



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERIA

---

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO  
FLEXIBLE EN LA VIA DE EVITAMIENTO SUR –  
CAJAMARCA UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES  
MEDIDAS CON LA VIGA BENKELMAN

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero Civil**

**Autor:**

Rosa Beatriz Cubas De la Torre

**Asesor:**

Ing. Alejandro Cubas Becerra

Cajamarca – Perú

2017

## APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por la Bachiller **Rosa Beatriz Cubas De La Torre**, denominada:

**“COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA  
VIA DE EVITAMIENTO SUR – CAJAMARCA UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES  
MEDIDAS CON LA VIGA BENKELMAN”**

---

Ing. Alejandro Cubas Becerra  
**ASESOR**

---

Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga  
**JURADO**  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Anita Alva Sarmiento  
**JURADO**

---

Ing. Roger Cerquin Quispe  
**JURADO**

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.*

*A mi padre, por ser el pilar más importante y demostrarme siempre su cariño, y brindarme su apoyo incondicional en transcurso de mi carrera universitaria, por compartir momentos de alegría y tristeza y demostrarme que siempre podré contar con él. De igual manera dedico esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos difíciles, demostrándome su amor en todo momento, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos*

*A mi hermano, por ser un gran amigo para mí. que con sus consejos me ha ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.*

*Finalmente, a mis incondicionales amigos, por la amistad sincera que nació entre risas, bromas, y enojos, por la gran calidad humana que me han demostrado con su amistad*

## AGRADECIMIENTO

*Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Ing. Alejandro Cubas Becerra, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa en el desarrollo de mi tesis, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.*

*A mi director de Carrera, Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia y su motivación me ha ayudado a realizar esta tesis*

*Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b><u>APROBACIÓN DE LA TESIS</u></b> .....	<b>ii</b>
<b><u>DEDICATORIA</u></b> .....	<b>iii</b>
<b><u>AGRADECIMIENTO</u></b> .....	<b>iv</b>
<b><u>ÍNDICE DE CONTENIDOS</u></b> .....	<b>v</b>
<b><u>ÍNDICE DE TABLAS</u></b> .....	<b>viii</b>
<b><u>ÍNDICE DE FIGURAS</u></b> .....	<b>ix</b>
<b><u>ÍNDICE DE FORMULAS</u></b> .....	<b>xi</b>
<b><u>ÍNDICE DE GRAFICOS</u></b> .....	<b>xii</b>
<b><u>RESUMEN</u></b> .....	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>20</b>
A. Carpeta Asfáltica .....	23
B. Base.....	23
C. Sub base.....	24
D. Subrasante .....	24
2.2.4. Métodos de evaluación estructural.....	25
2.2.4.1. Métodos directos de auscultación .....	26
2.2.4.2. Métodos indirectos de auscultación estructural .....	26
A. Medición de deflexiones estática o de movimiento lento.....	27
Uso de la viga Benkelman .....	30
B. MEDICION DE DEFLEXION POR IMPACTO .....	32
2.2.5. Metodologías Racionales Y Empíricas Basadas En Ensayos No Destructivos.....	33

2.2.8. METODOLOGÍA.....	40
2.2.9. CALCULO DE DEFLEXIONES .....	43
2.2.10. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA CONREVIAL .....	44
2.1.1. Técnicas de recolección de datos y análisis de datos.....	50
<b>CAPÍTULO 3. HIPOTESIS.....</b>	<b>51</b>
3.1. Formulación de la Hipótesis .....	51
3.2. Operacionalización de variables .....	51
<b>CAPÍTULO 4. MATERIAL Y METODOS .....</b>	<b>53</b>
4.1. Tipo de diseño de investigación.....	53
4.2. Material .....	53
4.2.2. Población .....	53
4.2.3. Muestra (muestreo o selección).....	53
4.3. Métodos .....	53
4.3.1. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos .....	53
4.3.2. Instrumentos.....	54
4.3.3. Procedimiento para la recolección de datos. ....	57
<b>CAPÍTULO 5. DESARROLLO .....</b>	<b>65</b>
5.1. Ubicación del tramo de estudio.....	65
5.1.1. Ubicación Política .....	65
5.1.2. Ubicación Geográfica.....	65
5.2. Clasificación de la vía.....	66
5.3. Características de la vía a evaluar. ....	66
5.3.1. Características Geométricas .....	66
5.3.2. Tipo de suelo de fundación: Predominantemente son CL.....	68
5.3.3. Trafico de diseño: $3.35 * 10^6$ EALS .....	68
5.3.4. Período de diseño: 10 años.....	68
5.3.5. Estructura del pavimento. ....	68

5.3.6. Año de Construcción y puesta en servicio: 2002 .....	68
5.4. Determinación del IMD actual .....	68
5.4.1. CALCULO DEL NUMERO DE EALS PROYECTADOS AL 2017 .....	72
5.5. Medición de las deflexiones .....	72
5.5.1. Se midieron las deflexiones, cuyos resultados se muestran en las tablas N° 10,11.....	72
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
6.1.1. CALCULO DE LOS PARÁMETROS .....	76
6.1.2. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS: .....	77
<b>CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN .....</b>	<b>82</b>
7.1. Análisis de Resultados .....	82
7.1.1. Análisis del Tránsito .....	82
7.1.2. Análisis de las deflexiones .....	83
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Categorías de Subrasante .....	24
Tabla 2: Factores De Corrección Por Estacionalidad .....	44
Tabla 3: Características del pavimento de acuerdo al tipo de deflexión y Radio de curvatura.....	49
Tabla 4: Factores de distribución carril .....	57
Tabla 5:Tabla de distancias para ensayos.....	58
Tabla 6: Ubicación geográfica.....	65
Tabla 7: Descripción geométrica de la vía .....	66
Tabla 8: Resumen de Resultados .....	73
Tabla 9 : Evaluación de los Parámetros.....	77
Tabla 10: Resumen de resultados de deflexiones máximas.....	80
Tabla 11:Resumen de resultados de radios de curvatura .....	81
Tabla 12: Comparación de parámetros.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°. 1: Vía de Evitamiento Sur - Cajamarca .....	17
Figura N°. 2: Esquema típico del paquete estructural de un pavimento .....	21
Figura N°. 3: Sección típica de un pavimento flexible.....	23
Figura N°. 4: Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones .....	27
Figura N°. 5: Equipo Viga Benkelman posicionado para efectuar las mediciones de deformaciones .....	28
Figura N°. 6: Viga Benkelman (Laboratorio U.T.P.L).....	28
Figura N°. 7: Viga Benkelman En Uso .....	30
Figura N°. 8: Deflectómetro de impacto .....	32
Figura N°. 9: Tipos De Deflexiones. ....	34
Figura N°. 10:Deflexión en pavimentos.....	35
Figura N°. 11: Esquema de la Viga Benkelman .....	39
Figura N°. 12:Principio de operación de la Viga Benkelman .....	39
Figura N°. 13: Configuración Geométrica del sistema de carga de ensayos con Viga Benkelman.....	40
Figura N°. 14:Proceso de medición con Viga Benkelman. ....	42
Figura N°. 15: Deformada Del Pavimento Y Radio De Curvatura.....	45
Figura N°. 16:Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de $d > d_c$ . ....	47
Figura N°. 17: Características del pavimento de acuerdo al cuenco de deflexiones.....	50
Figura N°. 18; Viga Benkelman.....	54
Figura N°. 19: Camión volquete (C2) .....	54
Figura N°. 20: Odómetro.....	55
Figura N°. 21: Medidor de Presión.....	55
Figura N°. 22: Balanza de 100 Ton. ....	56
Figura N°. 23: Termómetro: para medición de temperaturas.....	56
Figura N°. 24:Ubicación del centro de gravedad del eje posterior.....	59
Figura N°. 25:Alineamiento del Extremo de la Viga Benkelman con el Centro de las Llantas.....	60
Figura N°. 26: Posición inicial ( $D_0$ = Deflexión máxima). ....	61
Figura N°. 27:Posición a 25cm ( $D_{25}$ ).....	61
Figura N°. 28: Posición final ( $D = 0$ ).....	62
Figura N°. 29: Ubicación de la zona de estudio .....	66

Figura N°. 30: Sección típica de la vía .....	67
Figura N°. 31: Evaluación funcional de la vía: Fallas de borde.....	94
Figura N°. 32: Evaluación Funcional:Destrucción parcial de la carpeta asfáltica.....	94
Figura N°. 33: Levantamiento topográfico .....	95
Figura N°. 34: Levantamiento topográfico .....	95
Figura N°. 35: Estudio de Tráfico: Conteo de vehículos del carril derecho de la vía de Evitamiento Sur .....	96
Figura N°. 36: Pesaje del eje posterior del camión.....	96
Figura N°. 37: Pesaje del eje posterior del camión terminado con la supervisión de mi asesor.....	97
Figura N°. 38: Tomando la temperatura del Pavimento.....	97
Figura N°. 39: Armado de la viga Benkelman .....	98
Figura N°. 40: Tomando el primer punto .....	98
Figura N°. 41: Realizando las anotaciones de campo .....	99
Figura N°. 42: Equipo Vigía.....	99
Figura N°. 43: Final del tramo de Ida .....	100
Figura N°. 44: Inicio del tramo de retorno.....	100
Figura N°. 45: Temperatura del Pavimento .....	101
Figura N°. 46: Realizando la medida de un punto de la carretera con la Viga Benkelman.....	101
Figura N°. 47: Kilómetro 1+400 (regreso) .....	102
Figura N°. 48: Equipo Técnico de la Viga Benkelman.....	102
Figura N°. 49: Final de la toma de datos .....	103
Figura N°. 50: Equipo de Trabajo.....	103

## ÍNDICE DE FORMULAS

Ecuación 1: NUMERO DE EALS .....	36
Ecuación 2:Cálculo de las deflexiones.....	43
Ecuación 3: Corrección de las deflexiones por efecto de la temperatura .....	43
Ecuación 4: DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA.....	45
Ecuación 5:deflexión promedio .....	46
Ecuación 6:desviación estándar .....	46
Ecuación 7:coeficiente de variación .....	46
Ecuación 8:Deflexión característica .....	47
Ecuación 9 :DEFLEXIÓN ADMISIBLE .....	48
Ecuación 10: DEFLEXIÓN CRÍTICA.....	49
Ecuación 11:Deflexión admisible .....	76
Ecuación 12:Deflexión critica .....	77

## ÍNDICE DE GRAFICOS

GRAFICA N° 1: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de subrasante malo, regular y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial..	84
GRAFICA N° 2: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de pavimento malo y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial.....	85
GRAFICA N° 3: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de pavimento y subrasante a la vez malo, regular y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial.....	86
GRAFICA N° 4: Deflectograma.....	88
GRAFICA N° 5: Cuenco de deflexiones Carretera ubicada entre el Ovalo musical - Av. Industrial Ida y retorno.....	89

## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo ha sido la determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible en la vía de evitamiento sur – Cajamarca, utilizando las deflexiones medidas con la viga Benkelman. La vía en estudio corresponde a una autopista de Primera clase (IMDS = 9465 Veh/día) tipo I, y pertenece a la red vial Nacional (Ruta 3N). Este trabajo de investigación comprendió un desarrollo progresivo de diferentes etapas que se inicia desde el reconocimiento, levantamiento topográfico, estudio de tránsito, medición de las deflexiones, hasta el procesamiento de los datos obtenidos en campo, correlaciones y análisis de los resultados que permiten determinar el comportamiento estructural del pavimento. El pavimento evaluado ha sido construido en el año 2002 y está conformado por una capa de rodadura de 3.5”, una base granular de 15 cm y una sub base granular de 20 cm, La subrasante ha sido mejorada con una capa de material granular. Para la evaluación de la capacidad estructural del pavimento se midieron las deflexiones cada 50 metros, de acuerdo con el procedimiento indicado por la norma MTC E102-2000 “Medida de la deflexión y determinación del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman”, para lo cual se utilizó una viga Benkelman de doble brazo, un volquete cuyo eje posterior tuvo un peso de 8.2 toneladas, las llantas con una presión de inflado de 80 P.S.I. Con las deflexiones obtenidas se procedió a la evaluación del pavimento utilizando el método CONREVIAL obteniéndose una deflexión característica de  $125 \times 10^{-2}$  mm, mayor que la deflexión admisible de  $77 \times 10^{-2}$  mm y un radio de curvatura promedio de 589.93 mm, mayor al mínimo establecido por el método (100mm), llegando a la conclusión de que el pavimento no presenta un adecuado comportamiento estructural

## ABSTRACT

The main objective of this work was to determine the structural behavior of the flexible pavement in the Cajamarca - Sur avoidance route, using the deflections measured with the Benkelman beam. The road under study corresponds to a first class motorway (IMDS = 9465 Veh / day) type I, and belongs to the national road network (Route 3N). This research consisted in a progressive development of different stages that starts from the recognition, topographic survey, transit study, measurement of the deflections, to the processing of the data obtained in the field, correlations and analysis of the results that allow to determine the structure behavior of the pavement. The pavement evaluated was constructed in 2002 and consists of a tread of 3.5 ", a granular base of 15 cm and a granular sub-base of 20 cm. The sub-cultivation has been improved with a layer of granular material with a thickness not inferior to 80 cm and a CBR For the evaluation of the structural capacity of the pavement, deflections were measured every 50 meters, according to the procedure indicated by MTC E102-2000 "Measurement of deflection and determination of radius of curvature of a flexible pavement using the Benkelman beam, "using a Benkelman double girder, a tipper whose rear axle had a weight of 8.2 tons, tires with an inflation pressure of 80 PSI. With the deviations obtained, the evaluation of the pavement was performed through the CONREVIAl method, obtaining a characteristic deflection of  $125 \times 10^{-2}$  mm, greater than the permissible deflection of  $77 \times 10^{-2}$  mm and a mean radius of curvature of 589.93 mm, the higher the minimum using the indicated method (100 mm), concluded that the pavement does not present adequate structural behavior.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Desde tiempos antiguos, la necesidad de contar con un sistema de carreteras que conecten a las poblaciones ha sido fundamental en el desarrollo de una región. Ya que, las redes viales de un país son las que promueven un verdadero desarrollo social, cultural y económico de sus habitantes (García, 2012).

Se estima que fue en el año 3000 a.C. que el Imperio Hilita (en la península de Anatonía) construyó los primeros caminos a suelo firme. Otro antecedente destacado son los caminos que realizaron los esclavos egipcios alrededor de las pirámides. Las órdenes religiosas que florecen en Europa durante la Edad Media fomentan la construcción de caminos para los peregrinajes, en poblados de Francia, Italia y España (Bustamante, 1996).

La construcción de vías tuvo un rápido proceso de transformación y desarrollo a partir de 1920 cuando se inicia la fabricación de los automóviles de uso personal que empiezan a tener una amplia aceptación y difusión (Dorfman, 1982).

Conforme al paso del tiempo, el crecimiento del parque automotor tanto en número como en carga, combinado con los pavimentos que han sido diseñados para soportar condiciones de esfuerzo menores, ha provocado que exista un alto grado de deterioro de estas mismas (Bustamante, 1996).

Desde 1961 hasta la actualidad han existido considerables avances en la tecnología de pavimentos, ya que el no cumplimiento de los estándares pueden ocasionar un gran impacto en la economía y en la vida de las personas, ocasionados por los cortes del tránsito que se provocan cuando se realizan trabajos tanto de rehabilitación como de mantención, esto se traduce en la creación de desvíos, los que pueden ocasionar congestión de vehículos en las vías aledañas, demoras en los viajes, desorientación en los usuarios, etc (García, 2012).

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función.

Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación (Hoffman, 1985).

Dentro de este contexto es indispensable, de que se evalúen las vías a fin de obtener un diagnóstico de las mismas para poder determinar el estado en que se encuentran y así poder proponer el tratamiento adecuado y en el momento oportuno.

En la ciudad de Cajamarca, se puede observar que en los últimos años, el parque automotor ha experimentado un acelerado crecimiento, lo que ha originado en muchos casos que sus vías presenten fallas, las que en un primer momento no han sido atendidas convenientemente, esto ha originado de que lo que en un inicio correspondía únicamente a fallas de carácter funcional, se vayan empeorando, llegando en muchos casos a convertirse en fallas de carácter estructural, trayendo como consecuencia una pérdida de dinero lo que atenta con la economía de nuestra región, y por ende de nuestro país.

En la vía de evitamiento sur (Figura N°1), se puede apreciar una serie de fallas, debido a que prácticamente a cumplido con su período de diseño, al incremento del tráfico vehicular; razón por la cual es necesario evaluarla, de modo tal que se tenga la certeza acerca de la repuesta estructural frente a las sollicitaciones de tráfico actual, lo que nos permitirá decidir el tratamiento que se deberá plantear a fin de mantenerla con la serviciabilidad adecuada y así alargar su vida útil con el consiguiente ahorro de dinero.

*Figura N°. 1: Vía de Evitamiento Sur - Cajamarca*



Fuente: Elaboración Propia, 2015

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es el comportamiento estructural del pavimento flexible de la vía de Evitamiento sur-Cajamarca utilizando las deflexiones medidas con la viga Benkelman?

## **1.3. Justificación**

Actualmente, en muchas de las vías de nuestra localidad, como de nuestra región, se nota claramente la falta de una política de mantenimiento, pues en muchas de ellas se puede advertir de que no se les ha realizado el mantenimiento adecuado, en el momento oportuno; esto ha generado que dichas vías se deterioren rápidamente y no alcancen por lo menos la duración establecida en el período de diseño, con la consecuente pérdida de dinero, y presentando una serviciabilidad muy deficiente.

De lo expresado en el párrafo anterior, podemos indicar que la presente investigación se justifica en la necesidad de conocer el comportamiento estructural del pavimento flexible de la vía de Evitamiento Sur en función a las deflexiones

medidas a lo largo del tramo en estudio. Ello nos permitirá determinar si el pavimento todavía responde adecuadamente a las solicitudes del tráfico existente y futuro, con lo que podremos determinar el estado de la subrasante y del pavimento a fin de decidir acerca del tipo de intervención que deberá proponerse actualmente a fin de alargar el periodo de vida útil.

✓ **Justificación Teórica:**

Debido al complejo comportamiento de los pavimentos asfálticos, las fallas de un pavimento pueden ser causadas por diversos factores como agentes climáticos, cargas de tráfico mayor a las previstas en el diseño o deficiencias en el proceso constructivo. Por ello es adecuado tener un sistema de control de calidad que involucre la aplicación de metodologías prácticas para realizar el monitoreo y verificación de los procesos de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente como en la conformación de las capas de que se compone el pavimento flexible, con la finalidad de minimizar la probabilidad de aparición de fallas por deficiencias en el proceso constructivo.

✓ **Justificación aplicativa o practica:**

El presente trabajo es necesario debido a que las vías necesitan ser evaluadas a fin de proponer las actividades de mantenimiento correspondientes en forma oportuna, evitando el deterioro de las mismas, logrando así aumentar su vida útil.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la Vía de Evitamiento Sur – Cajamarca utilizando las deflexiones medidas con la viga Benkelman.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

1. Realizar el levantamiento topográfico de la Vía de Evitamiento Sur
2. Realizar el estudio de tráfico
3. Determinar las deflexiones del pavimento para las solicitaciones de tráfico.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

**Ávila y Albarracín (2014)** en su tesis “Evaluación de Pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso, caso de estudio: vía chicti – Sevilla de oro”. Ecuador. Se realiza el análisis de la factibilidad y eficiencia de la deflectometría para la evaluación de la capacidad portante de la estructura del pavimento, a través de la aplicación de metodologías de análisis inverso.

**Escobar y García (2007)** en su tesis “Análisis comparativo de la evaluación de pavimentos por medio de la viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto”. El Salvador. Se determina una correlación entre los datos obtenidos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (FWD), a partir de la medición de deflexiones.

**Castro (2003)** En la tesis Universitaria “Propuesta de gestión de pavimentos para la ciudad de Piura” tiene como objetivo principal, brindar una alternativa al problema del mantenimiento de la infraestructura vial, mediante un sistema de gestión de pavimentos, dentro de la organización municipal y concluye que cuando se decide pavimentar o reforzar un camino con un tráfico de más de 500 vehículos diarios y es difícil controlar las cargas por eje, es probable que el ahorro económico que se derive de la construcción sea inferior al costo de las fallas prematuras del pavimento. Por lo tanto, en las ciudades, como Piura, en que es difícil hacer cumplir los límites de carga los caminos deben construirse inicialmente con arreglo a normas elevadas, aun cuando esto por lo general significa la construcción de menos caminos.

**Ignacio (2003)** En la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Tesis “Análisis Deflectométrico de las capas del pavimento flexible con Subrasante de suelo arenoso en la Panamericana Norte km 355+500 al 375+500”, el análisis se realizó con los ensayos de deflexiones que se tomaron en la carpeta de rodadura, los que dan la idea de cómo se comporta el pavimento y la Subrasante mediante la interpretación de las curvas de deflexiones obtenidas, estos se procesaron en gabinete, obteniendo una buena capacidad estructural en todo el tramo de estudio.

Además, se controló las deflexiones en todas las capas del paquete estructural y Subrasante donde se construyó el pavimento flexible con la finalidad de evaluar puntos que noten inestabilidad. Así como también se determinó cualitativamente la capacidad estructura del pavimento flexible mediante experiencia recopilada en obra y con el apoyo de fórmulas empíricas sustentados por el teorema del Hogg.

**Carahuatay** (2015) En la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Tesis “Determinación del Comportamiento Estructural del Pavimento Flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunudén; mediante el Análisis Deflectométrico.”, se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento por lo que aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación. Dentro del marco de registro de información sobre pavimentos, comparados con los establecidos a la normativa establecida ASTM D4695, cuyos resultados podrían ser utilizados para que las autoridades implanten decisiones de política y de gestión en mejora de un problema de evaluación estructural.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1. Definición de Pavimento

Se define como pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados que se colocan sobre la subrasante debidamente acondicionada y que van a soportar las cargas del tránsito, transmitiéndolas debidamente distribuidas a las capas inferiores.

*Figura N°. 2: Esquema típico del paquete estructural de un pavimento*



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. SCT, 2001.

Es por ello que todo pavimento deberá presentar la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua, así como abrasiones y punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos o la compresión de elementos que se apoyan sobre él.

### **2.2.2. Clasificación de pavimentos**

No siempre un pavimento se compone de las capas señaladas en la figura 2. La ausencia o reemplazo de una o varias de esas capas depende de diversos factores, como por ejemplo del soporte de la subrasante, de la clase de material a usarse, de la intensidad de tránsito, entre otros (Rojas, 2003).

Por esta razón, pueden identificarse 3 tipos de pavimentos, que se diferencian principalmente por el paquete estructural que presentan:

- ✓ Pavimento flexible
- ✓ Pavimento rígido
- ✓ Pavimento articulado

El trabajo de la presente tesis está referido a pavimentos flexibles, por lo que se explicara a detalle las capas que lo constituyen y su comportamiento frente a solicitudes externas.

### **2.2.3. Pavimento flexible**

Pavimentos formados, como se puede observar en la figura N°3, por una sub-base y/o base hidráulica o estabilizada, y una superficie de rodamiento, que puede ser: una carpeta de riegos; una carpeta de mezcla asfáltica elaborada en frío o en el lugar, o de mezcla en caliente elaborada en planta, también llamadas de concreto asfáltico, pudiendo tener incluso además un riego de sello aplicado sobre la superficie de la carpeta (RUIZ, 2008).

*Figura N°. 3: Sección típica de un pavimento flexible.*



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. SCT, 2001.

### **A. Carpeta Asfáltica**

Es la capa más superficial de un pavimento. Está constituido por una mezcla íntima de agregados gruesos y finos y un ligante, que en el caso de los pavimentos asfálticos pueden ser cemento asfáltico, asfalto líquido o emulsiones asfálticas.

La carpeta es elaborada con material pétreo seleccionado y un aglomerante que es el asfalto. Es de gran importancia conocer el contenido óptimo de asfalto a emplear, para garantizar que la carpeta resista las cargas a la que será sometida.

### **B. Base**

Es el principal elemento estructural de un pavimento flexible y puede ser tratada (con cemento, cal, asfalto o cualquier otro producto para un fin específico), o sin tratar (como las gravas de río, los suelos coluviales o la piedra chancada) y va colocado sobre la subbase y debajo de la superficie de rodadura

### C. Sub base

Es una capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante debidamente acondicionada. Los espesores de la sub base son muy variables y dependen de cada proyecto específico

### D. Subrasante

La subrasante es la capa de terreno que soporta el paquete estructural y que se extiende hasta una profundidad en la cual no influyen las cargas de tránsito. Esta capa puede estar formada por el suelo natural debidamente preparado o por material de préstamo, dependiendo de las características del suelo encontrado.

Las características de la Subrasante sobre la que se asienta el pavimento, están definidas en seis (06) categorías de Subrasante, en base a su capacidad de soporte CBR (Timana 2009).

*Tabla 1.: Categorías de Subrasante*

<b>CATEGORÍAS DE SUBRASANTE</b>	<b>CBR</b>
S <sub>0</sub> : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S <sub>1</sub> : Subrasante Pobre	DE CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S <sub>2</sub> : Subrasante Regular	DE CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S <sub>3</sub> : Subrasante Buena	DE CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S <sub>4</sub> : Subrasante Muy Buena	DE CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S <sub>5</sub> : Subrasante Extraordinaria	CBR ≥ 30%

Fuente: (MTC-2013)

El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la Subrasante, por lo que esta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad.

#### **2.2.4. Métodos de evaluación estructural.**

Ante un problema de evaluación estructural, tradicionalmente se recurre a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego al sistema denominado pavimento y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es lenta y es “destructiva”.

En la actualidad se está aplicando nueva tecnología no destructiva “NDT” (non destructive test) basándose en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Su medición es simple, rápida, económica y lo más importante no altera el equilibrio de la estructura porque es una metodología “no destructiva”. Esta metodología se fundamenta en la información valiosa que nos presta la curva o cuenco de deflexiones para interpretar esta información de forma cuantitativa, se compara el sistema Pavimento-Subrasante con un modelo matemático.

Por lo tanto, se puede mencionar que la metodología NDT, basada en la interpretación de deflexiones es un proceso de diseño inverso (retro cálculo) ya que se utiliza la respuesta del sistema (Pavimento-Subrasante) para establecer sus características estructurales.

Es importante aclarar que al utilizar la metodología NDT, para la evaluación estructural de pavimentos a través de deflexiones no implica dejar de realizar ensayos destructivos como las calicatas, ya que cuando se están en presencia de evaluaciones estructurales de carreteras que no cuentan con antecedentes históricos de construcción y diseño, se procede a realizar calicatas para verificar sus dimensiones, tipos de materiales y homogeneidad de las capas que conforman el pavimento (Rojas, 2003).

#### **2.2.4.1. Métodos directos de auscultación**

Los métodos directos de auscultación son métodos destructivos, que deterioran la estructura del pavimento. El uso de los métodos directos, presentan las siguientes desventajas como la obtención de datos requiere mayor cantidad de tiempo, Costos más elevados, mayores molestias en el tráfico, etc.

Entre los métodos directos de auscultación estructural utilizados en el Perú se pueden mencionar (Velásquez, 2009).

- ✓ Calicatas o pozos a cielo abierto.
- ✓ Extracción de núcleos.

#### **2.2.4.2. Métodos indirectos de auscultación estructural**

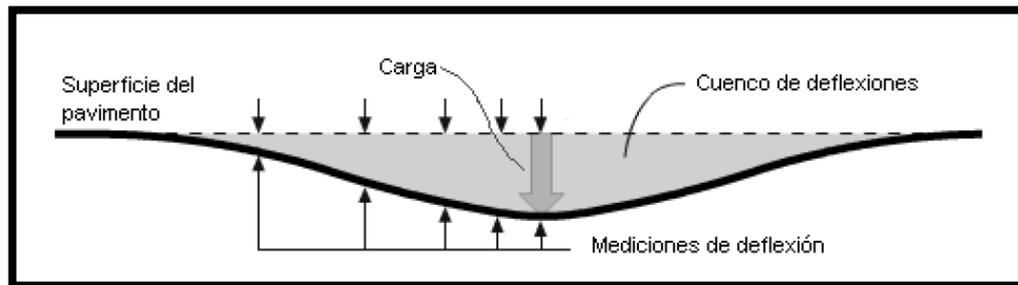
Se le puede llamar métodos indirectos de evaluación estructural, a aquellos métodos con los cuales se logra determinar la capacidad estructural del pavimento, sin tener que dañar la estructura, dichos métodos se basan en hipótesis y modelos matemáticos (Chávez, 2015).

Estos métodos se realizan por medio de metodologías conocidas tales como no destructiva “NDT” (non destructive test), que se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de los pavimentos. Dicha metodología se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su Subrasante, por lo que se puede mencionar que la metodología de evaluación estructural por medio de NDT, es un proceso de diseño inverso (retrocálculo) ya que se utiliza la respuesta del sistema (Pavimento-Subrasante) para establecer sus características estructurales.

Al definir el término deflexión, lo más acertado sería considerarlo como la medida de la deformación elástica que experimenta un pavimento, al paso de una carga en función del tipo y del estado del pavimento. El cuenco de deflexiones se define como el conjunto de deflexiones que se producen entre el punto de aplicación de la carga en un pavimento y sus alrededores (ver Fig.4).

Los equipos de deflectometría pueden registrar deflexiones en diferentes puntos lo que ayuda a definir completamente la caracterización de las deformaciones conocido como cuenco de deflexiones (Chávez, 2015).

Figura N°. 4: Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones



Fuente: Reyes Lizcano, 2003

La caracterización del cuenco de deflexiones está basada en tres parámetros básicos, que, si bien no otorgan un estado representativo de la estructura del pavimento, sirven para generar una visión y condición de homogeneidad del proyecto.

De forma general, hay tres tipos de equipo para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas los cuales son:

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas estáticas.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas vibratorias.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas de impacto.

Para cualquiera de ellos el principio es el mismo y consiste en aplicar una carga de magnitud conocida a la superficie del pavimento y medir las deflexiones (Velásquez, 2009).

#### **A. Medición de deflexiones estática o de movimiento lento**

Corresponde a la primera generación, básicamente originada con el desarrollo de la viga Benkelman. Estos equipos tipo viga, proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga estática o de movimiento lento.

La Figura N°5 muestra las ruedas duales de un eje trasero de un vehículo que transmite una carga de 8.2 toneladas y el equipo Viga Benkelman posicionado para efectuar las mediciones de deformaciones (Velásquez, 2009).

Figura N°. 5: Equipo Viga Benkelman instalado para efectuar las mediciones de las deformaciones



Fuente: Elaboración Propia,2016

La Viga Benkelman fue desarrollada por el Dr. A. C. Benkelman en los Estados Unidos. Es un dispositivo conveniente, exacto para medir la deformación elástica de los pavimentos flexibles, que permite conocer diferentes estados y propiedades del pavimento, por lo que se convierte en gran utilidad en el diseño, construcción y conservación de su estructura. Opera con el principio de palanca simple (Hoffman, 1985).

Figura N°. 6: Viga Benkelman (Laboratorio U.T.P.L)



Fuente: Elaboración Propia,2016

Se compone esencialmente de una parte fija y de otra móvil:

- **Parte Fija:** o estructura portante, se encuentra soportada por tres apoyos que descansan en la superficie del pavimento, además es donde se encuentra el deformímetro que se encuentra conectado con la parte móvil (Hoffman 1985).
- **Parte Móvil:** se encuentra constituida por el brazo de medida, está conectada a la estructura portante por medio de un pivote de giro, y el otro extremo (punta) hace contacto con la superficie del pavimento, en el punto donde se requiere medir la deflexión (Hoffman 1985).

El pivote divide el brazo de medida en dos partes entre las que existe una relación llamada “Constante de la Viga”.

La medida de la deflexión elástica mediante el uso de la Viga Benkelman, es una operación no destructiva, relativamente rápida y sencilla que solamente exige un vehículo de carga y operadores cuidadosos y bien entrenados para conseguir una evaluación de la estructura del pavimento real. (Hoffman, 1985)

El vehículo de carga consiste en un camión o un volquete de dos ejes, con una capacidad de aproximadamente 5 toneladas con una carga en el eje trasero de 18.000 libras (8.175 Kg), igualmente distribuida en sus dos ruedas cada una de las cuales debe tener dos llantas. Las llantas deben ser de 10” x 20” y 12 lonas e infladas a una presión de 5.6 Kg./cm<sup>2</sup> (80 psi) y deben estar en buen estado.

La presión de inflado debe verificarse cuando menos dos veces al día.

La carga del vehículo debe consistir en lo posible en materiales que no cambien sus condiciones de humedad con las condiciones climáticas. La carga debe estar protegida por una carpa.

Los puntos de medida deben estar relacionados con el kilometraje, además debe anotar como referencia, los puntos destacados de la vía como por ejemplo los monumentos, cruces, etc.

Para medir la deflexión, la punta de la viga debe colocarse en medio de las dos llantas y exactamente debajo del centro del eje de la rueda. (Hoffman, 1985)

En la siguiente figura se muestra la puesta en campo de la Viga.

*Figura N°. 7: Viga Benkelman En Uso*



Fuente: Elaboración Propia, 2016

### **Uso de la viga Benkelman**

La Viga Benkelman tiene un gran campo de acción en diversas etapas de la vida de un pavimento, como se indica a continuación: (Rojas, 2003)

#### **✓ CONSTRUCCIÓN**

La medida se la realiza a nivel de la subrasante y de las diferentes capas estructurales del pavimento, lo que permite obtener:

1. Una apreciación de la resistencia de las distintas capas del pavimento.
2. La localización de áreas débiles para su reparación.
3. El grado de homogeneidad.

✓ **PAVIMENTO TERMINADO**

En esta etapa la medida se la realiza sobre la superficie de la capa de rodadura, y los objetivos de este ensayo son:

- 1) Apreciar la homogeneidad y localizar áreas débiles susceptibles a una observación continua.
- 2) Obtener las deflexiones iniciales para poder comparar con medidas posteriores.
- 3) Comprobar la duración de la estructura del pavimento.

✓ **PAVIMENTO EN SERVICIO**

Igual que en la etapa anterior la medida se la realiza sobre la superficie de la capa de rodadura, y se logra determinar:

- La urgencia de operaciones de conservación o de refuerzo.
- La variación de la capacidad portante durante los periodos de invierno y verano.
- Los fenómenos de fatiga.

✓ **PAVIMENTOS PRÓXIMOS A REFORZAR**

La medida se la debe realizar sobre la superficie de la capa de rodadura, lo que nos permitirá definir:

- Los sectores homogéneos para el refuerzo.
- Los espesores del refuerzo.
- El grado de flexibilidad de las mezclas del refuerzo.

✓ **PAVIMENTOS REFORZADOS**

En esta etapa la medida se la debe realizar sobre la capa de refuerzo, planteando los siguientes objetivos:

- Apreciar el poder del refuerzo colocado.
- Corregir y mejorar el refuerzo colocado.

## **B. MEDICION DE DEFLEXION POR IMPACTO**

Se refiere a los equipos tipo impacto como el Deflectómetro de impacto (FWD) que aplican un impulso de carga de corta duración para simular el paso de una rueda móvil a alta velocidad, a través de una masa suspendida que se eleva y luego se deja caer sobre una placa que se ha situado en la superficie del pavimento. Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes magnitudes de cargas de impacto y duración, semejantes a las de una carga real del tránsito (Espinosa, 2009).

La secuencia de operación consiste en situar el equipo en el punto fijado, se baja la placa y los sensores hasta que se apoyen en la superficie y se aplica la carga o la serie de cargas previstas. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrones, distribuidos linealmente a una distancia de 30 cm entre ellos.

La deflexión medida en el punto de aplicación de la carga da el resultado de la capacidad estructural del pavimento en conjunto, mientras que las deflexiones registradas por los sensores más alejados son debidas a la deformación de las capas más inferiores (base, subbase y Subrasante) (Espinosa, 2009).

*Figura N°. 8: Deflectómetro de impacto*



Fuente: Ignacio (2003)

## **2.2.5. METODOLOGIAS RACIONALES Y EMPIRICAS BASADAS EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Para determinar la capacidad estructural del pavimento se pueden emplear metodologías empíricas y racionales.

- Metodología racional del Instituto del Asfalto.
- Metodología de base racional Modelo Elástico ó Modelo de Hogg.
- Metodología empírica establecida por El Consorcio de Rehabilitación Vial

### **A. METODOLOGÍA DEL INSTITUTO DEL ASFALTO**

La metodología racional del Instituto del Asfalto, no solo emplea el valor máximo de la deflexión, sino que también analizan el tipo de curvatura que adopta la superficie cargada en los ensayos (Chavez, 2013).

### **B. METODO ELÁSTICO Ó MODELO MATEMÁTICO DE HOGG**

En el año de 1944 A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que lleva su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa.

En este método, la evaluación del terreno de fundación y la estructura del pavimento existente consiste en la determinación analítica del C.B.R. del terreno de fundación y de los parámetros estructurales que caracterizan la estructura del pavimento (Hoffman, 1985).

El sistema pavimento – subrasante existente es idealizado por un modelo elástico de dos capas (Modelo de Hogg) y las deflexiones son medidas con la viga Benkelman. Los parámetros estructurales del sistema son calculados determinando los módulos de elasticidad del pavimento y del terreno de fundación, el número estructural del pavimento existente y el número estructural requerido (Hoffman, 1985).

### C. METODOLOGÍA EMPÍRICA CONREVAL

Se basa en el valor de la deflexión máxima y el tipo de curvatura que adopta la superficie cargada, siendo sus resultados confiables a medida que exista una base comparativa en una gran variedad de estructuras.

### D. DEFLEXIONES

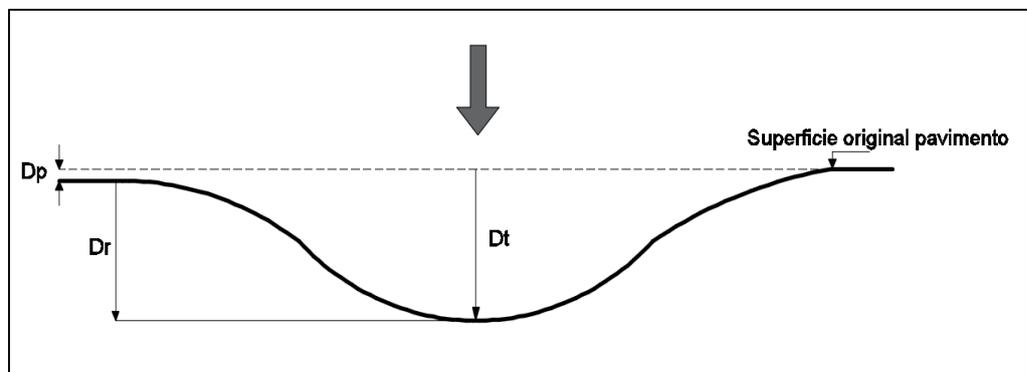
La deflexión es una medida elástica, pero intervienen esfuerzos plásticos. Los primeros desaparecen en cuanto se renuevan las cargas y los segundos son permanentes y su acumulación a través de las reiteraciones de las cargas produce distorsiones de ahuellamiento en la superficie del pavimento. Por este motivo se distinguen tres tipos de deflexiones:

**Deflexión Total (DT):** Es la deformación vertical puntual de una superficie bajo acción de una carga.

**Deflexión recuperable o elástica (DR):** Es la recuperación elástica de la superficie que se produce al retirar la carga.

**Deflexión permanente o residual (DP):** es la diferencia entre la posición original de la superficie antes de aplicar la carga y después de retirarla.

*Figura N°. 9: Tipos De Deflexiones.*

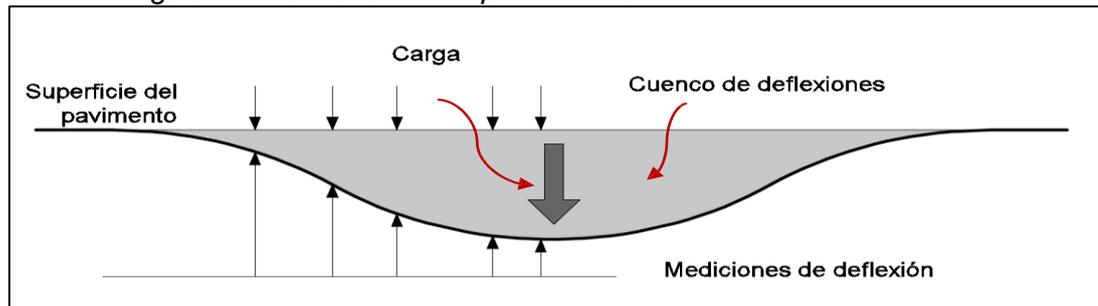


Fuente: Reyes Lizcano, 2003

### 2.2.6 DEFLEXIÓN EN PAVIMENTOS

La deflexión de un pavimento no es más que la respuesta del mismo ante un estímulo, en general cargas impuestas por el tráfico. La deflexión en los pavimentos es la deformación vertical bajo el punto de aplicación de la carga. En definitiva, la deflexión es la integración matemática de las deformaciones verticales con la profundidad (Bustamante, 1996).

*Figura N°. 10: Deflexión en pavimentos.*



Fuente: Bustamante, 1996

Urbaez, Corredor y Corros (2009) encontraron que, dependiendo de la estructura de pavimento considerada, la sub-rasante contribuye entre un 70 a 95% de la deflexión medida en la superficie del pavimento. Por esta razón se puede afirmar que la mayor deflexión en los pavimentos es causada por la compresión elástica de la subrasante.

Este es un aspecto determinante en el desarrollo de distintas metodologías para caracterizar las propiedades elásticas de los suelos de la fundación del pavimento en base a la medición de deflexiones.

Por otra parte, se debe considerar que la magnitud de la deformación en un material considerado en cualquier punto de la estructura de pavimento está directamente relacionada con el estado triaxial de esfuerzos, por lo que para las mismas condiciones cuando decrecen los esfuerzos verticales en la sub-rasante, la deflexión también decrece.

Esto significa que al incrementar los espesores de las capas o incrementar su rigidez, la deflexión decrece (Urbaez, Corredor y Corros, 2009).

Por ello, la medición de deflexiones del pavimento es uno de los principales parámetros a determinar en cualquier evaluación estructural de un pavimento.

### 2.2.6.1. SOLICITACIÓN TRANSITO

La solicitud producida por el tránsito sobre una infraestructura carretera es bastante compleja, debido no sólo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitudes adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito. Estas solicitudes dependen básicamente de los siguientes factores:

- **Volumen de tránsito**
- **Peso por eje de los vehículos comerciales:** En este caso, en todos los países se usa la equivalencia del tránsito a un solo tipo de Eje estándar. El más común es el propuesto por la AASHTO correspondiente a un eje de 18.000 libras de peso (18 kip, equivalente a 8.193 Kg.)

*Ecuación 1: NUMERO DE EALS*

$$N^{\circ}EALS = N^{\circ}veh_i * 365 * FC * FCR * FD * Fdis$$

Donde

$N^{\circ}veh_i$ = número de vehículos que transitan por la vía en un día

$F_c$ = Factor camión

$F_{cr}$ = Factor de crecimiento

$F_D$ = Factor de dirección

$F_{dis}$ = Factor de distribución

- **Presión de inflado:** Con respecto a la presión de inflado de los neumáticos, la carga es transmitida del vehículo al pavimento a través de los neumáticos. Cada neumático reparte la carga que le corresponde a través de su presión de inflado, siendo ésta la presión unitaria que recibe el pavimento. La presión de inflado del neumático influye directamente a la superficie de la primera capa, siendo su efecto rápidamente disipado en ella, de manera que a las capas siguientes sólo son influenciadas por el peso total del eje cargado.

### **2.2.6.2. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES**

La deflectometría es el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de una calzada, a consecuencia de la acción de una carga de solicitación, (respuesta del pavimento por la acción de una carga dinámica o estática).

Las fallas estructurales fundamentales dependen de la magnitud y frecuencia de las deformaciones recuperables y de la acumulación de las deformaciones permanentes en las estructuras, bajo la acción de las cargas móviles y/o estáticas.

Es lógico que el criterio dominante para valorar la capacidad estructural se base en la deformabilidad de los pavimentos bajo cargas normalizadas.

De esta manera la deflexión es una medida de la respuesta del conjunto subrasante- pavimento frente a una determinada carga, indicando la adecuabilidad del mismo desde el punto de vista estructural.

De forma general, hay tres tipos de equipo para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas los cuales son:

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas estáticas.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas vibratorias.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas de impacto.

### **2.2.6.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES**

#### **A. Carga**

La magnitud y duración de la carga influye considerablemente en las deflexiones de los pavimentos. Desafortunadamente, no todos los equipos comerciales que efectúan ensayos no destructivos pueden simular la carga de diseño, algunos lo hacen con la magnitud de la carga, pero no con su duración o frecuencia.

## **B. Temperatura**

La temperatura y la humedad son dos condiciones climáticas que afectan la magnitud de las deflexiones. En los pavimentos asfálticos, las altas temperaturas producen el reblandecimiento de la carpeta asfáltica e incrementan las deflexiones.

La época del año ejerce una influencia muy significativa en las mediciones de la magnitud de las deflexiones. En regiones que no experimentan congelamiento ni deshielo, las deflexiones generalmente presentan una curva senoidal, correspondiendo la máxima deflexión en la época de lluvias, donde el contenido de agua libre es mayor en la estructura del pavimento.

## **C. Condiciones del pavimento**

Es evidente que las condiciones en que se encuentre el pavimento influyen en la magnitud de las deflexiones medidas. Para asfálticos, las deflexiones obtenidas en áreas con agrietamientos y roderas serán mayores que las que se consigan en áreas libres de deterioros. Es importante considerar tales condiciones cuando se obtienen deflexiones en un tramo carretero, y más aún cuando se seleccionan las zonas de evaluación.

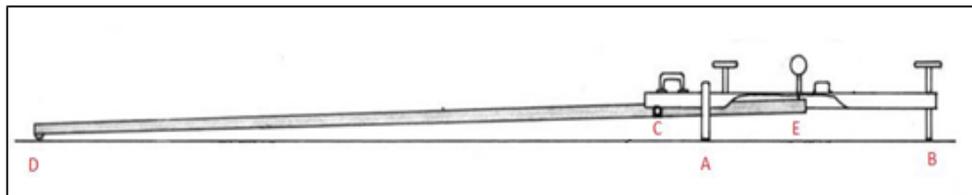
### **2.2.7. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN**

El instrumento más utilizado para medir la deformación elástica de un pavimento es la Viga Benkelman desarrollado por Alvin Carlton Benkelman, que permite conocer diferentes estados y propiedades del pavimento; de gran utilidad para el diseño, construcción y conservación de su estructura (Ver Figura 13).

Consiste en un dispositivo sencillo que opera por medio de una palanca suspendida de un bastidor que trasmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador.

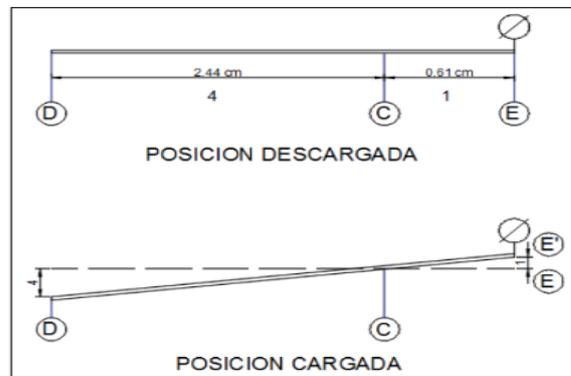
Este equipo debe ser usado con un camión cargado, normalmente con 80 KN en un eje, con llantas duales infladas a una presión de 0.48 a 0.55 MPa (70 a 80 Psi). Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo la deflexión cuando el vehículo se retira. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador. Se toma una lectura inicial y al retirar el camión, se toma la lectura máxima y una final del parámetro

*Figura N°. 11: Esquema de la Viga Benkelman*



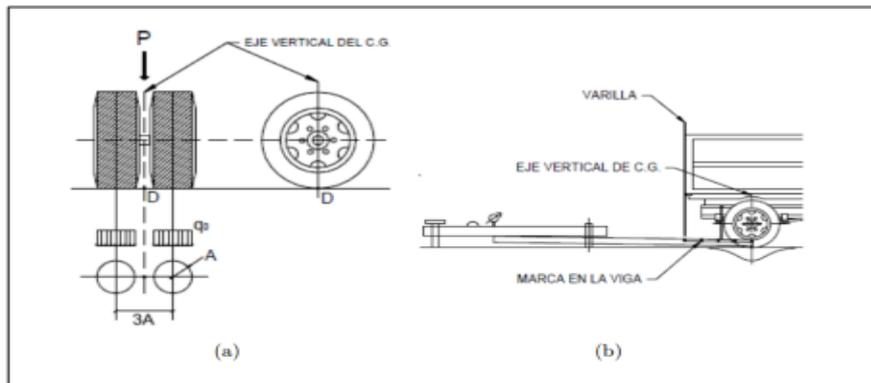
Fuente: Bustamante,1996

*Figura N°. 12:Principio de operación de la Viga Benkelman*



Fuente: Bustamante,1996

Figura N°. 13: Configuración Geométrica del sistema de carga de ensayos con Viga Benkelman



Fuente: Bustamante, 1996

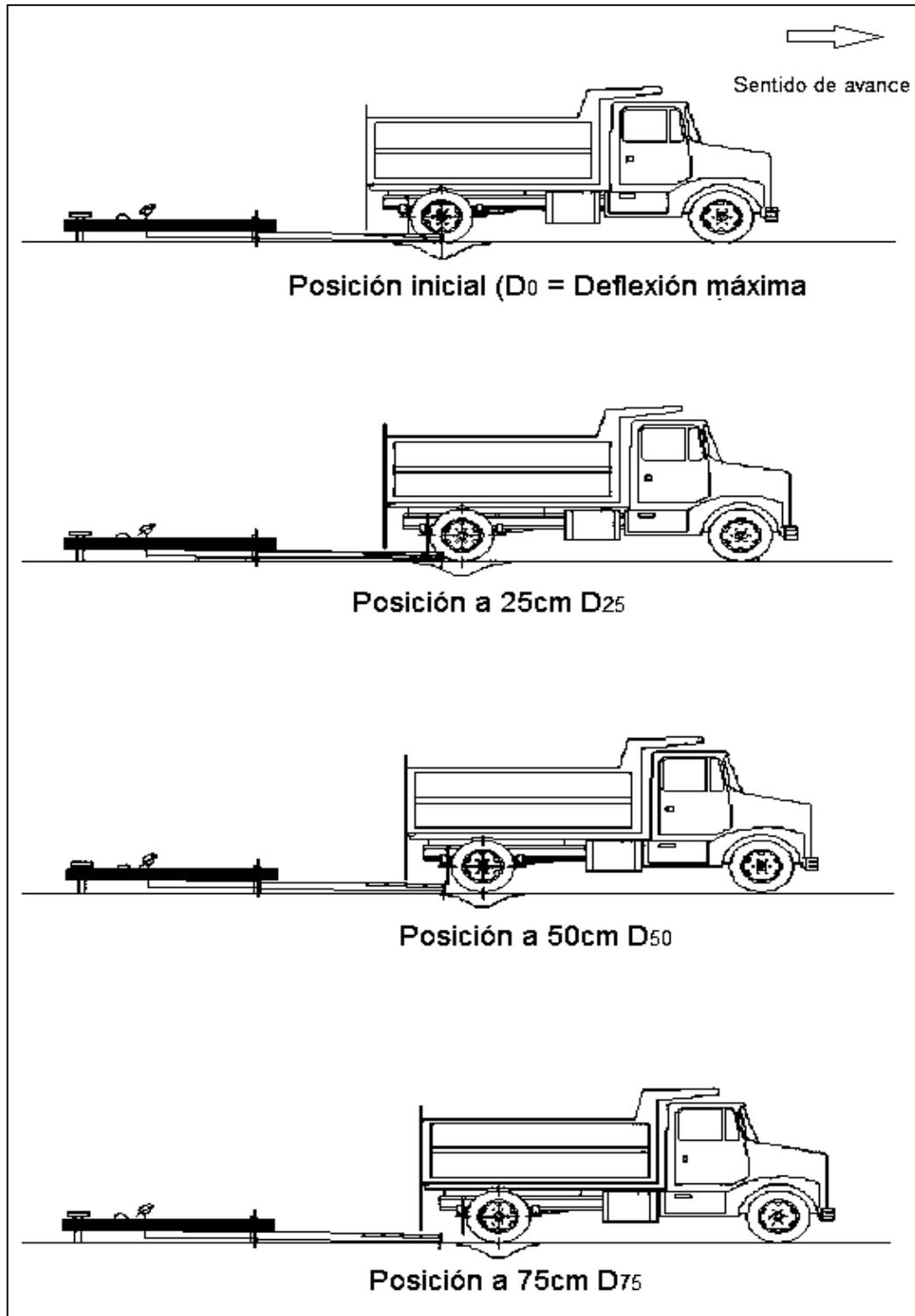
### 2.2.8. METODOLOGÍA

La Viga Benkelman de acuerdo a los procedimientos estandarizados, no mide la deformación elástica del pavimento en un proceso de carga directa, sino que partiendo de un estado inicial en que el pavimento se encuentra cargado, mide la recuperación que éste experimenta al ser descargado progresivamente. El deflectómetro Benkelman consta esencialmente de dos partes:

- a. Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B").
- b. Un brazo móvil acoplado al cuerpo fijo mediante una articulación de giro o pivote "C", uno de cuyos extremos apoya sobre el terreno (punto "D") y el otro se encuentra en contacto sensible con el vástago de un extensómetro de movimiento vertical (punto "E"). En algunos casos, el equipo posee un vibrador incorporado que, al ser accionado, durante la realización de los ensayos, evita que el indicador del dial se trabe y/o que cualquier interferencia exterior afecte las lecturas.

El extremo "D" o "punta de la viga" es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman ver figura

Figura N°. 14: Proceso de medición con Viga Benkelman.



Fuente: Bustamante, 1996

**2.2.9. CALCULO DE DEFLEXIONES**

**a) CÁLCULO DE LAS DEFLEXIONES**

Para el cálculo de las deflexiones máximas, se debe calcular la diferencia entre la lectura final y las demás lecturas. Las diferencias se multiplican por la relación de brazos de la Viga Benkelman utilizada, en este caso 1:4.

*Ecuación 2: Cálculo de las deflexiones*

$$D_n = (L_f - L_n) \times 4 \dots\dots\dots 1$$

Donde:

$D_n$ : Deflexión en la medida n.

$L_f$ : Lectura en la medida final.

$L_n$ : Lectura en la medida n.

**b) CORRECCIÓN DE LAS DEFLEXIONES POR EFECTO DE LA TEMPERATURA**

Para un pavimento, la magnitud de las deflexiones aumenta con un incremento de la temperatura de la carpeta, atribuido a una menor rigidez de la mezcla. Para corregir la deflexión se corrigen respecto a una temperatura estándar de 20 °C.

A fin de referir todas las deflexiones a una temperatura estándar de 20 °C, el estudio CONREVIAL, emplea la siguiente fórmula:

*Ecuación 3: Corrección de las deflexiones por efecto de la temperatura*

$$D_{20\text{ }^\circ\text{C}} = \frac{D_t}{((K * (t^\circ - 20^\circ) * h) + 1)} \dots\dots\dots 2$$

### c) CORRECCIÓN POR ESTACIONALIDAD

La capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan, por lo tanto, es deseable que la medición de deflexiones se realice durante la estación de lluvias, durante la cual los suelos se encuentran en su situación más crítica. De no ser así, se debe efectuar la corrección de las medidas a fin de tomar en cuenta dicho aspecto. Los valores de deflexión deben afectarse por los siguientes valores:

*Tabla 2: Factores De Corrección Por Estacionalidad*

TIPO DE SUELO DE LA SUBRASANTE	ESTACIÓN LLUVIOSA	ESTACIÓN SECA
Arenoso – Permeable	1.0	1.1 – 1.3
Arcilloso – Sensible al agua	1.0	1.2 – 1.4

Fuente: Reyes Lizcano, 2003

## 2.2.10. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE LA METODOLOGÍA CONREVAL

### A. DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA

El grado de curvatura de la línea elástica de Deflexión es una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas elásticas al flexionarse bajo las cargas de tránsito.

El método para determinar el radio de curvatura, se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones de la distancia hasta el eje de la carga, se aproxima a una parábola hasta una distancia superior a 25 cm, sufriendo luego una inflexión para atender asintóticamente hacia la horizontal (Ver fig.14).

La curvatura de la parábola queda entonces definida por su parámetro, el cual, en la zona de máxima curvatura, se confunde con el radio del arco oscular en dicho punto, es decir exactamente bajo el centro del eje de la rueda cargada. El radio de curvatura según la metodología francesa se expresa mediante la siguiente fórmula:

*Ecuación 4: DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA*

$$R_c = \frac{10 * 25^2}{2 * (D_0 - D_{25})} \dots\dots\dots 3$$

Dónde:

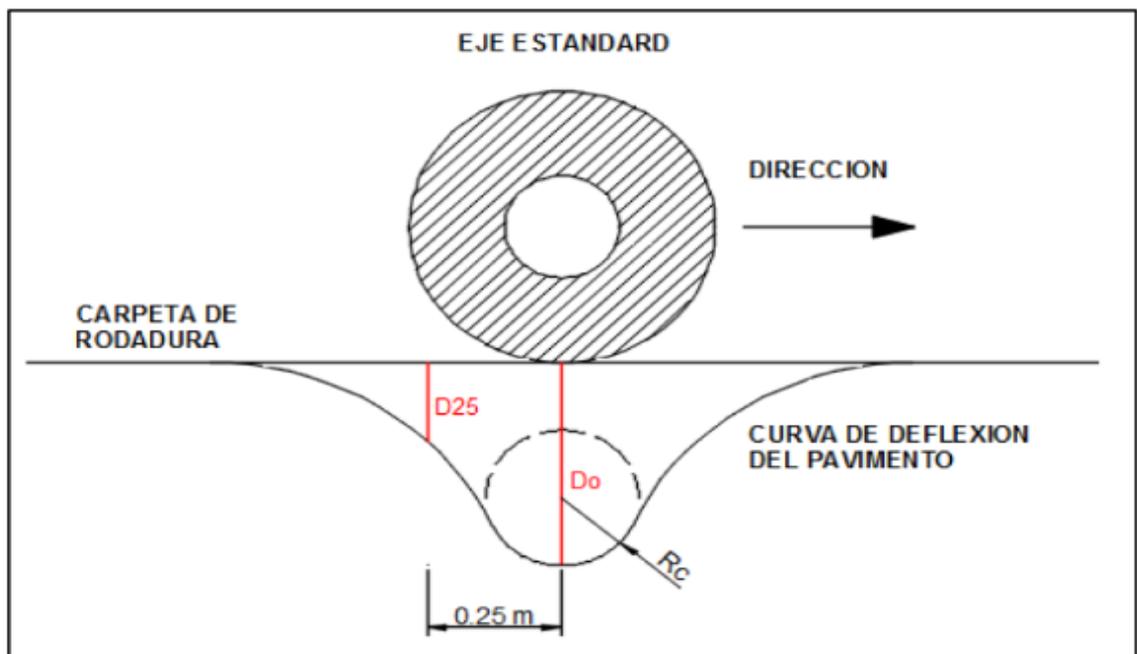
$R_c$  : Radio de Curvatura (m)

$D_0$ : Deflexión máxima corregida por temperatura (1/100 mm)

$D_{25}$ : Deflexión máxima corregida por temperatura (1/100 mm)

10: Coeficiente por cambio de unidades

*Figura N°. 15: Deformada Del Pavimento Y Radio De Curvatura*



Fuente: Reyes Lizcano, 2003

## **B. DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA**

La deflexión característica, es un parámetro estadístico, empleado para la caracterización representativa de los pavimentos. Para su determinación, es necesario contar con una base de datos de deflexiones recuperables máximas

( $D_0$ ), del tramo que se quiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos.

Los estudios de deflexiones recuperables han demostrado que las deflexiones medidas en una sección del pavimento, presentan una distribución de frecuencias que se asemejan a una distribución normal.

Por ende, a partir de las deflexiones individuales, asumiendo que se hallan distribuidas de acuerdo a la ley de Gauss se han determinado la deflexión promedio ( $D$ ) el desvío cuadrático medio o desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación CV, usando las siguientes expresiones; donde n es el número de determinaciones:

*Ecuación 5: deflexión promedio*

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \dots\dots\dots 4$$

*Ecuación 6: desviación estándar*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)}}, \text{ para } n > 30 \dots\dots\dots 5$$

*Ecuación 7: coeficiente de variación*

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{D}} * 100 \dots\dots\dots 6$$

Dado que la desviación estándar aumenta con un incremento de las deflexiones, y mayores deflexiones están asociadas a pavimentos más débiles en general son más variables, y que la deflexión de diseño, cuando se utiliza en algún método para el cálculo de refuerzo, debe basarse tanto en la deflexión media como en la dispersión.

Para diseño se emplea la deflexión característica, valor que representa mejor a una determinada sección; siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadístico, se establece como deflexión característica:

*Ecuación 8: Deflexión característica*

$$D_c = \bar{D} + t * \sigma \dots\dots\dots 7$$

DC : Deflexión característica

D : Deflexión promedio de los valores individuales D0 corregidos

t : Coeficiente que representa al porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica

σ: Desviación estándar

Considerando que cada deflexión media representa una cierta extensión o área de pavimento, cada valor “t” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a las características correspondientes.

*Figura N°. 16: Valor de “t” y probabilidad de ocurrencia de d>dc.*

<b>Valor de diseño</b>	<b>D<sub>c</sub></b>	<b>Área D &gt; D<sub>c</sub> %</b>
50	D	50
75	D + 0.674σ	25
85	D + σ	15
90	D + 1.3σ	10
95	D + 1.645σ	5
98	D + 2σ	2
99	D + 2.33σ	1

Fuente: Reyes Lizcano, 2003

En el caso del diseño de un refuerzo, el espesor deberá ser tal que solo una pequeña área resulte infradiseñada. La elección del valor “t” es una decisión técnico – económica que dependerá del número de determinaciones, del grado de confiabilidad, de la relación entre costos de mantenimiento y de rehabilitación, de la variabilidad de capacidad estructural o constructiva, del tráfico, ubicación e importancia de la carretera, etc.

En el método CONREVIAl se adopta como deflexión característica aquella que corresponde al 95%, es decir la que es superada solo por el 5% de las determinaciones ( $D_p + 1.645\sigma$ ).

### C. DEFLEXIÓN ADMISIBLE

La deflexión admisible, es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica, por encima del cual no se garantiza un comportamiento satisfactorio de la estructura, durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es:

*Ecuación 9 :DEFLEXIÓN ADMISIBLE*

$$D_a = \left(\frac{1.15}{N_{18}}\right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots 8$$

Donde:

$D_a$  : Deflexión admisible (mm).

$N_{18}$  : Numero repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton (millones).

Nota: Los valores de  $N_{18}$  resultan del estudio de tránsito, el cual integra los conteos de vehículos, el pesaje de los vehículos de mayor capacidad y hallar los factores equivalentes de carga y tasas de crecimiento anual de tránsito.

**D. DEFLEXIÓN CRÍTICA**

La deflexión crítica, es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión al término de su servicio, por encima del cual no se garantiza un comportamiento satisfactorio de la estructura, durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro es:

*Ecuación 10: DEFLEXIÓN CRÍTICA*

$$D_{CR} = \left(\frac{1.90}{N_{18}}\right)^{\frac{1}{5.3}} \dots\dots\dots 9$$

Dónde:  $D_{CR}$  : Deflexión crítica (mm).  
 $N_{18}$  : Numero repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton (millones).

**E. ANÁLISIS**

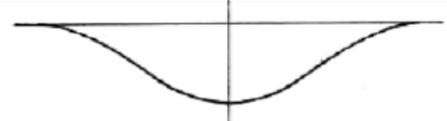
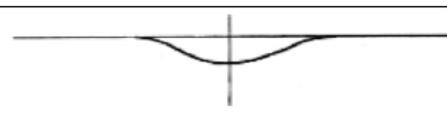
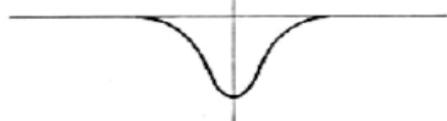
Con los parámetros calculados se procede al siguiente análisis:

*Tabla 3: Características del pavimento de acuerdo al tipo de deflexión y Radio de curvatura.*

Tipo de Deflexión	Comportamiento de la subrasante	Comportamiento del pavimento
Tipo I	Bueno $D_c < D_a$	Bueno $R_c > 100$
Tipo II	Malo $D_c > D_a$	Bueno $R_c > 100$
Tipo III	Bueno $D_c < D_a$	Malo $R_c < 100$
Tipo IV	Malo $D_c > D_a$	Malo $R_c < 100$

Fuente: Método CONREVIAL,2015

Figura N°. 17: Características del pavimento de acuerdo al cuenco de deflexiones

Tipo	Cuenco de deflexiones	Curva medida	Pavimento evaluado
I		Curva extensa Poco Profunda	Buen Pavimento Buena Subrasante
II		Curva extensa Profunda	Buen Pavimento Mala Subrasante
III		Curva corta Poco Profunda	Mal Pavimento Buena Subrasante
IV		Curva corta Profunda	Mal Pavimento Mala Subrasante

Fuente: Método CONREVIAl,2015

### 2.1.1. Técnicas de recolección de datos y análisis de datos

Los datos se los han tomado directamente en campo, para luego ser procesados de acuerdo con la metodología Conreval.

## **CAPÍTULO 3. HIPOTESIS**

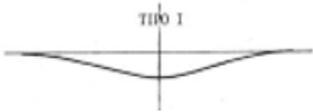
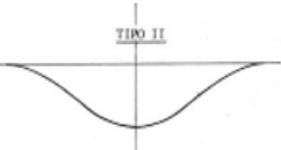
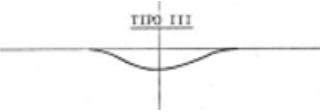
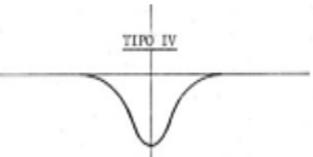
### **3.1. Formulación de la Hipótesis**

El comportamiento estructural del pavimento flexible de la vía de Evitamiento sur es bueno en función de las deflexiones medidas con la viga Benkelman

### **3.2. Operacionalización de variables**

- **Variable dependiente**
  - Comportamiento estructural
  
- **Variable Independiente**
  - Las deflexiones

Tabla 4: Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
DEFLEXIONES	Deformación vertical que experimenta un pavimento, cuando está actuando sobre él, una carga estandarizada	Deformación vertical	mm
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.	Respuesta del conjunto pavimento subrasante ante la aplicación de las cargas del tránsito.	Capacidad de recuperación	<b>Curva extensa y poco profunda</b> 
			<b>Curva extensa profunda</b> 
			<b>Curva corta y poca profunda</b> 
			<b>Curva corta y profunda</b> 

Fuente: Elaboración Propia

## **CAPÍTULO 4. MATERIAL Y METODOS**

### **4.1. Tipo de diseño de investigación**

#### **Tipo de investigación:**

Descriptiva - Aplicativa.

### **4.2. Material**

#### **4.2.1.1. Unidad de estudio**

Los pavimentos de la vía de evitamiento sur que comprende el tramo desde el ovalo musical hasta la avenida industrial

#### **4.2.2. Población**

Pavimentos flexibles de las vías de la ciudad de Cajamarca

#### **4.2.3. Muestra (muestreo o selección)**

La muestra elegida por conveniencia para la evaluación del comportamiento estructural, está constituida por el pavimento flexible de la vía de evitamiento sur que comprende el tramo desde el ovalo musical hasta la avenida industrial, haciendo un total de 2375 metros de longitud con un ancho promedio total de 6.60 metros por cada calzada.

### **4.3. Métodos**

#### **4.3.1. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos**

La recolección de datos se obtendrá por medio de mediciones de las deflexiones con la viga Benkelman cada 50 metros a lo largo de las dos calzadas de la vía en estudio.

Luego, para realizar la evaluación estructural del pavimento de la vía de Evitamiento Sur entre el Ovalo Musical y la Av. Industrial se empleará el modelo de Hogg

#### 4.3.2. Instrumentos

**Viga Benkelman:** De doble brazo con sus correspondientes diales Registradores, debidamente calibrada.

*Figura N°. 18; Viga Benkelman*



Fuente: Elaboración Propia,2016

**Vehículo de carga:** Camión volquete (C2) que lleve una carga de prueba de 80 kN (18000/lbf) en sus ruedas duales en el eje simple posterior y con presión de inflado de 75 a 85 psi, las cuales tienen una cubierta de 10" x 20" y una distancia entre los puntos medios de las bandas de rodamiento igual a 32 cm.

*Figura N°. 19: Camión volquete (C2)*



Fuente: Elaboración Propia,2016

**Odómetro:** Instrumento manual que permite medir longitudes para la ubicación de los puntos a evaluar.

*Figura N°. 20: Odómetro*



Fuente: Elaboración Propia,2016

*Figura N°. 21: Medidor de Presión*



Fuente: Elaboración Propia,2016

**Balanza:** para pesaje del camión.

*Figura N°. 22: Balanza de 100 Ton.*



Fuente: Elaboración Propia,2016

**Termómetro:** para medición de temperaturas.

*Figura N°. 23: Termómetro: para medición de temperaturas.*



Fuente: Elaboración Propia,2016

### 4.3.3. Procedimiento para la recolección de datos.

#### a. Aforo de Vehículos

La contabilización de los vehículos se los realizó en forma manual, desde el día lunes hasta el domingo

#### b. Distribución de tráfico total por carril

Al número promedio diario de vehículos que pasan por la sección de la vía, en ambas direcciones se lo multiplica por el factor de distribución carril y por el factor de dirección, para obtener el Transito promedio diario semanal en el carril de diseño. El factor de distribución se puede obtener de la Tabla N° 10 y es recomendable usar el valor promedio del rango mostrado en la tabla.

*Tabla 5: Factores de distribución carril*

N° carriles en 1 direccion	%ESAL en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Fuente: AASHTO, 1993.

#### c. Procedimiento para medir las deflexiones utilizando la viga Benkelman

- **Secuencia del procedimiento de campo**

Para medir las deflexiones en la superficie del pavimento, se usará la viga Benkelman, la cual es un instrumento que funciona según el principio de una palanca, uno de sus extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con un deformímetro de precisión, con dial de lecturas graduado en centésimas de milímetro.

Dependiendo de la relación de brazos del equipo y de la factibilidad que el dial proporcione la verdadera magnitud de las medidas, en forma automática, se establece si es necesario corregir o no las lecturas.

La carga de ensayos del orden de 18,000 libras (8,200 kg), las proporciona el eje posterior simple de llanta doble de un camión. La presión de inflado de las llantas debe verificarse en 80 psi (5.6 kg/cm<sup>2</sup>).

Eventualmente la carga usada en los ensayos puede tener una variación en el orden de +/- 1%.

- a) El punto del pavimento a ser ensayado deberá ser marcado convenientemente con una línea transversal al camino. Sobre dicha línea será localizado el punto de ensayo a una distancia prefijada del borde. Este punto de ensayo debe, además, colocarse a una distancia prefijada al borde del pavimento, como se indica en la siguiente Tabla.

*Tabla 6: Tabla de distancias para ensayos.*

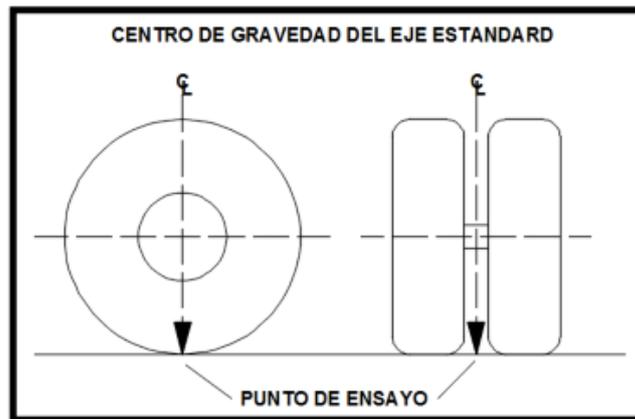
<b>ANCHO DE CARRIL</b>	<b>DISTANCIA DEL PUNTO DEL ENSAYO DESDE EL BORDE DEL PAVIMENTO (m.)</b>
2.70 m.	0.45
3.00 m.	0.60
3.30 m.	0.75
3.60 m. o más	0.90

Fuente: García Espinosa 2009

- b) La rueda dual externa deberá ser colocada sobre el punto seleccionado, quedando este ubicado entre ambas llantas. Para la correcta ubicación de la misma es conveniente colocar en la parte trasera externa del camión una guía vertical en correspondencia con el eje de carga; desplazando suavemente el camión, se hace coincidir la guía vertical con la línea transversal indicada en el paso número I, de modo que simultáneamente el punto que entre ambas llantas

de la rueda dual y que coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver Fig. 12). para toda esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3" alrededor del punto.

Figura N°. 24: Ubicación del centro de gravedad del eje posterior

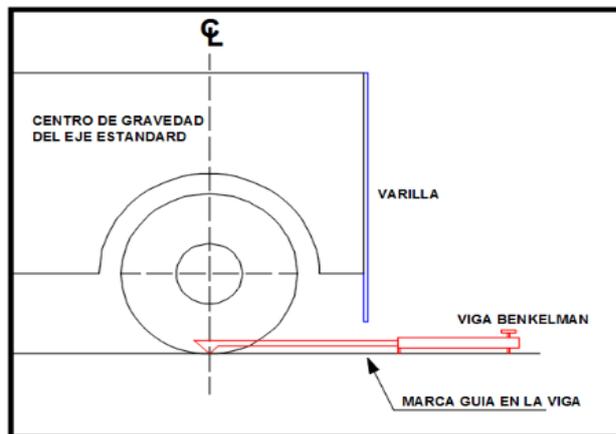


Fuente: García Espinosa 2009

- c) Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del brazo móvil (del primer brazo de mayor longitud, el caso sea doble) coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las cubiertas de las llantas de la rueda dual. Dado que eso último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación:

Se coloca la viga en la posición como estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir igualmente, haciendo uso de una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad, tomando como punto de referencia la varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver Fig. 13), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.

Figura N°. 25: Alineamiento del Extremo de la Viga Benkelman con el Centro de las Llantas.



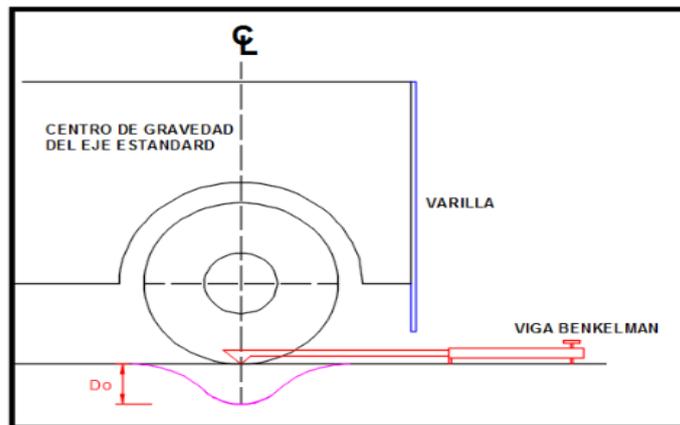
Fuente: García Espinosa 2009

- d) Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la guía vertical y la marca inicial, se verificará que esta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.
- e) Se retira o liberan los seguros del o brazos móviles y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que el o los brazos móviles de medición quede en contacto con el vástago del o los diales.
- f) Se ajusta el dial de modo que su vástago tenga un recorrido libre entre 4 y 6 mm (4 o 6 vueltas). Se gira la esfera del dial del extensómetro, hasta que la aguja quede en cero y se verificara la lectura golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la viga. Girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta obtener la posición cero (0).

El ensayo comenzara cuando se compruebe que dicha lectura permanece constante, asegurando el equilibrio del pavimento bajo carga. Se da por estabilizada la deformación producida por la carga, cuando la lectura inicial varía en 0.01 mm/minuto o menos.

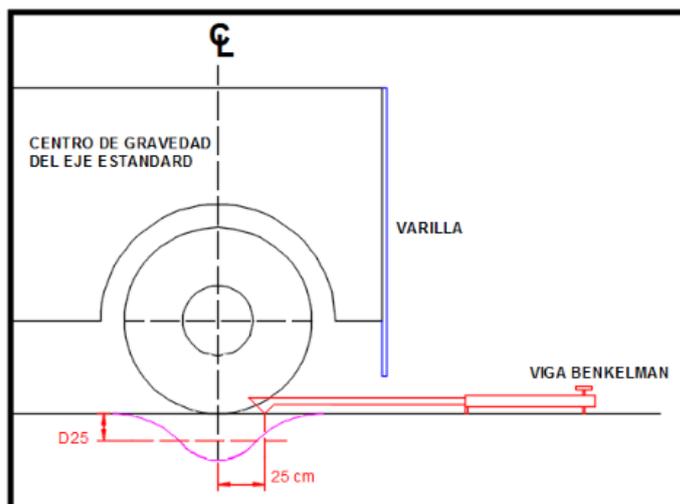
Establecida la lectura inicial en cero, se hace avanzar suave y lentamente el camión procediéndose a tomar las lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con la primera, segunda y demás marcas adicionales (Fig.14.), y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo hasta una distancia de 4 o 5 m. Aproximadamente en que el indicador del dial ya no tenga movimiento, registro que corresponde al punto de referencia con deflexión cero.

Figura N°. 26: Posición inicial ( $D_0$  = Deflexión máxima).



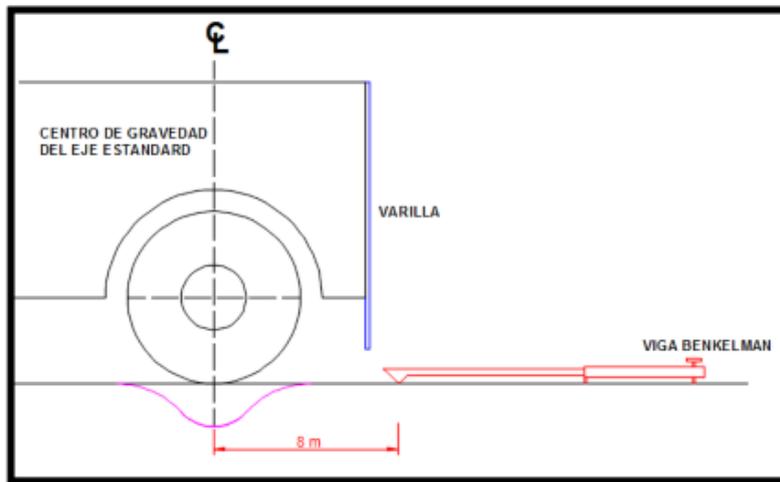
Fuente: García Espinosa 2009

Figura N°. 27: Posición a 25cm ( $D_{25}$ ).



Fuente: García Espinosa 2009

Figura N°. 28: Posición final ( $D = 0$ ).



Fuente: García Espinosa 2009

- g) Con el fin de medir la temperatura del pavimento se practica un orificio (antes de comenzar el ensayo y simultáneamente con el trazado de la línea) cuyas dimensiones serán: 4 cm de profundidad y 10 mm de diámetro, aproximadamente emplazado sobre la línea demarcada entre el punto de medición y el borde del pavimento.

Se llena con agua el orificio y, una vez pasado el tiempo prudencial para que el líquido adquiera la temperatura del pavimento (no menos de 10 minutos), se inserta el termómetro y se lee la temperatura antes del desplazamiento del camión.

- h) Para detectar deformación plástica entre los neumáticos de la rueda dual del camión o verificación del descenso de las patas de la viga se procede según lo dispuesto en la norma o especificación MTC E 1002-2000, el cual se adjuntará en los anexos.

Para la realización de esta rutina de medición en campo será necesario del concurso de tres operadores: un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso cuando las varillas adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga.



➤ *Unidades de Muestra U-01*

PROGRESIVA: Km 0+000					
Ancho de Calzada	:	7.40 m	Relación de brazos	:	4
Espesor de capa de rodadura	:	3.81 cm	Temperatura pavimento	:	26°C
Lecturas (x10 <sup>-2</sup> mm)					
L.inicial		L25	L50	L75	L. final
Deflexiones (x10 <sup>-2</sup> mm)					
D.inicial		D25	D50	D75	D. final
Deflexiones Corregidas (x10 <sup>-2</sup> mm)					
F <sub>Ct</sub> =				F <sub>ce</sub> =	
D.inicial		D25	D50	D75	D. final
Radio de Curvatura					
					R <sub>c</sub> =

Fuente: Elaboración Propia,2016

➤ *Interpretación de resultados*

RESULTADOS								
MUESTRA N°	PROGRESIVA		DEFLEXIONES					RADIO DE CURVATURA
	Km	Sentido	D0	D25	D50	D75	D.r	

Fuente: Elaboración Propia,2016

➤ *Evaluación de los Parámetros*

Muestra N°	Progresiva (Km)	Deflexión máxima (x10 <sup>-2</sup> mm)	Deflexión mínima (x10 <sup>-2</sup> mm)	Condición subrasante	Radio de Curvatura (m)	Radio de Curvatura mínimo (m)	Condición del Pavimento

Fuente: Elaboración Propia,2016

## CAPÍTULO 5. DESARROLLO

### 5.1. Ubicación del tramo de estudio

#### 5.1.1. Ubicación Política

País : Perú  
 Región : Cajamarca  
 Departamento : Cajamarca  
 Provincia : Cajamarca  
 Distrito : Cajamarca

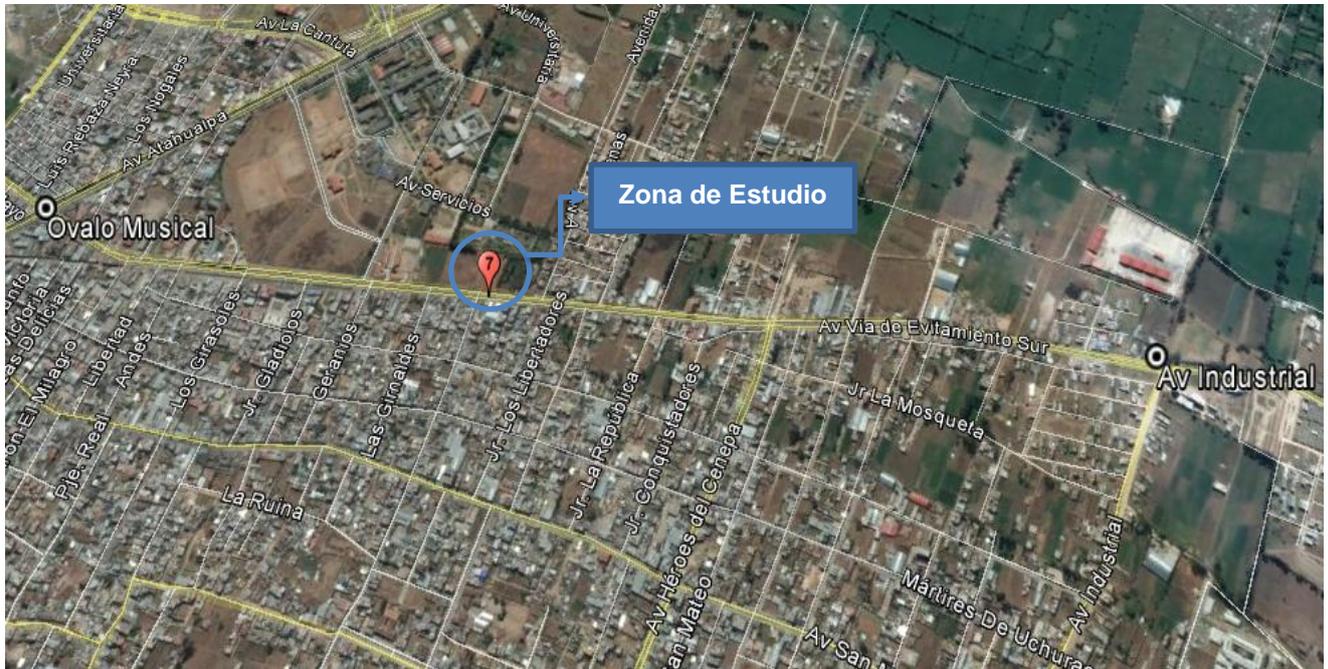
#### 5.1.2. Ubicación Geográfica

Tabla 7: Ubicación geográfica

Punto	Progresiva (Km)	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM			Elevación (msn m)
		Longitud	Latitud	Este (m)	Norte (m)	Zona	
Ovalo Musical	Km 0 +00 m	78°30' 9"O	7°9' 57"S	775828	9207168	17M	2698
Av. Industrial	Km02+475 m	78°29' 54"O	7°10' 44.7S"	777686	9205691	17M	2669

**Fuente:** Elaboración Propia, 2016

Figura N°. 29: Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Google Earth, 2016

## 5.2. Clasificación de la vía

- ✓ **Según su jerarquía:** Sistema Nacional (PE-08 B).
- ✓ **De acuerdo a su demanda:** Autopista de Segunda Clase (Ver anexo 3).
- ✓ **Según Condiciones Orográficas:** Tipo 1.

## 5.3. Características de la vía a evaluar.

### 5.3.1. Características Geométricas

Tabla 8: Descripción geométrica de la vía

N° de calzadas	N° de carriles por calzada	Bermas laterales		Ancho de carriles	Ancho de corona		Separador central
		N°	Ancho		N°	Distancia	
2	2	2	0.9	3.3	2	7.5	1.6

Fuente: Elaboración Propia, 2016

Figura N°. 30: Sección típica de la vía



**Fuente:** Elaboración Propia, 2016

**5.3.2. Tipo de suelo de fundación:** Predominantemente son CL (Arcilla de baja plasticidad)

**5.3.3. Trafico de diseño:**  $3.35 * 10^6$  EALS

**5.3.4. Período de diseño:** 10 años.

**5.3.5. Estructura del pavimento.**

Carpeta asfáltica : 7.5 Cm  
Base Granular : 15 cm  
Sub Base Granular : 20 cm  
Mejoramiento subrasante: 0.80 cm mínimo

**5.3.6. Año de Construcción y puesta en servicio: 2002**

**5.4. Determinación del IMD actual**

Se realizó la contabilización de vehículos desde el lunes 3 de octubre hasta el domingo 9 de octubre

**COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO  
FLEXIBLE EN LA VIA DE EVITAMIENTO SUR – CAJAMARCA  
UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON LA VIGA  
BENKELMAN**


**I. Datos Generales**

Tesis	Nivel de Servicio de la Av. Atahualpa, tramo Cajamarca-Baños del Inca, en base a la tasa de flujo vehicular, mediante la metodología del HCM,2016
Tesista	Cubas De La Torre Rosa Beatriz
Distrito	Cajamarca
Carretera	Av. Via de Evitamiento Sur
Tramo	Cajamarca-Baños del Inca
Ficha	Determinación de la tasa de flujo vehicular
Fecha	03/10/2016 - 09/10/2016

**II. Datos**

DIA	CARRIL (direccion entrada a Cajamarca)	HORA	TIPO VEHICULO	Mototaxi	Ac	Ap	Combi	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	T <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	T <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	T <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	T <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	T <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> R <sub>3</sub>	MAQUINARIA PESADA		
LUNES	DERECHA (de SUR A NORTE, carril que pasa al costado de la puerta de la U)	6:30 - 8:00 a.m		724	503	174	39	9	3		85	21								2	11	1				
		8:00 - 11:00 a.m		580	357	270	28	2	2	0		87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m		673	452	244	61	7	8			89	27	3							9					2
		1:30-5:30 p.m		912	695	462	62	8	0	0		151	30	2	0	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0	2
		5:30 - 8:00 p.m		690	448	316	87	13	2	1		81	5			3						3				3
					3579	2455	1466	277	39	15	1	493	96	5	1	5	3	0	1	4	42	2	0	0	8	
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m		816	456	227	15	20	1			129	12				1				3					
		8:00 - 11:00 a.m		595	296	228	44	4	0	0		71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m		636	398	267	35	9	8			59	28						10		5					
		1:30-5:30 p.m		1207	946	340	77	7	2	3		116	31	1	1	0	0	0	0	0	1	22	0	0	0	1
5:30 - 8:00 p.m			804	706	233	57	23	8			112	15								1	19					
<b>TOTAL</b>				<b>4058</b>	<b>2802</b>	<b>1295</b>	<b>228</b>	<b>63</b>	<b>19</b>	<b>3</b>	<b>487</b>	<b>101</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>55</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>		
MARTES	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m		759	415	205	48	13	2		67	20	2		2					7					3	
		8:00 - 11:00 a.m		580	357	270	28	2	2	0		87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0	1	
		11:00 - 1:30 p.m		629	361	284	39	5	3			109	14								11	1				
		1:30-5:30 p.m		912	695	462	62	8	0	0		151	30	2	0	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0	2
		5:30 - 8:00 p.m		533	411	299	88	15	1	1		54	13	1		2					5					
					3413	2239	1520	265	43	8	1	468	90	5	1	6	3	0	1	2	42	2	0	0	6	
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m		753	505	163	43	24	1			50	18								1					
		8:00 - 11:00 a.m		595	296	228	44	4	0	0		71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m		645	443	275	53	2	2			133	24	2		1					5					
		1:30-5:30 p.m		1207	946	340	77	7	2	3		116	31	1	1	0	0	0	0	0	1	22	0	0	0	1
5:30 - 8:00 p.m			617	491	288	53	12	2			55	18								2	17					
<b>TOTAL</b>				<b>3817</b>	<b>2681</b>	<b>1294</b>	<b>270</b>	<b>49</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>425</b>	<b>106</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>51</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>		

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO  
FLEXIBLE EN LA VIA DE EVITAMIENTO SUR – CAJAMARCA  
UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON LA VIGA  
BENKELMAN

MIÉRCOLES	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m	925	485	264	66	5	3	0	116	28	1						17				4	
		8:00 - 11:00 a.m	580	357	270	28	2	2	0	87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m	751	413	280	66	8			105	22	1							14	1	1	1	
		1:30 - 5:30 p.m	912	695	462	62	8	0	0	151	30	2	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0	2
		5:30 - 8:00 p.m	588	478	178	300	8	6		59	16						2		12		2		4
			3756	2428	1454	522	31	11	0	518	109	4	1	2	3	0	3	2	62	2	3	1	11
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m	950	539	336	79	8	2		81	12		4						11		1		1
		8:00 - 11:00 a.m	595	296	228	44	4	0	0	71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m	782	476	301	60	6			92	23							1	10	2	1		
		1:30 - 5:30 p.m	1207	946	340	77	7	2	3	116	31	1	1	0	0	0	0	1	22	0	0	0	1
		5:30 - 8:00 p.m	587	340	159	222	8		2	52	13											10	1
TOTAL		4121	2597	1364	482	33	4	5	412	94	1	5	0	0	0	0	2	49	2	2	10	4	
JUEVES	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m	437	289	212	14	7	4		77	28		3		3				4				4
		8:00 - 11:00 a.m	580	357	270	28	2	2	0	87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m	818	412	241	4	12	16		95	27							1	11				
		1:30 - 5:30 p.m	912	695	462	62	8	0	0	151	30	2	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0	2
		5:30 - 8:00 p.m	560	536	277	40	50	41		95	51			9	3			3	12				
			3307	2289	1462	148	79	63	0	505	149	2	4	11	9	0	1	6	46	1	0	0	7
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m	690	303	313	51	9	7		60	16						1		7				4
		8:00 - 11:00 a.m	595	296	228	44	4	0	0	71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	1
		11:00 - 1:30 p.m	873	502	245	10	43	53		96				2	1				10				
		1:30 - 5:30 p.m	1207	946	340	77	7	2	3	116	31	1	1	0	0	0	0	1	22	0	0	0	1
		5:30 - 8:00 p.m	423	330	255	17	41	27			111				3				15				1
TOTAL		3788	2377	1381	199	104	89	3	343	173	1	1	2	4	0	1	1	60	0	0	0	7	

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO  
FLEXIBLE EN LA VIA DE EVITAMIENTO SUR – CAJAMARCA  
UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON LA VIGA  
BENKELMAN

VIERNES	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m	860	438	263	39	10	2		86	34	2				2		2	12		2	3		2		
		8:00 - 11:00 a.m	580	357	270	28	2	2	0		87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m																								
		1:30-5:30 p.m	912	695	462	62	8	0	0		151	30	2	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0		2	
		5:30 - 8:00 p.m	506	351	203	35	16				72	14	1						1	4						
			2858	1841	1198	164	36	4	0		396	91	5	1	2	3	2	1	5	35	1	2	3		5	
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m	908	573	220	44	9	2			69	34	3							3					4	
		8:00 - 11:00 a.m	595	296	228	44	4	0	0		71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m	703	483	278	35	12	1			103	32	1							10	1				1	
		1:30-5:30 p.m	1207	946	340	77	7	2	3		116	31	1	1	0	0	0	0	1	22	0	0	0		1	
5:30 - 8:00 p.m		520	360	205	58	15	1			65	28								11					1		
TOTAL		3933	2658	1271	258	47	6	3		424	140	5	1	0	0	0	0	1	52	1	0	0		8		
SÁBADO	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m	730	478	128	63	15	2	0		91	34	1	0	2	1	0	0	0	5	0	0	0		4	
		8:00 - 11:00 a.m	580	357	270	28	2	2	0		87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m	521	354	305	31	5	1	0		58	21	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	9		0	
		1:30-5:30 p.m	912	695	462	62	8	0	0		151	30	2	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0		2	
		5:30 - 8:00 p.m	538	422	263	72	14	1	1		55	13	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0		0	
			3281	2306	1428	256	44	6	1		442	111	4	1	6	6	0	1	2	26	1	0	9		7	
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m	735	473	176	89	2	0	0		68	28	1	0	5	3	0	0	0	1	0	0	1		3	
		8:00 - 11:00 a.m	595	296	228	44	4	0	0		71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m	632	411	252	48	5	1	0		51	19	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	5		0	
		1:30-5:30 p.m	1207	946	340	77	7	2	3		116	31	1	1	0	0	0	0	1	22	0	0	0		1	
5:30 - 8:00 p.m		567	502	238	31	10	0	0		67	30	0	0	1	2	0	0	2	7	0	0	0		1		
TOTAL		3736	2628	1234	289	28	3	3		373	123	2	1	6	5	0	0	3	38	0	0	6		6		
DOMINGO	DERECHA (de SUR A NORTE)	6:30 - 8:00 a.m		695	142		10	3		21	8			5					4							
		8:00 - 11:00 a.m	580	357	270	28	2	2	0		87	13	0	1	2	3	0	0	1	4	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m		311	238	45	24				13	35				3			8	5						
		1:30-5:30 p.m	912	695	462	62	8	0	0		151	30	2	0	0	0	0	1	1	15	1	0	0		2	
		5:30 - 8:00 p.m		525	205	44	10		1		37	6								7						
			1492	2583	1317	179	54	5	1		309	92	2	1	7	6	0	1	10	35	1	0	0		3	
	IZQUIERDA (de norte a sur)	6:30 - 8:00 a.m		259	125		6				30	6								2						
		8:00 - 11:00 a.m	595	296	228	44	4	0	0		71	15	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0		1	
		11:00 - 1:30 p.m		384	280	51	5				9	20				1			1	5						
		1:30-5:30 p.m	1207	946	340	77	7	2	3		116	31	1	1	0	0	0	0	1	22	0	0	0		1	
5:30 - 8:00 p.m			428	322	50	4				27	3								2							
TOTAL		1802	2313	1295	222	26	2	3		253	75	1	1	0	1	0	0	2	37	0	0	0		2		
TOTAL CARRIL 2 IZQUIERDA (7 días acumulados)			28834	20511	10600	2225	389	145	24	3210	908	19	12	14	14	0	12	18	384	5	2	16		39		
TOTAL CARRIL 1 DERECHA (7 días acumulados)			21686	16141	9845	1811	326	112	4	3131	738	27	10	39	33	2	9	31	288	10	5	13		47		
IMDS (PARCIAL) CARRIL 2 IZQUIERDA			4119.142857	2930.143	1514.29	317.8571	55.571	20.7143	3.42857	458.57143	129.7	2.7143	1.7143	2	2	0	1.714	2.5714	54.8571	0.7143	0.2857	2.286		5.571428571		
IMDS (PARCIAL) CARRIL 1 DERECHA			3098	2305.857	1406.43	258.7143	46.571	16	0.57143	447.2857143	105.4	3.8571	1.4286	5.5714	4.714	0.286	1.286	4.4286	41.1429	1.4286	0.7143	1.857		6.714285714		
IMDS (TOTAL) CARRIL 2 IZQUIERDA			5501.143																							
IMDS (TOTAL) CARRIL 1 DERECHA			4653.5714																							

#### **5.4.1. CALCULO DEL NUMERO DE EALS PROYECTADOS AL 2017**

N° EALS<sub>2002</sub>= 3.35 X 10<sup>6</sup> EALS (Fuente Expediente Técnico)

N° EALS<sub>2016</sub>= 5 096 610 EALS

#### **5.5. Medición de las deflexiones**

**5.5.1.** Se midieron las deflexiones, cuyos resultados se muestran en las tablas N°  
10,11

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS

A continuación, se presenta un cuadro resumen (Tabla 10), de los datos necesarios para la evaluación del pavimento; así como para la elaboración del deflectograma correspondiente

Tabla 9: Resumen de Resultados

RESULTADOS								
MUESTRA N°	PROGRESIVA		DEFLEXIONES					RADIO DE CURVATURA
	Km	Sentido	D0	D25	D50	D75	Df	
1	0+000	IDA	86	73	64	51	0	240
2	0+050	IDA	133	120	111	94	0	240
3	0+100	IDA	124	111	69	64	0	240
4	0+150	IDA	129	111	90	69	0	174
5	0+200	IDA	107	99	86	69	0	391
6	0+250	IDA	107	99	86	81	0	391
7	0+300	IDA	81	77	43	34	0	781
8	0+350	IDA	124	120	107	86	0	781
9	0+400	IDA	141	137	116	103	0	781
10	0+450	IDA	129	124	107	90	0	625
11	0+500	IDA	150	146	120	94	0	781
12	0+550	IDA	81	77	64	51	0	781
13	0+600	IDA	154	150	124	99	0	781
14	0+650	IDA	133	129	103	90	0	781
15	0+700	IDA	141	137	116	103	0	781
16	0+750	IDA	149	144	127	115	0	625
17	0+800	IDA	140	136	119	110	0	781
18	0+850	IDA	127	123	106	98	0	781
19	0+900	IDA	136	132	110	102	0	781
20	0+950	IDA	81	76	64	51	0	625
21	1+000	IDA	140	136	123	110	0	781
22	1+050	IDA	81	76	64	51	0	625
23	1+100	IDA	88	84	67	59	0	781
24	1+150	IDA	131	126	105	93	0	625
25	1+200	IDA	143	139	118	105	0	781
26	1+250	IDA	143	139	122	105	0	781
27	1+300	IDA	131	126	105	93	0	625
28	1+350	IDA	139	135	118	105	0	781
29	1+400	IDA	173	160	110	93	0	240

RESULTADOS								
MUESTRA N°	PROGRESIVA		DEFLEXIONES					RADIO DE CURVATURA
	Km	Sentido	D0	D25	D50	D75	Df	
30	1+450	IDA	138	134	109	92	0	781
31	1+500	IDA	142	138	113	84	0	781
32	1+550	IDA	113	109	92	75	0	781
33	1+600	IDA	146	138	109	100	0	391
34	1+650	IDA	163	150	121	109	0	240
35	1+700	IDA	150	138	121	104	0	260
36	1+750	IDA	134	129	109	96	0	625
37	1+800	IDA	138	121	100	92	0	184
38	1+850	IDA	108	99	79	70	0	347
39	1+900	IDA	116	112	95	87	0	781
40	1+950	IDA	120	116	99	83	0	781
41	2+000	IDA	103	99	82	66	0	781
42	2+050	IDA	159	155	114	90	0	781
43	2+100	IDA	117	113	97	81	0	781
44	2+150	IDA	70	66	49	33	0	781
45	2+200	IDA	139	126	110	102	0	240
46	2+250	IDA	116	112	96	80	0	781
47	2+300	IDA	118	114	81	73	0	781
48	2+350	IDA	139	134	102	86	0	625
49	2+400	IDA	94	90	73	65	0	781
50	2+450	IDA	87	83	66	58	0	781
51	2+475	IDA	40	36	20	8	0	781
52	0+000	RETORNO	77	73	48	24	0	781
53	0+050	RETORNO	93	89	73	57	0	781
54	0+100	RETORNO	66	62	45	37	0	781
55	0+150	RETORNO	44	40	24	12	0	781
56	0+200	RETORNO	77	73	57	53	0	781
57	0+250	RETORNO	65	61	44	20	0	781
58	0+300	RETORNO	48	44	24	12	0	781
59	0+350	RETORNO	53	48	32	24	0	625
60	0+400	RETORNO	65	61	44	32	0	781
61	0+450	RETORNO	53	44	24	16	0	347
62	0+500	RETORNO	65	53	28	20	0	260
63	0+550	RETORNO	69	57	32	24	0	260
64	0+600	RETORNO	65	53	20	8	0	260
65	0+650	RETORNO	69	61	40	24	0	391

RESULTADOS								
MUESTRA N°	PROGRESIVA		DEFLEXIONES					RADIO DE CURVATURA
	Km	Sentido	D0	D25	D50	D75	Df	
66	0+700	RETORNO	73	69	53	36	0	781
67	0+750	RETORNO	69	61	24	16	0	391
68	0+850	RETORNO	52	40	24	16	0	260
69	0+900	RETORNO	56	44	28	20	0	260
70	0+950	RETORNO	56	52	36	20	0	781
71	1+000	RETORNO	44	36	24	16	0	391
72	1+050	RETORNO	44	40	24	16	0	781
73	1+100	RETORNO	56	36	20	12	0	156
74	1+150	RETORNO	80	68	52	44	0	260
75	1+200	RETORNO	44	40	24	16	0	781
76	1+250	RETORNO	44	40	24	16	0	781
77	1+300	RETORNO	40	36	20	12	0	781
78	1+350	RETORNO	64	60	36	28	0	781
79	1+400	RETORNO	56	44	20	12	0	260
80	1+450	RETORNO	83	72	48	32	0	284
81	1+500	RETORNO	68	56	32	24	0	260
82	1+550	RETORNO	44	40	16	8	0	781
83	1+600	RETORNO	71	67	43	28	0	781
84	1+650	RETORNO	35	32	16	8	0	1042
85	1+700	RETORNO	55	43	28	20	0	260
86	1+750	RETORNO	60	52	24	16	0	391
87	1+800	RETORNO	72	68	44	28	0	781
88	1+850	RETORNO	72	60	28	16	0	260
89	1+900	RETORNO	64	56	28	20	0	391
90	1+950	RETORNO	68	56	32	24	0	260
91	2+000	RETORNO	36	32	20	12	0	781
92	2+050	RETORNO	60	56	24	16	0	781
93	2+100	RETORNO	96	84	52	44	0	260
94	2+150	RETORNO	40	36	20	12	0	781
95	2+200	RETORNO	64	60	40	24	0	781
96	2+250	RETORNO	68	64	48	40	0	781
97	2+300	RETORNO	32	24	16	0	0	391
98	2+350	RETORNO	44	32	24	16	0	260
99	2+400	RETORNO	40	28	24	16	0	260
100	2+450	RETORNO	44	36	28	32	0	391
101	2+475	RETORNO	93	86	66	54	0	596

Fuente: Elaboración Propia, 2016

### 6.1.1. CALCULO DE LOS PARÁMETROS

1. **Deflexión Promedio:** Usamos ecuación

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{101} D_i}{101}$$

$$\bar{D} = 92.23 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

2. **Deflexión característica:** Usamos la ecuación

$$D_C = \bar{D} + t\sigma$$

3. **Desviación estándar:** Usamos la ecuación

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n - 1)}}$$

$$\sigma = 20.18 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Si:  $\bar{D} = 89.06$ ;  $t = 1.645$  y  $\sigma = 20.18$ , entonces:

$$DC = 92.23 + 1.645 \times 20.18$$

$$DC = 125.426 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

4. **Deflexión admisible:** Usamos la ecuación

*Ecuación 11: Deflexión admisible*

$$D_a = \left( \frac{1.15}{N_{18}} \right)^{1/4}$$

$N_{18}$  se obtiene del Estudio de tránsito

$$D_a = \left( \frac{1.15}{3.35} \right)^{1/4}$$

$$D_a = 0.765$$

$$D_a = 0.77 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

**5. Deflexión crítica:** Usamos la ecuación

*Ecuación 12: Deflexión crítica*

$$D_{CR} = \left( \frac{1.90}{N_{18}} \right)^{1/5.3}$$

$$D_{cr} = \left( \frac{1.90}{5.1} \right)^{1/5.3}$$

$$D_{cr} = 0.83$$

$$D_{cr} = 83 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

### 6.1.2. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS:

En la tabla 11, se analizó la condición de cada prueba tomada en la vía de estudio comparada con los datos propuestos por el método CONREVIAL

*Tabla 10 : Evaluación de los Parámetros*

PROGRESIVA (km)	DEFLEXIÓN MAXIMA	DEFLEXION ADMISIBLE	CONDICION SUBRASANTE	RADIO DE CURVATURA	RADIO DE CURVATURA MINIMO	CONDICION DE PAVIMENTO
0+000	86	77	MALO	240	100	BUENO
0+050	133	77	MALO	240	100	BUENO
0+100	124	77	MALO	240	100	BUENO
0+150	129	77	MALO	174	100	BUENO
0+200	107	77	MALO	391	100	BUENO
0+250	107	77	MALO	391	100	BUENO
0+300	81	77	MALO	781	100	BUENO
0+350	124	77	MALO	781	100	BUENO
0+400	141	77	MALO	781	100	BUENO
0+450	129	77	MALO	625	100	BUENO

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO  
FLEXIBLE EN LA VIA DE EVITAMIENTO SUR – CAJAMARCA  
UTILIZANDO LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON LA VIGA  
BENKELMAN

PROGRESIVA (km)	DEFLEXIÓN MAXIMA	DEFLEXION ADMISIBLE	CONDICION SUBRASANTE	RADIO DE CURVATURA	RADIO DE CURVATURA MINIMO	CONDICION DE PAVIMENTO
0+500	150	77	MALO	781	100	BUENO
0+550	81	77	MALO	781	100	BUENO
0+600	154	77	MALO	781	100	BUENO
0+650	133	77	MALO	781	100	BUENO
0+700	141	77	MALO	781	100	BUENO
0+750	149	77	MALO	625	100	BUENO
0+800	140	77	MALO	781	100	BUENO
0+850	140	77	MALO	781	100	BUENO
0+900	127	77	MALO	781	100	BUENO
0+950	136	77	MALO	781	100	BUENO
1+000	81	77	MALO	625	100	BUENO
1+050	140	77	MALO	781	100	BUENO
1+100	81	77	MALO	625	100	BUENO
1+150	88	77	MALO	781	100	BUENO
1+200	131	77	MALO	625	100	BUENO
1+250	143	77	MALO	781	100	BUENO
1+300	143	77	MALO	781	100	BUENO
1+350	131	77	MALO	625	100	BUENO
1+400	139	77	MALO	781	100	BUENO
1+450	173	77	MALO	240	100	BUENO
1+500	138	77	MALO	781	100	BUENO
1+550	142	77	MALO	781	100	BUENO
1+600	113	77	MALO	781	100	BUENO
1+650	146	77	MALO	391	100	BUENO
1+700	163	77	MALO	240	100	BUENO
1+750	150	77	MALO	260	100	BUENO
1+800	134	77	MALO	625	100	BUENO
1+850	138	77	MALO	184	100	BUENO
1+900	108	77	MALO	347	100	BUENO
1+950	116	77	MALO	781	100	BUENO
2+000	120	77	MALO	781	100	BUENO
2+050	103	77	MALO	781	100	BUENO
2+100	159	77	MALO	781	100	BUENO
2+150	117	77	MALO	781	100	BUENO
2+200	70	77	REGULAR	781	100	BUENO
2+250	139	77	MALO	240	100	BUENO
2+300	116	77	MALO	781	100	BUENO

PROGRESIVA (km)	DEFLEXIÓN MAXIMA	DEFLEXION ADMISIBLE	CONDICION SUBRASANTE	RADIO DE CURVATURA	RADIO DE CURVATURA MINIMO	CONDICION DE PAVIMENTO
2+350	118	77	MALO	781	100	BUENO
2+400	139	77	MALO	625	100	BUENO
2+450	94	77	MALO	781	100	BUENO
2+475	87	77	MALO	781	100	BUENO
0+000	40	77	BUENO	781	100	BUENO
0+050	77	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+100	93	77	MALO	781	100	BUENO
0+150	66	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+200	44	77	BUENO	781	100	BUENO
0+250	77	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+300	65	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+350	48	77	BUENO	781	100	BUENO
0+400	53	77	REGULAR	625	100	BUENO
0+450	65	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+500	53	77	REGULAR	347	100	BUENO
0+550	65	77	REGULAR	260	100	BUENO
0+600	69	77	REGULAR	260	100	BUENO
0+650	65	77	REGULAR	260	100	BUENO
0+700	69	77	REGULAR	391	100	BUENO
0+750	73	77	REGULAR	781	100	BUENO
0+850	69	77	REGULAR	391	100	BUENO
0+900	52	77	REGULAR	260	100	BUENO
0+950	56	77	REGULAR	260	100	BUENO
1+000	56	77	REGULAR	781	100	BUENO
1+050	44	77	BUENO	391	100	BUENO
1+100	44	77	BUENO	781	100	BUENO
1+150	56	77	REGULAR	156	100	MALO
1+200	80	77	MALO	260	100	BUENO
1+250	44	77	BUENO	781	100	BUENO
1+300	44	77	BUENO	781	100	BUENO
1+350	40	77	BUENO	781	100	BUENO
1+400	64	77	REGULAR	781	100	BUENO
1+450	56	77	REGULAR	260	100	BUENO
1+500	83	77	MALO	284	100	BUENO
1+550	68	77	REGULAR	260	100	BUENO
1+600	44	77	BUENO	781	100	BUENO
1+650	71	77	REGULAR	781	100	BUENO

PROGRESIVA (km)	DEFLEXIÓN MAXIMA	DEFLEXION ADMISIBLE	CONDICION SUBRASANTE	RADIO DE CURVATURA	RADIO DE CURVATURA MINIMO	CONDICION DE PAVIMENTO
1+700	35	77	BUENO	1042	100	BUENO
1+750	55	77	REGULAR	260	100	BUENO
1+800	60	77	REGULAR	391	100	BUENO
1+850	72	77	REGULAR	781	100	BUENO
1+900	72	77	REGULAR	260	100	BUENO
1+950	64	77	REGULAR	391	100	BUENO
2+000	68	77	REGULAR	260	100	BUENO
2+050	36	77	BUENO	781	100	BUENO
2+100	60	77	REGULAR	781	100	BUENO
2+150	96	77	MALO	260	100	BUENO
2+200	40	77	BUENO	781	100	BUENO
2+250	64	77	REGULAR	781	100	BUENO
2+300	68	77	REGULAR	781	100	BUENO
2+350	32	77	BUENO	391	100	BUENO
2+400	44	77	BUENO	260	100	BUENO
2+450	40	77	BUENO	260	100	BUENO
2+475	44	77	BUENO	391	100	BUENO

**Nota:** Se considera regular a las deflexiones menores que la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$  mm), pero mayor a  $50 \times 10^{-2}$  mm.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

De la tabla 11. se resumen en las tablas 12 y 13 que se muestran a continuación:

*Tabla 11: Resumen de resultados de deflexiones máximas*

Puntos de ensayo que sobrepasan la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$ mm)		Puntos que están cerca de la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$ mm)		Puntos que cumplen con la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$ mm)	
Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)
54	53	31	31	16	16

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

Tabla 12: Resumen de resultados de radios de curvatura

Puntos de ensayo que no cumplen con el radio de curvatura > 100m		Puntos de ensayo que si cumplen con el radio de curvatura > 100m	
Cantidad	Porcentaje (%)	Cantidad	Porcentaje (%)
0	0	101	100

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

De las tablas 12. y 13. se obtuvo:

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

**6.1.3 Resumen de resultados:** En la tabla 14 se presenta la comparación de los parámetros de evaluación del pavimento en estudio; en donde la deflexión característica es mayor a la deflexión admisible y el radio de curvatura promedio si cumple con el Radio mínimo establecido por el método CONREVIAL.

Tabla 13: Comparación de parámetros

PARAMETROS A EVALUAR		PARAMETROS Propuestos por el método CONREVIAL	
DEFLEXIÓN CARACTERISTICA (mm)	RADIO DE CURVATURA PROMEDIO (m)	DEFLEXIÓN ADMISIBLE (mm)	RADIO DE CURVATURA (m)
125.426 x 10 <sup>-2</sup> mm	589.93	77 x 10 <sup>-2</sup> mm	>100

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

## CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN

El objetivo general de este trabajo de investigación fue determinar el comportamiento estructural del pavimento flexible de la vía de Evitamiento Sur utilizando las deflexiones medidas con la viga Benkelman.

### 7.1. Análisis de Resultados

#### 7.1.1. Análisis del Tránsito.

Según el expediente técnico con el que se construyó esta vía, en la sección análisis del tráfico se tenía que en el año 2002 circulaban 3068 veh /día, cuya composición del tráfico era la siguiente:

- Automóviles, camionetas y combis : 2510 Veh/día
- Camiones de dos ejes : 484 veh/día
- Camiones de tres ejes : 22 veh/día
- Trayler y Semi tráiler : 52 veh/día.

Diseñándose para  $3.35 \times 10^6$  EALS

Número de EALS  $_{2016}=5\ 0960610$

Sin embargo, los aforos realizados por la vía indican que circulan 9465 veh/día, cuya composición vehicular es la siguiente:

- Automoviles Camionetas y Combis : 8133 veh/dia
- Buses de dos, tres y cuatro ejes : 136 veh/día
- Camiones de dos, tres y cuatro ejes : 1062 veh/día
- Trayler y Semi trayler : 122 veh/día

Obteniéndose que el número de EALS es de  $9.40 \times 10^6$  EALS

Al observar los Índices medios diarios, así como sus respectivas composiciones, el número de EALS, estos han crecido notablemente, lo que es una de las causas para la fatiga de la subrasante.

### **7.1.2. Análisis de las deflexiones.**

Según Carahuatay en su trabajo de investigación desarrollado en la carretera San Miguel San Pablo, obtiene una deflexión característica de 188.35 mm; una deflexión admisible de 1.08 mm y una deflexión crítica de 117 mm. Mientras que en el presente trabajo tales deflexiones son de  $125.43 \times 10^{-2}$  mm,  $77 \times 10^{-2}$  mm y  $74 \times 10^{-2}$  mm respectivamente, por lo que en ambos casos se ha determinado de que la estructura del pavimento no presenta un adecuado comportamiento estructural, en el caso de la carretera San Miguel San Pablo, mientras que en la Vía de Evitamiento se tiene un comportamiento de regular calidad, esto nos da una idea clara de que el pavimento de la carretera San Pablo San Miguel se encuentra con mayor cantidad de fallas.

Se ha determinado además que la subrasante de la carretera San pablo San Miguel corresponde a una subrasante buena y un pavimento malo, en el caso de la carretera en estudio la subrasante se encuentra fatigada tiene una respuesta mala y el pavimento está en regular calidad, probablemente ello se deba a las actividades de conservación que se han venido dando periódicamente.

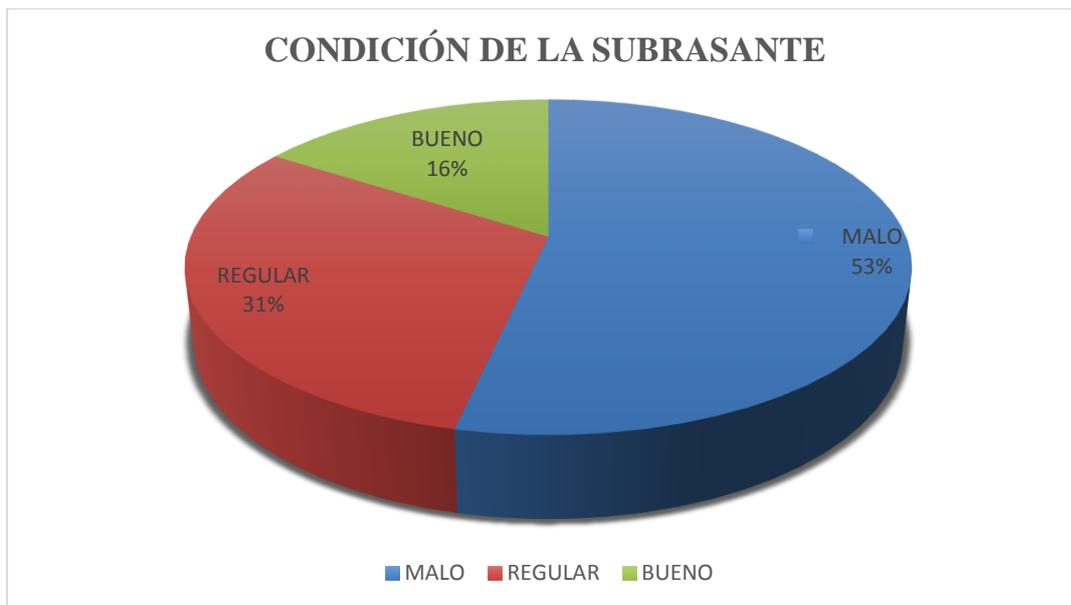
#### **7.1.2.1. Comportamiento de la subrasante:**

Analizado el cuenco de deflexiones se puede notar claramente de que la subrasante a lo largo de las dos calzadas tienen un mal comportamiento, debido a la profundidad del cuenco de deflexiones

La Grafica N°1 muestra el porcentaje de unidades de prueba de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial, con un comportamiento de subrasante malo, regular y bueno; estos datos se calcularon en base a la deflexión máxima de cada punto ensayado comparada con la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$  mm). El porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento malo es 53% ,

regular 31%, y bueno 16%, esto implica que el comportamiento de la subrasante en la mayor parte de la vía no es adecuado

GRAFICA N° 1: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de subrasante malo, regular y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial



*Fuente: Elaboración propia, 2016*

#### 7.1.2.2. Comportamiento del pavimento:

- ❖ Como se puede apreciar en el cuenco de deflexiones, y además como el radio de curvatura de cada punto ensayado es mayor que el radio de curvatura mínimo indicado por la metodología (100 mm), esto indica que el pavimento está en buen estado.
- ❖ En la Grafica N°2 muestra el porcentaje de unidades de prueba de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial, que se encuentran en buen estado. No se tienen unidades de prueba en mal estado (condición estructural) esto implica que el comportamiento del pavimento es aceptable, lo cual se puede evidenciar por la regular serviciabilidad que presenta la vía, debido a los programas de conservación periódico que se han hecho sobre ella.

- ❖ GRAFICA N° 2: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de pavimento malo y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial

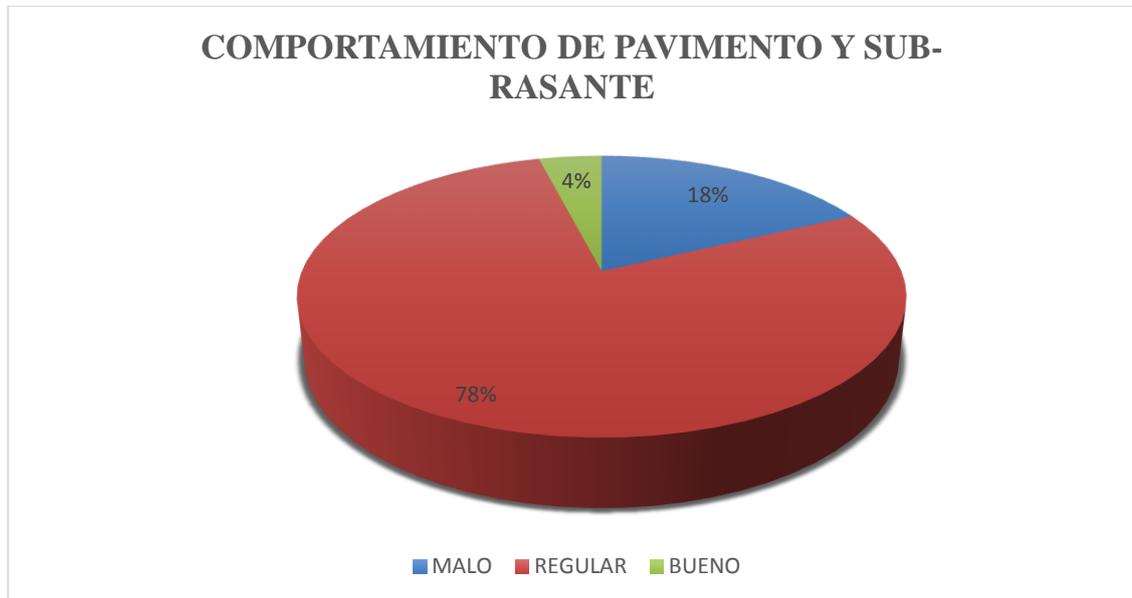


*Fuente: Elaboración propia, 2016*

#### 7.1.2.3. Comportamiento del pavimento y subrasante en conjunto:

- ❖ Como la deflexión característica del pavimento es mayor que la deflexión admisible, nos indica un mal comportamiento de la subrasante y un buen estado del pavimento; sin embargo, este aspecto indica que el pavimento empezará a fallar, por lo que se hace necesario una reconstrucción total de pavimento, previo mejoramiento de la subrasante.
- ❖ La Grafica N°3 muestra el porcentaje de unidades de prueba de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical– Av. Industrial, con un comportamiento de pavimento y subrasante malo, regular y bueno; estos datos se dedujeron de los datos de la subrasante y pavimento en conjunto. Siendo un 78% de unidades de prueba con un comportamiento regular.

GRAFICA N° 3: Porcentaje de unidades de prueba con un comportamiento de pavimento y subrasante a la vez malo, regular y bueno, de la carretera ubicada entre el Ovalo Musical – Av. Industrial



*Fuente: Elaboración propia, 2016*

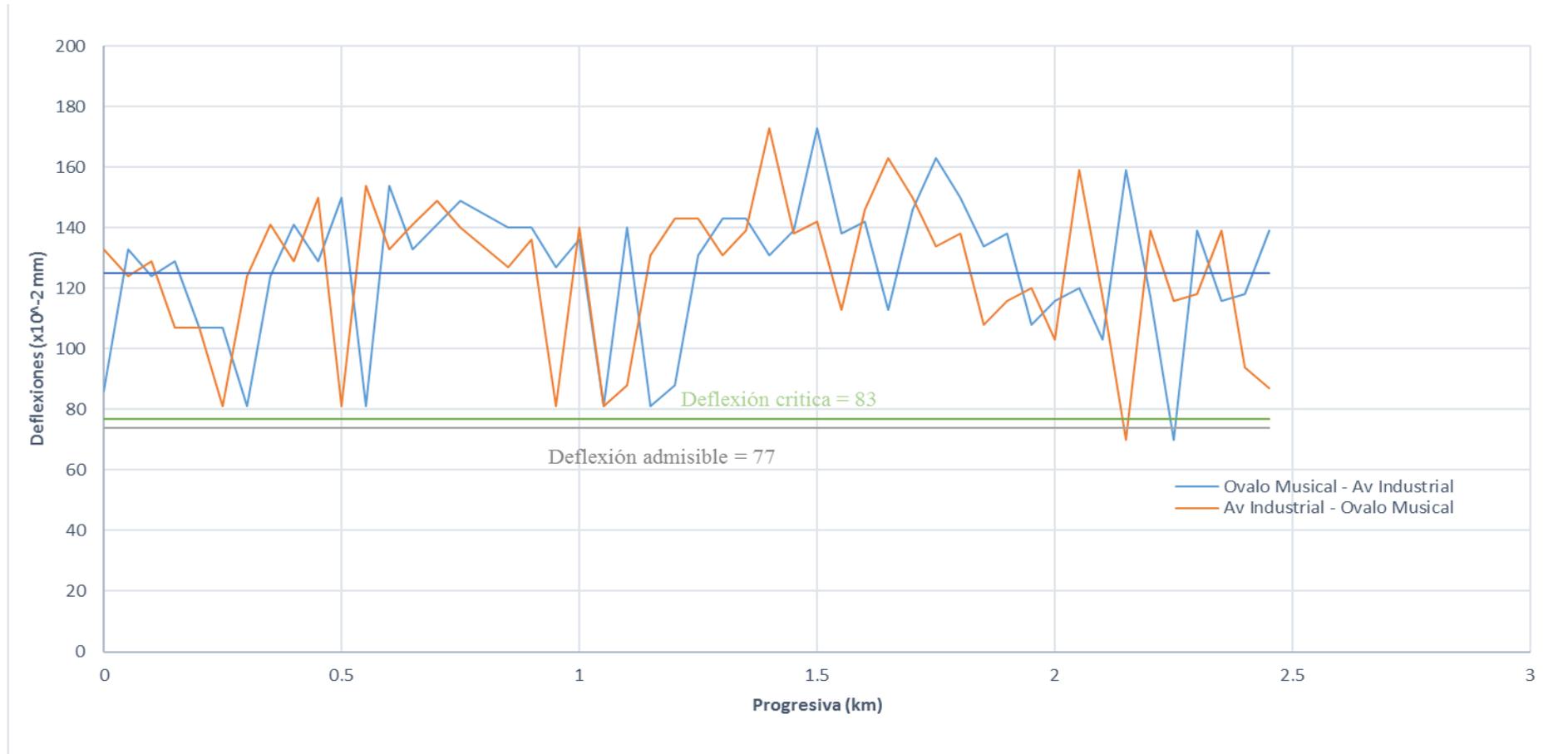
#### 7.1.2.4. Deflectograma:

- ❖ En La Grafica N°4 muestra el deflectograma resultante de graficar las deflexiones máximas obtenidas en cada punto evaluado en ambos carriles, con ello podemos observar la variación de las deflexiones en cada uno de los puntos ensayados, desde  $86 \times 10^{-2}$  mm. hasta  $127 \times 10^{-2}$  mm. aproximadamente; siendo los puntos más elevados los que presentan menor capacidad estructural. Además, nos muestra que la deflexión admisible ( $77 \times 10^{-2}$  mm) ha sido superada por la deflexión característica ( $125.426 \times 10^{-2}$  mm), lo que indica que ya no se garantiza un buen comportamiento del pavimento.

#### **7.1.2.5. Cuenco de deflexiones:**

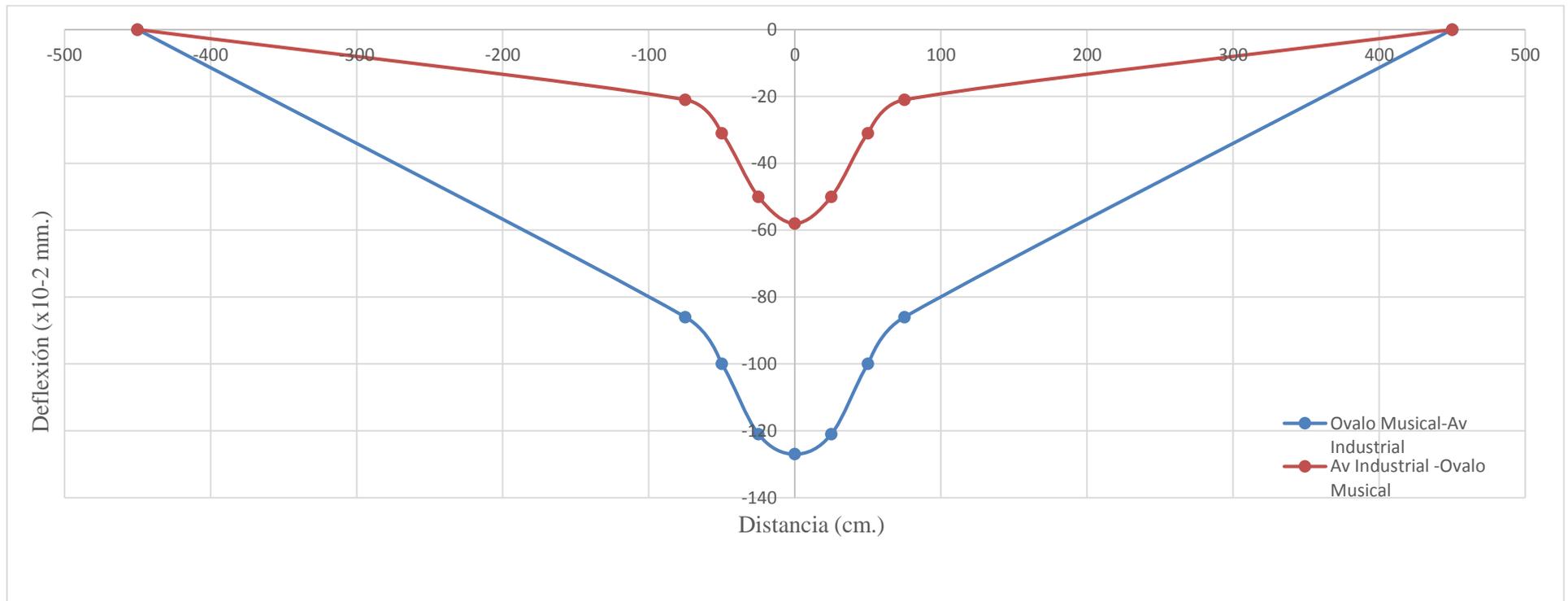
Para graficar el cuenco se tomó promedio de las deflexiones a 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm y deflexión final de cada punto ensayado, una de ida y otra de retorno, con estos datos tanto del pavimento de ida como el de retorno se puede observar que el cuenco presenta una curva extensa y profunda, por lo tanto, de acuerdo a la tabla en la figura N°19 el cuenco de deflexiones es de tipo II, siendo la calzada de ida la que presenta un cuenco más profundo, lo que indica un mayor deterioro.

GRAFICA N° 4: Deflectograma



Fuente: Elaboración propia, 2016

GRAFICA N° 5: Cuenco de deflexiones Carretera ubicada entre el Ovalo musical - Av. Industrial Ida y retorno



Fuente: Elaboración propia, 2016

## CONCLUSIONES

1. Se determinó el comportamiento estructural del pavimento flexible de la Carretera ubicada entre el Ovalo Musical y la Av. Industrial, a través de deflexiones obtenidas en campo mediante el uso de la Viga Benkelman es mala por lo que no cumple con la hipótesis
2. Se realizó el levantamiento topográfico llegándose a determinar que la longitud de la vía a estudiar es de 2475m por cada calzada.
3. Se hizo el estudio de tráfico, llegándose a determinar un índice medio diario Semanal de 9465 veh/día, valor que supera largamente al tráfico de diseño (3068 veh/día)
4. Se determinaron las deflexiones en la vía obteniéndose lo siguiente:
  - Deflexión admisible:  $77 \times 10^{-2}$  mm
  - Deflexión Crítica :  $83 \times 10^{-2}$  mm
  - Deflexión Característica:  $125.426 \times 10^{-2}$  mm

## RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda hacer el estudio del CBR de la Vía estudiada para poder obtener resultados más exactos.
- 2) Al tomar los datos, se debe tener especial cuidado, ya que unas malas prácticas nos arrojarán resultados equivocados.
- 3) Se recomienda que la viga Benkelman utilizada, tenga su certificado de calibración.
- 4) En general, los equipos y procesos a utilizar deben cumplir con las especificaciones que presenta la Norma MTC e 1002 2000 “Medida de la deflexión y determinación del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman” para minimizar errores en los datos obtenidos.
- 5) Se recomienda realizar el seguimiento del comportamiento estructural y funcional de los pavimentos de nuestras vías en forma periódica.
- 6) Para la toma de datos, se debe contar con el personal necesario que garantice una adecuada toma de datos y seguridad.

## REFERENCIAS

1. Garcia, C. y. (2012). Diagnóstico del estado situacional de la vía: av. argentina - av. 24 de junio por el método: índice de condición de pavimentos-2012. Huancayo.
2. Dorfman.B. (1982). Diseño de pavimentos rígidos y flexibles. Rusia
3. Bustamante, O. (1996). Estructuración de vías terrestres. México: CECSA
4. Hoffman, Ph.D. (1985). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos).Lima: Librotext
5. Chávez. (2013). Análisis de Nivel de Servicio Peatonal en el óvalo mesones Muro de la ciudad de Jaén. Jaén: UNC.
6. Chavez G. (2015). Fallas en el pavimento flexible de la avenida vía de evitamiento sur, Cajamarca, 2015. Cajamarca: UPNC.
7. AASTHO. (2001). Recommended Practice for Geosynthetic. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
8. Rojas. T. R (2003). Concepto de performance o comportamiento. Tecnología de pavimentos. Universidad de Piura
9. Ruiz. O. E (2009). Propuesta para la implementación de un sistema de administración de pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán. Universidad de Piura
10. Chavez.C.(2015). Determinación del Comportamiento Estructural del Pavimento Flexible de la carretera San Miguel – San Pablo, tramo San Miguel – Sunuden; mediante el Análisis Deflectométrico. Universidad Nacional de Cajamarca
11. MTC, D. g. (2013). Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Lima.
12. Espinosa. G. (2009) Evaluación Técnica de Pavimentos Flexibles Utilizando la Viga Benkelman en la Ciudad de Loja

## **ANEXOS**

### ***ANEXO 1*** ***GALERÍA FOTOGRÁFICA***

## Panel fotográfico

*Figura N°. 31: Evaluación funcional de la vía: Fallas de borde*



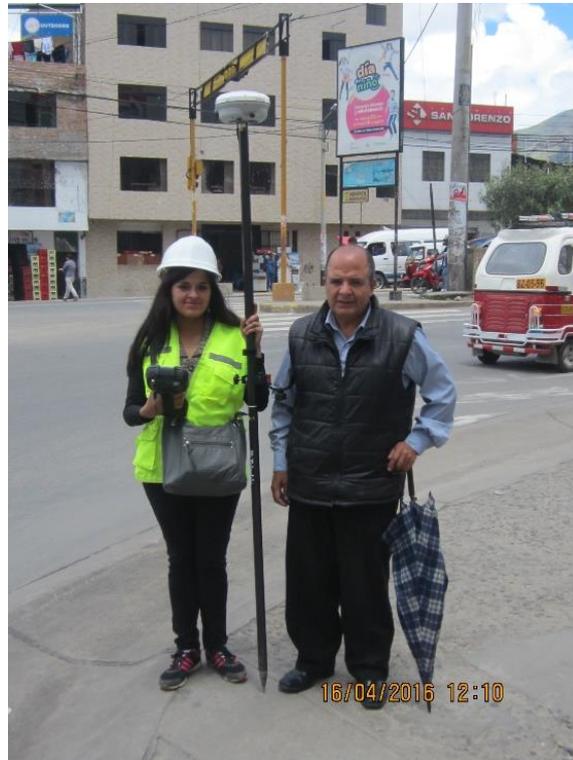
**Fuente:** Elaboración propia,2015

*Figura N°. 32: Evaluación Funcional:Destrucción parcial de la carpeta asfáltica*



**Fuente:** Elaboración propia,2015

*Figura N°. 33: Levantamiento topográfico*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 34: Levantamiento topográfico*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 35: Estudio de Tráfico: Conteo de vehículos del carril derecho de la vía de Evitamiento Sur*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 36: Pesaje del eje posterior del camión*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 37: Pesaje del eje posterior del camión terminado con la supervisión de mi asesor*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 38: Tomando la temperatura del Pavimento*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 39: Armado de la viga Benkelman*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 40: Tomando el primer punto*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 41: Realizando las anotaciones de campo*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 42: Equipo Vigía*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 43: Final del tramo de Ida*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 44: Inicio del tramo de retorno*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 45: Temperatura del Pavimento*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 46: Realizando la medida de un punto de la carretera con la Viga Benkelman*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 47: Kilómetro 1+400 (regreso)*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 48: Equipo Técnico de la Viga Benkelman*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 49: Final de la toma de datos*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

*Figura N°. 50: Equipo de Trabajo*



**Fuente:** Elaboración propia,2016

**ANEXO 2**  
**NORMA MTC E 1002 – 2000**

***ANEXO 3***  
***ASTM D 4695 – 03***

***ANEXO 4***  
***PLANOS***

***ANEXO 4***  
***DATOS PROCESADOS***