0.040	20.34
1+200	1.298	0.988	0.599	0.310	21.28
1+250	0.119	0.099	0.059	0.040	21.39
1+300	1.117	0.867	0.598	0.309	21.61
1+350	0.178	0.119	0.079	0.040	21.39
1+400	0.178	0.159	0.119	0.059	21.13
1+450	0.119	0.099	0.079	0.040	20.97
1+500	0.216	0.177	0.098	0.059	22.43
1+550	0.138	0.098	0.059	0.039	22.13
1+600	0.178	0.118	0.099	0.059	21.63
1+650	0.119	0.099	0.079	0.020	21.12
1+700	0.178	0.138	0.079	0.039	21.73
1+750	0.236	0.177	0.118	0.039	21.95
1+800	0.158	0.139	0.099	0.040	21.26

Fuente: *Elaboración Propia.*

4.2. Procesamiento de datos

Dentro del procesamiento de datos es importante para el cálculo de deformaciones superficiales a través de procesos analíticos como el modelo matemático de Hogg, el cálculo de la “Longitud característica de la curva de deflexión”, debido a que estos indican que profundidad de la subrasante aporta rigidez al pavimento, pero sobre todo nos facilita el cálculo del Módulo de elasticidad Esg. Los datos que se ha obtenido en campo serán procesadas de forma numérica, utilizando los procedimientos descritos en la sección 3.2.1. En las tablas 17, 18 y 19 se muestran los resultados obtenidos de manera numérica, en función de las ecuaciones y los valores de los coeficientes de ajuste (ver tabla 3 y 8) presentados por Wiseman et al. explicado en el capítulo 3.

Tabla 20: Longitud característica para una distancia de $r=40\text{cm}$.

Estación (Km)	DR/DO	Longitud característica-Lo
		$r = 40\text{cm}$
		$H/Lo = 10$
0+000	0.700	34.504
0+050	0.733	38.104
0+100	0.767	46.742
0+150	0.818	57.057
0+200	0.750	44.105
0+250	0.667	31.358
0+300	0.833	60.958
0+350	0.722	36.807
0+400	0.743	39.383
0+450	0.739	38.819
0+500	0.857	68.307

0+550	0.800	52.973
0+600	0.833	60.958
0+650	0.778	48.671
0+700	0.750	44.105
0+750	0.857	68.307
0+800	0.688	33.272
0+850	0.533	21.842
0+900	0.733	38.153
0+950	0.900	87.776
1+000	0.800	52.973
1+050	0.768	47.028
1+100	0.769	47.074
1+150	0.778	48.671
1+200	0.761	45.892
1+250	0.833	60.958
1+300	0.777	48.446
1+350	0.667	31.358
1+400	0.889	81.633
1+450	0.833	60.958
1+500	0.818	57.057
1+550	0.714	35.997
1+600	0.667	31.358
1+650	0.833	60.958
1+700	0.778	48.671

1+750	0.778	44.105
1+800	0.875	75.166

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tabla 21: Longitud característica para una distancia de $r=70\text{cm}$.

Estación (Km)	DR/DO	Longitud característica-Lo
		$r = 70\text{cm}$
		$H/Lo = 10$
0+000	0.500	38.376
0+050	0.493	37.743
0+100	0.507	39.001
0+150	0.636	53.602
0+200	0.625	52.084
0+250	0.333	25.928
0+300	0.500	38.376
0+350	0.500	38.376
0+400	0.487	37.169
0+450	0.500	38.376
0+500	0.571	45.629
0+550	0.600	48.939
0+600	0.500	38.376
0+650	0.444	33.609
0+700	0.625	52.084
0+750	0.571	45.629
0+800	0.375	28.599

0+850	0.333	25.928
0+900	0.533	41.604
0+950	0.500	38.376
1+000	0.600	48.939
1+050	0.518	40.120
1+100	0.537	41.995
1+150	0.444	33.609
1+200	0.462	34.954
1+250	0.500	38.376
1+300	0.535	41.808
1+350	0.444	33.609
1+400	0.667	57.968
1+450	0.667	57.968
1+500	0.455	34.325
1+550	0.429	32.387
1+600	0.556	43.903
1+650	0.667	57.968
1+700	0.444	33.609
1+750	0.444	38.376
1+800	0.625	52.084

Fuente: *Elaboración Propia.*

Tabla 22: Longitud característica para una distancia de $r=100\text{cm}$.

Estación (Km)	DR/DO	Longitud característica-Lo
		$r = 100\text{cm}$
		$H/L_o = 10$
0+000	0.300	36.089
0+050	0.267	33.398
0+100	0.260	32.828
0+150	0.273	33.854
0+200	0.375	42.693
0+250	0.167	25.430
0+300	0.333	38.924
0+350	0.222	29.791
0+400	0.257	32.555
0+450	0.261	32.921
0+500	0.286	34.910
0+550	0.300	36.089
0+600	0.333	38.924
0+650	0.222	29.835
0+700	0.375	42.693
0+750	0.429	48.052
0+800	0.125	21.960
0+850	0.133	22.676
0+900	0.200	28.084
0+950	0.300	36.089

1+000	0.100	19.706
1+050	0.287	34.987
1+100	0.291	35.338
1+150	0.222	29.835
1+200	0.239	31.125
1+250	0.333	38.924
1+300	0.277	34.161
1+350	0.222	29.835
1+400	0.333	38.924
1+450	0.333	38.924
1+500	0.273	33.854
1+550	0.286	34.910
1+600	0.333	38.924
1+650	0.167	25.430
1+700	0.222	29.835
1+750	0.222	25.430
1+800	0.250	32.032

Fuente: *Elaboración Propia.*

Se realiza el cálculo del Módulo de Elasticidad de la subrasante Esg para cada uno de los valores a distancias fijas de 25, 40, 70 y 100, partiendo de las deflexiones de campo del pavimento y la longitud característica, teniendo en cuenta que $H/L_0=10$. Se indican los valores más próximos a $DR/Do=0.5$, de este modo se obtiene los resultados del CBR y el módulo de elasticidad de la subrasante, con la ecuación 12 y 13.

Tabla 23: Módulo de elasticidad y CBR.

Estación (Km)	DR/DO	Longitud característica-Lo			Módulo de Elasticidad de la subrasante Esg (kg/cm ²)	Valor de soporte de la subrasante CBR (%)
		r = 40	r = 70	r = 100		
0+000	0.500		X		4776.621	43.42
0+050	0.493		X		664.569	6.04
0+100	0.260			X	201.533	1.83
0+150	0.273			X	1328.422	12.08
0+200	0.375			X	1493.674	13.58
0+250	0.333		X		3014.462	27.40
0+300	0.500		X		7952.810	72.30
0+350	0.500		X		544.241	4.95
0+400	0.487		X		648.901	5.90
0+450	0.500		X		535.654	4.87
0+500	0.286			X	2003.779	18.22
0+550	0.300			X	1314.128	11.95
0+600	0.500		X		7965.931	72.42
0+650	0.444		X		5920.886	53.83
0+700	0.375			X	1512.563	13.75
0+750	0.429			X	5648.707	51.35
0+800	0.375		X		1063.702	9.67
0+850	0.333		X		1228.350	11.17

0+900	0.200			X	1161.927	10.56
0+950	0.500		X		4858.191	44.17
1+000	0.100			X	2254.331	20.49
1+050	0.3			X	264.880	2.41
1+100	0.291			X	213.733	1.94
1+150	0.444		X		6010.172	54.64
1+200	0.462		X		805.047	7.32
1+250	0.500		X		8147.206	74.07
1+300	0.277			X	264.788	2.41
1+350	0.444		X		6060.847	55.10
1+400	0.333			X	1484.850	13.50
1+450	0.333			X	2224.338	20.22
1+500	0.455		X		4914.335	44.68
1+550	0.429		X		8075.770	73.42
1+600	0.333			X	1490.715	13.55
1+650	0.167			X	3146.958	28.61
1+700	0.444		X		6076.713	55.24
1+750	0.444		X		4091.689	37.20
1+800	0.250			X	1968.624	17.90

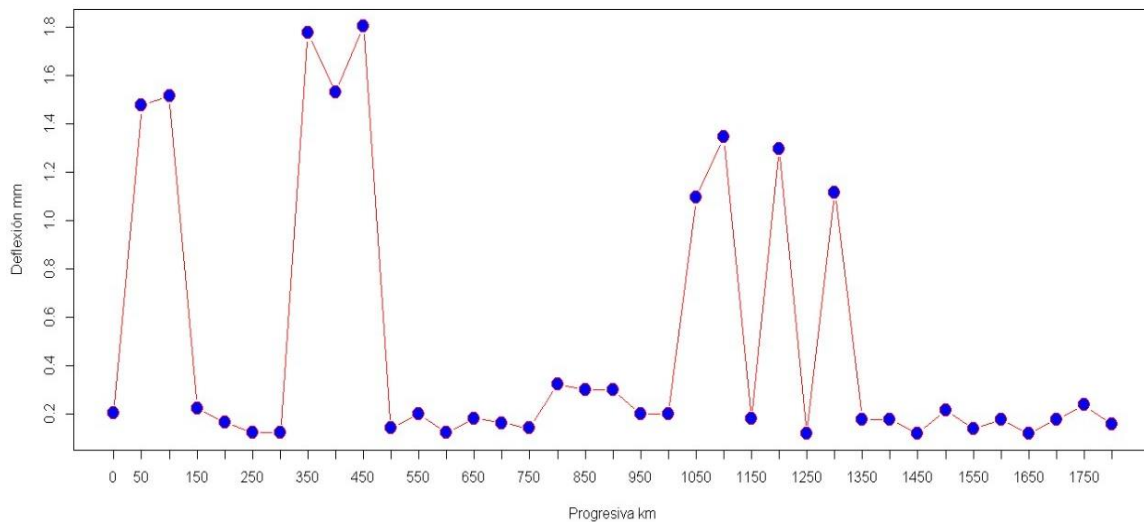
Fuente: *Elaboración Propia.*

De los resultados obtenidos se puede apreciar que los valores de CBR obtenidos son en algunos casos muy bajos, esto ocurre puesto a que en el proceso de forma numérica se predice la distancia a la que cumple la relación $DR/Do=0.5$. En el modelo matemático de Hogg, este demostró que la distancia radial en el que la deflexión se considera la mitad de la deflexión máxima era necesario para minimizar el error estadístico de los parámetros.

4.2.1 Deflectograma

El Deflectograma se puede observar en la gráfica 20, desarrollado en base a las deflexiones máximas de campo. En ella se puede ver que existe una continuidad entre las deflexiones del pavimento. Sin embargo, se aprecia que existen en algunos puntos ensayados deflexiones grandes creando en la figura puntas pronunciadas en las abscisas 0+050 a 1+100, 0+350 a 0+450, 1+100, 1+200 y 1+300, esto puede ser debido al efecto de la edad del pavimento o también a que se supera el límite de peso en los vehículos que circulan por la vía para el cual fue diseñada. Otra explicación por el que se produce esta variabilidad en las deflexiones es el asentamiento, ocasionado por el desgaste de la estructura granular, puesto a que al ser un pavimento antiguo ya fue sometido a diferentes cargas por mayor tiempo.

Gráfico 19: Deflectograma del pavimento evaluado en la Universidad Católica de Cuenca.



Fuente: *Elaboración Propia.*

En base a este Deflectograma es posible detectar el comportamiento del pavimento en referencia a las deflexiones máximas. Esto probablemente nos indique que existirá una discontinuidad en los resultados de CBR, por lo que será necesario tramificar los resultados para realizar un mejor análisis de la subrasante.

Luego de un análisis del deflectograma se puede apreciar que en ciertos sectores existen grandes deflexiones provocados por el tránsito vehicular, del mismo modo se puede observar que la mayoría de las deflexiones permanecen dentro de un rango considerable, de forma continua a lo largo de la vía. Debido a que este trabajo de investigación trata de determinar la factibilidad de la viga Benkelman se realiza un análisis individual en cada deflexión pico, a través de una comparación de deflexión obtenida y el tipo de falla que provoca dicha deformación en el pavimento.

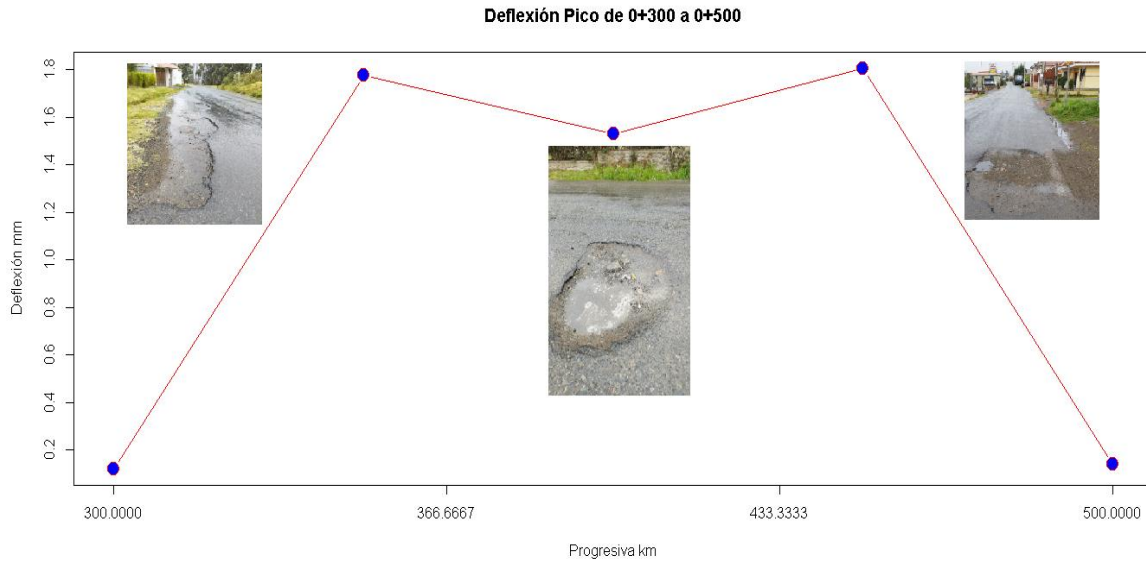
Gráfico 20: Deflexión pico de las abscisas 0+000 a 0+150.



Fuente: *Elaboración Propia*

En las abscisas 0+300 a 0+500 las deformaciones se aproximan a los 1.8 mm, los cuales son provocadas por el desgaste de la capa de rodadura según, se puede apreciar en las fotografías de campo, una alternativa de mantenimiento que se podría plantear sería la aplicación del micropavimento o una rehabilitación de a través de una sobrecarpeta asfáltica.

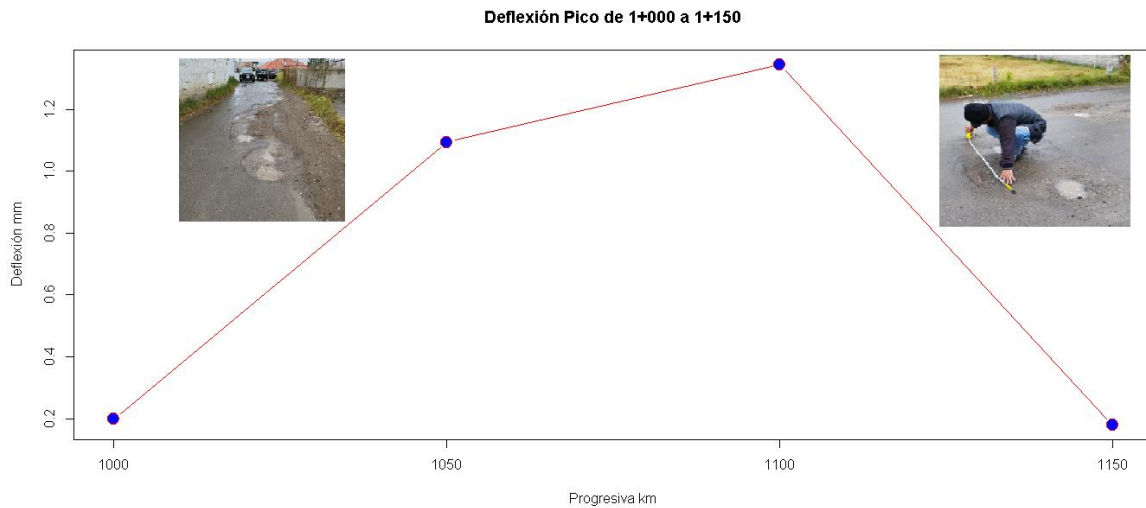
Gráfico 21: Deflexión pico de las abscisas de 0+300 a 0+500.



Fuente: *Elaboración Propia*

En las abscisas 1+100 a 1+150 las deformaciones disminuyen en un cierto porcentaje, rondando los 1.4 milímetros, se determina que las fallas que existen en el sector son desgastes de la capa de rodadura y a pesar que estas no son profundas provocan que las deformaciones se considerablemente distintos en los sectores que no se producen ningún tipo de falla, de la misma forma se propondría una sobrecarpeta asfáltica.

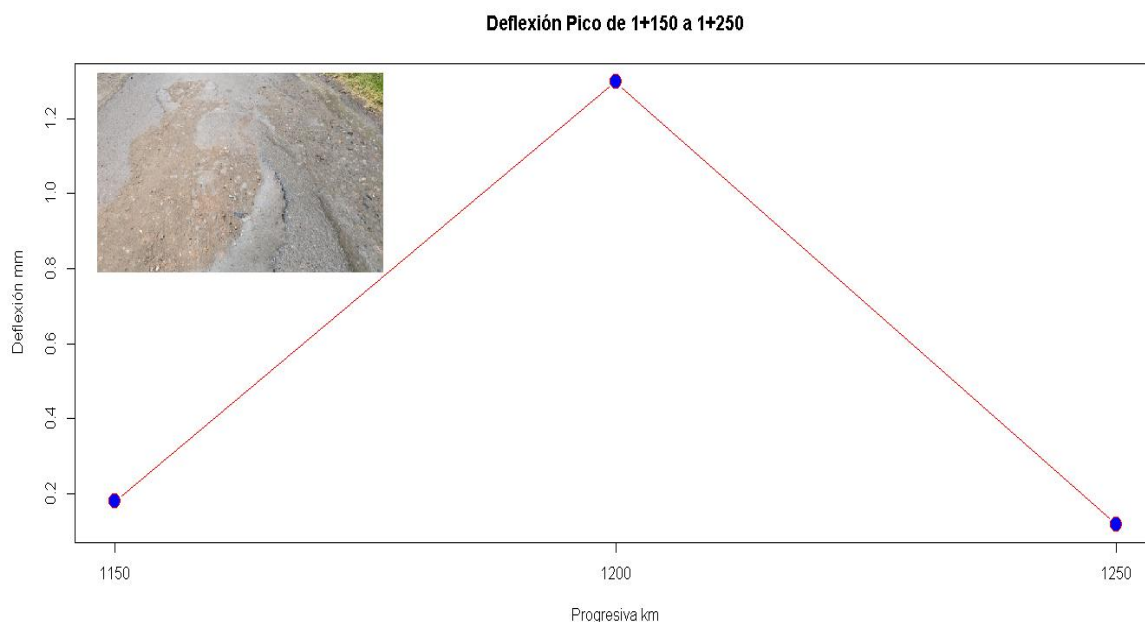
Gráfico 22: Deflexión pico de las abscisas 1+000 a 1+150.



Fuente: *Elaboración Propia*

En la abscisa 1+150 a 1+250, el desgaste de la capa granular es bastante notorio. Además de esta falla existe los baches que tienen una dimensión de aproximadamente 4 metros de largo y 1 metro de ancho, originando la las deflexiones pico en los puntos y provocando que se requiera realizar una reconstrucción del pavimento según la MTC, las deflexiones alcanzan los 1.3 milímetros aproximadamente.

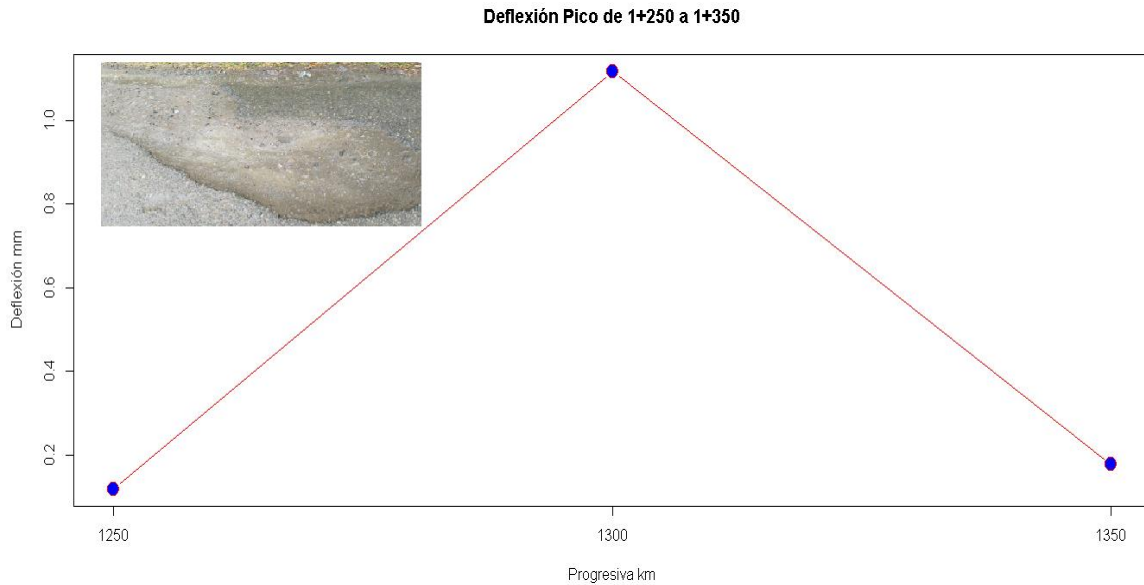
Gráfico 23: Deflexión pico de las abscisas 1+150 a 1+250.



Fuente: *Elaboración Propia*

En la abscisa 1+250 a 1+350 las deflexiones pico son provocadas por los baches que existen en el pavimento, los cuales tienen dimensiones de 2.30 metros de largo y 0.90 metros de ancho según los datos tomados en campo, la deflexión se encuentra alrededor de los 1.2 milímetros, se presume que además del tránsito vehicular, existen filtraciones de agua que provocan que se desgaste poco a poco el material formando este tipo de fallas, en vista que esto afecta la condición estructural se propone el sobrecarpeta asfáltica.

Gráfico 24: Deflexión pico de las abscisas 1+250 a 1+350.



Fuente: *Elaboración Propia*

4.3. Análisis e interpretación de resultados

Otra de las formas de clasificar la condición estructural en el que se encuentra la subrasante es a partir del CBR, el mismo que se puede calcular a través de una relación con el Módulo de elasticidad, la cual se muestra en la ecuación 13. En la tabla 21 se indica la calificación del CBR del pavimento flexible según la tabla 11, en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.

Tabla 24: Calificación del CBR del pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.

Estación (Km)	Módulo de Elasticidad de la subrasante Esg (kg/cm²)	Valor de soporte de la subrasante CBR (%)	Calificación de la Subrasante
0+000	4776.621	43.42	Subrasante Excelente
0+050	664.569	6.04	Subrasante Regular
0+100	201.533	1.83	Subrasante Inadecuada
0+150	1328.422	12.08	Subrasante Buena
0+200	1493.674	13.58	Subrasante Buena
0+250	3014.462	27.40	Subrasante Muy Buena
0+300	7952.810	72.30	Subrasante Excelente
0+350	544.241	4.95	Subrasante Pobre
0+400	648.901	5.90	Subrasante Pobre
0+450	535.654	4.87	Subrasante Pobre
0+500	2003.779	18.22	Subrasante Buena
0+550	1314.128	11.95	Subrasante Buena
0+600	7965.931	72.42	Subrasante Excelente
0+650	5920.886	53.83	Subrasante Excelente
0+700	1512.563	13.75	Subrasante Buena
0+750	5648.707	51.35	Subrasante Excelente
0+800	1063.702	9.67	Subrasante Regular
0+850	1228.350	11.17	Subrasante Buena

0+900	1161.927	10.56	Subrasante Buena
0+950	4858.191	44.17	Subrasante Excelente
1+000	2254.331	20.49	Subrasante Muy Buena
1+050	264.880	2.41	Subrasante Inadecuada
1+100	213.733	1.94	Subrasante Inadecuada
1+150	6010.172	54.64	Subrasante Excelente
1+200	805.047	7.32	Subrasante Regular
1+250	8147.206	74.07	Subrasante Excelente
1+300	264.788	2.41	Subrasante Inadecuada
1+350	6060.847	55.10	Subrasante Excelente
1+400	1484.850	13.50	Subrasante Buena
1+450	2224.338	20.22	Subrasante Muy Buena
1+500	4914.335	44.68	Subrasante Excelente
1+550	8075.770	73.42	Subrasante Excelente
1+600	1490.715	13.55	Subrasante Buena
1+650	3146.958	28.61	Subrasante Muy Buena
1+700	6076.713	55.24	Subrasante Excelente
1+750	4091.689	37.20	Subrasante Excelente
1+800	1968.624	17.90	Subrasante Buena

Fuente: *Elaboración Propia.*

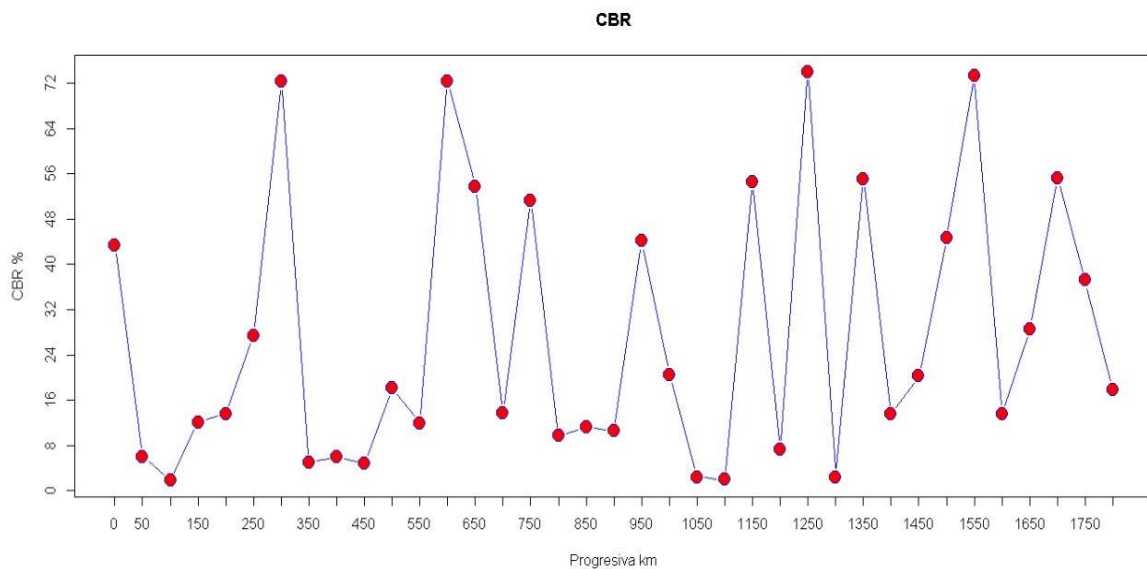
Según la clasificación realizada en base a los valores del CBR, nos muestra que las secciones se encuentran compuestas por una subrasante que varía entre Inadecuada, pobre y regular. En la figura 19 se puede apreciar que existe una discontinuidad entre los valores de CBR, esto se debe a ciertos

resultados discontinuos que se obtuvo en el caso de las deflexiones máximas en el pavimento. Como anteriormente se mencionó, esto puede ocurrir por la antigüedad y desgaste del pavimento.

Se presume que en ciertos puntos ensayados el pavimento pudo haberse asentado por el alto flujo vehicular, se suma a esto el elevado peso de los vehículos que circulan por el sector y al contar con una capa asfáltica demasiado antigua, se vuelve rígida con el tiempo perdiendo flexibilidad. Es necesario mencionar que el valor del CBR dependerán de la máxima deflexión y de la distribución que sigue la curva de deflexión.

En ciertos puntos existen picos de CBR (43.42%, 72.3%, 72.42%, 53.83%, 51.35%, 44.17%, 54.64%, 74.07%, 55.10%, 44.68%, 73.42%, 55.24%), esto es producto de que en ciertos tramos el desgaste es menor, su detección nos debería servir para conocer los puntos en los que se puede realizar una reparación más leve o profunda.

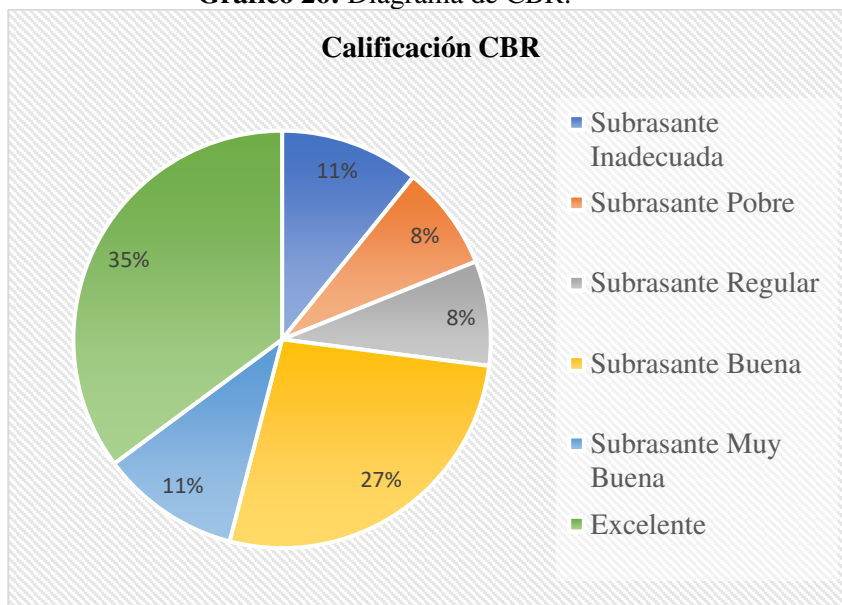
Gráfico 25: Diagrama de CBR.



Fuente: *Elaboración Propia.*

A continuación, se muestra la distribución de la calificación y los valores estadísticos.

Gráfico 26: Diagrama de CBR.



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 25: Valores estadísticos.

Parámetros estadísticos	
Promedio	27.35
Mediana	17.90
Moda	2.41
Desviación Estándar	23.62
Percentil 80	54.15

Fuente: *Elaboración Propia.*

Según los resultados estadísticos se puede comprobar que a pesar de tener el 35% de tramos con una subrasante excelente, existen ciertos intervalos en los que el pavimento presenta varias fallas por lo que tendrá una calificación de subrasante inadecuada.

La mayoría de los pavimentos que son analizados superficialmente se vuelven a deteriorarse constantemente, creando la necesidad de plantear alternativas de mantenimiento rutinarios o

periódicos, por lo cual dependiendo el tipo de falla se toma las alternativas correspondientes de mejora del pavimento basando en la información propuesta por la NEVI y la MTC. En el caso de las fallas superficiales, el defecto se puede identificar de manera fácil en la superficie de la capa asfáltica, por lo que las propuestas de reparación se encuentran destinadas a la parte superficial del pavimento, a través de la colocación de capas asfálticas de bajo espesor, los cuales no contribuyen a la parte estructural.

En el caso de las fallas estructurales se originan principalmente por el defecto que existe en una o más capas que componen la estructura del pavimento, causando que la resistencia disminuya y exista una mala distribución de esfuerzos, ocasionando que se produzca la destrucción de la superficie y la estructura del pavimento. Siendo este el caso, las correcciones se realizan a través de un refuerzo estructural mediante capas asfálticas, garantizando de este modo la funcionalidad y el aumento de la vida útil del pavimento. Como resultado final de este trabajo de investigación se muestra las alternativas de mantenimiento propuesta a partir de los tipos de fallas.

Luego de este análisis se puede apreciar que en ciertos tramos de la vía la subrasante es excelente los cuales corresponden a un 35%, sin embargo, se observa que en la superficie de la vía surgen problemas estructurales, producto de las diferentes fallas distribuidas casi de forma constante en los 2 km analizados, como se observa en el Gráfico 26. Esto nos lleva a concluir de forma general, que el tramo analizado no requiere una reconstrucción al presentar tramos en buen estado, pero si requiere un mantenimiento correctivo, por lo que se propone como alternativa un plan de bacheo aplicado a los tramos identificados en esta investigación, así como una sobrecarpeta asfáltica en toda la longitud de la vía.

Tabla 26: Alternativas de mantenimiento del pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal.

Tramo (Km)	Calificación MTC	Condición del Pavimento	Tipo de Falla	Alternativa de Mantenimiento/Rehabilitación
0+000 a 0+900	Subrasante Inadecuada	Con Problemas Estructurales	Desgaste de la capa de rodadura	Mantenimiento Correctivo: Plan de Bacheo Sobrecarpeta Asfáltica
0+950 a 1+800	Subrasante Inadecuada	Con Problemas Estructurales	Desgaste de la capa de rodadura	Mantenimiento Correctivo: Plan de Bacheo Sobrecarpeta Asfáltica

Fuente: *Elaboración Propia.*

El ciclo de vida de un pavimento empieza con un camino nuevo o rehabilitado, en estos casos el estado del pavimento sería excelente. El mantenimiento preventivo contribuirá a disminuir el desgaste natural, conservando el estado de la vía en un nivel bueno y muy bueno. En el caso que la subrasante del pavimento sea regular se realiza un mantenimiento de tipo periódico; es decir, restablecer la superficie del pavimento flexible, manteniendo el estado óptimo de la vía.

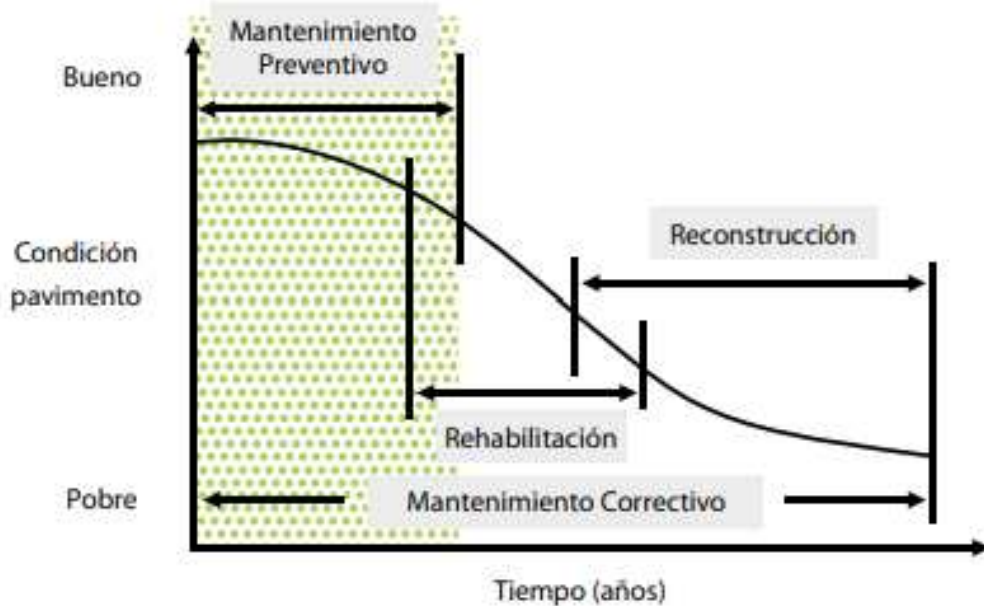
El propósito principal de un pavimento es prestar un servicio de tránsito de forma segura y eficiente, por esto, es muy importante realizar trabajos adecuados de conservación. La noción de la conservación de pavimentos es precautelar que su servicio se prolongue durante el tiempo requerido, lo cual involucra un esfuerzo de preocupación de los encargados y un gasto económico considerable por parte de la entidad responsable.

Como se mencionó anteriormente los pavimentos son inversiones muy importantes que con el paso del tiempo exigen rehabilitaciones y mantenimientos en el transcurso de su vida para poder conservar los estándares de calidad iniciales y en ciertas ocasiones, prolongar su vida útil. Por lo tanto, en la actualidad se ha aumentado la necesidad de mantener las vías en buenas condiciones para su óptimo funcionamiento.

Con este fin se utilizan los sistemas de gestión, como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, seccionando las acciones adecuadas y determinando su costo, dentro de las disponibilidades económicas de la entidad administradora (De Solminihac T. et al., 2018).

La gestión de pavimento se define como las acciones de conservación que, al ser aplicadas durante un periodo de tiempo, mantienen al pavimento en un adecuado nivel de servicio, tanto en la parte estructural y funcional. En gráfico 27 se puede apreciar la representación de la forma general del desgaste de los pavimentos, indicándonos que en los primeros años el desgaste es lento; a pesar de ello, se encuentra un umbral en el que se puede notar que el deterioro es acelerado, apareciendo rápidamente el final de la vida útil del camino. El esquema además indica que, parte de la conservación adecuada de un pavimento, requiere de mantenimiento preventivo y correctivo.

Gráfico 27: Esquema del ciclo de vida de un pavimento.



Fuente: (IDOT, s. f.)

De acuerdo a los resultados obtenidos y en vista que la vía cuenta con una subrasante inadecuada, se considera que la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la Calle Julia Bernal, se encuentra dentro de la etapa de Mantenimiento Correctivo, por lo cual se planteó como alternativa de mantenimiento bacheo y sobrecarpeta asfáltica, esta rehabilitación de caminos demanda una gran cantidad de inversión económica, esto sin considerar la inconformidad que ocasiona entre los usuarios. Esta etapa pudo haberse evitado con un adecuado mantenimiento preventivo, logrando obtener que el nivel de servicio aumente, prolongando la vida útil inicial. Es necesario mencionar que a través de este mantenimiento se evitara gastar en la etapa de reconstrucción del camino, el cual demanda mucha más inversión económica que un mantenimiento correctivo.

Del grafico anterior, se puede observar que al aplicar una rehabilitación aumenta el tiempo de vida útil del pavimento, existe un incremento en su serviciabilidad y en su capacidad estructural. En caso de no rehabilitarlo el pavimento solo cumplirá con su vida útil, la cual es inferior en comparación con la vida útil del pavimento rehabilitado.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se pudo concluir que para la evaluación de la superficie del pavimento flexible mediante el análisis de la Viga Benkelman aplicando la metodología del Retrocálculo, la viabilidad de su aplicación es eficaz en función del tiempo y los resultados de cálculo de longitud característica (L_0), deflexión (D), módulo resiliente (E_{sg}) y CBR.
- Se realizó un análisis comparativo entre las deflexiones máximas obtenidas aplicando el método del retrocálculo y las fallas existentes en el pavimento a través de las observaciones en campo, con lo que se determinó que el análisis con viga Benkelman es factible, puesto que, los datos coinciden con el estado en el que se encuentra la superficie del pavimento.
- Se aplicó satisfactoriamente la viga Benkelman en una vía de segundo orden que conecta dos sectores de la ciudad, el estado en el que se encuentra la estructura del pavimento requiere mantenimiento, ya que, existen desgastes de la capa de rodadura en varios tramos de la vía. Con ello se podría tener una idea del estado en el que se encuentran las vías aledañas a nuestro tramo.
- Se empleó el método del Retrocálculo para analizar y procesar los datos obtenidos mediante los ensayos de deflexión en donde se determinó el estado estructural de la Panamericana norte y Julia Bernal, además se analizó los valores del CBR de la subrasante.
- Una vez realizada la evaluación estructural según los resultados estadísticos se comprobó que en ciertos tramos de la vía la subrasante se conserva en buen estado, lo que nos indica que no se requiere de reconstrucción, sin embargo, un gran porcentaje del pavimento presentan daños estructurales, esto nos lleva a concluir de manera general que se requiere de un mantenimiento correctivo.

- En el análisis visual se pudo apreciar que existen varias fallas, sin embargo, los más comunes fueron los de tipo de desprendimiento de agregados, los cuales tenían una severidad baja, media y alta. Y por otro lado se observaron hundimientos en algunos tramos de la calzada (baches).
- En las abscisas 0+020, 1+100, 0+350 a 0+450, 1+100, 1+200 y 1+300 de la calzada se midió deflexiones grandes, con un valor de deflexión de 1.30 mm. Esto puede ser ocasionado por un sobrepeso vehicular que provocan un asentamiento y desgaste de la estructura granular, o por un fracaso del pavimento que ya cumplió sus años de funcionamiento.

RECOMENDACIONES

- Al obtener los resultados de la viga Benkelman y la evaluación estructural del pavimento flexible se recomienda dar mantenimiento y un refuerzo estructural en los puntos más críticos a través de bacheo y un sobrecapeo asfáltico según recomienda el MTC, para esto se necesita realizar un diseño en base a la normativa AASHTO 93.
- Dar un monitoreo continuó de la condición del pavimento flexible, por medio de la evaluación superficial (PCI). Para establecer el ritmo de deterioro del pavimento, y plantear alternativas de mantenimiento preventivo o correctivo de ser el caso, y de este modo ampliar la vida útil del pavimento.
- Se recomienda a las instituciones con competencia vial, aplicar cada 5 años métodos relacionados a la rehabilitación y conservación de la estructura de un pavimento, de esta manera se puede asegurar no incurrir en reconstrucciones viales, antes de que se cumpla su vida útil.
- Si se desea plantear un plan de rehabilitación de la subrasante del pavimento en base a los datos estudiados en el presente trabajo de titulación, se recomienda realizar una verificación de los datos obtenidos, puesto que, en el pavimento puede ocurrir ciertas variaciones con el transcurso

del tiempo, esto ocasionara que el presupuesto actual sea superado al que se planteó inicialmente en esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures* (Vol. 1). Aashto.

Apaza Chambilla, O. R. (2019). *Incidencia de las Patologías en la Superficie y Estructura del Pavimento Flexible, en la Av. Jorge Basadre Grohmann Tramo Calle 22– Av. Pinto–Tacna, 2018.*

Balarezo Zapata, J. I. (2017). *Evaluación estructural usando viga Benkelman aplicada a un pavimento.*

Bejarano, L. (2013). Análisis estructural de un pavimento flexible con presencia de deterioro, por medio de deflexiones obtenidas con equipo de carga dinámica y estática. *Dirección de Investigación Sede Bogotá, DC.*

Carrasco Cantos, S. F., & Vizhñay Reyes, C. J. (2019). *Evaluación estructural vial para Azogues mediante el análisis de deflexiones aplicando la viga Benkelman.*
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33520>

De Solminihac T., H., N., T. E., & G., A. C. (2018). *Gestión De Infraestructura Vial* (3.^a ed.). Ediciones UC. <https://doi.org/10.2307/j.ctvkjb4dw>

Higuera-Sandoval, C. H. (2010). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. *Facultad de Ingeniería, 19(28), 73-92.*

Hoffman, M., & Del Aguila, P. (1985). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos). *Perú: Lima.*

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (Vol. 2). Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

IDOT. (s. f.). *IDOT receives AASHTO award*. Recuperado 27 de octubre de 2022, de <https://ict.illinois.edu/news/newsletters/more-newsletters/august-2012/idot-receives-aashto-award>

I.N.V E-795-07. (2007). *MEDIDA DE LA DEFLEXIÓN DE UN PAVIMENTO EMPLEANDO DISPOSITIVO DE CARGA ESTÁTICA NO CONTINUA, VIGA BENKELMAN*.
https://www.academia.edu/43366170/MEDIDA_DE_LA_DEFLEXI%C3%93N_DE_UN_PAVIMENTO_EMPLEANDO_DISPOSITIVO_DE_CARGA_EST%C3%81TICA_NO_CONTINUA_VIGA_BENKELMAN

INVIAS. (2016). *Manual de Mantenimiento de Carreteras 2016 VI*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7713-manual-de-mantenimiento-de-carreteras-2016-v1>

Jiménez Lagos, M. E. (2014). *Diagnostico estructural de afirmado estabilizado con cloruro de magnesio mediante el modelo matematico de Hogg y Viga Benkelman*.

JOSE HEREDIA & ASOCIADOS C.A. (2016). *CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS DE PAVIMENTO FLEXIBLES Y RIGIDOS*.
https://www.academia.edu/9769872/CLASIFICACION_DE_LAS_FALLAS_DE_PAVIMENTO_FLEXIBLES_Y_RIGIDOS

Lemus Nájera, J. H. (2010). *Evaluación de tipos de fallas de la capa de rodadura en pavimentos flexibles* [Masters, Universidad de San Carlos de Guatemala].
<https://portal.ingenieria.usac.edu.gt/>

Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos*.

MTC. (2014). *CONREVIAL Estudio-De-Rehabilitacion-De-Carreteras-En-El-Pais*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/337328306/CONREVIAL-Estudio-de-rehabilitacion-de-carreteras-en-el-pais-pdf>

MTC. (2016). MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES. *CivilGeeks.com*. <https://civilgeeks.com/2016/07/08/aprueban-la-actualizacion-manual-ensayo-materiales/>

NEVI-12. (2013). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES*. 3.

Reyes, F., & Rondón, H. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones.

Timaná, J. (2012). Evaluación de la Subrasante. *Diseño de Pavimentos*. Curso de Pregrado de la Universidad de Piura.

Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1970). *Teoría de placas y láminas*. Urmo.

TNZ. (1997). *STANDARD TEST PROCEDURE FOR BENKELMAN BEAM DEFLECTION MEASUREMENTS 1. SCOPE*. https://www.academia.edu/40174232/STANDARD_TEST_PROCEDURE_FOR_BENKELMAN_BEAM_DEFLECTION_MEASUREMENTS_1_SCOPE

Wiseman, G., Hoffman, M., Ishai, I., Livneh, M., & Uzan, J. (1977). *Simple elastic models for pavement evaluation using measured surface deflection bowls*. TRI.

ANEXOS

ANEXO 1: Armado de la viga Benkelman

Ilustración 1: Viga Benkelman.



Ilustración 2: Identificación de partes de la viga Benkelman.



Ilustración 3: Unión del cuerpo fijo con el brazo móvil.



Ilustración 4: Verificar que el vibrador tope los brazos móviles.



Ilustración 5: Calibrar los extensómetros.



Ilustración 6: Armado de la viga Benkelman.



ANEXO 2: Desarrollo de medición de deflexiones

Ilustración 7: Calibración de la Viga Benkelman.



Ilustración 8: Ubicación de la plomada en la parte trasera del camión.



Ilustración 9: Ubicación de la viga debajo del eje vertical de las llantas.



Ilustración 10: Colocación de marcas a diferentes distancias.



Ilustración 11: Ubicación de la plomada en el punto de inicio.



Ilustración 12: Toma de lecturas en la abscisa 0+000.



Ilustración 13: Calibración de los extensómetros en cada abscisa.



Ilustración 14: Verificación de la plomada en cada abscisa.



Ilustración 15: Toma de lecturas en la abscisa 1+800



Ilustración 16: Finalización de levantamiento de lecturas de campo.



ANEXO 3: Vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal

Ilustración 17: Vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal.



ANEXO 4: Tipos de falla en el pavimento flexible en la vía de conexión entre la Panamericana Norte y la calle Julia Bernal

Ilustración 18: Abscisa 0+050 (Bacheos)



Ilustración 19: Abscisa 0+100 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 20: Abscisa 0+350 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 21: Abscisa 0+400 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 22: Abscisa 0+450 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 23: Abscisa 0+700 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 24: Abscisa 1+050 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 25: Abscisa 1+100 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 26: Abscisa 1+200 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 27: Abscisa 1+300 (Bacheos y desgaste de la capa granular)



Ilustración 28: Abscisa 1+500



Ilustración 29: Abscisa 1+600



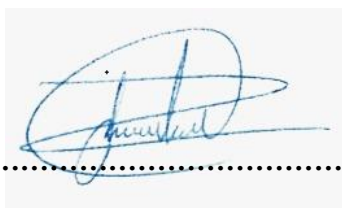
Ilustración 30: Abscisa 1+750



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Michael Antonio Espinoza Espinoza** y **Ramiro Rómulo Jintiach Sharup** portadores de las cédulas de ciudadanía N° 010753465-3 y 140084711-5. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Evaluación de la superficie del pavimento flexible en la vía de conexión entre la panamericana norte y calle Julia Bernal, mediante el análisis de la viga Benkelman aplicando el método del Retrocálculo**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

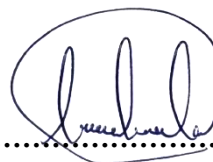
Cuenca, **09 de diciembre de 2022**



F:

Michael Antonio Espinoza Espinoza

C.I.: 010753465-3



F:

Ramiro Rómulo Jintiach Sharup

C.I.: 140084711-5