



**UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP**

*Registrado en el Asiento N° A00010 de la Partida N° 11000318, Personas Jurídicas de Iquitos  
Superintendencia de los Registros Públicos - SUNARP*

## **FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

### **PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL**

#### **TESIS:**

**“EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA  
CARRETERA IQUITOS – NAUTA CON VIGA BENKELMAN,  
TRAMO KM 16+300 - KM 17+800”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

#### **AUTORES:**

**Bach. Ing. Civil STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA**

**Bach. Ing. Civil JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO**

#### **ASESOR:**

**Ing° GLORIA NELLY RIMARACHIN CARBAJAL**

**IQUITOS – PERU**

**2020**

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser guía y darme fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis padres Eduardo Méndez y Eva García, a mis hermanos: Paul, María Elena y Kevin, y a mis sobrinos: Joel Sebastián y Geanfranco; por su paciencia y aliento constante.

A mis amigas Delly y Clarissa, con quienes compartimos muchas alegrías y dificultades durante la carrera.

## **STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA**

A Dios por enseñarme el camino de la Vida. A mi hija y Padres que son brotes y raíces de mi hogar.

## **JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Ing. Gloria Rimarachin Carbajal, por su apoyo en el asesoramiento de la presente investigación.

A la Ing. Liliana Bautista Serpa, Jefa del laboratorio de mecánica de suelos y a los técnicos por su experiencia y colaboración en la realización de los ensayos efectuados.

A la Universidad Científica del Perú y a la Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Al Ing. Gerber Zavala Escaño, Flor de Azalia Dávila y todas las personas que de una u otra manera han aportado, ideas y experiencia a favor de la presente investigación.

**STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA**

**JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO**

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP**

El presidente del Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:

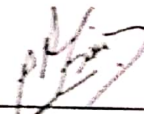
La Tesis titulada:

**"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS –  
NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 – KM 17+800".**

De los alumnos: **STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCÍA Y JORGE CARLOS  
AMASIFUEN CARO**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó  
satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje  
de **16% de plagio**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que  
estime conveniente.

San Juan, 25 de febrero del 2020.



**Dr. César J. Ramal Asayag**  
Presidente del Comité de Ética –UCP

CJRA/lasda  
031-2020



Av. Abelardo Quiñones Km. 2.5



(065) 261086



www.ucp.edu.pe



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** UCP\_INGENIERIACIVIL\_2020\_TESIS\_STEPHANIEMENDEZ\_JORGEAMASIF (D64351356)  
**Submitted:** 2/24/2020 11:20:00 PM  
**Submitted By:** revision.antiplagio@ucp.edu.pe  
**Significance:** 16 %

### Sources included in the report:

14870--Diaz Ruiz, Frank P.pdf (D55425847)  
15194--Carranza Chávez, Davies Rogers.pdf (D54493683)  
15011--Mamani De La Cruz, David.pdf (D48397326)  
15051--Aliaga Zamora, Raúl Ommar.pdf (D54856554)  
15076--Ildefonso Sánchez, Daniel Angel.pdf (D54819170)  
16120--Vargas Manrique, Fernando Alberto.pdf (D49411327)  
15024--Soria Robles, Mariela Edith.pdf (D54918753)  
15030--Rivera Gómez, Flor.pdf (D54918759)  
15118--Centurión Torres, Carlos Alberto.pdf (D54721793)  
16143--Segil Jimenez, Roberto Alonso.pdf (D49553121)  
14872--Garrido del Aguila, Angel Alexander.pdf (D55425849)  
14873--Gomez Montes, Freddy.pdf (D55425850)  
<https://www.buenastareas.com/materias/benkelman/0>  
[https://issuu.com/d.smithgonzaga/docs/an\\_lisis\\_comparativo\\_de\\_la\\_evaluac](https://issuu.com/d.smithgonzaga/docs/an_lisis_comparativo_de_la_evaluac)  
<https://docplayer.es/98947640-Universidad-nacional-de-ingenieria-facultad-de-ingenieria-civil.html>  
<https://docplayer.es/86601479-Universidad-nacional-del-altiplano.html>  
<https://docplayer.es/83694255-Diagnostico-estructural-de-afirmado-estabilizado-con-cloruro-de-magnesio-mediante-el-modelo-matematico-de-hogg-y-viga-benkelman.html>  
<https://docplayer.es/31369477-Universidad-ricardo-palma.html>  
[https://www.researchgate.net/publication/299657315\\_Evaluacion\\_de\\_pavimentos\\_en\\_base\\_a\\_metodos\\_no\\_destructivos\\_y\\_analisis\\_inverso](https://www.researchgate.net/publication/299657315_Evaluacion_de_pavimentos_en_base_a_metodos_no_destructivos_y_analisis_inverso)

### Instances where selected sources appear:

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

### FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal N°246-2015-UCP-FCEI del 04 de noviembre de 2015, la FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- |                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| • Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera, M. Sc. | Presidente |
| • Ing. Mario Amador Vela Rodríguez            | Miembro    |
| • Ing. Liliana Bautista Serpa                 | Miembro    |

Como Asesora: **Ing. Gloria Nelly Rimarachín Carbajal**

En la ciudad de Iquitos, siendo las 11 horas del día 21 de agosto del 2020, a través de la plataforma ZOOM supervisado en línea por la Secretaria Académica del programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Científica del Perú, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: **“EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS – NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 – KM 17+800”**.

Presentado por los sustentantes:

**STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCÍA**

**Y**

**JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO**

Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: **ABSUELTAS**

El Jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión: **APROBADO POR UNANIMIDAD**

La sustentación es:

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.



Presidente



Miembro



Miembro

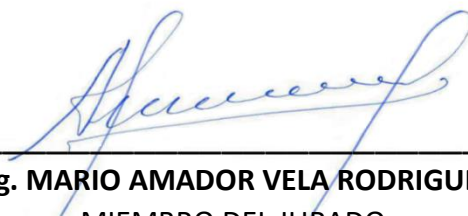
## APROBACIÓN

Tesis sustentada en Acto Público el día 21 de Agosto del 2020 a las 11:00 a.m.



---

**M. SC. Ing. ULISES IRIGOIN CABRERA**  
PRESIDENTE DEL JURADO



---

**Ing. MARIO AMADOR VELA RODRIGUEZ**  
MIEMBRO DEL JURADO



---

**Ing. LILIANA BAUTISTA SERPA**  
MIEMBRO DEL JURADO



---

**Ing. GLORIA NELLY RIMARACHIN CARBAJAL**  
ASESOR

# INDICE

	<b>Página</b>
Carátula.....	1
Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	3
Índice.....	4
Resumen.....	11
Abstract.....	12
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>13</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2 ESTADO DE TRAMOS.....	14
1.3 DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	19
1.4 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	20
1.4.1 Problema general.....	20
1.4.2 Problemas específicos.....	20
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION .....	21
1.5.1 Objetivo general.....	21
1.5.2 Objetivos específicos.....	21
1.6 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION.....	21
<b>CAPITULO II: MARCO TEORICO – CONCEPTUAL.....</b>	<b>23</b>
2.1 MANTENIMIENTO VIAL.....	25
2.1.1 Mantenimiento Rutinario.....	26
2.1.2 Mantenimiento Periódico.....	29
2.2 EVALUACION ESTRUCTURAL.....	31
2.2.1 Métodos de Evaluación Estructural.....	34
2.2.1.1 Método Conrevial.....	34
2.2.1.2 Método Elástico.....	47
2.2.1.3 Método Sarp.....	54

2.3	SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO.....	59
2.3.1	Tránsito.....	59
2.3.2	Clima.....	67
2.4	METODOS DE AUSCULTACION ESTRUCTURAL.....	69
2.4.1	Métodos Directos de Auscultación.....	70
2.4.2	Métodos Indirectos de Auscultación Estructural.....	71
2.4.2.1	Medición de Deflexión Estática o de Movimiento Lento.....	73
2.4.2.1.1	Viga Benkelman.....	73
2.4.2.1.2	Deflectómetro Lacroix.....	82
2.4.2.2	Medición de Deflexión por Vibración.....	83
2.4.2.3	Medición de Deflexión por Impacto.....	85
<b>CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS.....</b>		<b>88</b>
3.1	TIPO DE INVESTIGACION.....	88
3.2	MATERIAL.....	88
3.2.1	POBLACION.....	88
3.2.1	MUESTRA.....	88
3.3	METODOS.....	89
3.3.1	TECNICAS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO DE RECOLECCION DE DATOS.....	89
3.3.2	INSTRUMENTOS.....	89
3.3.3	PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCION DE DATOS.....	90
<b>CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE.....</b>		<b>91</b>
<b>RESULTADOS</b>		
4.1	RECOLECCION DE DATOS.....	91
4.1.1	UBICACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO.....	91
4.1.2	ESTUDIO DEL TRANSITO.....	92
4.2	MEDICION DE DEFLEXIONES.....	96
4.3	RESULTADOS.....	98

<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>104</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	104
5.2 RECOMENDACIONES.....	106
<b>CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>108</b>
A. ANEXO 01 – Sección Típica Carretera Iquitos – Nauta (Tramo I) .....	109
Fuente: GUICONSA (1996) “Proyecto Integral Iquitos Nauta: Primera Etapa Sistema Vial ”	
B. ANEXO 02 – Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos.....	112
Carretera Iquitos – Nauta (IV Tramo)	
C. ANEXO 03 – MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y .....	116
Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible Empleando Viga Benkelman”	
D. ANEXO 04– Ensayos para la Evaluación Estructural del .....	122
Tramo en estudio	

## **FIGURAS**

<b>Figura N°01:</b> Mapa Vial – Ubicación de Carretera Iquitos Nauta.....	13
<b>Figura N°02:</b> Elaboración Propia, Sección Típica Carretera ..... Iquitos – Nauta (Tramo I)	15
<b>Figura N°03:</b> Líneas Bases y Métodos Aplicados.....	24
<b>Figura N°04:</b> Distribución de la presión del neumático a través de la..... estructura del pavimento	32
<b>Figura N°05:</b> Deflexión en el Pavimento.....	32
<b>Figura N°06:</b> Tipos de Deflexiones.....	35
<b>Figura N°07:</b> Esquemas de la Transmisión de Carga y equipo..... Medidos de deformaciones	37
<b>Figura N°08:</b> Esquemas Conceptual del Radio de Curvatura.....	39
<b>Figura N°09:</b> Esquema Modelo de Hogg.....	47
<b>Figura N°10:</b> Curvas de Deflexiones en el Modelo de Hogg para..... La configuración de Carga de la Viga Benkelman	49
<b>Figura N°11:</b> Nomograma para Evaluación Basado en el Modelo..... De Hogg (Viga Benkelman)	50
<b>Figura N°12:</b> Significado Cualitativo de los Diferentes Tipos de ..... Curvas de Deflexiones	53
<b>Figura N°13:</b> Recolección y Procesamiento de Datos – Programa SARP.....	55
<b>Figura N°14:</b> Concepto de Vida Remanente.....	57
<b>Figura N°15:</b> Resultados de una Evaluación Estructural .....	58
<b>Figura N°16:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de..... Vehículos (Pág. 78)	60
<b>Figura N°17:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de..... Vehículos (Pág. 79)	61
<b>Figura N°18:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de..... Vehículos (Pág. 80)	62

<b>Figura N°19:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 81)	63
<b>Figura N°20:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 82)	64
<b>Figura N°21:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 83)	65
<b>Figura N°22:</b> Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 84)	66
<b>Figura N°23:</b> Comparación de la distribución de cargas en pavimentos	67
<b>Figura N°24:</b> Muestra típica de extracción de núcleo de pavimento	71
<b>Figura N°25:</b> Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones	72
<b>Figura N°26:</b> Esquema y Principio de la Viga Benkelman	74
<b>Figura N°27:</b> Esquema y Principio de la Viga Benkelman Brazo Simple	75
<b>Figura N°28:</b> Esquema de Transductores	84
<b>Figura N°29:</b> Perfil Longitudinal Tramo de Estudio	91
<b>Figura N°30:</b> Medición de Deflexiones	100

## **CUADROS**

<b>Cuadro N° 01:</b> Valor de "t" y probabilidad de ocurrencia de $D_m > D_c$	41
<b>Cuadro N° 02:</b> Coeficiente de Corrección por estacionalidad	42
<b>Cuadro N° 03:</b> Análisis Combinado de los Resultados de Evaluación	46
<b>Cuadro N° 04:</b> Parámetros Modelo de Hogg	48
<b>Cuadro N° 05:</b> Distancias a Utilizar	78
<b>Cuadro N° 06:</b> Ubicación Geográfica	91
<b>Cuadro N° 07:</b> Índice Medio Anual en el Tramo de Estudio	92



<b>Cuadro N° 08:</b> Cálculo del EAL del Tramo de Estudio.....	93
<b>Cuadro N° 09:</b> Lecturas de Deflexión en Campo.....	96
<b>Cuadro N° 10:</b> Resumen de Resultados de la Medición de Deflexiones..... Obtenidas en campo	99
<b>Cuadro N° 11:</b> Resumen Estadístico (Carril Derecho).....	100
<b>Cuadro N° 12:</b> Resumen Estadístico Deflexiones (Carril Derecho).....	101
<b>Cuadro N° 13:</b> Resumen Estadístico Radio de Curvatura.....	101
<b>Cuadro N° 14:</b> Comparación de Resultados.....	103

## **FOTOS**

<b>Foto N°01:</b> Estado Actual de la Carretera Iquitos - Nauta.....	16
<b>Foto N°02:</b> Pavimento de la Carretera Iquitos - Nauta.....	16
<b>Foto N°03:</b> Perfilado de Derecho de Vía, Carretera Iquitos - Nauta.....	17
<b>Foto N°04:</b> Limpieza de Cunetas, Carretera Iquitos - Nauta.....	18
<b>Foto N°05:</b> Limpieza de Alcantarillas, Carretera Iquitos - Nauta.....	18
<b>Foto N°06:</b> Reparación de Cunetas, Carretera Iquitos – Nauta.....	18
<b>Foto N°07:</b> Berma en Tramo I, Carretera Iquitos – Nauta.....	19
<b>Foto N°08:</b> Pesaje de Ejes Posteriores.....	78
<b>Foto N°09:</b> Medición y Trazado de Línea Transversal en el Punto ..... De Ensayo	79
<b>Foto N°10:</b> Colocación de la Regla en el Punto de Ensayo .....	79
<b>Foto N°11:</b> Ajustes de Tornillos para el contacto del Dial.....	80
<b>Foto N°12:</b> Verificación de los Diales antes de la Marcha del Camión.....	80
<b>Foto N°13:</b> Marcha del Camión y Toma de lecturas.....	81

<b>Foto N°14:</b> Toma de Temperatura del pavimento.....	82
<b>Foto N°15:</b> Deflectógrafo tipo Lacroix, Equipo semicontinuo.....	83
<b>Foto N°16:</b> Dinaflect.....	84
<b>Foto N°17:</b> Road Rater (electro-hidraulico).....	85
<b>Foto N°18:</b> Deflectómetro de Impacto Dynatest FWD 8000.....	87
<b>Foto N°19:</b> Tramo de Estudio.....	89
<b>Foto N°20:</b> Método Aproximado para el Cálculo del EAL.....	94
<b>Foto N°21:</b> Cálculo del EAL del Periodo de Diseño.....	95

## **FORMULAS**

<b>Fórmula N°01:</b> Deflexión total.....	36
<b>Fórmula N°02:</b> Deflexión Recuperable.....	38
<b>Fórmula N°03:</b> Deflexión Recuperable a la Temperatura estándar.....	38
<b>Fórmula N°04:</b> Radio de Curvatura.....	39
<b>Fórmula N°05:</b> Deflexión Media.....	40
<b>Fórmula N°06:</b> Desviación Estándar.....	40
<b>Fórmula N°07:</b> Coeficiente de Variación porcentual.....	40
<b>Fórmula N°08:</b> Deflexión Característica.....	41
<b>Fórmula N°09:</b> Deflexión Admisible.....	43
<b>Fórmula N°10:</b> Deformación de la Superficie.....	48
<b>Fórmula N°11:</b> Determinación de "φ" .....	48
<b>Fórmula N°12:</b> Módulo de Elasticidad de la Masa de Subsuelo.....	54

## RESUMEN

La presente tesis trata sobre la evaluación estructural de pavimento por el método no destructivo, realizada en el tramo Km. 16+300 al km. 17+800 de la Carretera Iquitos – Nauta haciendo uso de la viga Benkelman doble brazo. Se evaluó la capacidad estructural del pavimento por medio del estudio de las deflexiones en su estructura, aplicando el criterio establecido por el CONREVIAl. Como la deflexión característica resultó ser menor a la deflexión admisible, se concluyó para el tramo representativo de toda la vía, bajo las condiciones actuales de tránsito, un comportamiento estructural aceptable.

Con la finalidad de establecer el comportamiento a tracción de las capas de pavimento, se efectuó el análisis de las curvas de deflexión conjuntamente con los radios de curvatura, siendo el promedio de éstos mayor a 300m, concluyéndose consecuentemente, de una buena conformación de las capas del pavimento y que la deflexión se produce en la subrasante, asimismo que se trata de un terreno de fundación de buen comportamiento.

### **Palabras clave:**

Evaluación Estructural

Deflectometría

Viga Benkelman

Selva

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the structural evaluation of pavement by the non-destructive method, carried out in the stretch Km. 16 + 300 per km. 17 + 800 of the Iquitos - Nauta Highway making use of the Benkelman double arm beam. The structural capacity of the pavement was evaluated by studying the deflections in its structure, applying the criteria established by CONREVIAL. As the characteristic deflection turned out to be less than the admissible deflection, an acceptable structural behavior was concluded for the representative section of the entire road, under current traffic conditions.

In order to establish the traction behavior of the pavement layers, the analysis of the deflection curves was carried out together with the radii of curvature, the average of these being greater than 300m, consequently concluding, of a good conformation of the layers of the pavement and that the deflection occurs in the subgrade, also that it is a foundation ground with good behavior.

### **Keywords:**

Structural Evaluation

Deflectometry

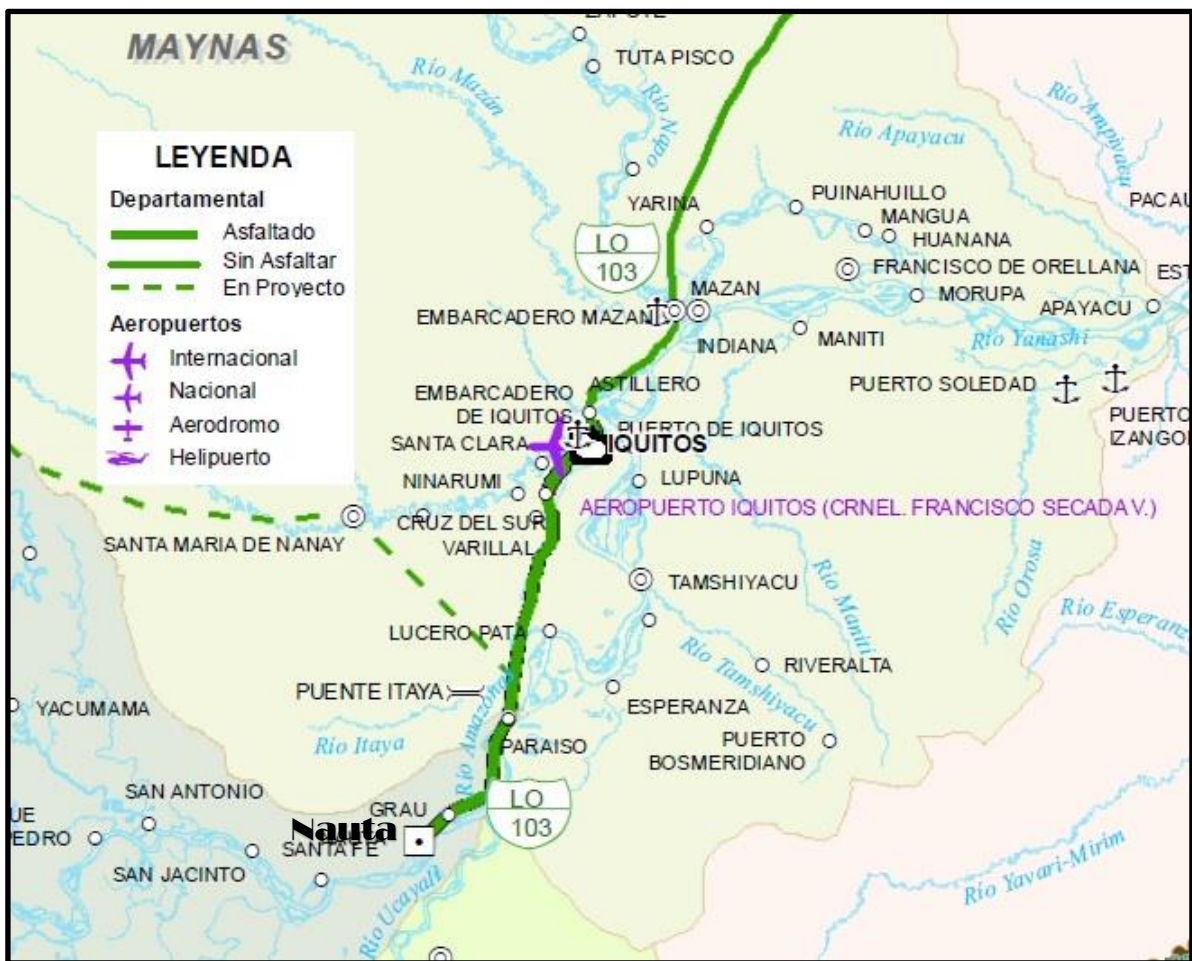
Benkelman beam

Jungle

# CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 ANTECEDENTES

La carretera Iquitos – Nauta, actualmente está dividida en cuatro tramos (I, II, III y IV), desde la ciudad de Iquitos (aeropuerto punto de inicio), hasta la ciudad de Nauta (fin del tramo), con una longitud de 94.40 Km., las cuales se encuentran concluidos a nivel de carpeta asfáltica.



*Figura N° 01: Mapa Vial – Ubicación de Carretera Iquitos Nauta*

Su construcción inicialmente estuvo a cargo del Ministerio de Transportes, y luego del Batallón de Ingeniería de Combate N°5 del Ejército en Convenio con ORDELORETO. Hasta 1981, la carretera llegaba al Km 35 Campamento Militar Otorongo; en este tramo,

no existían estudios de proyectos de ingeniería definitivos. De 1981 a 1991, la construcción de la carretera hasta el Km. 51, estuvo a cargo del Ejército y de la CORDELOR (por administración), con fondos del Canon petrolero. En 1995, el Consejo Transitorio de Administración Regional, Región Loreto, priorizó la reconstrucción y asfaltado de la carretera. Una empresa privada fue seleccionada y contratada para la continuación de la obra financiada por el Gobierno Regional de Loreto (Flores, 1998).

De acuerdo al Decreto Supremo N° 036-2011-MTC, del 27 de Julio del año 2011, la carretera Iquitos Nauta, está comprendida dentro de la red vial Departamental, por lo que corresponde a la Región Loreto, efectuar el mantenimiento de esta vía, por tal situación el GOREL, asigna por Encargo a la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones el mantenimiento y conservación de esta importante vía. Efectuándose actividades rutinarias, necesarias para mantener en buen estado de esta vía tan importante para nuestra región.

## **1.2 ESTADO DE TRAMOS**

La carretera Iquitos - Nauta que se inicia en el Km 0+000 entrada al Aeropuerto internacional Secada Vigneta y concluye en la ciudad de Nauta en el Km 94+400 se ha construido en 4 tramos:

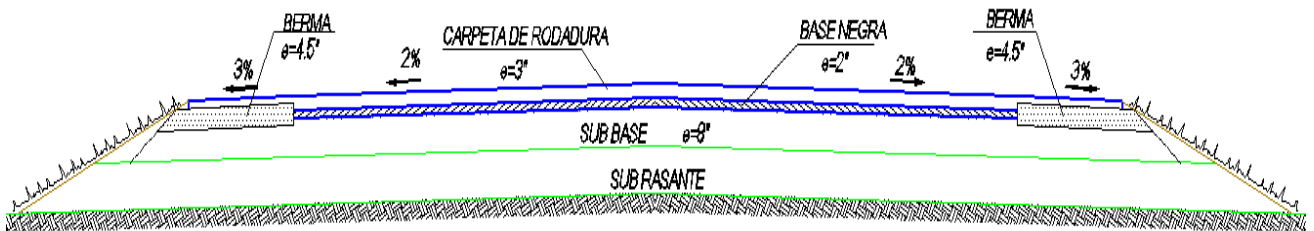
- TRAMO I: Del Km 0+000 al Km 25+000
- TRAMO II: Del Km 25+000 al 58+400
- TRAMO III: Del Km 58+400 al Km 76+400
- TRAMO IV: Del Km 76+400 al Km 94+400

## **CARACTERISTICAS TECNICAS**

La Carretera Iquitos – Nauta se ejecutó de acuerdo a las siguientes características:

- Velocidad Directriz :40 Km./h.
- Ancho de Plataforma :9.00m.
- Ancho Calzada :6.00 m. (carpeta asfáltica)
- Berma laterales Asfaltadas :1.00 m
- Bombeo : 2% Pavimetno, 3% en bermas

- Cunetas triangulares revestidas: 1.00 m. x 0.50 m.
- Taludes : 1:1.5 en alturas menores a 1m  
1:2 en alturas mayores a 1m
- Sub Base de 20cm (8"). Ejecutada con una mezcla de arena – arcilla (C.B.R.>= 25-30)
- Revestimiento de Cemento Asfáltico de 5" en dos capas, la primera de 3" y la segunda de 2" (Base Negra).



**Figura N° 02:** Elaboración Propia, Sección Típica Carretera Iquitos – Nauta (Tramo I).  
Fuente: GUICONSA (1996) "Proyecto Integral Iquitos Nauta: Primera Etapa Sistema Vial  
( Ver Anexo I)

### **UBICACION:**

Está ubicada en la jurisdicción de los Distritos de San Juan Bautista y Nauta, comprensión de las Provincias de Maynas y Loreto, respectivamente, en Selva Baja, al Sur de la Ciudad de Iquitos, se encuentran los Distrito de San Juan Bautista y Nauta, Provincia de Maynas y Loreto, Región de Loreto, y a una altura de 150 m.s.n.m., con una dirección NE – SO, uniendo la capital del departamento con el Distrito de Nauta.

Geográficamente, se sitúa entre los meridianos 73°15' y 73°36' de Longitud Oeste y el paralelo 03°43' y 04°35' de Latitud Sur.

### **CLIMA:**

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Medio Ambiente (L. Holdridge), el clima en la zona corresponde a Bosque Húmedo – Tropical, donde la biotemperatura es alta

todo el año siendo su medida anual superior a 25°C y el promedio de precipitación total por año variable entre 1900 y 4500 mm

**ESTADO ACTUAL:**

La carretera Iquitos Nauta actualmente, presenta deficiencias muy marcadas de acuerdo a la ejecución de cada tramo, pero en términos generales presenta deformaciones que están muy por encima de las tolerancias de otras vías, especialmente en los tramos cuya estructura de pavimento es con material arena y materiales A-2-4 de textura fina han presentado deficiencias.



**Foto N° 01:** Estado Actual de la Carretera Iquitos – Nauta.



**Foto N° 02:** Pavimento de la Carretera Iquitos – Nauta.

Cabe mencionar, que a pesar de que la carretera Iquitos - Nauta ya cumplió con su periodo de diseño, no se han realizado Actividades para su Mantenimiento Periódico. A la fecha, solo se han realizado actividades de Mantenimiento Rutinario, las cuales han sido las siguientes:



- **Obras De Arte Menores**

Limpieza De Cunetas Revestidas (Mortero)

Limpieza De Cunetas Sin Revestir (Tajo Abierto)

Limpieza De Alcantarillas, Con Herramientas

Manual

Encausamiento De Curso De Agua, Con

Herramientas Manual.

Reparación De Cunetas Revestidas (Mortero),

Incluye Demolición Y Perfilado

- **Obras De Arte Mayores**

Limpieza De Bordes De Cauces

Limpieza De Puentes Y Pontones

- **Seguridad Vial**

Mantenimiento De Postes De Acero

Mantenimiento De Señales Verticales (Paneles)



*Foto N° 03: Perfilado de Derecho de Vía, Carretera Iquitos - Nauta*



**Foto N° 04:** Limpieza de Cunetas, Carretera Iquitos – Nauta



**Foto N° 05:** Limpieza de Alcantarillas, Carretera Iquitos - Nauta



**Foto N° 06:** Reparación de Cunetas, Carretera Iquitos - Nauta

Asimismo, el Primer Tramo de la carretera cuenta con diferentes deficiencias originadas por las solicitudes a las que está sometida desde los inicios de su

construcción, siendo el tramo más transitado por camiones y volquetes, que trasladan los materiales de construcción, especialmente arena, para los trabajos de construcción de la ciudad de Iquitos, sin embargo el mayor desgaste de la vía se ha generado en las bermas por los ingresos a las canteras o a las nuevas vías que se generan por el crecimiento de la ciudad.



**Foto N° 07:** Berma en Tramo I, Carretera Iquitos - Nauta

También se ha encontrado que la superficie de rodadura presenta desgaste y ha disminuido el espesor inicial de la carpeta.

Cabe mencionar, que a la fecha no se han realizado Ensayos para su Evaluación Estructural en el Tramo I (Km 0+000 al Km 25+000), a lo largo de su vida útil. Por lo que, la presente investigación es la primera que se realiza.

### **1.3 DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

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.

Un buen diagnóstico de los pavimentos permite a través del mantenimiento, prolongar su vida útil, además siendo las vías de grandes longitudes y permanente uso, estos ensayos se deben realizar de manera rápida, por tal razón los métodos de

deflectometría son adecuados para tales objetivos; asimismo, los inventarios viales de toda la red de carreteras de nuestro país deben consignar tanto el estado funcional como estructural de pavimentos afirmados y sin afirmar para la inversión en la gestión de carreteras.

En El Perú la evaluación estructural de pavimentos, ha sido a través de diferentes equipos de deflectometría, entre los cuales se tiene la viga Benkelman el cual pertenece a la rama de los equipos de deflexión estática. Más reciente se tienen los equipos de tipo impacto, como el Deflectómetro (FWD), de impacto que aplican una carga que simula el tráfico real sobre el pavimento.

En la presente investigación La alternativa presentada en este estudio es "no destructiva" y se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. El equipo utilizado es la viga benkelman doble brazo (1:4), el área de ensayo se ubica en la carretera Iquitos – Nauta, Tramo KM 16+300 - KM 17+800.

## **1.4 FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.4.1 Problema general.**

¿Es posible realizar la evaluación estructural del pavimento flexible basándose en la interpretación de curvas de deflexiones?

### **1.4.2 Problemas específicos.**

- ¿Cómo obtener resultados de evaluación estructural de un pavimento flexible utilizando el equipo de viga Benkelman conforme a la Norma ASTM D 4695?
- ¿Cómo determinar la deflexión recuperable y el radio de curvatura del pavimento flexible?
- ¿Cómo se debe analizar e interpretar los resultados obtenidos y diagnosticar mediante la aplicación de Viga Benkelman, el estado actual general y particular del pavimento?
- ¿Es posible establecer el estado actual del pavimento evaluando su condición estructural?

- ¿Cómo contribuir con el establecimiento de algunas normas para nuestro país en la construcción y evaluación estructural de vías terrestres?

## **1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **1.5.1 Objetivo General:**

Determinar la capacidad estructural del pavimento a partir de la medición de las deflexiones haciendo uso de la viga benkelman

### **1.5.2 Objetivos Específicos:**

- a) Realizar las mediciones de las deflexiones en el pavimento haciendo uso de la viga benkelman conforme a la Norma ASTM D 4695.
- b) Determinar la deflexión recuperable y el radio de curvatura de un pavimento flexible
- c) Analizar e interpretar los resultados obtenidos y diagnosticar mediante la aplicación de la viga Benkelman, el estado actual general y particular del pavimento
- d) Establecer el estado actual del pavimento evaluando su condición estructural
- e) Hacer un análisis comparativo con lo estudiado hasta la fecha con relación al dimensionamiento de la estructura del pavimento de vías de comunicación terrestre.

## **1.6 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION**

El funcionamiento de las carreteras resulta clave para la vida económica y social de la nación, por lo cual se ha dedicado desde hace muchos años importantes esfuerzos a la extensión, preservación y modernización de la red de carretera.

Actualmente el avance tecnológico de los equipos de auscultación estructural de pavimentos permite obtener información amplia y valiosa del comportamiento de los mismos, podrían hacer pensar en eliminar el uso de equipos predecesores; sin

embargo, los costos de esta nueva tecnología, para nuestros países, impiden su aplicación masiva.

Este estudio permitirá comprender, interpretar y comparar con mejor juicio los resultados obtenidos con la viga Benkelman; y su uso para la evaluación estructural de pavimentos. Asimismo permitirá preparar a los constructores, supervisores, diseñadores e investigadores de esta área de la ingeniería.

El presente trabajo de investigación se justifica por la necesidad de aplicar de manera práctica y económica el método de diagnóstico estructural no destructivo como es la evaluación con viga Benkelman utilizados con frecuencia en nuestro país. Asimismo, permitirá determinar el estado actual en el que se encuentra un tramo de la carretera Iquitos – Nauta.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO - CONCEPTUAL

El esquema de estudio de pavimentos asfálticos, presenta tres líneas bases, que se requieren para afrontar problemas en la red vial nacional: construcción, rehabilitación y mantenimiento.<sup>1</sup>

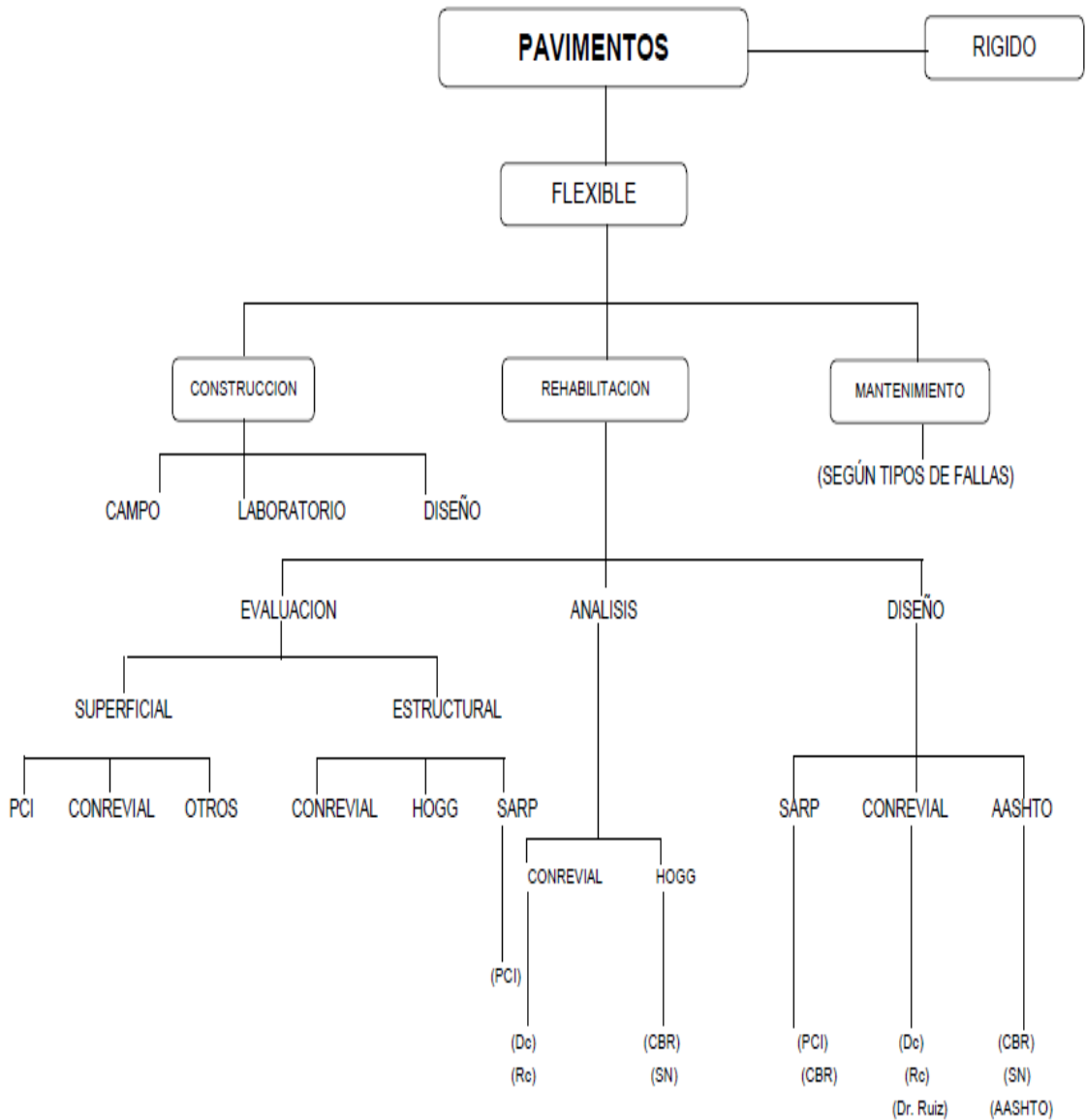
La Construcción de una nueva estructura demanda trabajos relacionados a la exploración de campo, ensayos de laboratorio y luego mediante la integración de la información recopilada se realiza el análisis y diseño correspondiente del pavimento.<sup>2</sup>

La línea base correspondiente a la Rehabilitación, demanda trabajos como evaluación de la estructura existente que permite establecer el estado situacional del pavimento, ya sea del punto de vista superficial como estructural. Esta evaluación se realiza mediante métodos que actualmente son recomendados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Con la información recopilada y procesada se realiza el análisis para obtener los parámetros o insumos de diseño, de tal manera aumentar el tiempo de vida útil del pavimento.<sup>3</sup>

Cuando los trabajos proyectados, en la etapa de rehabilitación, son ejecutados, se presenta una nueva línea base orientada a establecer actividades estratégicas de Mantenimiento basado en la proyección de formaciones de fallas.<sup>4</sup>

La **Figura N° 03** presenta las líneas bases mencionadas de donde se desprenden métodos aplicados y que se indican mediante siglas que corresponden a las metodologías que actualmente sugiere el MTC.

<sup>1,2,3,4</sup> José W. Gutiérrez, "Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú", 2007



**Figura N°03: Líneas Bases y Métodos Aplicados.**

*Fuente: José W. Gutiérrez, "Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú", 2007*

Los trabajos en las etapas de construcción o mantenimiento se interpretan con menor complejidad que los casos o situaciones para realizar proyectos de rehabilitación, ya que éste último no define una única solución. Los trabajos con fines de rehabilitación, emplea una metodología tradicional, casi en un 80% del desarrollo total del proyecto. El 20% restante es aportado por la experiencia del proyectista de una manera creativa.



## 2.1 MATENIMIENTO VIAL

MAMANI (2011). El "Mantenimiento Vial", en general, es el conjunto de actividades que se realizan para conservar en buen estado las condiciones físicas de los diferentes elementos que constituyen el camino y, de esta manera, garantizar que el transporte sea cómodo, seguro y económico. En la práctica lo que se busca es preservar el capital ya invertido en el camino y evitar su deterioro físico prematuro. En los sistemas tercerizados de mantenimiento vial, también se incluyen actividades socio-ambientales, de atención de emergencias viales y de cuidado y vigilancia de la vía.

MTC (2013) "Manual de Carreteras Conservación Vial". La Conservación Vial es un proceso que involucra actividades de obras e instalaciones, que se realizan con carácter permanente o continuo en los tramos conformantes de una red vial.

Para la ejecución de la conservación vial, se requiere tener una asignación presupuestal anual de recursos económicos, personal capacitado y utilizar máquinas y herramientas; cuyo costo se asigna en el presupuesto anual de la entidad competente de la gestión vial. El presupuesto y la programación de actividades deberá hacerse previsoramente para ser realizadas en el año siguiente a su aprobación; y así sucesivamente cada año o cuando la norma presupuestal considere aplicables presupuestos plurianuales este se desarrollará conforme a la norma presupuestal aplicable.

La ejecución del gasto se realizará por administración directa de la entidad competente o mediante contratos con terceros; y teniendo siempre como objetivo de la conservación vial mantener el nivel de servicio operativo de la carretera y de sus componentes en un rango programado por la entidad competente para cumplir las metas oficiales.

En el sector público el gasto en conservación vial corresponde en la clasificación presupuestal al concepto de gasto corriente y debe cubrir una previsión de cantidades de necesidades estimada por la experiencia de la unidad y del personal directamente encargado de realizar las tareas o partidas del gasto.

Las obras que conforman la conservación vial no requieren de estudios de preinversión, porque se trata de obras de prevención o de corrección menor de deterioros y en la medida que se identifique su inicio de estos se deberá proceder a su corrección para evitar su progresión. Pero si requieren de una programación técnica sistemática que permita sustentar el gasto necesario.

La conservación vial desde el punto de vista de las actividades u obras y equipamiento a realizarse por administración directa, se organiza en dos grupos de ejecución: “conservación rutinaria” y “conservación periódica”.

### **2.1.1 MANTENIMIENTO RUTINARIO**

MTC (2013) “Manual de Carreteras Conservación Vial”. La conservación o mantenimiento rutinario, es el conjunto de actividades que se ejecutan dentro del presupuesto anual, está constituida por todas las actividades necesarias para cuidar la seguridad del camino y para prevenir el desarrollo de deterioros en todos los componentes de la infraestructura vial como son: pistas, puentes y túneles, señales y dispositivos de seguridad, obras de drenaje, contención de taludes, limpieza de la carretera, también del derecho de vía, etc. La conservación rutinaria trata en todos esos componentes, de evitar y llegado el caso, corregir cualquier deterioro que origine incomodidad o distorbe la circulación del tránsito originando riesgos de accidentes y mayores deterioros en la infraestructura vial.

En otras palabras, un camino no debe operar en condiciones que causen riesgos al usuario; y en cualquier caso la conservación vial deberá advertir a los usuarios de las condiciones requeridas para circular sin riesgos creados por las condiciones del camino. En la mayoría de los casos será suficiente señalar las limitaciones en la circulación para evitar los riesgos. En otros casos podrá requerirse la colocación de barreras de protección, etc.

En carreteras pavimentadas, por ejemplo, es importante eliminar baches, deterioros o pérdidas de guardavías y de señales, rajaduras en muros, en disipadores de la energía de los canales de drenaje, la limpieza de la colmatación de cursos de agua y alcantarillas, limpieza de la calzada de polvo, de piedras o de derrumbes sobre las

calzadas, etc. Este tipo de problemas deben ser identificados en los reconocimientos rutinarios, posiblemente diarios, en los diferentes tramos y reportados sistemáticamente para su atención en lo posible inmediata. En el caso de carreteras no pavimentadas, se requerirá del perfilado de la capa granular de rodadura rellenar baches causados después de lluvias, limpieza de las obras de drenaje, reparación y remplazo de señales camineras, remoción de derrumbes, etc.

El alto índice de accidentalidad en las carreteras, posiblemente tiene un componente causado por la falta de señalización de las condiciones de peligro por el uso de velocidades inadecuadas o por la falta de guardavías en trazados en terrenos accidentados; y los derrumbes o caídas de piedras, podrían deberse al deterioro de algún muro o la falta de estabilidad de algún talud. La mayoría de estos casos pueden evitarse con acciones de carácter rutinario. Con este tipo de actividades, la carretera, aunque sea de las más simples deberá mantenerse dentro de niveles de operación cómodos y seguros. No está demás mencionar que las carreteras o caminos de menor tráfico, son los que pese o quizás en razón de su bajo volumen de demanda, son los de mayor riesgo para la circulación.

HOBBS CONSULTORES SA. (2011) "Estudio de Factibilidad y Definitivo del Proyecto Mejoramiento de la Carretera Mala – Calango – La Capilla. Informe de Mantenimiento Periodico y Rutinario". El mantenimiento rutinario comprende las siguientes áreas de la vía:

**a) Calzada.**

- Proveer una superficie de rodadura uniforme, libre de defectos que representen peligro para el usuario.
- Corregir los defectos que con el transcurrir del tiempo contribuyan a crear problemas futuros para la vía.
- Evaluación y monitoreo del comportamiento de la superficie de la vía mediante mediciones de rugosidad y deflectometría.

**b) Bermas**

- Mantener uniformidad y estabilidad de modo que sirvan como soporte seguro en caso de emergencia para los vehículos y sus cargas.

- Mantener el alineamiento y pendiente de las bermas para asegurar un drenaje adecuado.

**c) Drenaje**

- Limpieza del sistema de drenaje superficial (cunetas, alcantarillas, zanjas de coronación, zanjas de drenaje, etc.) para asegurar su operatividad.
- Reconocimiento y evaluación del funcionamiento de las estructuras y la influencia en ellas de las aguas superficiales.

**d) Estructuras**

- Inspección periódica y sistemática con el propósito de auscultar cualquier daño en la estructura, evaluando su magnitud para proceder a su mantenimiento y reparación inmediata.

**e) Señalización**

- Verificación que la señalización horizontal, vertical y de seguridad vial, se encuentren en óptimas condiciones, verificando la reflectividad y la posición correcta para el confort y seguridad del usuario, proponiendo asimismo la colocación, cambio y/o retiro de la misma.

**f) Preservación ambiental**

- Supervisar las obras específicas de prevención y mitigación ambiental.
- Reforestación de zonas desforestadas dentro del área de influencia o derecho de vía.
- Desarrollo de actividades de comunicación y capacitación a los usuarios de la vía y a la población en general, orientadas a la conservación del medio ambiente, en beneficio del mantenimiento de la vía.

- Mantenimiento y utilización adecuada de las zonas de botadero para el acondicionamiento de materiales provenientes de derrumbes, bacheos, limpiezas en general, etc.

### **2.1.2 MANTENIMIENTO PERIODICO**

MTC (2013) “Manual de Carreteras Conservación Vial”. De otro lado, la conservación periódica es de naturaleza distinta, mayormente está referida a las condiciones que se requiere recuperar en los elementos que conforman lo que en el Perú se denomina las calzadas y las bermas de la carretera, así como correcciones puntuales generadas por alguna inestabilidad en los terraplenes, que producirán posiblemente pequeños hundimientos y que requieren recuperación localizada de la plataforma, de la superficie de rodadura y de las obras complementarias.

La conservación periódica en las carreteras pavimentadas se realiza en periodos de más de un (01) año; la intervención de recuperación se centra fundamentalmente sobre la calzada y las bermas. En las tareas previas de programación de esta intervención puede detectarse un proceso de incremento previsible en la demanda. Motivo éste que significará tomar en cuenta este factor y en caso necesario, además de aplicar la conservación periódica consistente en la colocación alternativa de un sello o de un micropavimento, podría optarse por la colocación de un refuerzo que prolongaría la vida útil del pavimento por otros cinco o más años. Esta actividad, sin embargo, para ser considerada presupuestalmente como conservación vial, debe ejecutarse manteniendo el mismo trazado de la carretera actual; y adicionalmente la programación deberá haber considerado para el mismo tramo intervenido, la realización de las actividades rutinarias del año.

En el caso de las carreteras de grava, denominadas en el Perú normalmente carreteras afirmadas, el periodo de reposición de grava de la superficie de rodadura y su compactación, puede tener periodicidad bastante más seguida, dependiendo de la naturaleza de la demanda o de la calidad de la grava que tiene la carretera, particularmente respecto de la estabilidad de la dosificación de la granulometría utilizada y el cuidado que se haya tenido de mantener la humedad del camino. E igualmente que, en el caso de las carreteras pavimentadas, todas las otras actividades

de conservación rutinaria que protejan al usuario de la carretera a lo largo del tramo, para darle seguridad, deberán ser ejecutadas normalmente.

El mantenimiento periódico abarca todas las actividades tendientes a mejorar la integridad estructural y calidad de la superficie de rodadura, de acuerdo a una programación pre-establecida y apuntalada con la base de datos obtenida durante el mantenimiento rutinario, en las siguientes áreas:

Hobb Consultores SA. (2011) “Estudio de Factibilidad y Definitivo del Proyecto Mejoramiento de la Carretera Mala – Calango – La Capilla. Informe de Mantenimiento Periodico y Rutinario”. El mantenimiento periódico comprende las siguientes áreas de la vía:

**a) Calzada.**

- Realizar Estudios de Deflexiones y rugosidad, con la finalidad de confirmar y/o redefinir el programa de mantenimiento pre-establecido.
- Restablecer los niveles de serviciabilidad de tal forma de cumplir con los niveles aceptables.

**b) Bermas**

- Restablecer las condiciones de las bermas de tal forma de cumplir los niveles de serviciabilidad requeridos.

**c) Drenaje**

- Reconstrucción del sistema de drenaje superficial.
- Reconstrucción del sistema de drenaje subterráneo.

**d) Estructuras**

- Reconstrucción de elementos de protección en alcantarillas y muros, pontones y puentes.

#### **e) Señalización**

- Reposición de la Señalización Horizontal.
- Reposición de la Señalización Vertical
- Reposición de los dispositivos de seguridad vial (Elementos de encarrilamiento).

#### **f) Taludes**

- Intervención en Taludes inestables y monitoreo de su estabilidad a fin de proyectar las soluciones adecuadas que garanticen la seguridad vial de la vía.

#### **g) Protección Ambiental**

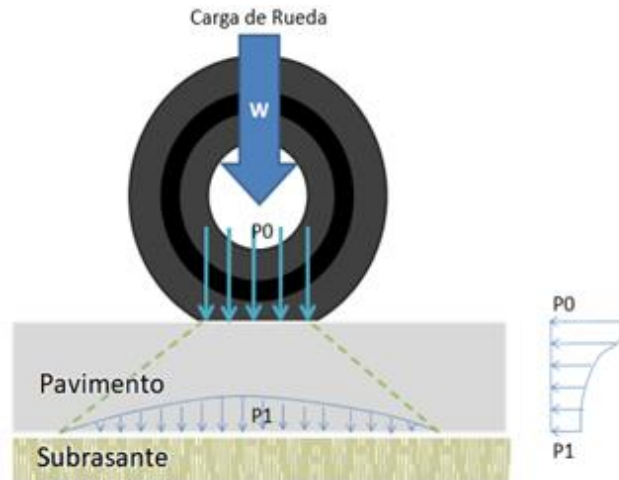
- Monitoreo ambiental (calidad del agua, aire, ruidos, temperatura, etc)
- Revegetación de zonas deforestadas dentro del área de influencia o derecho de vía.

## **2.2 EVALUACION ESTRUCTURAL**

La estructura del pavimento flexible al ser sometida a una determinada sollicitación, normalmente una carga ortogonal a su superficie, produce un estado de tensiones y deformaciones. Las deformaciones producen desplazamientos en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas del orden de centésimas o milésimas de milímetros.

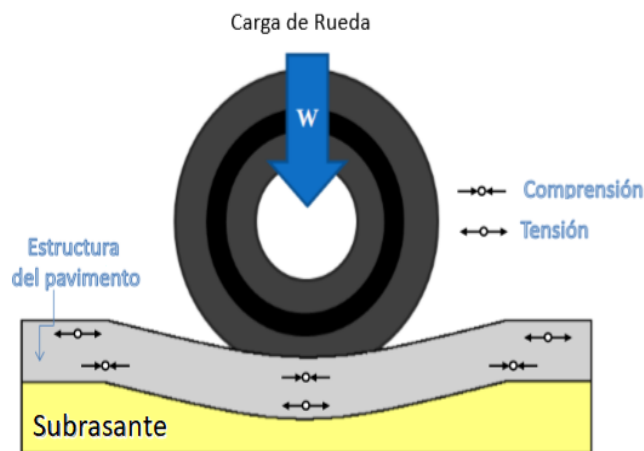
En la **Figura N°04**, se observa la primera condición específica de Esfuerzo Deformación:

- La Carga por rueda  $W$  es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una Presión Vertical aproximadamente Uniforme,  $P_0$
- La estructura del Pavimento distribuye luego los esfuerzos de la carga, reduciendo su intensidad hasta que, en la superficie de la subrasante, tiene una intensidad máxima  $P_1$ . La figura ilustra la manera general en la cual la intensidad de la máxima presión vertical disminuye con la profundidad de  $P_0$  a  $P_1$ .



**Figura N° 04:** Distribución de la presión del neumático a través de la estructura del pavimento. Fuente: Manual de Pavimentos, Néstor Huamán

En la **Figura N°05**, se observa la segunda condición específica de Esfuerzo Deformación. Donde la carga por rueda  $W$ , deflexa la estructura del pavimento causando Esfuerzos y Deformaciones de Tensión y Compresión en la capa Asfáltica



**Figura N° 05:** Deflexión en el Pavimento  
Fuente: Manual de Pavimentos, Néstor Huamán

La deflectometría es el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de una calzada, a consecuencia de la acción de una determinada carga o sollicitación. Es una medida de la respuesta del conjunto “pavimento – sub rasante” frente a una determinada sollicitación, indicando la adecuabilidad del pavimento desde el punto de vista estructural.



La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema 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 de demanda de tráfico.<sup>5</sup>

En general la evaluación estructural está comprendida por la auscultación estructural y el retrocálculo, entendiendo por auscultación estructural las técnicas de recolección de información del pavimento (deflexiones) y la segunda la aplicación de la metodología a utilizar para definir los resultados finales de la evaluación estructural.<sup>6</sup>

Escobar (2007) en su Tesis “Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), la auscultación estructural de los pavimentos ha ido variando con el tiempo en función de los avances tecnológicos, requiriendo cada vez un mejor rendimiento de trabajo, una recolección sistemática de los parámetros del pavimento y menor daño físico y operacional al pavimento en estudio. Dentro de las mediciones realizadas en la auscultación estructural habrá que considerar los siguientes aspectos ya que pueden inducir errores al interpretar los resultados:

- Temperatura. Será necesario realizar ajustes en las deflexiones en base a la temperatura bajo las que se realizaron los ensayos y se observará cual es el comportamiento térmico del pavimento.
- Humedad. Esta afecta a las bases, subbases y subrasantes, ya que algunos de los materiales componentes de las mismas tienen una gran susceptibilidad a dicha humedad.
- Tiempo de carga. Esta condición tiene una gran influencia en los valores obtenidos de deflexión, por ejemplo:

<sup>5,6</sup> Mario S. Hoffman, Ph.D, “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos no destructivos)”, Octubre 1985.

- Materiales ligados con cemento asfáltico: Están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza visco elástica del asfalto. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.
- Materiales ligados con cemento hidráulico: El módulo dinámico para materiales cementados puede ser de aproximadamente el doble del módulo estático, si el tiempo de aplicación de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el módulo aumenta.
- Suelos finos: Manifiestan mayor rigidez en respuestas a cargas dinámicas.

## **2.2.1 METODOS DE EVALUACION ESTRUCTURAL**

Escobar (2007) en su Tesis “Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectometro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), con el análisis estructural se encuentran los estudios de vida remanente, capacidad estructural y rehabilitaciones. Para realizar todos estos estudios se utilizan diversos métodos, los cuales han sido orientados para predecir y solucionar fallas estructurales que ocurren en los pavimentos.

Como se mencionó líneas arriba, existen tres métodos para la evaluación estructural, los cuales son los siguientes:

### **2.2.1.1 METODO CONREVIAL:**

El Consorcio de Rehabilitación Vial (CONREVIAL) Se basa en las deflexiones características y admisibles halladas mediante el procesamiento estadístico de los datos recopilados en campo.

Mamani (2011) en su Tesis “Evaluación Estructural del Pavimento con Viga Benkelman -Método Empírico, Carretera Cañete-Chupaca Política de Mantenimiento; las fallas estructurales fundamentalmente 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 cargas móviles y/o estáticas.

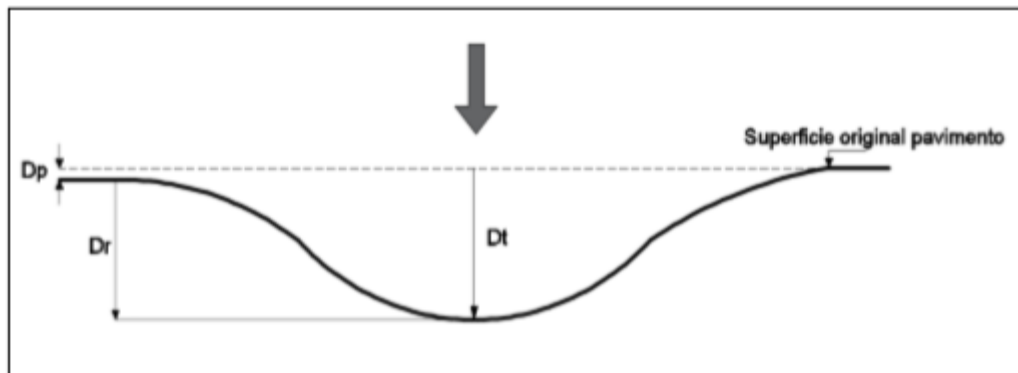
En consecuencia es lógico que el criterio dominante para valorar la capacidad estructural se basa en la deformabilidad de las calzadas bajo cargas normalizadas.

De esta manera, la deflexión es una medida de la respuesta del conjunto "pavimento-subrasante" frente a una determinada sollicitación, indicando la adecuación del mismo desde el punto de vista estructural. (Mamani, 2011)

### a) Deflexión

La deflexión es parte de carácter elástico, pero también intervienen esfuerzos plásticos. Los primeros desaparecen en cuanto se renueva la carga, mientras que los segundos son permanentes, y su acumulación a través de las reiteraciones de las cargas produce las distorsiones o ahuellamientos en la superficie del pavimento. Por este motivo, deben distinguirse:

- La deflexión total ( $d_t$ ) (flecha hacia debajo de la deformación producida por la carga)
- La deflexión recuperable o elástica ( $d_r$ ) (flecha hacia arriba de la recuperación de la superficie que se produce al retirar la S).
- La deflexión permanente o residual ( $d_p$ ) (diferencia entre la posición original de la superficie antes de aplicar la carga y después de retirarla).



**Figura N° 06:** Tipos de Deflexiones. Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Via De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman, Cubas Rosa (2017)

Se puede observar que:

$$dt = dr + dp$$

***Fórmula N° 01: Deflexión total***

**b) Equipo Necesario**

- Viga Benkelman modificada

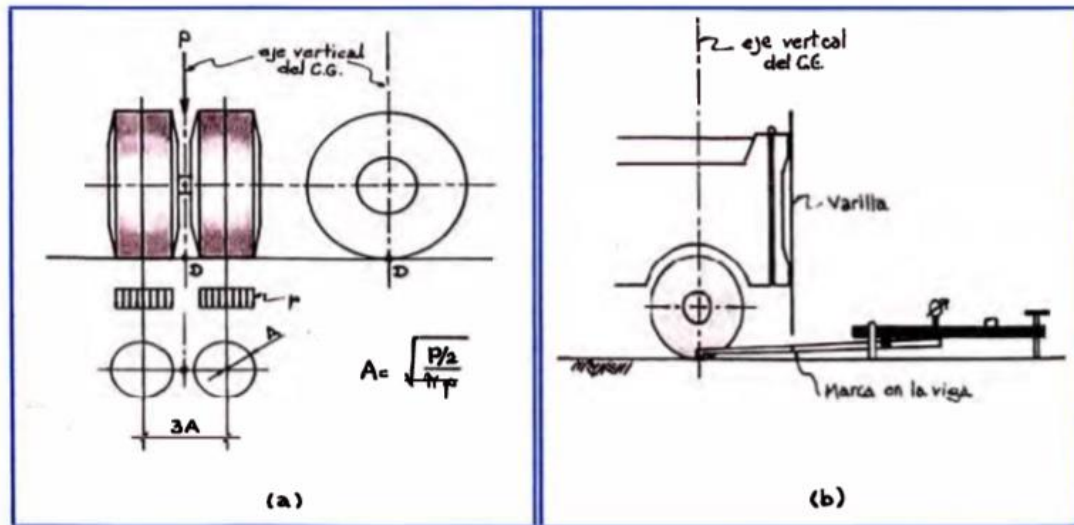
Es un dispositivo mecánico que mide los desplazamientos de un punto de contacto colocado entre las ruedas duales de un camión, bajo el eje de carga, con una determinada presión de aire en los neumáticos y una carga pre-establecida en el eje; es decir, se mide la flecha máxima de la línea de deformación bajo una carga constante.

La Viga Benkelman usual está constituida por una palanca de gran longitud, que pivota alrededor de un eje de rotación horizontal, situado en un punto fijo, que divide la palanca en dos brazos desiguales, generalmente en la relación 2: 1. En uno de los extremos de la palanca, que corresponde al brazo de mayor longitud, se encuentra la punta de prueba, diseñada para situarse entre las llantas de la rueda dual. En el otro extremo se sitúa el palpador de un flexímetro o comparador, soportado por un bastidor independiente de la palanca. Los desplazamientos de los extremos de la palanca son registrados a través del flexímetro, guardando lógicamente la misma relación que los brazos de la misma. La viga se apoya en dos patas delanteras y en una trasera de posición regulable. Un pequeño vibrador asegura un estrecho y continuo contacto entre flexímetro y palanca. Un volante permite trabar la palanca, para el traslado de la misma.

La viga modificada consta de dos palancas en un mismo bastidor. Se trata de dos vigas desplazadas 0.25m. una de otra, de manera que cuando la punta de prueba de la viga 1, o principal, se sitúa entre las llantas de la rueda dual, la correspondiente a la viga 2 queda ubicada a 25 cm de aquella. La ventaja radica en que permite la determinación simultánea de la deflexión bajo carga y a 25 cm de la misma, de utilidad para una mejor caracterización del pavimento, según se describe más adelante. Por este motivo, todos los componentes relativos al

funcionamiento de las palancas, se hallan duplicados.

Camión para la carga de prueba Se utiliza un camión con un solo eje trasero, cargado a 8,2 toneladas, ruedas duales. Se aconseja llantas 10 x 20, 12 lonas, infladas a una presión de 5.6 bares. En la **Figura N°07**, se muestra las vistas de perfil y frontal del eje cargado.



**Figura N° 07:** Esquema de la Transmisión de Carga y equipo medidor de deformaciones. Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones, Del Águila Minusa, Pablo

- Termómetro electrónico digital para la medición de la temperatura del asfalto.
- Equipo para perforación de pavimento asfáltico, para medición de temperatura (cincel o punzón de acero y comba de 10 libras)

### c) Procedimiento de medición

Cuando el camión se encuentra estacionado en la zona de medida, se introducen los puntos de prueba entre los neumáticos (uno a nivel del eje, el otro se coloca automáticamente 25 cm detrás).

### d) Proceso de las medidas

La deflexión recuperable medida por la viga 1 ( o principal) y la viga 2 se obtienen por la fórmula siguiente:

$$D_t = (L_t - L_i) R$$

**Fórmula N° 02: Deflexión Recuperable**

Donde:

$D_t$  = Deflexión recuperable en centésimos de mm, medida a la temperatura "t" °C.

$L_t$  = Lectura final del flexímetro de la viga considerada (en centésimos de mm)

$L_i$  = Lectura inicial del flexímetro de la viga considerada (en centésimos de mm).

$R$  = 2 ó 4 según la relación de brazos de la viga

**Ajuste por temperatura**

La fórmula indicada más arriba permite conocer las deflexiones recuperables (deflexión máxima y a 25 cm del eje), a la temperatura medida. Se debe ajustarlas para una temperatura estándar de 20 °C usando la fórmula siguiente:

$$D_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{D_t}{10^{-3}(1/\text{cm}^{\circ}\text{C}) \times e \times (t - 20^{\circ}\text{C}) + 1}$$

**Fórmula N° 03: Deflexión Recuperable a la Temperatura estándar**

$D_t$  = Deflexión recuperable en centésimos de mm, medida a la temperatura "t" ° C.

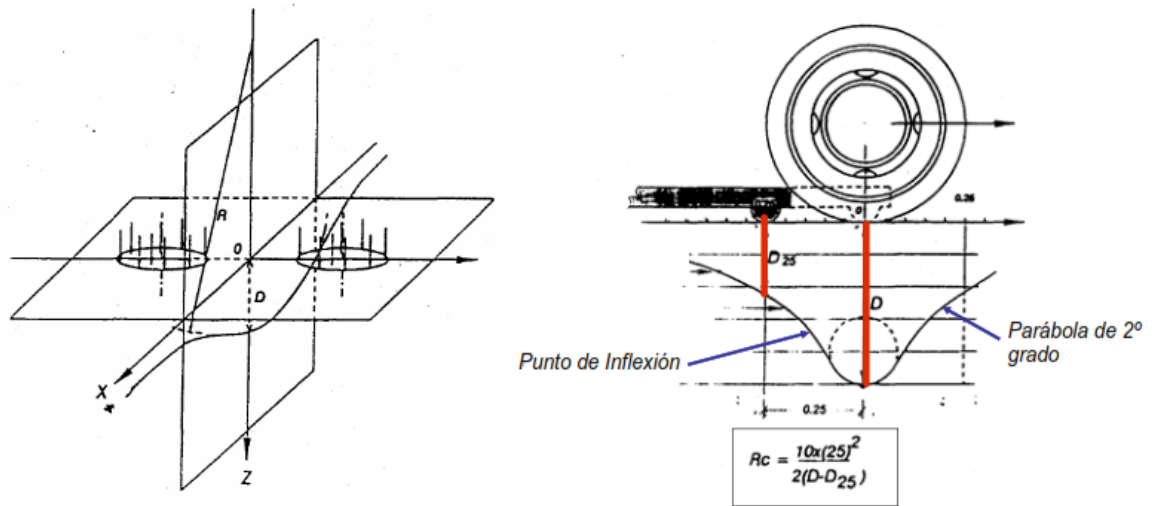
$D_{20}$  = Deflexión recuperable a la temperatura estándar (20° C).

$e$  = Espesor de mezclas asfálticas en cm, medido en el borde del pavimento

**Radio de Curvatura**

La línea de deflexión se aproxima a una parábola hasta una distancia algo mayor de 25 cm, del eje de carga para sufrir luego una inflexión y tender asintóticamente

hacia la horizontal. En la **Figura N°08** se esquematiza el radio de curvatura y además también la deflexión recuperable que mide la Viga Benkelman. La deformada del pavimento y parámetros de comparación, la Viga de brazo doble y su método empírico, genera una deformada del tipo parábola. Se muestra la deformada y el círculo inscrito de radio de curvatura ( $R_c$ )



**Figura N° 08**, Esquema Conceptual del Radio de Curvatura. Fuente: Estudio de rehabilitación de Carreteras en el Perú – MTC- CONREVIAl

El cálculo del radio de curvatura se hace con la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$$

**Fórmula N° 04: Radio de Curvatura**

$R_c$  = Radio de Curvatura en metros

$D_0$  = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga,  
en centésimas de mm para la temperatura estándar de 20°C

$D_{25}$  = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga,  
en centésimas de mm para la temperatura estándar de 25°C

**e) Análisis estadísticos de los resultados – Deflexión característica**

Si en un tramo las deflexiones siguen una distribución normal, entonces para el cálculo de la deflexión característica se usan las siguientes ecuaciones:

**Deflexión media:**

$$Dm = \frac{\sum D}{N}$$

**Fórmula N° 05: Deflexión Media**

Donde:

Dm = Media aritmética de los valores individuales.

D = Valor individual de un ensayo.

N = Número de ensayos individuales.

**Desviación Estándar:** este valor representa la dispersión de resultados en pavimentos que posean el mismo valor medio Dm

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum(D-Dm)^2}{N-1}\right)}$$

**Fórmula N° 06: Desviación Estándar**

**Coefficiente de Variación porcentual:** indica un mayor o un menor grado de dispersión aun cuando las secciones poseen distinto valor medio.

$$C_v = \frac{\sigma}{Dm} * 100$$

**Fórmula N° 07: Coeficiente de Variación porcentual**

La  $\sigma$  corresponde a la distorsión de resultados que posean el mismo valor medio Dm, de deflexión. El valor Cv, indica un mayor o menor grado de dispersión, aún para un distinto valor medio.

Para realizar el diseño del refuerzo, la **deflexión característica** representa mejor



a una determinada sección, mediante la expresión:

$$D_c = (D_m + t * \sigma)$$

**Fórmula N° 08: Deflexión Característica**

Tal como muestra en el **Cuadro N°01**, el valor de "t" corresponde a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la deflexión característica Dc.

Se aprecia los valores de "t" en cada probabilidad evaluada. En el diseño de un refuerzo, el espesor deberá ser tal que sólo una pequeña área resulte infradiseñada. Luego "t" es una decisión técnica y económica, que dependerá del número de determinaciones, grado de confiabilidad, relación entre costos de mantenimiento y rehabilitación, variabilidad de - capacidad estructural o constructiva, del tráfico, de la ubicación e. importancia de la carretera, entre otras.

<b>Valor diseño</b>	<b><math>D_c</math></b>	<b>Área <math>D_m &gt; D_c</math></b>
50	$D_m + \sigma$	50
75	$D_m + 0.674\sigma$	25
85	$D_m + \sigma$	15
90	$D_m + 1.3\sigma$	10
95	$D_m + 1.645\sigma$	5
98	$D_m + 2\sigma$	2
99	$D_m + 2.33\sigma$	1
99.9	$D_m + 3\sigma$	0.1

**Cuadro N° 01, Valor de "t" y probabilidad de ocurrencia de  $D_m > D_c$ .**

*Fuente: Estudio de rehabilitación de Carreteras en el Perú – MTC- CONREVIAl*

En la División de Carreteras de California se considera trabajar con el 80% percentil, mientras que el Instituto del Asfalto y Canadá recomiendan usar el 98%, a lo cual le corresponde una Dc igual a  $(D_m + 2 \sigma)$

El método CONREVIAl adopta un valor de  $D_c$  igual a  $(D_m + 1.645 \sigma)$  que corresponde al 95% de probabilidad de diseño, superada sólo por el 5% de las determinaciones efectuadas.

#### f) Ajuste Estacional

En principio, las deflexiones se miden en la época más húmeda del año. Si se miden en época seca, se debería aplicar un coeficiente correctivo a las deflexiones características cuando el contenido de agua de la subrasante es significativamente diferente durante los dos períodos.

Dicho coeficiente se define por experiencia (comparación de las deflexiones de un mismo tramo en período húmedo y seco). Depende:

- Del tipo de material de la subrasante (arena o arcilla)
- De la estación.

Por falta de datos comparativos en el Perú, se pueden aplicar los coeficientes de referencia propuestos por CONREVIAl que se muestra en el **Cuadro N°02**. Si por convención el coeficiente vale 1 para la estación "lluviosa", el coeficiente por aplicar a medidas hechas durante la estación "seca" se encuentra en los rangos siguientes:

<i>Tipo de suelo de la subrasante</i>	<i>Coficiente de corrección</i>	
	<i>Periodo llluvias</i>	<i>Periodo seco</i>
<i>Arena permeable</i>	1,0	1,1 a 1,3
<i>Arcilla sensible al agua</i>	1,0	1,2 a 1,4

**Cuadro N° 02, Coficiente de Corrección por estacionalidad**

*Fuente: Estudio de rehabilitación de Carreteras en el Perú – MTC- CONREVIAl*

Se comparan las precipitaciones de los dos meses anteriores a la medida del período más lluvioso del año, para determinar empíricamente el valor del coeficiente. Esos coeficientes se pueden aplicar en las zonas de sierra y selva. En principio, no se aplica corrección por este concepto en la zona costera, por ser excepcionales las llluvias.

### g) Deflexión Admisible

Esta deflexión corresponde a aquella que alcanzará el pavimento al final del tiempo de diseño. Por lo tanto, esta deflexión se calcula considerando la sollicitación de cargas para ese tiempo de diseño, representado en el valor "N" de ejes equivalentes acumulados hasta el último día de servicio. Luego la expresión será:

$$D_{adm} = \left( \frac{1.15}{N} \right)^{1/4}$$

*Fórmula N° 09: Deflexión Admisible*

Donde:

N = Número de ejes estándar equivalentes de 8.2 toneladas acumulados en el período de diseño.

D<sub>adm</sub> = Deflexión característica admisible en mm.

### h) Juicio sobre la capacidad estructural - CONREVIAL

Una vez finalizadas las distintas tareas de campo y obteniéndose los datos necesarios para aplicar el Método Empírico, se realizará un análisis de los resultados que conduzca a establecer la capacidad estructural del pavimento en relación al tránsito que debe soportar la calzada.

Como resultado de este análisis se llega a:

- Establecer el tipo de rehabilitación requerida, distinguiéndose tres situaciones representativas que pueden resumirse en:
  - Estructura adecuada: requiere de mejora superficial.
  - Estructura fatigada: requiere un refuerzo estructural.
  - Estructura deficiente: requiere reconstrucción parcial o total.
- Establecer el método que se empleará para el diseño de las obras de rehabilitación.
- La estimación de la vida útil remanente de la estructura del pavimento.

Para establecer el juicio sobre la capacidad estructural del pavimento de un tramo, se ha adoptado un criterio racional que combina **tres factores principales**

- La apariencia de la superficie en relación a la observación de fallas (particularmente de carácter estructural) de acuerdo a los resultados de la inspección visual.
- La deflexión recuperable del pavimento como parámetro indicativo de la respuesta mecánica del mismo, complementado con el radio de curvatura de la deflexión.
- La estructura del pavimento, determinada en base a los sondeos y antecedentes disponibles, que implica una compleja relación entre espesores y calidad de las capas del pavimento, calidad del suelo de la subrasante, drenaje, etc. y que se resume en si la misma responde a un diseño estructural adecuado o no.

El **Cuadro N°03** indica los casos típicos, no son los únicos, dependen de las circunstancias que puedan existir. A continuación, se detalla los casos presentados:

#### **Primer caso**

Se caracteriza porque la deflexión característica es superior a la tolerable para el tránsito actual o futuro previsto y no presentar fallas estructurales generalizadas. Se trata de pavimentos infradiseñados que necesitan con urgencia un refuerzo estructural para resistir el tránsito futuro.

Debe prestarse especial atención que no existe inmediatamente debajo de la capa asfáltica un cierto espesor de capa de base degradado y/o con elevado contenido de humedad. En forma no destructiva la presencia de esta zona débil puede ser detectada a través de reducidos valores del radio de curvatura en relación a la deflexión. Las deflexiones obtenidas son representativas para el cálculo del refuerzo.

#### **Segundo caso**

La característica que lo diferencia del primero es la generalización del desarrollo de fallas estructurales, que obedecen a causas ajenas a la presencia de espesor de base débil, inmediatamente debajo de la capa asfáltica.

Es el paso avanzado del primer caso cuando no se han tomado a tiempo las medidas necesarias. Las deflexiones son empleadas para el cálculo del refuerzo, sin embargo, para valores excesivamente altos puede negarse su utilización en razón de que:

- Es extremadamente difícil estimar el poder reductor de las deflexiones por efecto de un espesor de refuerzo excesivamente grande.
- La utilización de un único material de refuerzo (concreto asfáltico resulta, en la generalidad de los casos, antieconómica.

Por estos motivos, en estas circunstancias es conveniente por lo menos verificar el refuerzo calculado en base a métodos de diseño racionales.

### **Tercer caso**

Está caracterizado por la presencia de una capa débil subyacente a la asfáltica, que determina que la deformación de esta última bajo cargas no encuentre apoyo suficiente y sea mayor que la que correspondería en ausencia del espesor débil.

En este caso los radios de curvatura de la línea de deflexión son reducidos y el desarrollo de fisuramiento es posible aún con deflexiones tolerables, cuando la estructura total puede defender adecuadamente a la fundación, pero la base no presta el necesario apoyo.

### **Cuarto Caso**

Se tratan de pavimentos antiguos reforzados con grandes espesores asfálticos que evitan fallas por fatiga, pero que no compensan la debilidad de la fundación primitiva, por lo que se observan deformaciones permanentes que afectan toda la estructura (no atribuidas a las capas asfálticas). (Mamani, 2011)

### **Quinto caso**

No se observan signos de degradación estructural, las deflexiones son inferiores a la tolerable y la estructura del pavimento no revela infradiseño. La capacidad estructural del pavimento resulta satisfactoria por lo que la rehabilitación se limitará a una corrección de las deficiencias superficiales que se observan en la superficie de rodamiento. (Mamani, 2011)

DEFLEXTOMETRÍA	ESTADO VISUAL	ESTADO ESTRUCTURAL	RECOMENDACIONES
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados o aceptables (en relación a la estructura). $D_c > D_a$ y $+R_c$	No hay fallas de origen estructural.	Estructura infradiseñada, pero la capacidad portante de las capas decrece en profundidad (No existe capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica).	Examinar fecha y tipo de las últimas obras ejecutadas, para justificar estado del pavimento.  <b>1er CASO</b>
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados o aceptables (en relación a la estructura). $D_c > D_a$ y $+R_c$	Hay fallas de origen estructural generalizadas.	Estructura infradiseñada, pero la capacidad portante de las capas decrece en profundidad (No existe capa débil inmediatamente debajo de la capa asfáltica).	Hay acuerdo entre todas las variables. A) Las deflexiones son empleadas para el cálculo del refuerzo. B) Para deflexiones muy fuertes analizar económicamente la reconstrucción. C) Verificar refuerzo con otros métodos de diseño.  <b>2do CASO</b>
La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son pequeños (aún para deflexiones reducidas). $D_c > D_a$ y $-R_c$	Hay fallas de origen estructural generalizadas.	Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas (Relación entre módulos de elasticidad es menor que 1).	Se trata de neutralizar el efecto de la capa de falla, ya sea por reconstrucción parcial, o refuerzo. No es conveniente emplear las deflexiones ya que puede no ser representativa.  <b>3er CASO</b>
La deflexión característica es inferior a la admisible. Los radios de curvatura son reducidos $D_c < D_a$ y $-R_c$	Hay fallas de origen estructural por fatiga (fisuras tipo piel de cocodrilo)	Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas	Analizar fecha de mediciones y tipo de estructura. Neutralizar el efecto de la capa débil (Reconstrucción o refuerzo). De ninguna manera se pueden considerar las deflexiones para el proyecto, emplear métodos de diseño.  <b>3er CASO</b>
La deflexión característica es inferior a la admisible. $D_c < D_a$	Hay fallas de origen estructural: Deformaciones permanentes de la fundación.	Estructura degradada no adecuada para fundación.	Evaluar aporte estructural de la calzada existente (reconstrucción o refuerzo). La deflexión no es representativa.  <b>4to CASO</b>
La deflexión característica es inferior a la admisible. $D_c < D_a$	No hay fallas de origen estructural	Estructura bien diseñada.	Corregir fallas de origen superficial: las soluciones dependerá de los defectos observados y sus causas. Mejora superficial.  <b>5to CASO</b>

**Cuadro N° 03, Análisis Combinado de los Resultados de Evaluación**

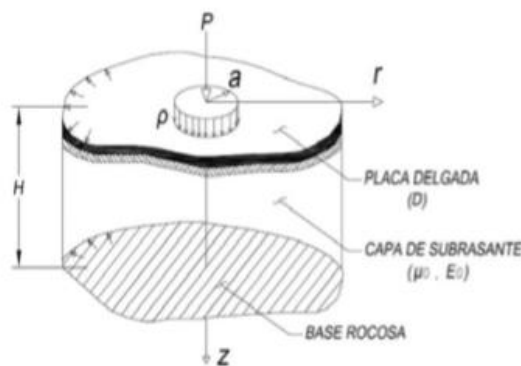
Fuente: Modelación Geotécnica de Pavimento Flexible con Fines de Análisis y Diseño en el Perú, Gutiérrez Lázares José (2007)

### 2.2.1.2 METODO ELASTICO:

En el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. (Hoffman, 1985, p.8). Ver Figura N°09

Gutiérrez (2007) en su Tesis “Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú”. El Modelo matemático de Hogg o también llamado Método Elástico, se basa en la interpretación de combinaciones entre la máxima deflexión alcanzada por la carga y de la longitud característica de la deformada misma.

El modelo de Hogg está basado en un sistema hipotético de dos capas que consiste en una placa relativamente delgada que se apoya sobre una fundación elástica. El método es práctico y simplifica el Sistema elástico multicapa típico por un modelo equivalente bicapa, compuesto por una capa rígida sobre un medio elástico. Dependiendo de la selección de valores a lo largo de la curva de deflexión usada para calcular el módulo de la subrasante, existirá la posibilidad de sobre o subestimar el módulo de elasticidad. (Del Águila, 2007, p.1). Ver Cuadro N°04



**Figura N° 09, Esquema Modelo de Hogg.**

. Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos No Destructivos), Hoffman S., Mario

PARAMETROS BÁSICOS DEL MODELO	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (t - m)$	Rigidez a la flexión de la placa
	$l_0 = \frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)^{1/3}}{2(1 - \mu)E\phi} \quad (cm)$	Longitud característica
	$E\phi$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad de la subrasante
	$\mu_0$ (adimensional)	Módulo de poisson de la subrasante
	H (cm)	Profundidad de estrato rocoso
Parámetros de evaluación	$L_0, E\phi, D$	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas

**Cuadro N° 04,** *Parámetros Modelo de Hogg. Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos No Destructivos), Hoffman S., Mario*

### DEFLEXIONES EN EL MODELO DE HOGG

La expresión matemática desarrollada para el cálculo de las deformaciones en la superficie del sistema viene dada por una integral infinita de funciones Bessel y funciones angulares hiperbólicas, la cuál, para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio "a" tiene la siguiente forma:

$$\Delta_{(z=0,r)} = \left( \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0) \cdot p \cdot a}{2(1 - \mu_0) \cdot E_0} \right) \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{m \cdot r}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{L_0}\right)}{m^4 + m \cdot \phi \frac{m \cdot h}{L_0}} dm$$

**Fórmula N° 10:** *Deformación de la Superficie*

Donde  $\mu_0$ ,  $E_0$ ,  $p$ ,  $l_0$ , están definidos en el cuadro N°04, "r", es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga y "φ" viene dada por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{\operatorname{senh} m \times \operatorname{cosh} m + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{\operatorname{senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}}$$

**Fórmula N° 11:** *Determinación de "φ"*

Siendo "m" la variable de integración.

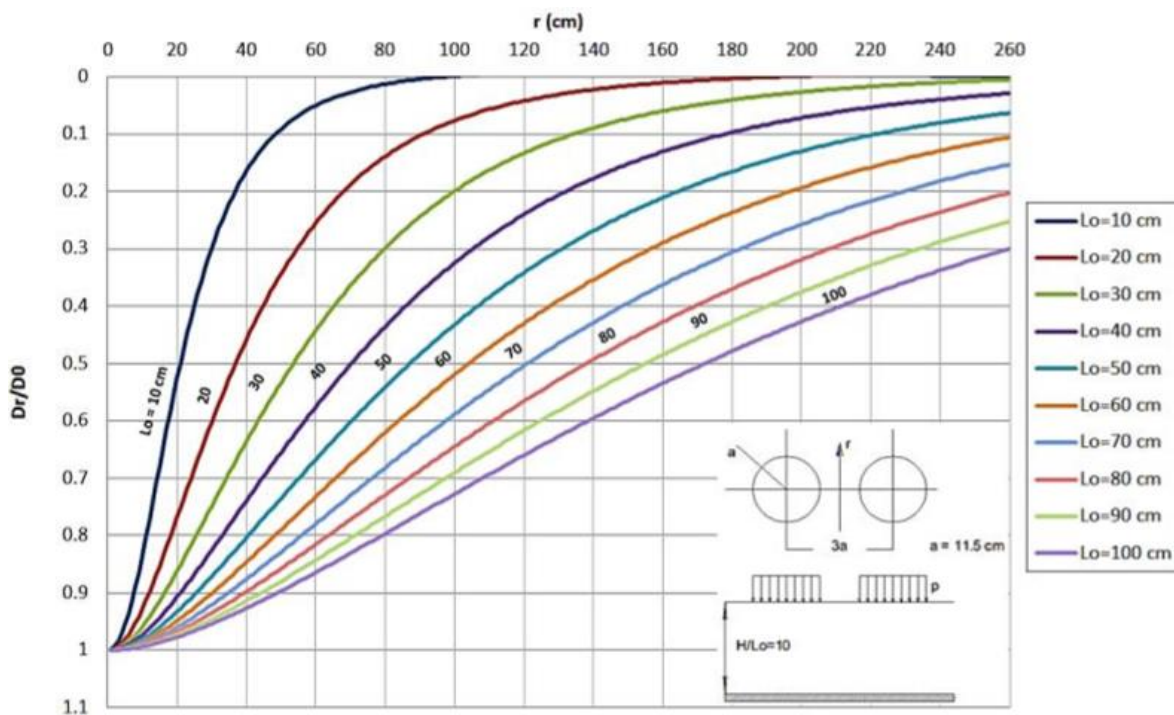


Hoffman en 1977 presentó la solución computarizada para la Fórmula N°10, lo que permitió la confección de nomogramas y tablas para el cálculo de deformaciones teóricas, en cualquier punto de la superficie del sistema. (Hoffman, 1985, p.9)

### CARACTERÍSTICAS Y UTILIZACIÓN DEL MODELO

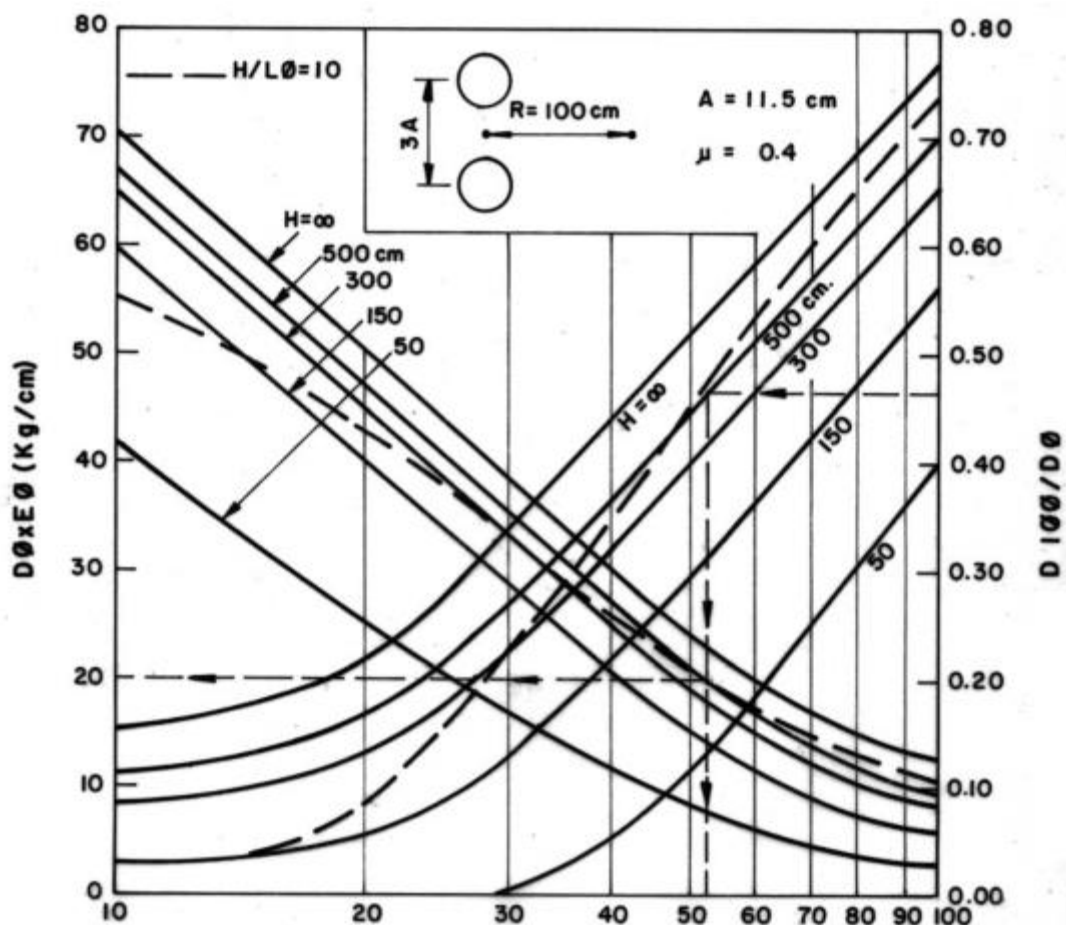
El modelo presentado y los conceptos desarrollados en torno a él, hacen posible caracterizar los materiales del sistema pavimento-subrasante en base al análisis e interpretación de las curvas de deflexiones.

Para hacer uso del modelo de Hogg no se necesita conocer el espesor de las capas del pavimento, ya que las curvas de deflexiones de superficie teóricas, diseñadas mediante la Fórmula N°10, dependen solamente de la longitud elástica  $L_0$  (ver figura N°10), lo que constituye una ventaja toda vez que, la experiencia demuestra, en la gran mayoría de los pavimentos evaluados, ó se desconoce el espesor o es difícil controlar su variación.



**Figura N°10,** Curvas de Deflexiones en el Modelo Hogg para la configuración de Carga de la Viga Benkelman. Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos No Destructivos), Hoffman S., Mario

En el modelo se introduce, mediante la variable  $h$  una capa rígida a una profundidad finita. En el procedimiento de evaluación ésta representa a una capa rocosa existente o funciona como un factor de ajuste que limita la extensión horizontal de las curvas de deflexiones teóricas, que de otra manera serían infinitas, lo que se contradice con las curvas experimentales. Por otro lado, la extensión finita de las curvas de deflexiones medidas puede obedecer a una conducta no-lineal de los materiales del pavimento y subrasante y no implica necesariamente que realmente exista una capa rígida. Para la utilización del modelo se sugiere la introducción de una capa rígida a una profundidad igual a 10 veces la Longitud Elástica del pavimento ( $h = L_0$ ). (Hoffman, 1985, p.10)



**Figura N°11, Nomograma para Evaluación Basado en el Modelo de Hogg (Viga Benkelma).** Fuente: *Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos No Destructivos)*, Hoffman S., Mario

Las curvas y nomogramas, como los presentados en las Figuras N°10 y N°11, constituyen la implementación práctica del modelo para la evaluación estructural de pavimentos.

La Figura N°10 muestra las curvas de deflexiones adimensionales ( $DR/D_0$ ) obtenidas con el modelo de Hogg para una carga que simula la llanta doble utilizada con la Viga Benkelman. Así, por ejemplo, si se mide un  $D_0=60 \times 10^{-2}$  mm, y un  $DR=32 \times 10^2$  mm. a una distancia R de 60 cm, se obtiene un valor  $DR/D_0=0.53$  que corresponde a un valor  $L_0=34$  cm.

La Figura N°11 muestra un nomograma preparado en base a las soluciones rigurosas del modelo de Hogg, para determinar el Módulo de Elasticidad de la subrasante ( $E_0$ ). Este nomograma es para deflexiones medidas con la Viga Benkelman, para una carga de eje de 18 kilolibras, una huella circular de llanta de 11.5 cm, para  $R=100$  cm, y para distintos espesores "h" de la profundidad de la capa rocosa. Así, por ejemplo, para  $D_0=50 \times 10^{-2}$  mm.  $D_{100}/D_0=0.46$  y  $h=500$  cm, se obtiene  $L_0=52$  cm,  $D_0 E_0=20$  kg/cm y  $E_0=20/D_0$ , es decir,  $E_0=20/0.05=400$  kg/cm<sup>2</sup>. (Hoffman, 1985, p.12)

## **PARÁMETROS DE EVALUACIÓN**

Según se ha expuesto, la metodología de evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de deflexiones de superficie se sustenta matemáticamente en el Modelo de Hogg y en conceptos de la teoría de la elasticidad y resistencia de materiales. Los insumos para el procesamiento de los datos se dividen en cuatro (4) categorías:

- a) Datos de carga (P y p)
- b) Deflexiones medidas ( $D_0$ , DR y R)
- c) Datos de pavimento (Espesores y características de las capas)
- d) Parámetros del modelo ( $H/L_0$  y  $\mu$ )

La metodología por su parte, produce los siguientes datos de salida:  $L_0$ ,  $E_0$ , y  $E^*$ . Obviamente, los datos de salida dependen de los datos de entrada. La carga de ensayo es generalmente un dato fijo para cada proyecto y salvo circunstancias especiales debe estar en el rango recomendado de  $P= 18$  kilolibras y  $p= 75-85$  psi. Las deflexiones

medidas son el resultado de los ensayos y varían seguramente de proyecto a proyecto y entre diferentes puntos de un mismo proyecto debido a la heterogeneidad del pavimento y su subrasante y a errores inevitables de medición.

La selección de una o más distancias "R" depende del criterio del Ingeniero, aunque es común y práctico medir, como mínimo, D0, D40, D50 y D100 a distancias de 0, 40, 50 y 100 cm. del eje de la carga.

Los espesores y características de las capas del pavimento no siempre se conocen, a menos que existan datos históricos de construcción y/o diseño o se perforen calicatas. Esta información es necesaria para determinar "HC", cuyo valor influye en "E\*" pero no influye en los valores de "L0" y "E0", siendo esta una característica importante del modelo de Hogg. El significado de los parámetros del modelo se discute a continuación.

- **Significado de L0**

La longitud característica (L0) del pavimento es, por definición, un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor de L0 permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento-subrasante.

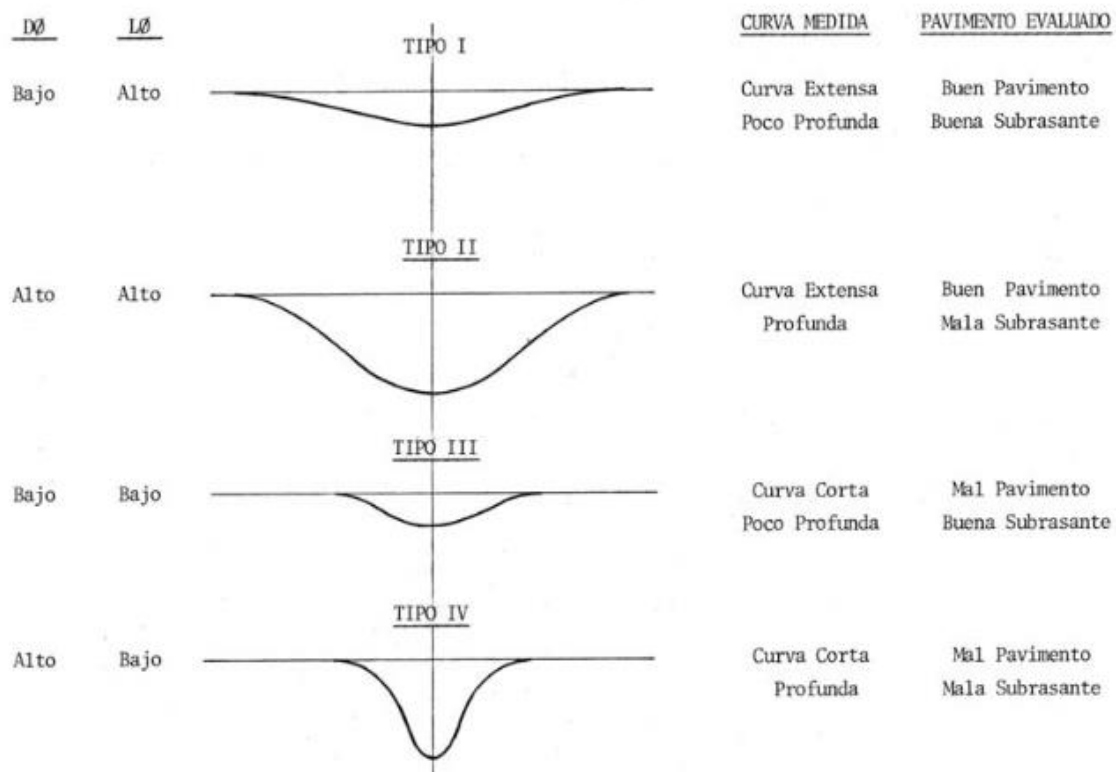
En un extremo de la escala puede pensarse en un pavimento rígido (losa de concreto) sobre una subrasante débil con un L0 del orden de los 80 cms. En el otro extremo se encuentra un pavimento compuesto de una capa granular sin revestimiento sobre una subrasante fuerte y un L0 del orden de los 15 cms. No hay que olvidar que se trata de una relación de rigideces de manera que un valor bajo de L0 puede corresponder tanto al caso de un buen pavimento sobre una buena subrasante como el caso de un mal pavimento sobre una débil subrasante.

La determinación de L0 en el proceso de evaluación depende solamente del cociente DR/D0 y del valor R. Es decir que dos pavimentos cualesquiera con igual cociente DR/D0 a una misma distancia R dada, tienen el mismo L0 aunque DR y D0 sean diferentes. Los valores específicos de D0 y DR influyen en los módulos E0 y E\* según se explica más adelante.

- **Significado de E0 y su relación con el CBR**

El parámetro E0 representa el módulo de elasticidad de la masa de subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante. E0 es inversamente proporcional a D0 y a L0, es decir que E0 es menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces S0/S dada, y viceversa. El primer paso corresponde a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y, en general, puede establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema, que se ilustran en la Figura N° 12.

Cabe insistir que las de la Figura N°12 son relaciones comparativas generales que pretenden ayudar en la visualización del significado de E0 y el pavimento en relación con las características de la curva de deflexiones medida.



**Figura N°12, Significado Cualitativo De Los Diferentes Tipos De Curvas De Deflexiones.** Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la Interpretación de curvas de deflexiones (Ensayos No Destructivos), Hoffman

S., Mario

A pesar que el módulo E0 es un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el valor del CBR de la subrasante, para facilitar el diseño del refuerzo requerido o para chequear diseños usando métodos tradicionales. Esta relación ha sido establecida experimentalmente, comparando los valores de E0 obtenidos de la metodología de evaluación estructural, usando deflexiones medidas con la Viga Benkelman y valores de CBR obtenidos en sitio.

De numerosas comparaciones de este tipo se ha podido establecer la siguiente relación:

$$E0 = (100 \text{ a } 160) \times \text{CBR}$$

***Fórmula N° 12: Módulo de Elasticidad de la Masa de Subsuelo***

Para E0 expresado en Kg/cm<sup>2</sup> y CBR en porcentaje.

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp, durante ensayos de propagación y análisis de ondas vibratorias realizadas en Holanda para determinar lo que denominaron el "E dinámico" de los suelos. El coeficiente numérico (100 a 160) de la Fórmula N°12 se denomina "factor de CBR" y se recomienda utilizar un factor de 100 a 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio. (Hoffman, 1985, p.28)

### **2.2.1.3 METODO SARP:**

El sistema de Análisis de Rehabilitación de Pavimentos (SARP), integra los resultados tanto de evaluación superficial, como de evaluación estructural del tipo de Ensayos destructivos. Integra información de fallas de la superficie del pavimento y espesores de las capas que conforman la estructura determinados mediante la ejecución de calicatas o excavaciones a cielo abierto. El método incluye factores de deducción por cada falla que presenta el pavimento y que degrada la estructura. Se considera el tráfico y su crecimiento gradual de sus ejes equivalentes asociados al PCI (*Paviment Condition Index*, Índice de Condición del Pavimento, el cual se realiza a través de inspecciones visuales, identificando la clase, seriedad y cantidad de fallas encontradas) y la correspondiente alternativa de solución. Como resultado final, al análisis con todos

los insumos, el proceso simula la degradación de la estructura a lo largo de los años y al momento de generar una alternativa de solución, calcula la vida remanente añadida por las actividades de mantenimiento ejecutadas. Se podrá elegir la alternativa más conveniente como:

- Número de años exigidos en la Rehabilitación
- PCI requerido
- Costo de las obras de Mantenimiento y/o rehabilitación

El método SARP requiere de varios insumos, pero principalmente del PCI y se orienta a evaluar los trabajos a nivel de proyecto, que luego se podrá integrar a un programa de gerencia de inversión en pavimentos, que evalúa a nivel de red vial.

Para los casos de evaluar el SARP, se requerirá de una planilla de recolección de datos, tal como se muestra en la Figura N°13, donde se aprecia que los datos corresponden a la evaluación superficial y estructural (Gutiérrez, 2007, p.46).

**PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS <SARP>**  
\*\*\*\*\*

TRAMO: Km. 1120 - Km. 1140

CODIGO GIP DEL TRAMO: M - ST - 8      FECHA: JUN-06

OPERADOR: W. GUTIERREZ L

FECHA DE EVALUACIÓN Y/O COMENTARIOS: ABRIL-06  
*Trabajos realizados para preparar el presupuesto 2007*

ALTURA MEDIA (m) SOBRE NIV. MAR: 1100

NIVEL DE CONFIANZA (50, 70 ó 90%) 50      PCI 64

PDT ACTUAL (vpd - 2 dir): 752      AÑOS DE SERVICIO: 22

ES SEGURA LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO POR FRICCIÓN (s/n): 5

PCI - FALLAS - VALOR DE DEDUCCIÓN (VD)

Nº FALLAS EN EL PAV. n= 8

1 Grieta piel / cocodrilo	V.D. <u>89</u>	CBR DE DISEÑO: <u>45</u>
2 Exudación de asfalto	<u>11</u>	
3 Grietas de contracción	<u>64</u>	
4 Elevac / hundimientos	_____	ESPESOR PAVIMENTO <u>cm.</u>
5 Corrugaciones	_____	
6 Depresiones	_____	
7 Grietas de borde	<u>16</u>	
8 Grieta reflex. junta	_____	
10 Grietas long / transv.	<u>68</u>	
11 Baches / zanjas rep.	<u>14</u>	
12 Agregado pulido	<u>18</u>	
13 Huecos	_____	
15 Ahuellamiento	_____	
16 Deform. por empuje	_____	Vida estimada del pav. Orig. (años) <u>20</u>
17 Grietas deslizam.	_____	
18 Hinchamiento	_____	
19 Disgreg / desinteg.	<u>18</u>	
	% Camiones <u>50.2</u>	Factor Camión <u>8.7</u>
	% Crecimiento Traf. <u>3.0</u>	
	Número de Canales <u>2</u>	
	Ancho de Canal <u>3.6</u>	

\*\*\*\* S A R P - G.I.F. - Versión 1.0 \*\*\*\*

TRAMO: Km 1108 - km 1117      FECHA: 9-92  
TRAMO CODIGO: M-ST-6      OPERADOR: W. GUTIERREZ L.

\*\*\*\*\* DATOS DEL TRAMO \*\*\*\*\*

FECHA RECOLECCIÓN DE DATOS y/o COMENTARIOS: 8-92      ALT. SNM (mts.) = 1100      AÑOS EN SERVICIO = 22      PDT (vpd) = 752  
PCI = 52      VIDA EST. PAV. ORIGINAL = 20      % CAMIONES = 50.20001

COND. SUPERF.: Segura      NIVEL DE CONFIANZA (%) = 50      FACTOR CAM. = 8.7  
CANALES = 2 / 3.6 M.      CRECIMIENTO = 3

-PCI-	FI - FALLA	VALOR DE DEDUCCIÓN
	1 Grieta piel / cocodrilo	90
	3 Grietas contracción	74
	10 Grietas long. / transv.	12
	11 Baches / zanjas rep.	74
	19 Disgreg. / desinteg.	7

-ESTRUCTURA PAVIMENTO-      -Cm.-      CBR de diseño

= 35      Superficie concreto asfáltico      5.5  
Base granular      30.0

\*\*\*\*\* ANÁLISIS DE RESULTADOS \*\*\*\*\*

Nº	ALTERNATIVA DE M&R	VIDA EST. (años)		COSTO / Km	PCI (d)
		TOTAL	VRE (+)		
	VIDA REMANENTE ESTIMADA	2.2			
1	Bachos de áreas críticas	3.5	1.3	72	74
2	Bachos extensos	4.4	2.2	115	81
3	Sello con agregado	4.4	2.2	57	81
4	Lechada asfáltica	4.4	2.2	86	81
5	Bachos de áreas críticas (+) Sello con agregado	6.8	4.5	130	99
6	Bachos de áreas críticas (+) Capa refuerzo CA c= 7cm.	30.0	PI	27.8	465
7	Rec. Sup. + adit. / asf. / agreg	6.2	4.0	144	99
8	Rec. Sup. + 3 cm. mezcla asf.	20	15.0*	270	99
9	No hacer nada	2.2	0.0	0	52

-COMENTARIOS-

Área estimada de Bachos % = 30.0  
Posible causa de falla : COMBINADA, NO SE DETECTA CAUSA FREDOMINANTE  
\* Máxima vida remanente agregada por esta alternativa  
PI Debido a que el dato ambiental y otros factores no son considerados 30 años es la max. vida asumida para el pavimento rehabilitado.

**Figura N°13, Recolección y Procesamiento de Datos – Programa SARP . Fuente: Modelación Geotécnica de Pavimento Flexible con Fines de Análisis y Diseño en el Perú, Gutiérrez Lázares José (2007)**

## **PROGRAMA SARP**

El programa, Sistema de Análisis de rehabilitación de Pavimento SARP, se emplea para generar alternativas de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R) en pavimentos flexibles, simulando la actuación de un ingeniero experto y permitiendo determinar lo siguiente:

- Posibles acciones correctivas que el pavimento pueda requerir.
- La vida remanente estimada (VRE) de la estructura tal y como se encuentra.
- Tiempo añadido por cada acción de M&R. - Costo por km. - Beneficio producido en la calidad de rodaje.

La información se asociada a cada tramo de vía evaluada y puede ser usada para la toma de decisiones a nivel de proyecto o para suministrar información al sistema a nivel red y de esta manera efectuar la gestión de inversión.

## **INTERPRETACION DE RESULTADOS**

El programa analiza la información que le ha sido suministrada con la finalidad de determinar una serie de indicadores que le permitan estimar las condiciones del pavimento, tanto funcional como estructural, su posible causa de falla y otras características que permitan diagnosticar el problema y definir posibles soluciones en el caso de que estas sean requeridas. Los resultados del análisis son presentados en pantalla y mediante copia impresa, comprendiendo lo siguiente:

### **- Información general y datos del tramo.**

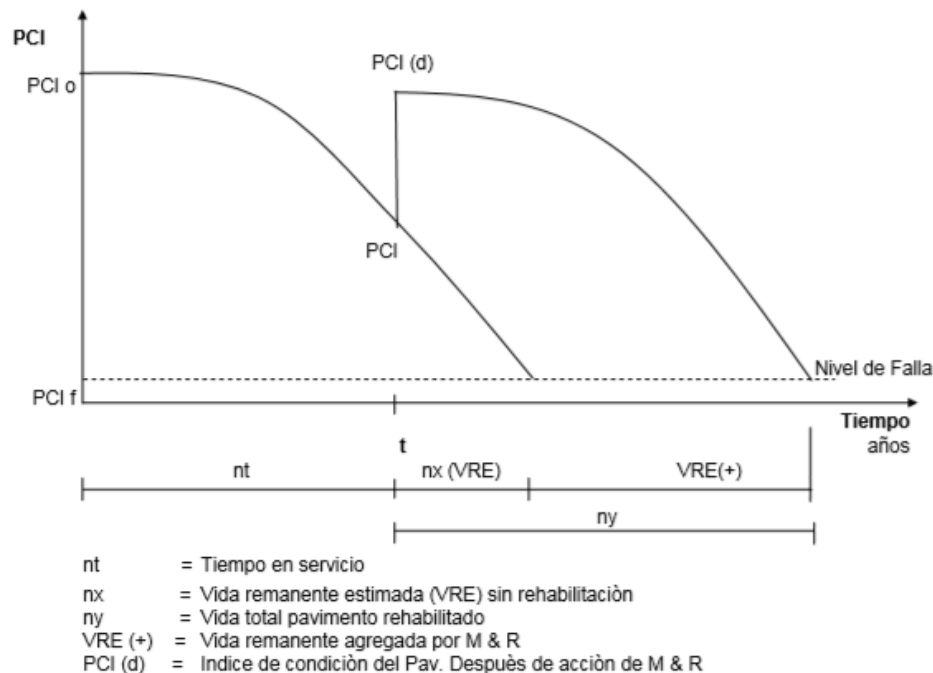
La parte inicial del reporte contiene los datos correspondientes al tramo tal y como han sido introducidos por el usuario.

### **- Análisis de resultados.**

Se presentan los resultados del análisis del pavimento. En la primera fila, bajo el título Vida Remanente Estimada se indica la vida estimada en años para que el pavimento llegue a su condición de falla funcional de no aplicarse antes alguna acción de mantenimiento mayor. Este valor de VRE, corresponde al dato que debe ser introducido en el programa GIP para determinar el nivel de prioridad del tramo. Para cada alternativa se presenta la información siguiente:



- Acción o estrategia de M&R.
- Vida total estimada del pavimento en años, una vez que se ejecute la acción indicada.
- Vida remanente agregada por la acción de M&R, VRE (+)
- Costo estimado para la acción, en miles de soles /Km.
- Índice de Condición del Pavimento después que la acción es ejecutada, PCI (d)..



**Figura N° 14:** Concepto de Vida Remanente. Fuente: Modelación Geotécnica de Pavimento Flexible con Fines de Análisis y Diseño en el Perú, Gutiérrez Lázares José (2007)

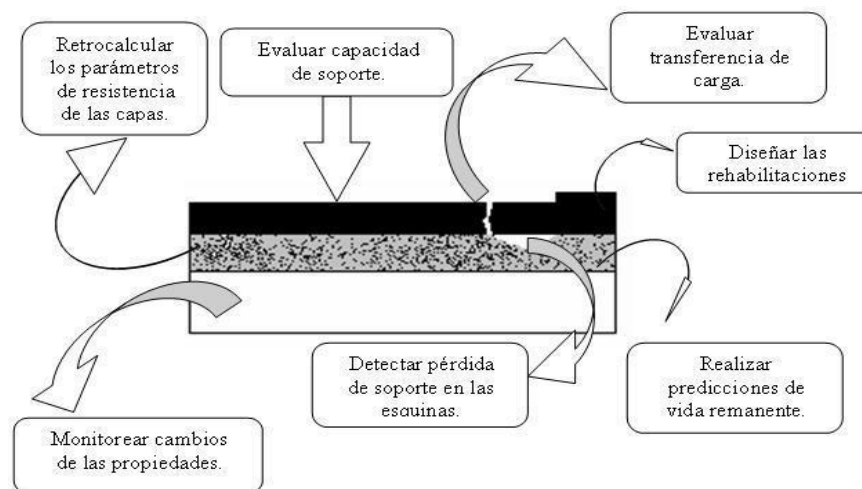
La Figura N°14, muestra como al realizar una medida de mantenimiento y rehabilitación (M&R), el valor de PCI se incrementa a la posición de PCI(d), modificando la trayectoria que sigue la degradación y aumentando el tiempo de servicio. Para un tiempo  $t$  de servicio. Las actividades de M&R, que elevan el valor del PCI, propicia un tiempo de servicio añadido (VRE (+)). Estas actividades de M&R puede darse tanto para largar el tiempo de servicio del pavimento, como para corregir el tiempo para el cual fue diseñado inicialmente. El proceso de degradación del pavimento presenta una trayectoria que al final coincide con el valor de PCI final (PCIf) en un nivel que no llega a la destrucción total de la estructura. Este nivel de falla puede ser el requerido en los términos de referencia del MTC, pero lo más importante radica en que la curva

intersecta a este nivel para un tiempo igual al de diseño e igual a  $(nt + nx(VRE))$ . (Gutiérrez, 2007, p.76).

Es importante que se escoja el método de evaluación estructural en base al método de diseño utilizado para entrelazar el estudio.

Muchos son los procedimientos empíricos que se basan en las condiciones tales como: tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales.

Al final, la evaluación estructural puede proveer resultados partiendo de las dos etapas importantes que lo componen como lo son la auscultación estructural y el retrocálculo (**Figura N°15**)



**Figura N° 15:** Resultados de una Evaluación Estructural. Fuente: Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd), Escobar, Kerin (2007)

Para la evaluación estructural son tan importantes las condiciones actuales del pavimento como las condiciones bajo las que se concibió el mismo, entre las que se pueden mencionar: las solicitaciones principales del pavimento, modelos de comportamiento del pavimento, métodos de evaluación estructural, etc. (Escobar,2007,p.11)

## 2.3 SOLICITACIONES PRINCIPALES DE UN PAVIMENTO.

Las solicitaciones principales de un pavimento son el producto del tránsito y el clima. El tránsito visto como las cargas a las que está expuesto el pavimento y el clima como el agente natural del medio ambiente.

### 2.3.1 TRÁNSITO

El pavimento debe ser diseñado para que sirva a las necesidades del tráfico durante cierto número de años (Periodo de diseño); por lo tanto, se debe predecir el crecimiento de éste para determinar las necesidades estructurales del pavimento. El estudio de tráfico, tiene por finalidad cuantificar, clasificar y conocer el volumen de los vehículos.

8





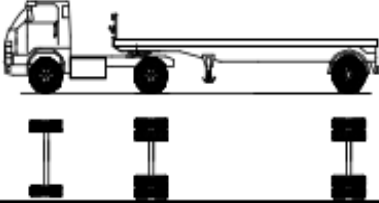
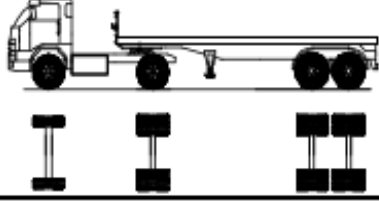
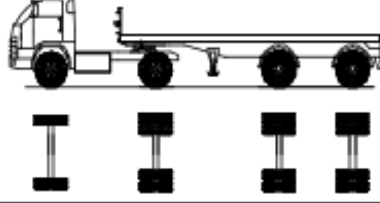
La estimación del volumen del tráfico, inicial y futuro, para el diseño estructural de pavimentos, requiere de un estudio y análisis exhaustivo. Para determinar el tráfico se debe determinar en primer lugar, el periodo de diseño para que un pavimento pueda soportar el efecto acumulativo del tráfico durante ese periodo.<sup>9</sup>

Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en los últimos años, pero ese aumento ha sido aún mayor si se ve en términos de la carga que se transporta, esta situación tiene una influencia significativa en el comportamiento de los pavimentos, a la hora de determinar o predecir el daño que sufrirá un pavimento en el tiempo. El tránsito está compuesto por diferentes vehículos, de diferentes pesos y número de ejes; los cuales se encuentran en el Anexo IV del Reglamento Nacional de Vehículos del MTC (Ver Figuras N° 16,17,18,19,20,21,22). Evaluar esta diversidad es un trabajo complejo, por tal razón, actualmente algunas metodologías definen la conversión del tránsito existente, proyectado o inducido en un número de ejes equivalentes identificado como EAL (*Equivalent Axle Load*, carga por eje equivalente) el cual consiste en el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 ton o 18 kips, durante la vida útil del pavimento.

<sup>8,9</sup> Kerin Escobar & Alonso García, "Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)", Diciembre 2007

**ANEXO IV : PESOS Y MEDIDAS**

**1. PESOS Y MEDIDAS MÁXIMAS PERMITIDAS**

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS								
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
C2		12,30	7	11	---	---	---	18
C3		13,20	7	18	---	---	---	25
C4		13,20	7	23 <sup>(1)</sup>	---	---	---	30
8x4		13,20	7+7 <sup>(2)</sup>	18	---	---	---	32
T2S1		20,50	7	11	11	---	---	29
T2S2		20,50	7	11	18	---	---	36
T2Se2		20,50	7	11	11	11	---	40

*Figura N° 16: Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 78)*

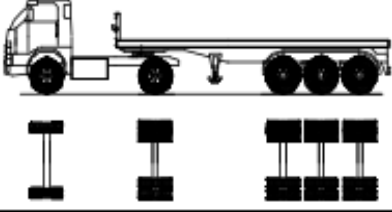
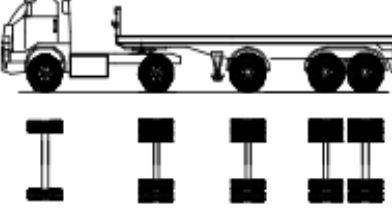
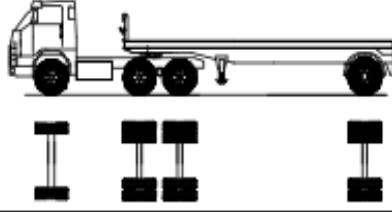
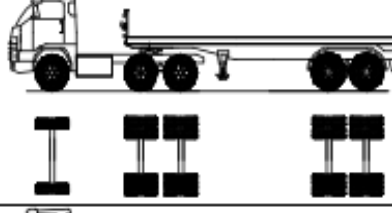
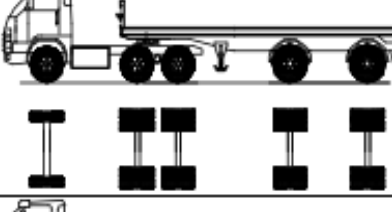
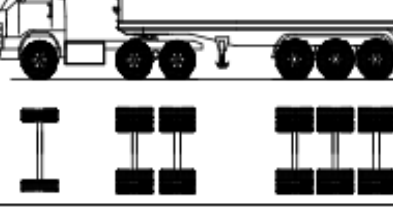
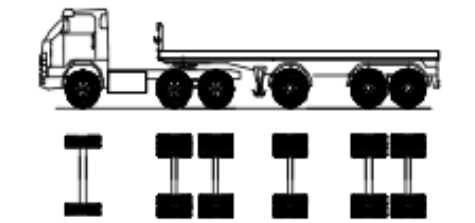
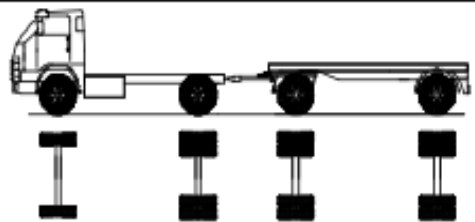
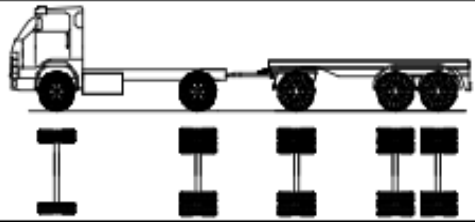
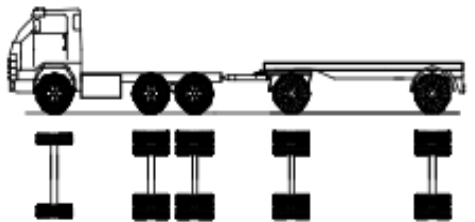
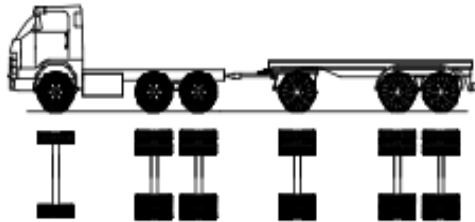
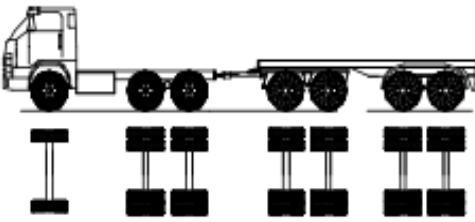
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
T2S3		20,50	7	11	25	---	---	43
T2Se3		20,50	7	11	11 <sup>(4)</sup>	18	---	47
T3S1		20,50	7	18	11	---	---	36
T3S2		20,50	7	18	18	---	---	43
T3Se2		20,50	7	18	11	11	---	47
T3S3		20,50	7	18	25	---	---	48 <sup>(2)</sup>

Figura N° 17: Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 79)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
T3Se3		20,50	7	18	11 <sup>(4)</sup>	18	---	48 <sup>(2)</sup>
C2R2		23,00	7	11	11	11	---	40
C2R3		23,00	7	11	11	18	---	47
C3R2		23,00	7	18	11	11	---	47
C3R3		23,00	7	18	11	18	---	48 <sup>(2)</sup>
C3R4		23,00	7	18	18	18	---	48 <sup>(2)</sup>

**Figura N° 18:** Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 80)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1°	2°	3°		4°
C4R2		23,00	7	23 <sup>(1)</sup>	11	11	---	48 <sup>(2)</sup>
C4R3		23,00	7	23 <sup>(1)</sup>	11	18	---	48 <sup>(2)</sup>
8x4R2		23,00	7+7 <sup>(5)</sup>	18	11	11	---	48 <sup>(2)</sup>
8x4R3		23,00	7+7 <sup>(5)</sup>	18	11	18	---	48 <sup>(2)</sup>
8x4R4		23,00	7+7 <sup>(5)</sup>	18	18	18	---	48 <sup>(2)</sup>
C2RB1		20,50	7	11	11	---	---	29

**Figura N° 19:** Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 81)

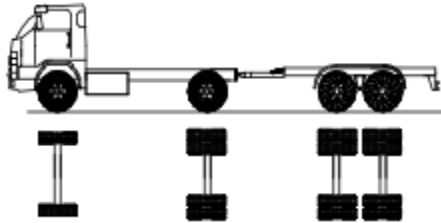
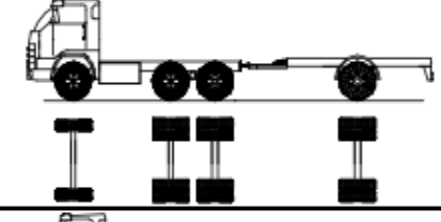
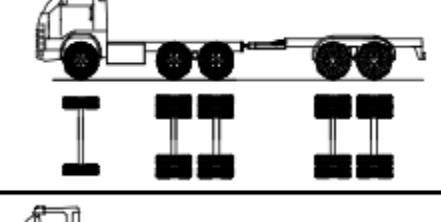
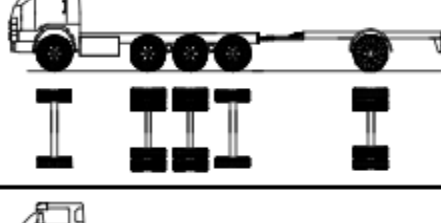
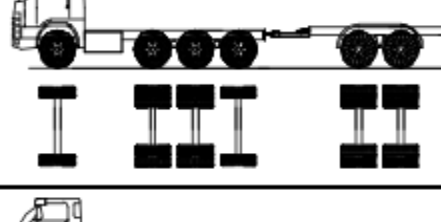
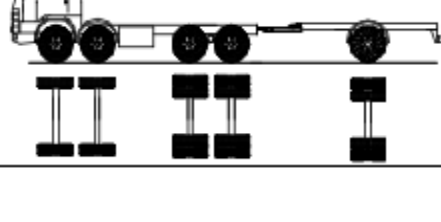
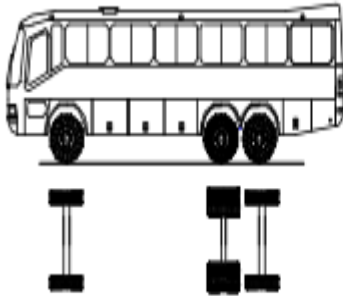
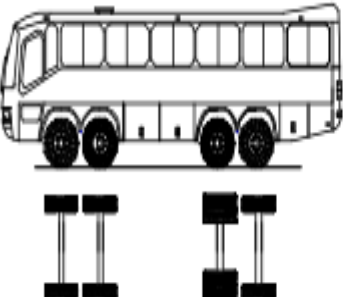
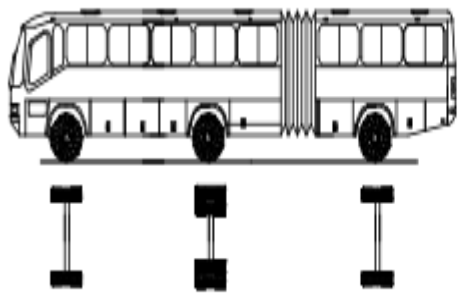
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
C2RB2		20,50	7	11	18	---	---	36
C3RB1		20,50	7	18	11	---	---	36
C3RB2		20,50	7	18	18	---	---	43
C4RB1		20,50	7	23 <sup>(1)</sup>	11	---	---	41
C4RB2		20,50	7	23 <sup>(1)</sup>	18	---	---	48
8x4 RB1		20,50	7+7 <sup>(5)</sup>	18	11	---	---	43

Figura N° 20: Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 82)



Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Eje Delant	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )
				Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º	4º	
8x4 RB2		20,50	7+7 <sup>(3)</sup>	18	18	---	---	48 <sup>(2)</sup>
T3S2 S2		23,00	7	18	18	18	---	48 <sup>(2)</sup>
T3Se2 Se2		23,00	7	18	11 + 11 <sup>(3)</sup>	11 + 11 <sup>(3)</sup>	---	48 <sup>(2)</sup>
T3S2 S1S2		23,00	7	18	18	11	18	48 <sup>(2)</sup>
T3Se2 S1Se2		23,00	7	18	11 + 11 <sup>(3)</sup>	11	11 + 11 <sup>(3)</sup>	48 <sup>(2)</sup>
B2		13,20	7	11	---	---	---	18

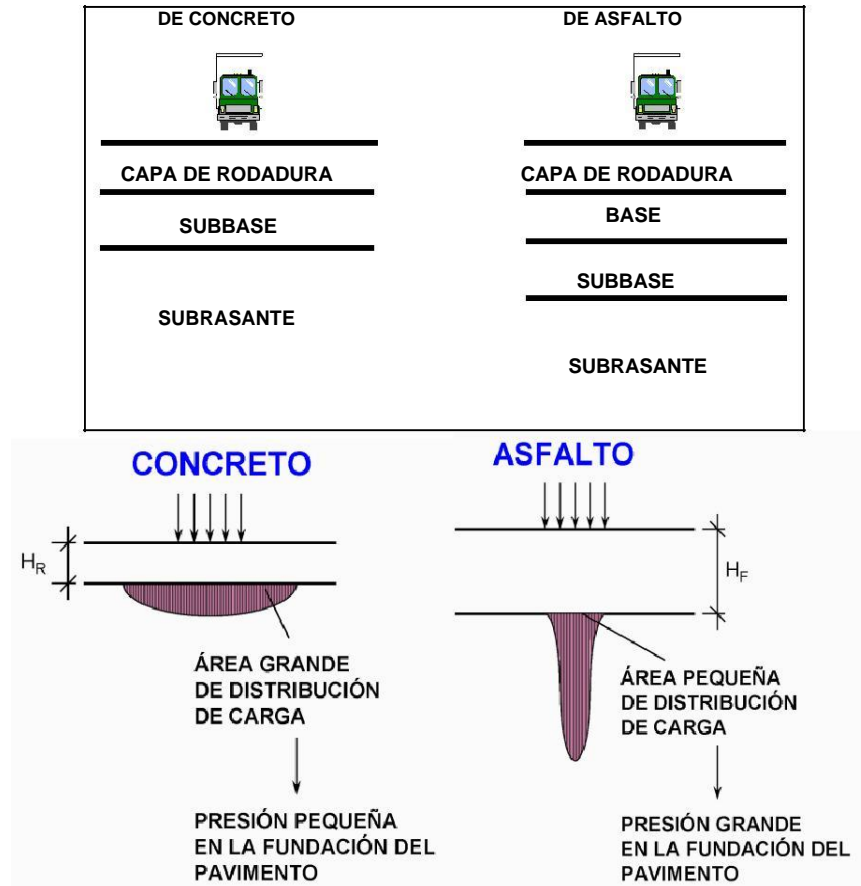
Figura N° 21: Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 83)

Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. ( m )	Peso máximo ( t )				Peso bruto máx. ( t )	
			Eje Delant	Conjunto de ejes posteriores				
				1º	2º	3º		4º
B3-1		14,00	7	16	---	---	---	23
B4-1		15,00	7+7 <sup>(5)</sup>	16	---	---	---	30
BA-1		18,30	7	11	7	---	---	25

- (1) Conjunto de ejes con un eje direccional
- (2) Vehículos con facilidad de distribución de peso por ejes
- (3) Conjunto de ejes separados compuesto por dos ejes simples donde la distancia entre centros de ruedas es superior a 2,40 m
- (4) Eje direccional
- (5) Carga máxima para conjunto de ejes direccionales compuestos por dos ejes simples donde la distancia entre centros de ruedas es superior a 1,70 m

**Figura N° 22:** Pesos y Medidas del Reglamento Nacional de Vehículos (Pág. 84)

El efecto de las cargas producidas por los vehículos en los pavimentos son la principal causa del deterioro de este, a lo cual se suma el efecto del clima, reduciendo así la capacidad del pavimento.



**Figura N° 23:** Comparación de la distribución de cargas en pavimentos.

Fuente: Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd), Escobar, Kerin (2007)

### 2.3.2 CLIMA.

Las condiciones del medio ambiente tienen efectos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Factores externos tales como la precipitación, temperatura y la profundidad del nivel freático juegan un papel clave para definir las

limitaciones que los impactos del medio ambiente pueden tener en el comportamiento del pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales de pavimentos para la humedad, drenabilidad en las capas de pavimento, infiltración potencial del pavimento, etc.<sup>10</sup>

En la estructura de pavimento, la humedad y la temperatura son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la subrasante, y por lo tanto, su capacidad de soportar cargas.

#### **A. Efectos de la temperatura.**

Los cambios en la temperatura del medio ambiente originan variaciones en la temperatura de las estructuras de los pavimentos.

En pavimentos rígidos, como resultado del cambio de temperatura, se obtiene una desigual dilatación o contracción de las fibras paralelas a la superficie con la profundidad, lo que provoca el alabeo de la losa. Este movimiento está parcialmente impedido por el peso propio y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca tensiones; El alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la sub-base, aumentando las tensiones producidas por el tránsito.

En pavimentos flexibles la temperatura producirá envejecimiento superficial de la capa de rodadura; además de ablandamiento y reducción de la viscosidad del asfalto y en presencia de bajas temperaturas se producirá pérdida de flexibilidad y grietas de contracción en el asfalto.<sup>11</sup>

#### **B. Efectos de la lluvia.**

El contenido de humedad, provoca una considerable influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen la estructura de pavimentos y sobre su comportamiento. Si la base, subbase y subrasante no están bien protegidas de la acción del agua se ocasionan daños, algunos de ellos son:

- Pérdida de partículas de suelo, creando erosión.
- Saturación y exceso de subpresión o de fuerzas de filtración

<sup>10,11</sup> Kerin Escobar & Alonso García, "Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)", Diciembre 2007

- Pérdida de resistencia de la subrasante cuando esta se satura y permanece saturada durante un periodo largo de tiempo.
- Degradación de la calidad del material del pavimento por acción de la humedad.

## 2.4 MÉTODOS DE AUSCULTACION ESTRUCTURAL.

La metodología establecida se encuentra dentro de las denominadas evaluaciones no destructivas, de gran rendimiento operacional que permite obtener un elevado número de determinaciones, en poco tiempo, reduciendo a un mínimo, por lo tanto, la cantidad necesaria de ensayos destructivos.<sup>12</sup>

Por lo tanto se puede mencionar que la metodología NDT, basada en la interpretación de deflexiones es un proceso de diseño inverso (retrocálculo) ya que se utiliza la respuesta del sistema (pavimento–subrasante) para establecer sus características estructurales.<sup>13</sup>

El cálculo o análisis inverso puede considerar la aplicación de los equipos como el Deflectómetro de impacto que registran todo el cuenco de deflexión, por lo cual se puede determinar el Módulo Resiliente ( $M_r$ ) de la subrasante y el modulo efectivo ( $E_p$ ) de la capa del pavimento (rodadura + base y subbase) para establecer espesores de refuerzo a través del Cálculo del número estructural (SN).<sup>13</sup>

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 está en presencia de evaluaciones estructurales de carreteras que no cuentan con antecedentes históricos de construcción y diseño, se procede a realizar calicatas para verificar dimensiones, tipos de materiales y homogeneidad de las capas que conforman el pavimento<sup>14</sup>

<sup>12,13,14</sup> Kerin Escobar & Alonso García, “Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)”, Diciembre 2007

### **2.4.1 MÉTODOS DIRECTOS DE AUSCULTACIÓN.**

Escobar (2007) en su tesis "Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd) nos dice que, 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:

#### Calicatas o pozos a cielo abierto.

Las calicatas permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar, por lo tanto es un método de exploración confiable pero sacrifica la estructura del pavimento y tiene muy bajo rendimiento.

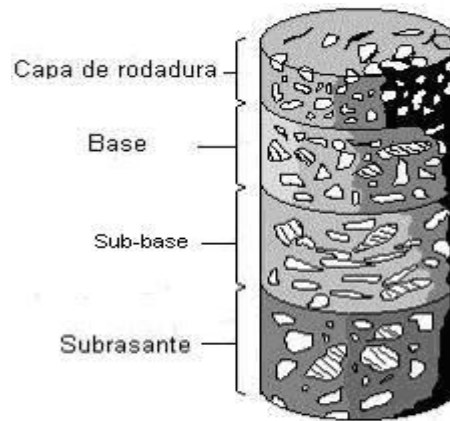
- El área que utilizan es más o menos un metro cuadrado y la profundidad varía según las exigencias de la investigación. Estas suelen realizarse, generalmente, centradas en la línea de borde de la carretera, frente a juntas o grietas

#### Extracción de núcleos

Con la extracción de núcleos, se obtienen volúmenes muy pequeños de material físico del pavimento, en comparación con el volumen obtenido con las calicatas; son cilindros con diámetros entre los 10 a 15 cms, en los se puede verificar el espesor de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento y los elementos que los componen a cada uno de ellos. Muchas veces es difícil la extracción de núcleos en base y subrasante cuando son materiales granulares ya que existe desprendimiento de material.

La extracción de núcleos suele tener un buen rendimiento, partiendo del estado en que se encuentre el equipo, la experiencia del operario y la toma de ensayos sea

relativamente cerca. Por lo general los testigos son tomados en el borde exterior del carril en sentido del tráfico y en los hombros de la vía. Además se extraen núcleos sobre grietas para ver su alcance y si se trasmite a las capas inferiores.



**Figura N° 24:** Muestra típica de extracción de núcleo de pavimento.

*Fuente: Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd), Escobar, Kerin (2007)*

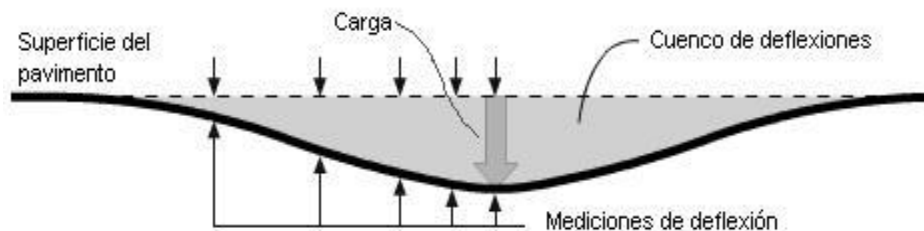
#### **2.4.2 MÉTODOS INDIRECTOS DE AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL**

Escobar (2007) en su tesis “Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd) nos dice que, 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 o estadístico.

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



**Figura N° 25:** Esquema ideal del comportamiento del cuenco de deflexiones

Fuente: *Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd)*, Escobar, Kerin (2007)

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.

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, entre ellos tienen:

- Deflexión máxima normalizada: corresponde a la deflexión medida por el sensor ubicado bajo el plato de carga y se normaliza por medio de la siguiente formula:

$$d_{o \text{ normalizada}} = d_o \text{ (carga aplicada / carga normalizada)}$$

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



temperatura.

- AREA: provee una estimación de la rigidez relativa de la sección del pavimento, particularmente de las capas ligadas, debido a que es muy insensible a la rigidez de la subrasante.
  
- Índice de curvatura de la superficie: refleja la rigidez relativa de las capas superiores de un pavimento.

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.

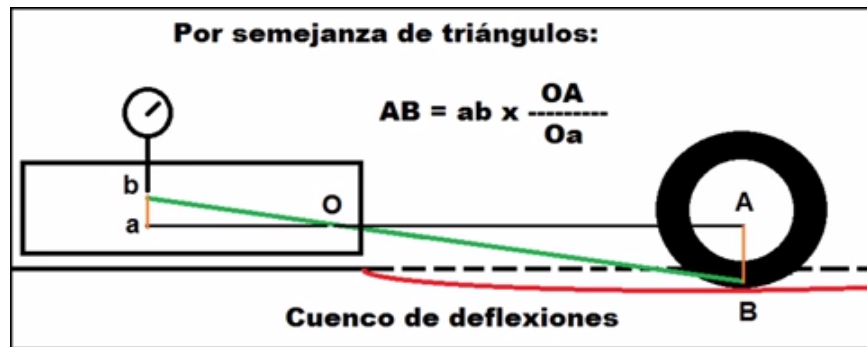
#### **2.4.2.1 MEDICIÓN DE DEFLEXIÓN ESTÁTICA O DE MOVIMIENTO LENTO**

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.

##### **2.4.2.1.1 VIGA BENKELMAN**

Los END empleando la Viga Benkelman, determina deformaciones del pavimento frente a las solicitaciones de carga provenientes de un vehículo cargado. En el año 1983, durante los primeros trabajos de rehabilitación en el país, este equipo era considerado obsoleto para la toma de lecturas de deformaciones, pero equipos más sofisticados demandaban costo por encima de los 100,000 dólares, tal es el caso del equipo Falling Weight Deflectometre (FWD) y que el MTC no podía adquirir en aquel entonces.

La Viga Benkelman es probablemente el más popular y económico equipo de medición de deflexiones superficiales del pavimento y el mismo permite medir el rebote de la deflexión estática de un pavimento asfáltico bajo la aplicación de una carga. Funciona según el principio de palanca: los dos brazos de la viga rotan alrededor de un eje horizontal, de manera tal que cualquier movimiento del extremo de la viga en contacto con el pavimento, produce un movimiento proporcional en el extremo opuesto, el cual es registrado por un dial extensómetro<sup>15</sup>



**Figura N° 26:** Esquema y Principio de la Viga Benkelman

Fuente: *Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito* (2012)

Existen distintos tipos de Vigas Benkelman para realizar mediciones de deflexiones de pavimentos. Las más comunes son:

- **VIGA SIMPLE:**

Corresponde a la viga que cuenta con un solo palpador o brazo de medición y por ende un solo dial extensómetro para la medición de la máxima deflexión (D0).

El deflectómetro Benkelman Simple funciona según el principio de la palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple. Según se esquematiza en la Ilustración, la viga consta esencialmente de dos partes:

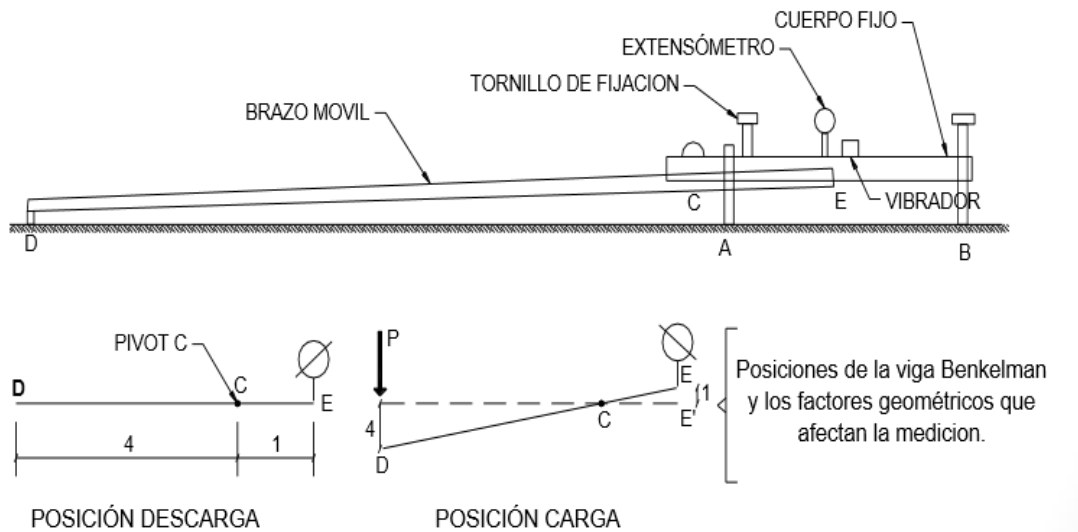
1. Un cuerpo de sostén que se sitúa directamente sobre el terreno mediante tres apoyos (dos delanteros fijos "A" y uno trasero regulable "B") y

<sup>15</sup> Leonardo Flores, "Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito", Diciembre 2012

2. 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 micrómetro de movimiento vertical (punto "E"). Adicionalmente 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 micrómetro 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 micrómetro.

La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto reflectó el pavimento en el lugar subyacente al punto "D" de la viga, durante el procedimiento descrito. Es de anotar que en realidad lo que se mide es la recuperación del punto "D" al remover la carga (rebote elástico) y no la deformación al colocar ésta. Para calcular la deflexión deberá considerarse la geometría de la viga, toda vez que los valores dados por el micrómetro ( $EE'$ ) no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existente. (Escobar,2007)



**Figura N° 27:** Esquema y Principio de la Viga Benkelman Brazo Simple

Fuente: *Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd)*, Escobar, Kerin (2007)

- **VIGA DOBLE BRAZO:**

Corresponde a la viga que cuenta con más de un brazo palpador articulado en una misma base de referencia y por ende más de un dial extensómetro para la medición de la máxima deflexión ( $D_0$ ) y subsecuentes deflexiones alejadas una distancia “ $r$ ” del punto de máxima carga “0”. El caso más común corresponde a la Viga Doble que cuenta con dos brazos de medición. Este tipo de medición también es posible realizarlo utilizando varias Vigas Benkelman Simples simultáneamente.

La Viga Benkelman de brazo doble, fue utilizada desde el año 1981, mediante el método empírico, que considera dos puntos de deflexión distantes 25 cm, y con los cuales se puede establecer la parábola de la deformada. En esta deformada se inscribe un círculo cuyo radio de curvatura ( $R_c$ ) representa una longitud ficticia y mediante la interpretación de este valor, la deflexión máxima en el origen ( $D_0$ ) y la deflexión característica ( $D_c$ ), se tipifica la respuesta en cinco casos. De estos casos, sólo uno indica que las deflexiones halladas pueden ser utilizadas para hallar los refuerzos a colocar. Los otros cuatro casos recomiendan el uso de métodos tradicionales, como el método AASHTO. Este proceso que demanda la recopilación de una gran cantidad de

datos, puede verse desestimado al no cumplir las exigencias de los Rc, Do y Dc. Un aspecto importante es tener en consideración el deflectograma con fines de sectorizar la carretera que se está evaluando, e inclusive no se debe tomar en cuenta los valores numéricos obtenidos de la evaluación y por el contrario se debe tomar como curvas interactivas de las cuales se realizan las interpretaciones necesarias para dividir en sectores de comportamiento estructural homogéneo. (Gutiérrez, 2007)

## **A) METODOLOGÍA DE MEDICIÓN CON VIGA BENKELMAN DOBLE BRAZO**

- **CARACTERIZACIÓN DEFLECTOMÉTRICA**

Con la finalidad de analizar el comportamiento del pavimento midiendo directamente la respuesta de la estructura del sistema pavimento-subrasante, ante la aplicación de cargas

y establecer si esta capacidad es suficiente para soportar el tráfico de diseño sin presentar una fatiga estructural creciente fuera de la prevista.

Para el cumplimiento del objetivo indicado se empleará el procedimiento deflectométrico CONREVIAL-MTC; dado que involucra las medidas de deflexiones de pavimentos y su análisis con respecto al tráfico actual, este procedimiento tiene la ventaja de medir directamente la respuesta estructural del pavimento para cargas de tráfico.

- **MEDICIÓN DE DEFLEXIONES**

El ensayo toma en cuenta una carga de ensayo en un eje simple de 18,000 libras (8.2 ton.), que además constituye la de más amplia difusión y experiencia. Las llantas de la rueda dual especificadas son de 10 x 20, 14 lonas, infladas a una presión de 5,6 Kg/cm<sup>2</sup> (80 p.s.i.).



**Foto N°08** : Pesaje de Ejes Posteriores, Elaboración Propia

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para determinar con una viga Benkelman la deflexión recuperable, producida por una carga estática.

- Se utilizará un camión de eje simple donde la carga del eje, tamaño de las cubiertas, espaciado entre ruedas duales y presión de inflado, se verificará previamente, estando todas estas variables de acuerdo a lo requerido anteriormente.
- Los puntos del pavimento a ser ensayados se marcarán convenientemente con líneas transversales al camino. Dichos puntos se localizaron a una distancia de 0.75 m del borde y aproximadamente cada 100 m por carril. De Acuerdo al Manual de Ensayo de Materiales EM 2000, MTC-E 1002-2000. Ver Cuadro N° 05

Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2,70 m	0,45 m
3,00 m	0,60 m
3,30 m	0,75 m
3,60 m o más	0,90 m

**Cuadro N°05:** Distancias a Utilizar

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales EM 2000, MTC-E 1002-2000



**Foto N°09** : *Medición y Trazado de Línea Transversal en el Punto de Ensayo, Elaboración Propia*

- La rueda dual externa se colocará sobre el punto seleccionado, quedando éste ubicado entre ambas ruedas.
- Se coloca la regla sobre el pavimento detrás del camión perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba coincidiera con el punto de ensayo y la regla no roce contra las cubiertas de la rueda dual.



**Foto N°10** : *Colocación de la Regla en el Punto de ensayo, Elaboración Propia*



- Se retira la traba de la regla y la base se ajusta por medio del tornillo trasero, de modo tal que el brazo de medición quede en contacto con el vástago del dial.



**Foto N°11** : Ajustes de Tornillos para el contacto del Dial, Elaboración Propia

- El flexímetro del brazo se ajusta de modo tal que el vástago tenga un recorrido libre comprendido entre 4 y 6 mm. Se gira la esfera del flexímetro hasta que la aguja queda en cero y se verifica la lectura de este golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la regla.



**Foto N°12** : Verificación de los Diales antes de la Marcha del Camión, Elaboración Propia



- Se hace avanzar suave y lentamente el camión; se pone en marcha el cronómetro y se leen los diales cada 60 segundos. Cuando dos lecturas sucesivas de cada uno de ellos no difieran en más de 0.01 mm, se da por finalizada la recuperación, registrándose las últimas lecturas observadas (L0 Y L25)



**Foto N°13** : *Marcha del Camión y Toma de lecturas , Elaboración Propia*

- 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: 4cm de profundidad y 10 mm de diámetro, aproximadamente, emplazado sobre la línea paralela al eje del camino. Se llena con aceite no menos de 10 minutos antes de iniciar el ensayo, se inserta el termómetro y se lee la temperatura, retirando el mismo antes del desplazamiento del camión. El rango de la Temperatura debe estar entre el Rango de 5°C y 25°C.



**Foto N°14** : Toma de Temperatura del pavimento, *Elaboración Propia*

#### **2.4.2.1.2 DEFLECTOMETRO LACROIX**

El deflectómetro transitivo tipo Lacroix, mide las deflexiones ó deformaciones verticales de la superficie de un pavimento bajo la acción de una carga estática. El Deflectómetro está montado sobre un camión de chasis largo, el cual tiene una carga en el eje trasero de 8,5 toneladas y que se aplica al pavimento mediante dos pares de ruedas duales. Mide a través de dos brazos palpadores en zonas próximas a las huellas de rodado de los vehículos. El vehículo avanza a una velocidad de 2.5 Km/h, y las mediciones las realiza cada 6 metros.

Para medir posee un sistema de trineo que se apoya en el suelo mediante tres puntos que constituyen un plano de referencia fijo para la determinación del cero, el camión recorre una distancia para las mediciones y cuando las ruedas duales llegan a los palpadores se registra la deflexión máxima; avanza el trineo al doble de la velocidad del camión y se pone en posición para iniciar nuevamente el ciclo. Permite auscultar entre 10 y 20 km de camino por día. El rango de las mediciones está comprendido entre 0 y 300 centésima de milímetro. El resultado obtenido es la deflexión máxima.

Mediante la deflexión es posible evaluar la pérdida de la capacidad resistente de la estructura del pavimento, por comparación con las de diseño, y así se cuenta con información para intervenciones oportunas si fueran necesarios. (Escobar,2007)



**Foto N°15 :** Deflectógrafo tipo Lacroix, Equipo semicontinuo.

*Fuente: Fuente: Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd), Escobar, Kerin (2007)*

#### **2.4.2.2 MEDICIÓN DE DEFLEXIÓN POR VIBRACION**

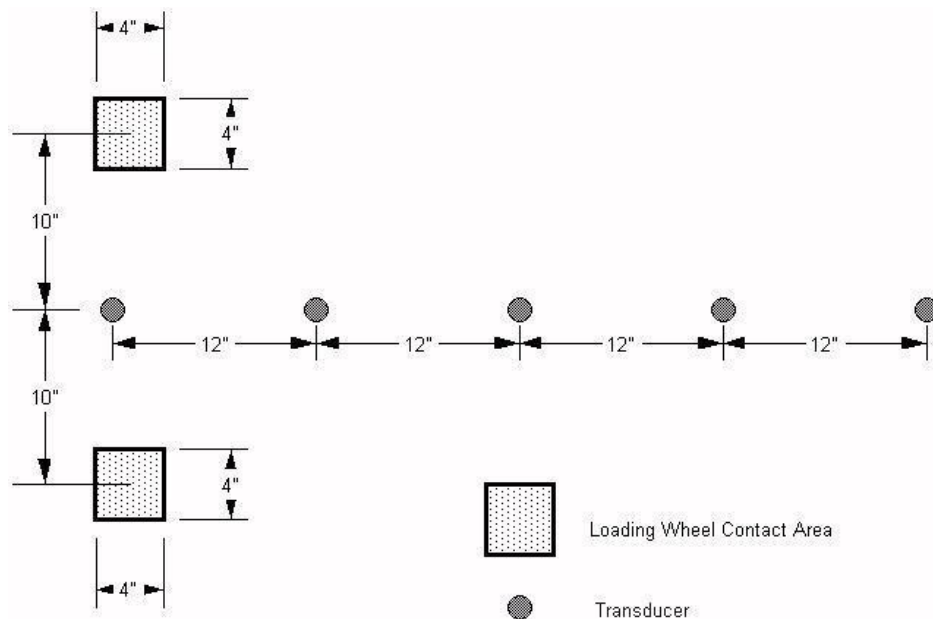
Las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre el pavimento. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro.

La ventaja de estos equipos sobre los estáticos es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal es que las cargas reales que transitan por los pavimentos no tienen el mismo comportamiento que las que aplican ellos. Entre los equipos más característicos se encuentran:

- Dynaflect (Electro-Mecánico). Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplican un rango de fuerzas entre pick-up de 1000 lb. Para medir las deflexiones cuentan con cinco traductores de velocidad ubicados a 0, 12, 24, 36 y 48 pulgadas, respectivamente (ver Foto N° 09 y Figura N° 28).



**Foto N°16 Dynaflect.** Fuente: *Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd)*, Escobar, Kerin (2007)



**Figura N°28 Esquema de Transductores.** Fuente: *Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd)*, Escobar, Kerin (2007)

- Road Rater (electro-hidráulico). Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas; con él produce un rango de frecuencias entre 5

y 60 Hz (Ver Foto N°10). Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad.



**Foto N°17** Road Rater (electro-hidráulico).. Fuente: *Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd)*, Escobar, Kerin (2007)

#### **2.4.2.3 MEDICIÓN DE DEFLEXIÓN 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).

Para el uso de los datos proporcionados por el Deflectómetro de impacto (FWD), existen dos metodologías de análisis, una la utilización directa de la deflexión y la otra la determinación de las características estructurales del pavimento auscultado mediante calculo inverso (retrocálculo).

En cuanto a la primera se refiere, se pueden realizar comparaciones relativas entre zonas de un tramo o entre tramos y también determinar la capacidad resistente del pavimento. Con respecto a la segunda, el análisis inverso (retrocálculo) puede considerarse la aplicación fundamental de los equipos tales como el Deflectómetro de impacto (FWD), que registra todo el cuenco de deflexión, en donde se utiliza la respuesta del sistema (pavimento-subrasante) para establecer sus características estructurales. (Escobar, 2007)

Existen otras aplicaciones específicas con el Deflectómetro de Impacto (FWD), en las que se pueden citar las siguientes: Permite determinar la eficiencia de la transferencia de carga en placas de concreto hidráulico, detectar la presencia de huecos bajo las losas y la evaluación de la subrasante o de las capas granulares durante la ejecución o construcción del pavimento.

La principal ventaja del Deflectómetro de impacto frente a los demás es que permite registrar la forma de todo el cuenco de deflexión, y no sólo la deflexión máxima central y que la carga que solicita el pavimento representa mejor la sollicitación ejercida por el paso de un eje pesado a altas velocidades.

Otra ventaja es poder estudiar el efecto en todas las capas (por retrocálculo) gracias a la medición de hasta 9 puntos de información distanciados desde los 20 cms hasta los 1.80 m medidos desde el punto de aplicación de la carga y la segunda es la aplicación dinámica de la carga (de 20/30 milisegundos) que simula el paso de una llanta a una velocidad promedio de 60 a 70 Km/h.

Tener la forma del cuenco de deformaciones puede ayudar a interpretar si el daño se debe a la estructura del pavimento o a la subrasante sobre la cual se apoya la estructura del pavimento. Esto es posible gracias a un parámetro denominado Área y que es una medida relativa de las mediciones de deflexión máxima con las medidas de deflexión de los otros geófonos. (Escobar, 2007)



**Foto N°18** Deflectómetro de Impacto Dynatest FWD 8000. Fuente: Análisis Comparativo De La Evaluación De Pavimentos Por Medio De La Viga Benkelman Y El Deflectómetro De Impacto (Falling Weight Deflectometer, Fwd), Escobar, Kerin (2007)

## **CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 TIPO DE INVESTIGACION**

El tipo de investigación usada en la presente tesis es la Descriptiva - Aplicativa

### **3.2 MATERIAL**

#### **3.2.1 UNIDAD DE ESTUDIO**

Los pavimentos de la Carretera Iquitos – Nauta, Tramo del 16+300 al 17+800

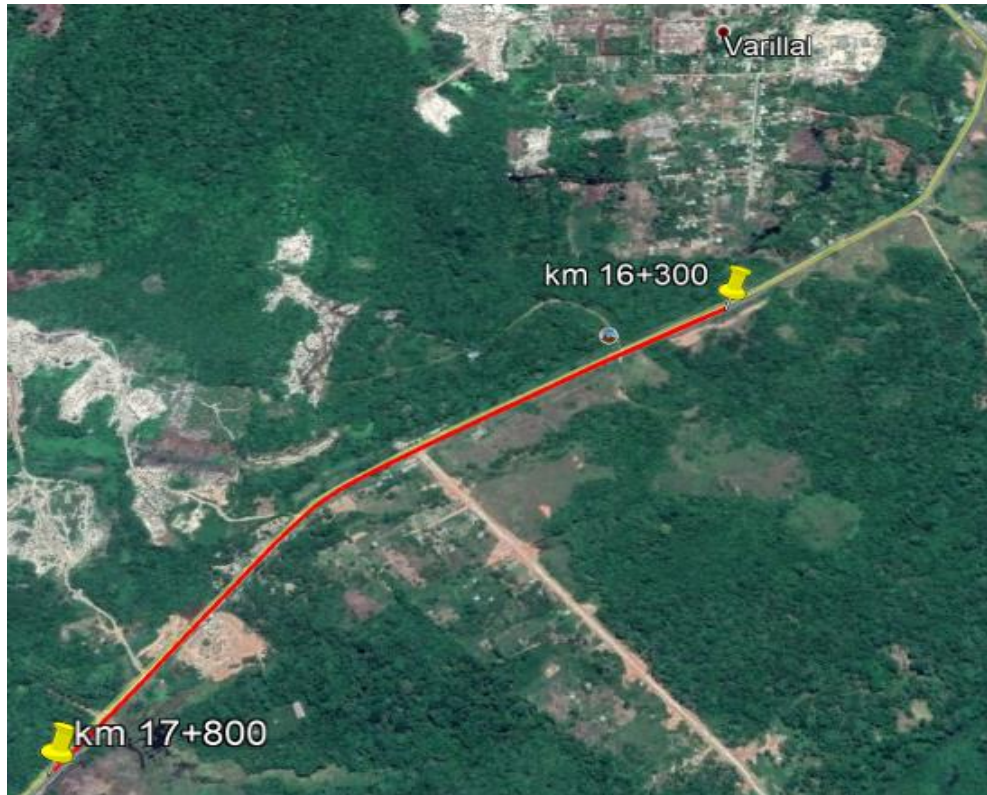
#### **3.2.2 POBLACION**

Pavimentos Flexibles de la Carretera Iquitos – Nauta, Tramo I

#### **3.2.2 MUESTRA**

La muestra está constituida por el pavimento flexible correspondiente al Tramo I de la Carretera Iquitos – Nauta, del Km 16+300 al 17+800, haciendo un tramo total de 1500 metros de longitud con un ancho promedio total de 6.00 de calzada.





*Foto N°19: Tramo de Estudio.*

*Fuente: Google Earth*

### **3.3 METODOS**

#### **3.3.1 TECNICAS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO DE RECOLECCION DE DATOS**

La recolección de datos se obtuvo por medio de mediciones con la viga benkelman cada 100 metros a lo largo del carril derecho del tramo de la carretera en estudio, según lo indicado en el Manual de Ensayo de Materiales (MTC E 1002-2000) "Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura Flexible empleando Viga Benkelman.

#### **3.3.2 INSTRUMENTOS**

- **Viga Benkelman:** De doble brazo con sus correspondientes diales registradores,

- **Vehículo de Carga:** Camión Volquete 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"x20" y una distancia entre los puntos medios de las bandas de rodamiento iguala 32 cm
- **Flexómetro:** Permite medir las longitudes de los puntos a evaluar.
- **Termómetro:** Instrumento que permite medir la temperatura del pavimento, en los puntos de ensayo.
- **Balanza:** Pesaje de Camión para la realización de Ensayos.

### 3.3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCION DE DATOS

Para los análisis y procesamiento de los datos obtenidos en campo se empleará el procedimiento deflectométrico CONREVIAL-MTC; asimismo también deberá de considerarse lo siguiente:

- **Aforo de Vehículos:** De manera manual, por un periodo de 7 días
- **Valor del EAL:** Carga por Eje equivalente de Diseño
- **Análisis de los Resultados:** Deflexión Admisible, Deflexión Característica, Radio de Curvatura.

# CAPITULO IV: PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

## 4.1 RECOLECCION DE DATOS

### 4.1.1 UBICACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

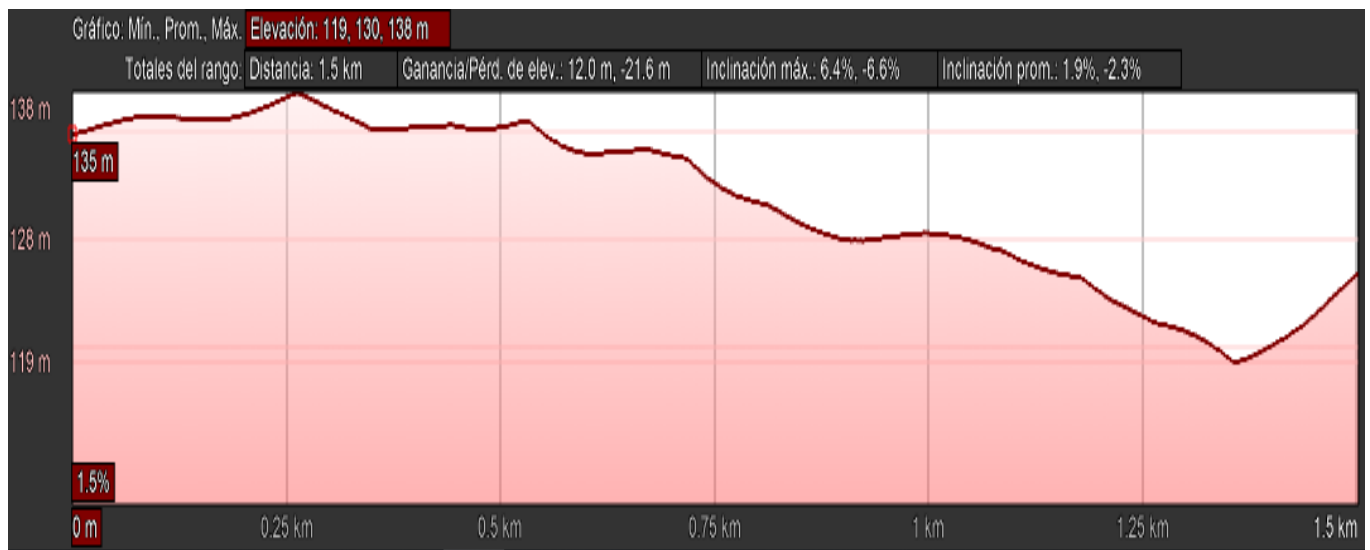
#### Ubicación Política

- País : Perú
- Departamento : Loreto
- Provincia : Maynas
- Distrito : San Juan Bautista

#### Ubicación Geográfica

Progresiva (km)	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		Elevación (m.s.n.m)
	Longitud	Latitud	Norte	Este	
16+300	73°21'10.96"O	3°54'6.58"S	9568545.2	682868.1	135
17+800	73°21'45.48"O	3°54'39.41"S	9567538.9	681801.1	125

*Cuadro N°06: Ubicación Geográfica. Elaboración Propia*



*Figura N°29. Perfil Longitudinal Tramo de Estudio. Fuente: Google Earth*

#### 4.2.1 ESTUDIO DE TRANSITO

- **VALOR DEL EAL EN EL TRAMO DE ESTUDIO**

El estudio de Transito se realizó durante el mes de abril del presente año, para ello se efectuó el conteo y clasificación de vehículos según el tipo de eje y el promedio del sentido de dirección (entrada y salida). El resultado se puede apreciar en el siguiente cuadro:

TIPO DE VEHICULOS	I.M.D	F.C.E. PEAJE BAGUA	I.M.D.A.	PART. %
Automóvil	278	0.96072448	267	23.02%
Camioneta	156	0.96072448	150	12.93%
Camioneta Rural	265	0.96072448	255	21.98%
Micro	49	0.96072448	47	4.05%
Ómnibus de 02 Ejes	20	1.0131208	20	1.72%
Ómnibus de 03 Ejes	0	1.0131208	0	0.00%
Camión de 02 Ejes	196	1.0131208	199	17.16%
Camión de 03 Ejes	209	1.0131208	212	18.28%
Camión de 04 Ejes	1	1.0131208	1	0.09%
Semi Tráiler 2S1/2S2	2	1.0131208	2	0.17%
Semi Tráiler 2S3	2	1.0131208	2	0.17%
Semi Tráiler 3S1/3S2	5	1.0131208	5	0.43%
<b>TOTAL</b>	<b>1183</b>		<b>1160</b>	<b>100.00%</b>

**Cuadro N°07:** Índice Medio Anual en el Tramo de Estudio. Elaboración Propia

**CALCULO DEL EAL**  
**(Carretera Iquitos - NautaSector: Km 16+300 - Km 17+800)**

TIPO DE VEHICULOS	Automovil	Camioneta	Camioneta Rural	Micro	BUS 2E	Camión de 2E	Camión de 3E	Camión de 4E	Semi Trayler 251/252	Semi Trayler 253	Semi Trayler 351/352
CANTIDAD	267	150	255	47	20	199	212	1	2	2	5
<b>PROYECCION PERIODO DE 10 AÑOS</b>											
1	97455	54750	93075	17155	7300	72635	77380	365	730	730	1825
2	99696.47	56009.25	95215.73	17549.57	7467.90	75540.40	80475.20	379.60	759.20	759.20	1898.00
3	101989.48	57297.46	97405.69	17953.20	7639.66	78562.02	83694.21	394.78	789.57	789.57	1973.92
4	104335.24	58615.30	99646.02	18366.13	7815.37	81704.50	87041.98	410.58	821.15	821.15	2052.88
5	106734.95	59963.46	101937.88	18788.55	7995.13	84972.68	90523.66	427.00	854.00	854.00	2134.99
6	109189.86	61342.62	104282.45	19220.69	8179.02	88371.58	94144.60	444.08	888.16	888.16	2220.39
7	111701.22	62753.50	106680.94	19662.76	8367.13	91906.45	97910.39	461.84	923.68	923.68	2309.21
8	114270.35	64196.83	109134.60	20115.01	8559.58	95582.70	101826.80	480.32	960.63	960.63	2401.58
9	116898.57	65673.35	111644.70	20577.65	8756.45	99406.01	105899.87	499.53	999.06	999.06	2497.64
10	119587.24	67183.84	114212.53	21050.94	8957.85	103382.25	110135.87	519.51	1039.02	1039.02	2597.54
<b>Sub Total</b>	<b>1,081,858.38</b>	<b>607,785.61</b>	<b>1,033,235.53</b>	<b>190,439.49</b>	<b>81,038.08</b>	<b>872,063.59</b>	<b>929,032.57</b>	<b>4,382.23</b>	<b>8,764.46</b>	<b>8,764.46</b>	<b>21,911.15</b>
Factor de Incidencia	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Factor Camión	0.002	0.002	0.002	0.002	0.13	0.24	0.24	0.37	0.55	0.70	0.70
<b>Total</b>	<b>1,081.86</b>	<b>607.79</b>	<b>1,033.24</b>	<b>190.44</b>	<b>5,267.48</b>	<b>104,647.63</b>	<b>111,483.91</b>	<b>804.14</b>	<b>2,410.23</b>	<b>3,050.03</b>	<b>7,625.08</b>
										<b>EAL</b>	<b>2.38E+05</b>

***Cuadro N°08: Cálculo del EAL del Tramo de Estudio. Elaboración Propia***

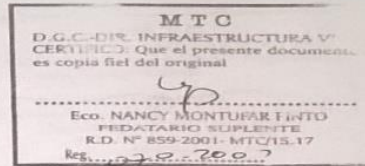
Cabe mencionar, que, a falta de información histórica del tránsito en la estación de estudio, se consideran los factores de corrección mensual para la estación de Bagua. Alcanzados del MTC, la misma que se ubica en el ámbito del departamento de Amazonas.

- **VALOR DE EAL SEGÚN EXPEDIENTE TECNICO DE CARRETERA IQUITOS – NAUTA**

En los expedientes técnicos de los diferentes tramos de la Carretera Iquitos – Nauta, está considerado un valor de **EAL = 3.21E05**, como se observa en las **Foto N°20 y 21**, las cuales corresponden al Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos Carretera Iquitos – Nauta (IV Tramo) (Anexo 2)



MINISTERIO DE TRANSPORTES, COMUNICACIONES,  
VIVIENDA Y CONSTRUCCION



0014

Resultando en este caso por la condiciones señaladas poco relevante como parámetro para el diseño de Pavimentos, más aún cuando no existe registro sistemático de los datos de vehículos que transitan por la carretera.

Por las razones expuestas se ha visto conveniente la aplicación de Métodos Aproximados para el Análisis de Tráfico, empleándose el desarrollado por la T.R.B. para Carreteras de Bajo de Volumen de Tráfico en el manual "Synthesis 4. Structural Design of Low Volume Roads", donde el TPD es afectado por un factor (M) de tráfico mixto de acuerdo a tres categorías de porcentaje de camiones (bajo, medio y alto) y tres categorías de carga (ligero, medio y pesado).

Los valores del Factor de Tráfico Mixto, están tabulados en el siguiente cuadro:

CUADRO N° 02

Distribución de Carga (N <sub>8.2</sub> por Camión)	Porcentaje de Camiones		
	Bajo (Menos de 15%)	Medio (15% - 25%)	Alto (Más de 25%)
Ligero (menos de 0.75)	9	18	27
Medio (0.75 - 1.5)	23	46	69
Pesado (más de 1.5)	37	73	110

Una vez estimado el tráfico M, el cálculo del Número de Ejes Equivalentes a 8.2 Ton previsto durante el período de diseño, en función de la tasa de crecimiento, se realiza en forma convencional.

Para el cálculo del Número de Ejes Simple Equivalentes durante el periodo de diseño considerado se dispone de la siguiente información:

- Tráfico promedio diario (asumido) : 380 Veh / día
- Tasas de crecimiento : 4%
- Período de Diseño : 10 años

ENTRAL

Av. Túpac Amaru N° 1590 - Rimac, Telf: 481 - 3707 Fax: 481 0677

**Foto N° 20:** Método Aproximado para el Cálculo del EAL. Fuente: Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos Carretera Iquitos – Nauta (IV Tramo)



247

0015

M T C

D.G. DE INFRAESTRUCTURA VIAL  
CERTIFICADO Que el presente documento  
es copia fiel del original

Eco. NANCY MONTUFRAR PINTO  
FEDATARIO SUPLENTE  
R.D. N° 859-2001-MTC/15-17  
Reg. 020-2002

INSTITUTO NACIONAL DE TRANSPORTES, COMUNICACIONES,  
VIVIENDA Y CONSTRUCCION

Para entrar al Cuadro N°02 se deben definir las características del tráfico en función de los parámetros y rangos establecidos, considerándose en este caso:

- Porcentajes de Camiones : Alto (más de 25%)
- Distribución de Cargas : Medio

El Factor de Tráfico que corresponde será entonces  $M = 69$ .

El Número de Repeticiones Total Acumulado de Ejes Simples Equivalentes a 8.2 Ton ( $EAL_{8.2}$ ) durante el periodo de diseño se calcula con la siguiente expresión:

$$EAL_{8.2} (n \text{ años}) = (TPD \times M) \times \frac{[(1+i)^n - 1]}{\ln(1+i)}$$

Donde:

- TPD : Tráfico Promedio Diario
- M : Factor de Composición de Tráfico
- i : Tasa de Crecimiento
- n : Período de diseño

Reemplazando la información disponible:

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = (380 \times 69) \times \frac{[(1+0.04)^{10} - 1]}{\ln(1+0.04)}$$

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = 3.21 \times 10^5 \text{ repeticiones}$$

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = 3.21 \times 10^5 \text{ repeticiones}$$

**3.0 DISEÑO DEL PAVIMENTO**

El pavimento es la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidos entre la superficie de la Subrasante y la Superficie de Rodadura, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie uniforme de textura apropiada, resistentes a la acción del tráfico, intemperismo y de otros agentes

LABORATORIO CENTRAL

Av. Túpac Amaru N° 1590 - Rímac, Telf: 481 - 3707 Fax: 481 0677

**Foto N°21: Cálculo del EAL del Periodo de Diseño.**

Para efectos del presente estudio, se considera el EAL de mayor valor, el cual corresponde a **EAL = 3.21 E105**, del Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos Carretera Iquitos – Nauta (IV Tramo)

## 4.2 MEDICION DE DEFLEXIONES

Para el cumplimiento del objetivo indicado se empleó el procedimiento deflectométrico CONREVIAl-MTC. A continuación, se muestran en el Cuadro N° 09, las lecturas obtenidas de la medición de las deflexiones del tramo de estudio.

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 <sup>-2</sup> mm)		Espesor (cm)
	L <sub>25</sub>	L <sub>max</sub>	
16+300	1	9	7.0
16+400	2	11	7.0
16+500	1	9	7.0
16+600	4	12	7.0
16+700	1	12	7.0
16+800	7	8	7.0
16+900	1	16	7.0
17+000	2	10	7.0
17+100	1	9	7.0
17+200	2	10	7.0
17+300	2	11	7.0
17+400	1	15	7.0
17+500	2	16	7.0
17+600	2	16	7.0
17+700	1	10	7.0
17+800	1	10	7.0

**Cuadro N° 09:** Lecturas de Deflexión obtenidas en Campo. Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP



### **Cálculo de deflexiones**

La aplicación de una carga estática en el pavimento induce como respuesta deflexiones de carácter elástico y plástico; los primeros desaparecen con la recuperación del pavimento y la última permanece, y se acumula a través de las reiteraciones (repeticiones de carga) produciendo las distorsiones y ahuellamientos en el tiempo. Como ésta última merecería todo un seguimiento y medición periódica de las deflexiones, para este caso se tomará en el análisis sólo las deflexiones de carácter elástico.

La deflexión elástica (recuperable) depende de un conjunto de variables (espesores de las capas estructurales, rigidez de estas y de las subyacentes, historia previa de la estructura) y corresponde a la deformación del pavimento y su apoyo, siendo en la subrasante donde ocurre la mayor parte de la misma. Ello explica que la deflexión no guarde siempre una relación unívoca con las deformaciones por tracción de las capas asfálticas, en consecuencia toda correlación entre este tipo de falla y la magnitud de las deflexiones implicaría el análisis de estructuras semejantes.

### **Corrección de las deflexiones por temperatura**

Para un pavimento dado, la magnitud de la deflexión aumenta con un incremento en la temperatura de las capas asfálticas, esto es atribuido a una disminución de la rigidez de las mezclas bituminosas, por lo que el efecto dependerá del espesor de dichas capas y de la rigidez de las capas subyacentes.

Existen procedimientos para corregirlas y llevarlas a la temperatura estándar de 20 °C. En este análisis se ha aplicado la Fórmula N°03:

### **Corrección de las deflexiones por periodo estacional**

La deflexión de un pavimento varía a través del año a lo largo de los ciclos estacionales, particularmente cuando la diferencia de los mismos es marcada.

Se trata de un efecto combinado de factores climáticos y características inherentes al pavimento. La necesidad de corregir o no las deflexiones obtenidas dependerán si se ha medido fuera del período definido como crítico, porque en este periodo la capacidad de deformación de los suelos está

influenciada por el grado de saturación que experimentan. Si las mediciones se realizan en otro periodo, se deben corregir las mismas. En el cuadro N°02 se indican los factores de corrección a utilizar de acuerdo al tipo de suelo de subrasante y la época en que se realizaran las mediciones.

### **4.3 RESULTADOS**

Para determinar el comportamiento estructural del pavimento se emplearán los principios establecidos en los estudios desarrollados en nuestro medio por el MTC y el Consorcio de Rehabilitación Vial (CONREVIAL), en el que se definen los siguientes parámetros:

- **DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA ( $D_c$ )**

Es la deflexión representativa del tramo, sector o sección en estudio y se obtiene del análisis estadístico que involucra el promedio, la desviación estándar y el grado de confianza. Para efectos de análisis se usaron las Fórmulas N°05, N°06, N°07 y N°08

- **DEFLEXIÓN ADMISIBLE ( $D_{adm}$ )**

La deflexión admisible que garantice un comportamiento satisfactorio del pavimento, es función del número de repeticiones acumuladas de las cargas que produce el tráfico durante el periodo de diseño del pavimento, en este caso según lo tomado de la Fórmula N°09 y el EAL del Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos Carretera Iquitos – Nauta (IV Tramo).

- **RADIOS DE CURVATURA ( $R_c$ )**

Los Radios de Curvatura ( $R_c$ ) determinan la magnitud de la deformación lineal (curvatura de la línea de deflexión) principalmente por tracción de las capas superiores (asfálticas, base) al flexionar ante las cargas impuestas. Como criterio general se puede indicar que:

- Los Radios de Curvatura son grandes cuando la mayor parte de la deflexión se produce en la subrasante.
- Los Radios de Curvatura son pequeños cuando la mayor parte de la deflexión se produce en las capas superiores (pavimento).

Para el cálculo del Radio de Curvatura ( $R_c$ ) se emplea la fórmula N°04.

Los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados en el tramo de estudio se muestran en los siguientes cuadros y en el Anexo 04, los cuales son necesarios para la evaluación del pavimento; así como también, para la elaboración del deflectograma correspondiente.

Estaca (km)	Lecturas de Campo ( $10^{-2}$ mm)		Espesor (cm)	Ahuellamiento (mm)			Temp (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS		
	$L_{25}$	$L_{max}$		Ahue ext.	Ahue int.	Prom		Deflexiones Corregidas		Radio Curvatura (m)
								$D_{25} \times 10^{-2}$ mm	$D_{max} \times 10^{-2}$ mm	
16+300	1	9	7.0				29.0	30.1	33.9	822
16+400	2	11	7.0				29.0	33.9	41.4	417
16+500	1	9	7.0				29.0	30.1	33.9	822
16+600	4	12	7.0				29.0	30.1	45.2	207
16+700	1	12	7.0				30.0	41.1	44.9	822
16+800	7	8	7.0				30.0	3.7	29.9	119
16+900	1	16	7.0				30.0	56.1	59.8	845
17+000	2	10	7.0				31.0	29.7	37.1	422
17+100	1	9	7.0				31.0	29.7	33.4	845
17+200	2	10	7.0				31.0	29.7	37.1	422
17+300	2	11	7.0				31.0	33.4	40.9	417
17+400	1	15	7.0				31.0	52.0	55.7	845
17+500	2	16	7.0				31.0	52.0	59.4	422
17+600	2	16	7.0				31.0	52.0	59.4	422
17+700	1	10	7.0				33.0	33.0	36.7	845
17+800	1	10	7.0				41.0	31.4	34.9	893

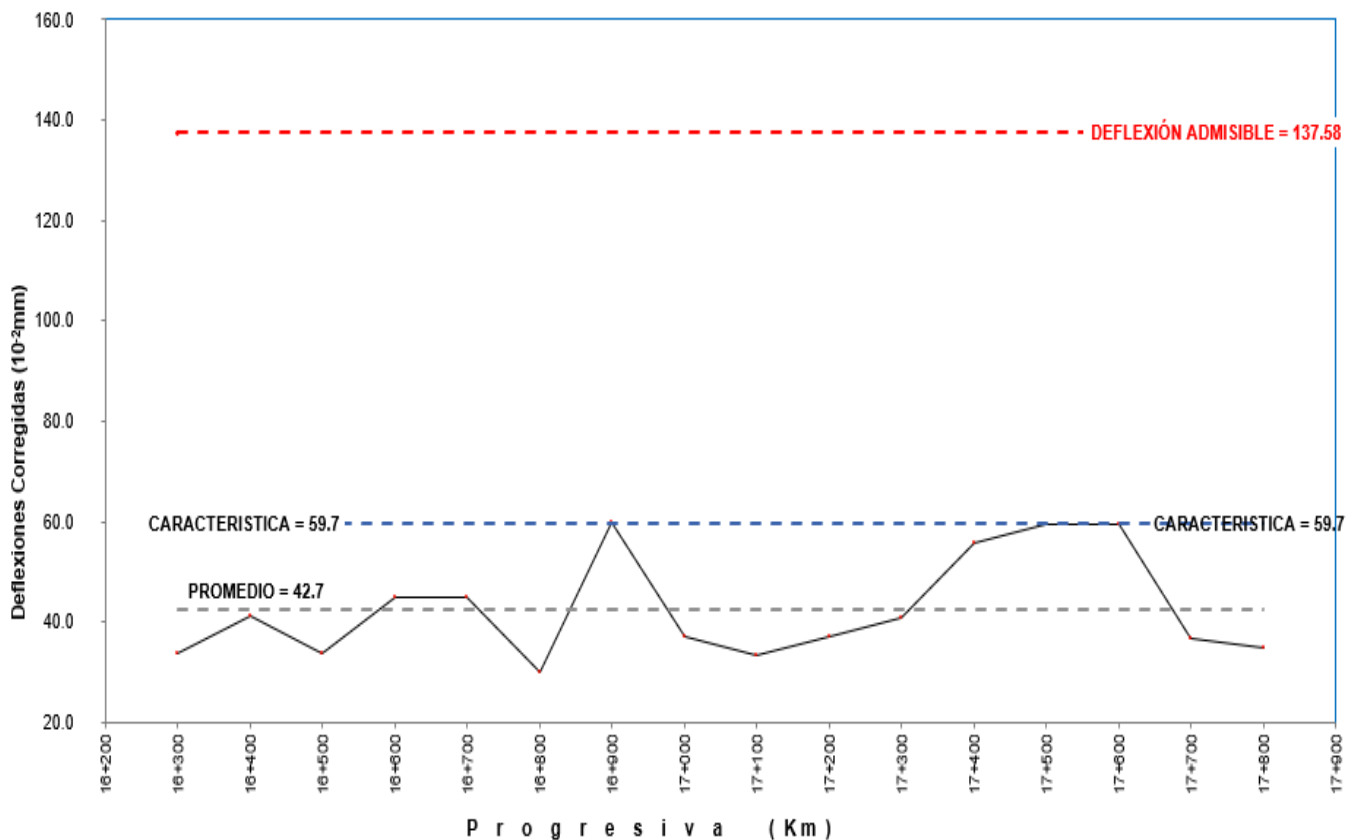
**Cuadro N° 10:** Resumen de Resultados de la Medición de Deflexiones obtenidas en Campo. Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP

Los resultados para los parámetros, según las fórmulas del Método Conreval y el procesamiento de datos obtenidos en campo, se observan en el Resumen Estadístico del Cuadro N°11.

RESUMEN ESTADÍSTICO (CARRIL DERECHO)					
Progresivas (Km)		Desviación Estandar	Deflexiones Corregidas (10-2mm)		
			Promedio	Característica	Admisible
16+300	17+800	10.34	42.72	59.72	137.58

**Cuadro N° 11:** Resumen Estadístico (Carril Derecho). Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP

En la Figura N°30, se muestra el deflectograma del tramo de estudio, comprendido entre los Tramos Km 16+300 al Km 17+800.



**Figura N° 30:** Medición de Deflexiones - Gráfico Representativo (Carril Derecho). Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP

CARPETA ASFÁLTICA							
Progresivas (Km)		Desviación Estandar	Deflexiones Corregidas ( $10^{-2}$ mm)				CV
			Promedio	Característica	Máximo	Mínimo	
16+300	17+800	10.3	42.7	59.7	59.8	29.9	0.24

**Cuadro N°12** : Resumen Estadístico Deflexiones (Carril Derecho). Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP

CARPETA ASFÁLTICA							
Progresivas (Km)		Desviación Estandar	Radio de Curvatura (m)				CV
			Promedio	Característica	Máximo	Mínimo	
16+300	17+800	266.5	600.6	1039.0	896.1	119.4	0.44

**Cuadro N°13** : Resumen Estadístico Radio de Curvatura. Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales de la UCP

#### • CONSIDERACIONES DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

En la Evaluación de Pavimentos Carretera: Sullana – El Alamor del Eje N°02 de Interconexión Vial Perú – Ecuador, Sector Km 15+000 – Km 37+000 Tomo I, (Diciembre 2014); indica que el Pavimento sujeto a evaluación tiene la capacidad estructural adecuada para resistir los esfuerzos del tráfico de diseño, para las condiciones de resistencia del suelo, si se cumple que la deflexión característica es menor que la deflexión admisible ( $D_c < D_{Adm}$ ).

El comportamiento de acuerdo al radio de curvatura se podrá calificar como satisfactorio, si se cumple que:

- Los valores de radio de curvatura calculados son mayores de 100 m ( $R_c > 100$  m).
- El radio de curvatura promedio está comprendido entre 300 - 500 m ( $300 < R_c < 500$ ).

La deflexión admisible es un parámetro dirimente dentro del análisis empírico. El radio de curvatura es un valor referencial de la condición actual del pavimento.

Tomando en Cuenta el Cuadro N° 03, del Análisis Combinado de los Resultados de Evaluación. Se considera, entre del 4to y 5to caso. Para lo cual, se realiza una inspección visual para determinar el estado superficial del tramo de estudio.

Rosa Cubas en su tesis “Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Vía De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman”, (2017); nos indica que los factores que influyen en la determinación de las deflexiones son las siguientes:

- 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.
- 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

#### • **COMPARACION DE RESULTADOS**

Rosa Cubas en su tesis “Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Vía De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman”, (2017); presenta el siguiente cuadro en el cual se puede apreciar 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:

PARAMETROS A EVALUAR		PARAMETROS Propuestos por el método CONREVIAL	
DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA (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

**Cuadro N°14:** Comparación de Resultados. Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Vía De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman, Cubas Rosa (2017)

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES:

Se ha efectuado el análisis estadístico de las deflexiones, habiéndose calculado las deflexiones características de acuerdo al criterio establecido por el CONREVIAl, así como las deflexiones admisibles en base al Análisis de Tráfico.

- El empleo del método empírico, para la evaluación estructural del pavimento, permite establecer la respuesta de la estructura frente a sollicitaciones de cargas
- Rosa Cubas en su tesis “Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Vía De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman” (2017) obtiene como resultado que la deflexión característica es  $125.426 \times 10^{-2}$  mm y la deflexión admisible  $77 \times 10^{-2}$  mm. Mientras que, en el presente trabajo tales deflexiones son  $59.721 \times 10^{-2}$  mm y  $137.581 \times 10^{-2}$  mm respectivamente. En el caso de la Vía de Evitamiento, se concluye que la estructura del pavimento no presenta un adecuado comportamiento estructural; caso contrario a lo obtenido en el presente trabajo, en donde la deflexión característica es menor a la deflexión admisible, lo cual indica un adecuado comportamiento estructural. Tal como se observa en el Cuadro N° 03 de Análisis Combinado de los Resultados de Evaluación y los resultados obtenidos en el Cuadro N°11 del Resumen Estadístico. Asimismo, Cabe indicar, que fue necesario realizar una inspección visual de la condición superficial del pavimento; por lo cual, los resultados corresponden al 5to Caso de lo establecido en el Cuadro N°03.
- Rosa Cubas en su tesis “Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Vía De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman” (2017) obtiene como resultado que el radio de curvatura promedio es 589.93, mientras que en el presente trabajo es 600.60. En ambos casos los radios de curvatura son adecuados, ya que son mayores de 100. Lo cual, nos indica las deformaciones se dan en la subrasante y, por ende, que el pavimento está en buen estado.



- De los resultados obtenidos en la tesis de Rosa Cubas (2017) podemos observar que como la deflexión característica es mayor que la deflexión admisible, se tiene como resultado un mal comportamiento de la subrasante y buen estado del pavimento. Caso contrario a lo obtenido en el presente trabajo, en donde la deflexión admisible es mayor a la característica, lo cual indica que existe un buen comportamiento del pavimento y subrasante en conjunto.
- Bajo esta condición las deflexiones Características se encuentran por debajo de la Deflexión Admisible, lo que induce un comportamiento actual aceptable para el tráfico que viene circulando. Entre las causas del buen comportamiento estructural del pavimento en este tramo es debido a que en este tramo existe un menor número esperado de repeticiones de ejes equivalentes con respecto al del periodo de diseño.
- El radio de curvatura es elevado (mayor a 350 metros) y las deflexiones características menores que las deflexiones admisibles, indican que se trata de un buen terreno de fundación y un pavimento con un comportamiento estructural adecuado a las exigencias de tráfico y condiciones ambientales.
- Con la finalidad de establecer el comportamiento a tracción de las capas de pavimento, se ha efectuado el análisis de las curvas de deflexión conjuntamente con los radios de curvatura. Del análisis estadístico de los Radios de Curvatura se establece que el promedio es mayor a 300 m (Cuadro N°13: Resumen Estadístico Radio de Curvatura), lo cual es un indicativo de una buena conformación de las capas de pavimento.
- La dispersión de las deflexiones es moderada que la califica como Construcción No Uniforme.

## 5.2 RECOMENDACIONES:

- Deben orientarse futuros trabajos de investigación para la evaluación funcional, no solo en el tramo de estudio, sino a todo lo largo de la Carretera Iquitos – Nauta, ya que esta permitirá determinar el estado o calidad superficial del pavimento en cuanto a los siguientes rubros
  - Como factor de correlación que indica la falla de uno o más de los componentes del pavimento.
  - Determinar si el pavimento es lo suficientemente suave para los usuarios (aceptabilidad) y establecer en muchos casos una apreciación de los costos de operación de los vehículos.
  
- Deben realizarse un mayor número de ensayos en los diferentes tramos de la carretera Iquitos – Nauta.
  
- Se deben programar tareas de evaluación de niveles de servicio, mantenimiento periódico para garantizar que el pavimento se conserve estructural y funcionalmente eficiente. Se recomienda la intervención oportuna del Contratista Conservador mediante los mantenimientos rutinarios, incrementando su efectividad y frecuencia en la atención de las fallas de origen superficial, las soluciones dependerán de los defectos observados y sus causas. Con estas acciones se espera que el afirmado conserve su porcentaje de humedad y no falle estructuralmente debido a infiltraciones de agua, teniendo la capa bituminosa en buen estado.
  
- Se recomienda hacer el estudio del CBR de la Vía estudiada para poder obtener resultados más exactos.
  
- Se recomienda realizar la deflectometría dos veces por año, una en época de estío y la otra en lluvias, con estos datos realizar las comparaciones de deflexiones características en condiciones ambientales distintas.

## CAPITULO VI: REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Marío S. Hoffman, Ph.D, “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en la Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos no destructivos)”, Octubre 1985.
- Kerin Escobar & Alonso García, “Análisis Comparativo de la Evaluación de Pavimentos por medio de la Viga Benkelman y el Deflectometro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD)”, Diciembre 2007
- José W. Gutiérrez, “Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú”, 2007
- Leonardo Flores, “Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles de Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito”, Diciembre 2012
- David Mamani. “Evaluación Estructural del Pavimento con Viga Benkelman -Método Empírico, Carretera Cañete-Chupaca Política de Mantenimiento. 2011
- Rosa Cubas. “Comportamiento Estructural Del Pavimento Flexible En La Via De Evitamiento Sur – Cajamarca Utilizando Las Deflexiones Medidas Con La Viga Benkelman”, (2017)
- MTC(2000), “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible Empleando Viga Benkelman – MTC E 1002-2000”
- MTC “Manual de Carreteras Conservación Vial”
- HOBBS CONSULTORES SA. (2011) “Estudio de Factibilidad y Definitivo del Proyecto Mejoramiento de la Carretera Mala – Calango – La Capilla. Informe de Mantenimiento Periodico y Rutinario”

# **ANEXOS**

A. ANEXO 01 – Sección Típica Carretera Iquitos – Nauta (Tramo I).  
Fuente: GUICONSA (1996) “Proyecto Integral Iquitos Nauta: Primera Etapa  
Sistema Vial”



## MEMORIA DESCRIPTIVA CARRETERA IQUITOS - NAUTA

Esta Obra comprende la construcción de 25.00 km. de longitud comprendiendo desde el empalme con la Carretera al Aeropuerto hasta el Asentamiento Humano 2 de Febrero, con una longitud de 25.00 Km. con el terrapién íntegramente construido y asfaltado.

### 1.01 CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA IQUITOS - NAUTA

La firma Consultora CEGEL S.A. tuvo a cargo el Proyecto Original que fue analizado en principio sobre características geométricas pre - determinadas y simultáneamente sobre los datos Geotécnicos que recogidos durante los estudios efectuados por el proyectista para la evaluación del proyecto de Pavimentación .

#### a) Proyecto Geométrico

Las características dadas en el proyecto fueron las siguientes:

. Plataformas	:	8.91 m.
. Pista de Rodadura	:	6.00 m.
. Berma Lateral Derecha	:	1.20 m.
. Berma Lateral Izquierda	:	1.20 m.

Estas características fueron definidas tomando en cuenta que la carretera Iquitos - Nauta estaba clasificada como de segunda clase especificaciones peruana.

#### b) Estudios Geotécnicos

Los estudios Geotécnicos presentados por el Proyectista fueron echo en base a las especificaciones vigentes, habiéndose ensayado en laboratorio muestras representativas de los suelos, recolectadas a lo largo del eje con espaciamiento mínimo de 200 m. a una profundidad de 1.50m. de la superficie del terreno natural. En esta fase de los estudios la consultora determinó también la profundidad de la napa friática. Los estudios demostraron que los ensayos de índice de soporte California (CBR) fueron efectuados con muestras representativas de cada segmento, identificadas por su ubicación en los sectores en los que la carretera fue dividida, cuya sectorización se efectuó en base a los suelos predominantes encontrados.



- . Berma lado derecho : 1.00 metros
  - . Berma lado izquierdo : 1.00 metros
  - . Peralte : 3% a cada lado
- Estas características fueron definidas en concordancia con las Normas Peruanas para el Diseño de Carreteras clasificadas como de segunda clase.

#### 1.02.02 Estudios Geotécnica

Los estudios geotécnicos presentados por el proyectista fueron realizados con la frecuencia especificada para este tipo de trabajo habiendo sido sometidas a ensayos de laboratorio muestras representativas de los suelos, recogidas a lo largo vía con una separación mínima de 200 metros e/a una profunda de 1.50 metros de la superficie del terreno natural. En esta fase de los estudios, la consultora determinó, también, la profundidad de la capa friática. Los estudios demuestran que los ensayos del Índice de Soporte California (CBR), fueron realizados con muestras representativas de cada segmento, habiendo sido, para esto, identificado.

- . Sector Quistococha : Km 0,00 al Km 25+269

Este sectores se definió con base en la clasificación de los suelos que predominan en Area a ejecutar.

#### 1.02.03 Proyecto de Pavimentación

- a) Sector del aeropuerto Quistococha Km. 7.100 y Km 25.00.

- . Sub-base : 0.20 centímetros ejecutada con una mezcla de arcilla + Arena (CBR >= 25-30)
- . Revestimiento: Mortero de cemento asfáltico de 5" de espesor.

B. ANEXO 02 – Estudio de Suelos, Canteras y Diseños de Pavimentos Carretera  
Iquitos – Nauta (IV Tramo)





MINISTERIO DE TRANSPORTES, COMUNICACIONES,  
VIVIENDA Y CONSTRUCCION



0005


DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS  
OFICINA DE CONTROL DE CALIDAD

**ESTUDIO DE SUELOS, CANTERAS, DISEÑO DE  
PAVIMENTO Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

**CARRETERA : IQUITOS – NAUTA  
TRAMO IV : KM 13+000 – KM 29+500**

**IQUITOS - LORETO**

AGOSTO 2001

BORATORIO  CENTRAL

Av. Túpac Amaru N° 1590 - Rímac, Telf: 481 - 3707 Fax : 481 0677



DE TRANSPORTES, COMUNICACIONES,  
VIVIENDA Y CONSTRUCCION



246  
0014

Resultando en este caso por la condiciones señaladas poco relevante como parámetro para el diseño de Pavimentos, más aún cuando no existe registro sistemático de los datos de vehículos que transitan por la carretera.

Por las razones expuestas se ha visto conveniente la aplicación de Métodos Aproximados para el Análisis de Tráfico, empleándose el desarrollado por la T.R.B. para Carreteras de Bajo de Volumen de Tráfico en el manual "Synthesis 4. Structural Design of Low Volume Roads", donde el TPD es afectado por un factor (M) de tráfico mixto de acuerdo a tres categorías de porcentaje de camiones (bajo, medio y alto) y tres categorías de carga (ligero, medio y pesado).

Los valores del Factor de Tráfico Mixto, están tabulados en el siguiente cuadro:

CUADRO N° 02

Distribución de Carga (N <sub>8.2</sub> por Camión)	Porcentaje de Camiones		
	Bajo (Menos de 15%)	Medio (15% - 25%)	Alto (Más de 25%)
Ligero (menos de 0.75)	9	18	27
Medio (0.75 - 1.5)	23	46	69
Pesado (más de 1.5)	37	73	110

Una vez estimado el tráfico M, el cálculo del Número de Ejes Equivalentes a 8.2 Ton previsto durante el período de diseño, en función de la tasa de crecimiento, se realiza en forma convencional.

Para el cálculo del Número de Ejes Simple Equivalentes durante el periodo de diseño considerado se dispone de la siguiente información:

- Tráfico promedio diario (asumido) : 380 Veh / día
- Tasas de crecimiento : 4%
- Período de Diseño : 10 años



MINISTERIO DE TRANSPORTES, COMUNICACIONES,  
VIVIENDA Y CONSTRUCCION



247

0015

Para entrar al Cuadro N°02 se deben definir las características del tráfico en función de los parámetros y rangos establecidos, considerándose en este caso:

- Porcentajes de Camiones : Alto (más de 25%)
- Distribución de Cargas : Medio

El Factor de Tráfico que corresponde será entonces  $M = 69$ .

El Número de Repeticiones Total Acumulado de Ejes Simples Equivalentes a 8.2 Ton ( $EAL_{8.2}$ ) durante el período de diseño se calcula con la siguiente expresión:

$$EAL_{8.2} (n \text{ años}) = (TPD \times M) \times \frac{[(1+i)^n - 1]}{\ln(1+i)}$$

Donde:

- TPD : Tráfico Promedio Diario
- M : Factor de Composición de Tráfico
- i : Tasa de Crecimiento
- n : Período de diseño

Reemplazando la información disponible:

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = (380 \times 69) \times \frac{[(1+0.04)^{10} - 1]}{\ln(1+0.04)}$$

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = 3.21 \times 10^5 \text{ repeticiones}$$

$$EAL_{8.2} (10 \text{ años}) = 3.21 \times 10^5 \text{ repeticiones}$$

### 3.0 DISEÑO DEL PAVIMENTO

El pavimento es la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidos entre la superficie de la Subrasante y la Superficie de Rodadura, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie uniforme de textura apropiada, resistentes a la acción del tráfico, intemperismo y de otros agentes



LATORIO CENTRAL

Av. Tupac Amaru N° 1590 - Rimac, Telf: 481 - 3707 Fax: 481 0677

C. ANEXO 03 – MTC E 1002-2000 “Medida de la Deflexión y Determinación del Radio de Curvatura de un Pavimento Flexible Empleando Viga Benkelman”





## MEDIDA DE LA DEFLEXIÓN Y DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN

### MTC E 1002 – 2000

Este Modo Operativo está basado en la Norma ASTM D 4055, la misma que se ha adaptado al nivel de implementación y a las condiciones propias de nuestra realidad. Cabe indicar que este Modo Operativo está sujeto a revisión y actualización continua.

Este Modo Operativo no propone los requisitos concernientes a seguridad. Es responsabilidad del Usuario establecer las cláusulas de seguridad y salubridad correspondientes, y determinar además las obligaciones de su uso e interpretación.

#### 1. OBJETIVO

Detalla el procedimiento para determinar simultáneamente con una viga Benkelman la Deflexión Recuperable y el Radio de Curvatura de un pavimento flexible, producidos por una carga estática. A tal fin se utiliza un camión donde la carga, tamaño de llantas, espaciamiento entre ruedas duales y presión de inflado están normalizadas.

#### 2. APARATO

2.1 Una viga Benkelman de doble brazo con sus correspondientes diales registradores (al 0.01 mm y recorrido 12 mm) y las siguientes dimensiones fundamentales:

- Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba = 2,440 m.
- Longitud del primer brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0,610 m.
- Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote a la punta de prueba = 2,190 m.
- Longitud del segundo brazo de ensayo, desde el pivote al punto de apoyo del vástago de su dial registrador = 0,5475 m.

**Nota 1.** Se permite el empleo de vigas con dimensiones diferentes siempre y cuando no sean tan reducidas que el radio de acción de la carga no afecte permanentemente la posición de sus patas (ver numeral 3.8).

2.2 Un camión para ensayo con las siguientes características.

El eje trasero pesará en la balanza 8.175 kilogramos, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. Las llantas deberán ser 10" x 20"; 12 lonas e infladas a 5,6 kg/cm<sup>2</sup> (80 libras por pulgada cuadrada). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual deber ser de 32 cm.



2.3 Un medidor de presión de inflado.

2.4 Un termómetro de 0 a 100 °C con divisiones cada grado.

2.5 Un barreno para ejecutar orificios en el pavimento de 4 cm de profundidad y 10 mm de diámetro.

2.6 Un cronometro.

2.7 Una Wincha de acero de 2 m y otra de 25 m.

2.8 Un vibrador.

### 3. PROCEDIMIENTO

3.1 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. Se recomienda utilizar las distancias indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1

Ancho del carril	Distancia del punto de ensayo desde el borde del pavimento
2,70 m	0,45 m
3,00 m	0,60 m
3,30 m	0,75 m
3,60 m o más	0,90 m

3.2 La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado; para la correcta ubicación de la misma, deberá colocarse en la parte trasera extrema 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 3,1 de modo que simultáneamente el punto quede entre ambas llantas de la rueda dual.

3.3 Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión, perpendicularmente al eje de carga, de modo que la punta de prueba del primer brazo coincida con el punto de ensayo y la viga no roce contra las llantas de la rueda dual.

3.4 Se liberan los seguros de los brazos y se ajusta la base de la viga por medio del tornillo trasero, de manera que los dos brazos de medición queden en contacto con los diales.

3.5 Se ajustan a los diales de modo que sus vástagos tengan un recorrido libre comprendido entre 4 y 6 mm. Se giran las esferas de los diales hasta que las agujas queden en cero y se verifica la lectura



golpeándolos suavemente con un lápiz. Girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta obtener la posición 0 (cero).

**3.6** Se hace avanzar suave y lentamente el camión; se pone en marcha el cronómetro y vibrador y se leen los diales cada 60 segundos. Cuando dos lecturas sucesivas de cada uno de ellos no difieran en más de 0,01 mm, se da por finalizada la recuperación, registrándose las últimas lecturas observadas (L0 y L25)

**3.7** 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 paralela al eje del camino, que pasa por el punto de determinación de la deflexión y a 50 cm del mismo, en el sentido de avance del camión. Se llena con aceite no menos de 10 minutos antes de iniciar el ensayo, se inserta el termómetro y se lee la temperatura, retirando el mismo antes del desplazamiento del camión.

El rango de temperatura de trabajo deberá quedar dentro de los siguientes límites:

Límite inferior : 5 °C

Límite superior : 35 °C

**3.8** No obstante el límite superior indicado en el párrafo 3.7, el ensayo no se deberá efectuar a temperaturas inferiores si ellas producen deformación plástica entre ambas llantas de la rueda dual. Para detectar si dicha deformación se produce, se deberá proceder de la siguiente forma:

Una vez registradas las lecturas L0 y L25, se hace retroceder suave y lentamente el camión hasta que la rueda dual externa quede colocada sobre el punto de ensayo, observando la marcha en la aguja del dial. Si alcanzada cierta posición la aguja se detiene y luego se observa un desplazamiento en sentido contrario, como si se produjera la recuperación del pavimento, ello indica que existe deformación plástica medible entre ambas llantas de la rueda dual. Esa aparente recuperación puede ser, debida, también, al hecho de que el radio de acción de la carga del camión afecte las patas de la viga (ver numeral 3.9).

**3.9** Tampoco deberá efectuarse el ensayo si, aun cuando no se detectara deformación plástica mediante el procedimiento recién indicado, se constata que el radio de acción de la carga del camión afecta las patas de la regla, para lo cual se procederá de la siguiente forma:

Una vez registradas las lecturas de los diales, se hace retroceder lentamente el camión observando el dial del primer brazo. Cuando se observe que el dial comienza a desplazarse acusando la deformación producida por la carga, se marca sobre el pavimento la posición de la guía vertical mencionada en el párrafo 3.2 y se detiene el retroceso del camión.

Se mide la distancia entre la punta de prueba del primer brazo y la marca practicada sobre el pavimento, de acuerdo con lo indicado antes. Sea  $d$  esa distancia, si  $d$  es mayor de 2,40 m, la acción de la carga del camión afecta las patas de la viga.







#### 4. CÁLCULOS

4.1 La deflexión bajo el eje de la carga ( $D_0$ ), se calcula mediante la expresión:

$$D_0 = 4 \times L_0 \text{ (expresada en 0,01 mm)}$$

donde  $L_0$  es la lectura registrada en el dial del primer brazo de ensayo.

4.2 La deflexión a 25 cm del eje de la carga ( $D_{25}$ ), se calcula con la expresión:

$$D_{25} = 4 \times L_{25} \text{ (expresada en 0.01 mm).}$$

**Nota 2.** El valor 4 usado por el cálculo de  $D_0$  y  $D_{25}$  obedece a que la relación de longitudes de brazo indicadas en 2.1 es 4. En caso de que la viga utilizada tenga una relación diferente, se aplicará el factor que corresponda.

4.3 El radio de curvatura en el punto de ensayo se calcula con la expresión

$$RC = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})} \text{ expresado en mm}$$

#### 5. INFORME

Para cada ensayo, el informe deberá incluir la abscisa de la prueba, el estado superficial y la temperatura del pavimento, las deflexiones ( $D_0$  -  $D_{25}$ ) y el radio de curvatura ( $R_c$ ).

La aplicación de correcciones por efecto de la temperatura y el procesamiento estadístico de los datos, se efectuarán conforme lo establezca la normativa respectiva.

#### 6. REFERENCIAS NORMATIVAS

ASTM	D 4695
------	--------

D. ANEXO 04– Ensayos para la Evaluación Estructural del Tramo en estudio



# UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

Y ENSAYO DE MATERIALES



**TESIS** : EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS – NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 - KM 17+800.

**SOLICITANTES** : BACH. ING. CIVIL STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA Y BACH. ING. CIVIL JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO.

**FECHA** : SAN JUAN, 20 DE FEBRERO DE 2018

**Carretera Iquitos - Nauta**  
**Sector: Km 16+300 - Km 17+800**

### MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

TRAMO : KM 16+300 - KM 17+800 (Carpeta asfáltica)

CARRIL : DERECHO

OPERADOR :

RB : 4:1

FECHA : 22/12/2015

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 <sup>-2</sup> mm)		Espesor (cm)	Ahueamiento (mm)			Temp (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS		
	L <sub>25</sub>	L <sub>max</sub>		Ahue ext.	Ahue int.	Prom		Deflexiones Corregidas		Radio Curvatura (m)
								D <sub>25</sub> x 10 <sup>-2</sup> mm	D <sub>MAX</sub> x 10 <sup>-2</sup> mm	
16+300	1	9	7.0				29.0	30.1	33.9	822
16+400	2	11	7.0				29.0	33.9	41.4	417
16+500	1	9	7.0				29.0	30.1	33.9	822
16+600	4	12	7.0				29.0	30.1	45.2	207
16+700	1	12	7.0				30.0	41.1	44.9	822
16+800	7	8	7.0				30.0	3.7	29.9	119
16+900	1	16	7.0				30.0	56.1	59.8	845
17+000	2	10	7.0				31.0	29.7	37.1	422
17+100	1	9	7.0				31.0	29.7	33.4	845
17+200	2	10	7.0				31.0	29.7	37.1	422
17+300	2	11	7.0				31.0	33.4	40.9	417
17+400	1	15	7.0				31.0	52.0	55.7	845
17+500	2	16	7.0				31.0	52.0	59.4	422
17+600	2	16	7.0				31.0	52.0	59.4	422
17+700	1	10	7.0				33.0	33.0	36.7	845
17+800	1	10	7.0				41.0	31.4	34.9	893

**ESPECIFICACIONES** : La medida de la deflexion y determinacion del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman, se realizó según las Normas Técnicas ASTM D 4695.

**OBSERVACIONES** : Los datos de los ensayos fueron proporcionados por el solicitante.



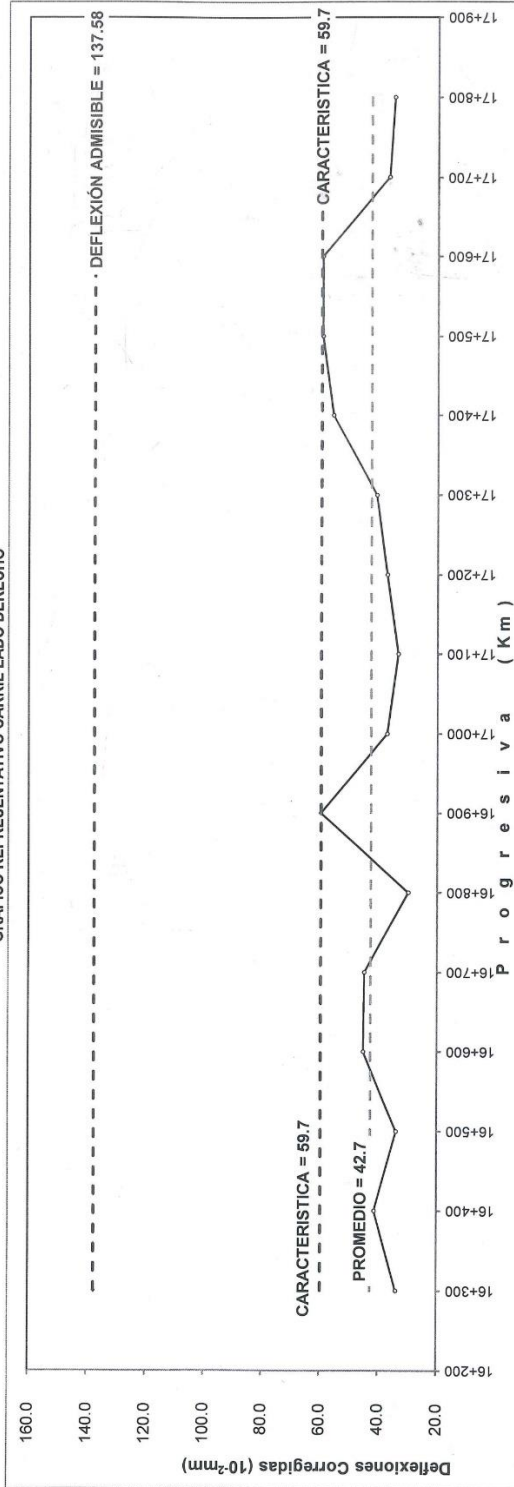
**UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ**  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
**Y ENSAYO DE MATERIALES**



**TESIS** : EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS – NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 - KM 17+800.  
**SOLICITANTES** : BACH. ING. CIVIL STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA Y BACH. ING. CIVIL JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO.  
**FECHA** : SAN JUAN, 20 DE FEBRERO DE 2018

Carretera Iquitos - Nauta  
Sector: Km 16+300 - Km 17+800

**MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN**  
**GRAFICO REPRESENTATIVO CARRIL LADO DERECHO**



RESUMEN ESTADÍSTICO (CARRIL DERECHO)			
Progresivas (Km)	Deflexiones Corregidas (10 <sup>-2</sup> mm)		Admisible
	Desviación Estandar	Promedio	
16+300 - 17+800	10.34	42.72	59.72
			137.58

**ESPECIFICACIONES** : La medida de la deflexión y determinación del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman, se realizó según las Normas Técnicas ASTM D 4695.

**OBSERVACIONES** Los datos de los ensayos fueron proporcionados por el solicitante.



# UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
Y ENSAYO DE MATERIALES



**TESIS** : EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS - NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 - KM 17+800.  
**SOLICITANTES** : BACH. ING. CIVIL STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA Y BACH. ING. CIVIL JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO.  
**FECHA** : SAN JUAN, 20 DE FEBRERO DE 2018

Carretera Iquitos - Nauta  
Sector: Km 16+300 - Km 17+800

## RESUMEN DE DEFLEXION DEL TRAMO 16+300 AL 17+800

ESTACION	DEFLEXION	NUMERO DE INTERVALO	DISTANCIA DE INTERVALO (Km)	DISTANCIA ACUMULADA (Km)	DEFLEXION PROMEDIO	INTERVALO DE AREA REAL	AREA ACUMULADA	Zx
16+300	33.9	1	0	0	33.9	0.0	0.0	0.00
16+400	41.4	2	0.1	0.1	37.6	3.8	3.8	-0.56
16+500	33.9	3	0.1	0.2	37.6	3.8	7.5	-1.13
16+600	45.2	4	0.1	0.3	39.5	4.0	11.5	-1.51
16+700	44.9	5	0.1	0.4	45.0	4.5	16.0	-1.33
16+800	29.9	6	0.1	0.5	37.4	3.7	19.7	-1.92
16+900	59.8	7	0.1	0.6	44.9	4.5	24.2	-1.76
17+000	37.1	8	0.1	0.7	48.5	4.8	29.0	-1.24
17+100	33.4	9	0.1	0.8	35.3	3.5	32.6	-2.04
17+200	37.1	10	0.1	0.9	35.3	3.5	36.1	-2.84
17+300	40.9	11	0.1	1	39.0	3.9	40.0	-3.27
17+400	55.7	12	0.1	1.1	48.3	4.8	44.8	-2.77
17+500	59.4	13	0.1	1.2	57.6	5.8	50.6	-1.34
17+600	59.4	14	0.1	1.3	59.4	5.9	56.5	0.27
17+700	36.7	15	0.1	1.4	48.0	4.8	61.3	0.75
17+800	34.9	16	0.1	1.5	35.8	3.6	64.9	0.00

**ESPECIFICACIONES** : La medida de la deflexion y determinacion del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman, se realizó según las Normas Técnicas ASTM D 4695.

**OBSERVACIONES** : Los datos de los ensayos fueron proporcionados por el solicitante.





**UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ**  
**LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**  
**Y ENSAYO DE MATERIALES**



**TESIS** : EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS - NAUTA CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 - KM 17+800.  
**SOLICITANTES** : BACH. ING. CIVIL STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA Y BACH. ING. CIVIL JORGE CARLOS AMASIFUEN CARO.  
**FECHA** : SAN JUAN, 20 DE FEBRERO DE 2018

**Carretera Iquitos - Nauta**  
**Sector: Km 16+300 - Km 17+800**

**RESUMEN DE RADIO DE CURVATURA**

ESTACION	RADIO CURVATURA	NUMERO DE INTERVALO	DISTANCIA DE INTERVALO (Km)	DISTANCIA ACUMULADA (Km)	DEFLEXION PROMEDIO	INTERVALO DE AREA REAL	AREA ACUMULADA	Zx
16+300	830.5	1	0	0	830.5	0.0	0.0	0.00
16+400	415.2	2	0.1	0.1	622.9	62.3	62.3	3.97
16+500	830.5	3	0.1	0.2	622.9	62.3	124.6	7.95
16+600	207.6	4	0.1	0.3	519.0	51.9	176.5	1.54
16+700	835.9	5	0.1	0.4	521.8	52.2	228.7	-4.59
16+800	119.4	6	0.1	0.5	477.7	47.8	276.4	-15.13
16+900	835.9	7	0.1	0.6	477.7	47.8	324.2	-25.67
17+000	420.7	8	0.1	0.7	628.3	62.8	387.0	-21.15
17+100	841.4	9	0.1	0.8	631.1	63.1	450.1	-16.36
17+200	420.7	10	0.1	0.9	631.1	63.1	513.2	-11.56
17+300	420.7	11	0.1	1	420.7	42.1	555.3	-27.80
17+400	841.4	12	0.1	1.1	631.1	63.1	618.4	-23.01
17+500	420.7	13	0.1	1.2	631.1	63.1	681.5	-18.21
17+600	420.7	14	0.1	1.3	420.7	42.1	723.6	-34.45
17+700	852.3	15	0.1	1.4	636.5	63.7	787.2	-29.11
17+800	896.1	16	0.1	1.5	874.2	87.4	874.7	0.00

**ESPECIFICACIONES** : La medida de la deflexion y determinacion del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman, se realizó según las Normas Técnicas ASTM D 4695.

**OBSERVACIONES** : Los datos de los ensayos fueron proporcionados por el solicitante.



# UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS  
Y ENSAYO DE MATERIALES



**TESIS** : EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA IQUITOS – NAUTA  
CON VIGA BENKELMAN, TRAMO KM 16+300 - KM 17+800.  
**SOLICITANTES** : BACH. ING. CIVIL STEPHANIE DESSIRE MENDEZ GARCIA Y BACH. ING. CIVIL JORGE  
CARLOS AMASIFUEN CARO.  
**FECHA** : SAN JUAN, 20 DE FEBRERO DE 2018

Carretera Iquitos - Nauta  
Sector: Km 16+300 - Km 17+800

## RESUMEN ESTADISTICO DEFLEXIONES

CARPETA ASFÁLTICA							
Progresivas (Km)		Desviación Estandar	Deflexiones Corregidas (10 <sup>2</sup> mm)				CV
			Promedio	Característica	Máximo	Mínimo	
16+300	17+800	10.3	42.7	59.7	59.8	29.9	0.24

## RESUMEN ESTADISTICO RADIO DE CURVATURA

CARPETA ASFÁLTICA							
Progresivas (Km)		Desviación Estandar	Radio de Curvatura (m)				CV
			Promedio	Característica	Máximo	Mínimo	
16+300	17+800	266.5	600.6	1039.0	896.1	119.4	0.44

**ESPECIFICACIONES** : La medida de la deflexion y determinacion del radio de curvatura de un pavimento flexible empleando la viga Benkelman, se realizó según las Normas Técnicas ASTM D 4695.

**OBSERVACIONES** : Los datos de los ensayos fueron proporcionados por el solicitante.