

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON VIGA BENKELMAN -  
METODO MATEMÁTICO**

**MONITOREO DE CONSERVACIÓN CARRETERA CAÑETE –  
HUANCAYO  
Km. 116+000 AL Km. 118+000**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**RUBEN DAVID PAJUA COTERA**

**Lima- Perú**

**2010**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	3
<b>LISTA DE CUADROS</b>	4
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	5
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS</b>	7
<b>INTRODUCCIÓN</b>	10
<b>CAPÍTULO I.- PERFIL DEL PROYECTO</b>	11
1.1. ANTECEDENTES	11
1.2. TRAMO EVALUADO KM. 116+000 AL KM. 118+000	15
1.2.1 <i>Ubicación</i>	15
1.2.2 <i>Aspectos geológicos</i>	15
1.2.3 <i>Geografía e hidrología</i>	16
1.2.4 <i>Clima y Meteorología</i>	16
1.2.5 <i>Aspectos geotécnicos</i>	17
1.2.6 <i>Tráfico vehicular</i>	17
1.2.7 <i>Sub-tramo en estudio Km. 116+000 – Km. 118+000</i>	19
<b>CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE</b>	22
2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS	22
2.1.1 <i>Sistemas elásticos de capas</i>	22
2.1.2 <i>Sistemas no lineales de capas</i>	22
2.1.3 <i>Sistemas lineales viscoelásticos</i>	22
2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	23
2.2.1 <i>Viga Benkelman</i>	23
2.2.2 <i>Dynaflec</i>	23
2.2.3 <i>Road Rater</i>	24
2.2.4 <i>RDD</i>	25
2.2.5 <i>FWD</i>	25
2.2.6 <i>KUAB – FWD</i>	26
<b>CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO</b>	27
3.1 VIGA BENKELMAN	27
3.1.1 <i>Metodología de medición de deflexiones con Viga Benkelman</i>	28
3.1.2 <i>Equipo requerido</i>	30

3.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	30
3.2.1	Definiciones previas	30
3.2.2	Modelos matemáticos	31
3.3	MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	33
3.3.1	<i>Modelo de Boussinesq</i>	33
3.3.2	<i>Modelo de Hogg</i>	35
3.3.3	<i>Modelo de Westergaard</i>	36
3.3.4	<i>Modelos bicapas</i>	37
3.3.5	<i>Modelos multicapas</i>	37
3.4	MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS	38
3.4.1	<i>Fórmula de Boussinesq</i>	38
3.4.2	<i>Fórmula de Westergaard</i>	38
3.4.3	<i>Fórmula de Palmer y Baber</i>	39
3.4.4	<i>Fórmula de Odemark</i>	39
3.4.5	<i>Método de Elementos Finitos</i>	40
	<b>CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO Km. 116+000 – Km. 118+000</b>	41
4.1	APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN	41
4.2	APLICACIÓN CON EL MÉTODO DE HOGG	45
	<b>CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	50
	<b>CONCLUSIONES</b>	51
	<b>RECOMENDACIONES</b>	53
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	54
	<b>ANEXOS</b>	55

## RESUMEN

En el presente Informe de Suficiencia se ha evaluado el comportamiento estructural del pavimento de la carretera Cañete – Huancayo en el tramo Km. 116+000 – Km. 118+000.

La evaluación estructural del pavimento se ha llevado a cabo mediante ensayos no destructivos (END) empleando la Viga Benkelman, que permite obtener en campo las deflexiones que se genera en un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar, de una manera sencilla y práctica. El procesamiento de datos a partir de la medición de deflexiones en campo será realizado con el método matemático de Hogg, que permitirá obtener la longitud característica ( $L_0$ ) y módulo de elasticidad ( $E_0$ ) de la subrasante.

Se espera que, al realizar la evaluación estructural del pavimento los valores característicos sean aceptables.

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro N° 1.01</b>	Tramos y longitudes de la carretera en estudio.....	14
<b>Cuadro N° 1.02</b>	IMD 2010, estación E6.....	17
<b>Cuadro N° 1.03</b>	Resumen del IMD 2009 - por estación de control (veh/día).....	18
<b>Cuadro N° 1.04</b>	Tráfico por Tipo de vehículo para la estación E6 .....	19
<b>Cuadro N° 4.05</b>	Datos tomados en campo. ....	44
<b>Cuadro N° 4.06</b>	Procesamiento de datos mediante el modelo de Hogg ...	46
<b>Cuadro N° 4.07</b>	Rango de valores del CBR.....	46
<b>Cuadro N° 4.08</b>	Deflexiones corregidas.....	47
<b>Cuadro N° 4.09</b>	Deflexión admisible vs tiempo.....	49
<b>Cuadro N° 4.10</b>	Resumen estadístico .....	49

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura N° 1.01</b>	Corredor Vial N° 13 (Carretera Cañete – Yauyos - Chupaca).....	14
<b>Figura N° 1.02</b>	Ubicación del Tramo en estudio .....	15
<b>Figura N° 1.03</b>	Ubicación detallada del tramo en estudio.....	20
<b>Figura N° 1.04</b>	Estructura del Pavimento en Estudio .....	21
<b>Figura N° 2.05</b>	Viga Benkelman.....	23
<b>Figura N° 2.06</b>	Equipo Dynaflect .....	24
<b>Figura N° 2.07</b>	Equipo Road Rater .....	25
<b>Figura N° 2.08</b>	Deflectómetro dinámico de Balanceo.....	25
<b>Figura N° 2.09</b>	Equipo FWD .....	26
<b>Figura N° 2.10</b>	Equipo KUAB-FWD .....	26
<b>Figura N° 3.11</b>	Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman.....	27
<b>Figura N° 3.12</b>	Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman. ....	28
<b>Figura N° 3.13</b>	Esquematzación del proceso de medición de la Viga Benkelman .....	29
<b>Figura N° 3.14</b>	Modelos matemáticos.....	32
<b>Figura N° 3.15</b>	Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada.....	34
<b>Figura N° 3.16</b>	Modelo de Hogg.....	36
<b>Figura N° 3.17</b>	Modelo de Westergaard.....	37
<b>Figura N° 3.18</b>	Modelo multicapas.....	37
<b>Figura N° 3.19</b>	Representación de un masivo semi infinito.....	38
<b>Figura N° 3.20</b>	Multicapa propuesto con la formula de palmer y baber generalizada.....	39
<b>Figura N° 3.21</b>	Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark .....	40
<b>Figura N° 3.22</b>	Modelo de Elementos Finitos .....	40
<b>Figura N° 4.23</b>	Toma de datos con viga Benkelman progresiva Km. 116+600.....	41
<b>Figura N° 4.24</b>	Medida del ahuellamiento.....	42

---

<b>Figura N° 4.25</b>	Medida del espesor de la superficie de rodadura (monocapa).....	42
<b>Figura N° 4.26</b>	Estado de la superficie de rodadura (monocapa).....	43
<b>Figura N° 4.27</b>	Estado de la superficie de rodadura (monocapa).....	43
<b>Figura N° 4.28</b>	Significado cualitativo de los diferentes tipos de Curvas de Deflexiones.....	47
<b>Figura N° 4.29</b>	Deflectograma.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>AYESA</b>	Asociación Aguas y Estructuras
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CBR</b>	California Bearing Ratio
<b>D<sub>v</sub></b>	Desviación
<b>FWD</b>	Falling Weight Deflectometer
<b>MEF</b>	Método de Elementos Finitos.
<b>LVDT</b>	Transformador Diferencial Variable Lineal
<b>MTC</b>	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
<b>MCCP</b>	Mezclas de Concreto con Cemento Portland
<b>M<sub>r</sub></b>	Módulo Resiliente
<b>MDS</b>	Máxima Densidad Seca
<b>NTP</b>	Norma Técnica Peruana
<b>OCH</b>	Óptimo Contenido de Humedad
<b>PERT</b>	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
<b>PROMCEPRI</b>	Promoción de Concesiones Privadas
<b>RDD</b>	Deflectómetro dinámico del balanceo
<b>SUCS</b>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<b>SN</b>	Número Estructural
<b>TSB</b>	Tratamiento Superficial Bicapa
<b>WASHO</b>	Western Association of State Highway Organizations
<b>Vac</b>	Vertientes Aluviales de cultivo
<b>FHWA</b>	Administración Federal de Carreteras – Virginia - USA
<b>A</b>	Radio de la huella de la llanta
<b>D<sub>0</sub></b>	Deflexión máxima
<b>D<sub>R</sub></b>	Deflexión a una distancia R
<b>D<sub>(R,0)</sub></b>	Deflexión a una distancia R y profundidad 0
<b>D<sub>t</sub></b>	Deflexión teórica
<b>D<sub>c</sub></b>	Deflexión de campo



<b><math>D_{rig}</math></b>	Rigidez del pavimento
<b><math>E_s</math></b>	Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq
<b><math>E^*</math></b>	Módulo de elasticidad del pavimento
<b><math>E_o</math></b>	Módulo de elasticidad de la subrasante o módulo de elasticidad del modelo de Maxwell
<b><math>E_i</math></b>	Módulo de elasticidad del modelo de Kelvin
<b><math>E_1</math></b>	Módulo de elasticidad de la capa 1
<b><math>E_2</math></b>	Módulo de elasticidad de la capa 2
<b><math>E_3</math></b>	Módulo de elasticidad de la capa 3
<b>H</b>	Espesor de Pavimento y capa de la subrasante
<b><math>h_2</math></b>	Espesor de capa subrasante
<b><math>h_1</math></b>	Espesor de pavimento
	Número entero mayor igual que cero
<b><math>J_0</math></b>	Función de Bessel de primera especie y orden 0
<b><math>J_1</math></b>	Función de Bessel de primera especie y orden 1
<b><math>J_i</math></b>	Función de Bessel de primera especie y orden i
<b>K</b>	Distancia donde se aplica la carga hacia el punto donde se mide el esfuerzo
<b><math>K_1</math></b>	Coefficiente no lineal del material granular
<b><math>K_2</math></b>	Exponente no lineal del material granular
<b>k</b>	Módulo de reacción
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>km</b>	Kilómetro
<b><math>L_0</math></b>	Longitud característica
<b>m</b>	Variable de integración
<b>P</b>	Carga
<b>psi</b>	Libra sobre pulgada <sup>2</sup>
<b><math>q_0</math></b>	Presión de Inflado
<b>R</b>	Distancia a la que se mide la deflexión $D_R$
<b><math>\mu</math></b>	Ratio de Poisson
<b><math>T_i</math></b>	Tiempo de retardo del iésimo modelo de Maxwell
<b><math>T_0</math></b>	Tiempo de retardo del modelo de Maxwell
<b><math>T_1</math></b>	Tiempo de retardo del modelo de Kelvin
<b>t</b>	Tiempo

---

$W_{18}$	Número estimado de ejes simples equivalentes a 8.2 toneladas
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_0$	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell
$\sigma_i$	Esfuerzo del modelo de Kelvin
$\varepsilon$	Deformación unitaria
$\delta$	Desplazamiento vertical unitario
$\lambda$	Viscosidad
$\lambda_0$	Viscosidad del modelo de Maxwell
$\lambda_1$	Viscosidad del modelo de Kelvin
$\theta$	Primer esfuerzo invariante
$\rho$	Presión vertical
$\nabla$	Operador nabla

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Informe de Suficiencia es la evaluación estructural del pavimento en el tramo Km. 116+000 – Km. 118+00 de la carretera Cañete – Huancayo, mediante la medición en campo de deflexiones del pavimento utilizando la Viga Benkelman.

La evaluación estructural de un pavimento mediante la Viga Benkelman permite medir las deformaciones elásticas que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar y empleando métodos matemáticos es posible hallar las características estructurales de la subrasante y del pavimento.

Lo que se describe en este informe consta de 5 capítulos que muestran cómo se puede evaluar la condición de la capacidad estructural de un pavimento, usando una metodología sencilla, práctica y no destructiva.

En el capítulo I se describe las generalidades y el estado de la carretera en su totalidad y el tramo del Km. 116+000 – Km. 118+000.

En el capítulo II se describe los sistemas de análisis y los ensayos no destructivos para la evaluación estructural de los pavimentos.

En el capítulo III se explica el marco teórico con los conceptos relacionados a la evaluación estructural con Viga Benkelman mediante modelos y métodos matemáticos que se pueden utilizar.

El capítulo IV describe el procedimiento de obtención de datos de las deflexiones con la Viga Benkelman y su procesamiento con el modelo de Hogg.

En el capítulo V se realiza el análisis de resultados obtenidos con el modelo de Hogg.

## CAPÍTULO I.- PERFIL DEL PROYECTO

### 1.1. ANTECEDENTES

La carretera de penetración y enlace entre Cañete – Yauyos – Chupaca, ubicada en los departamentos de Lima y Junín, fue proyectada y ejecutada por etapas durante el Gobierno del Sr. Augusto B. Leguía entre los años 1920 a 1930, mediante la ley de la Conscripción Vial Territorial del Perú.

Mediante esta ley se impulsó la creación y reparación de carreteras, ley que fue promulgada por el entonces Ministerio de Fomento.

En los años 1940 - 1944 durante el Gobierno del Dr. Manuel Prado Ugarteche y el alcalde de Yauyos Dr. Carlos Ayulo Laos, se avanza con los trabajos en la zona de la Costa desde Cañete hasta Yauyos, siendo inaugurada por el presidente en Junio de 1944.

En 1954 se retoman los trabajos, por la necesidad de los pueblos del Norte de Yauyos, sobre todo en el pase del Cañón de Uchco. Por tal motivo deciden gestionar ayuda ante el Ministerio de Fomento, solicitando una delegación de Ingenieros para realizar la rectificación del trazo.

En 1957, se concluyó con el trazo de la carretera, integrando la región costa con la sierra. En 1958 se realizan trabajos de mantenimiento y perfilado a la vía por las empresas Cementos Lima y ARPL Tecnología Industrial.

En los próximos años hasta el año 1998 no se encontró información alguna sobre la Carretera.

En el año 1998 la Comisión de Promoción de Concesiones Privadas (PROMCEPRI) adjudicó la buena Pro al Consorcio “Asociación Aguas y estructuras (AYESA) – ALPHA CONSULT SA” para realizar el Servicio de Consultoría a Nivel de Estudio Definitivo de la Carretera Lunahuaná - Huancayo.

En el año 2003, el Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) encargó al consultor Ing.

Floriano Palacios León, (Contrato de Estudios N° 0412-2003-MTC/20 del 28.11.2003) la elaboración del Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Carretera Corredor Vial N° 13, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca de 245.15 Km. de longitud.

En el año 2005, PROVIAS NACIONAL – MTC ha realizado el Estudio de Pre Inversión a nivel de Factibilidad del Proyecto Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Corredor Vial N° 13, enfatizando el tema de Diseño Vial.

Posteriormente el 2007 por Resolución Ministerial N° 408 -2007-MTC/02 se creó el Programa “Proyecto Perú” bajo responsabilidad de PROVIAS NACIONAL.

Proyecto Perú es un programa de Infraestructura vial diseñado para mejorar las vías de integración de corredores económicos, conformado por ejes de desarrollo sostenido con el fin de mejorar el nivel de competitividad de las zonas rurales, en la red Vial Nacional, Departamental y Vecinal. Dicho programa se caracteriza por contratos que se controlan por niveles de servicio y plazos mayores o iguales a los 3 años.

Con fecha 16 de Octubre de 2007 se realiza la Convocatoria para el Concurso Público “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete-Lunahuana-Pacarán-Chupaca y Rehabilitación del tramo Zúñiga. Dv. Yauyos – Ronchas por un periodo de 5 años.

Con fecha 17 de Diciembre 2007 se firma el contrato con el CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS, por un monto que asciende en S/. 131'589,139.71, por la conservación vial de 271.73 Km.

En los Términos de Referencia señalan que se debe dar una Solución Básica a aplicar sobre la superficie actual de la vía, previamente conformada, no se deben realizar cambios en la geometría ni trazo de la vía existente.

Finalmente el 01 de febrero del 2008 se pone en servicio la vía. El consorcio decidió ejecutar el servicio en 2 etapas: Pre-Operativa y Operativa.

En la etapa Pre-Operativa se realizaron los siguientes estudios o informes:

Diseño y elaboración del programa de Conservación Vial.

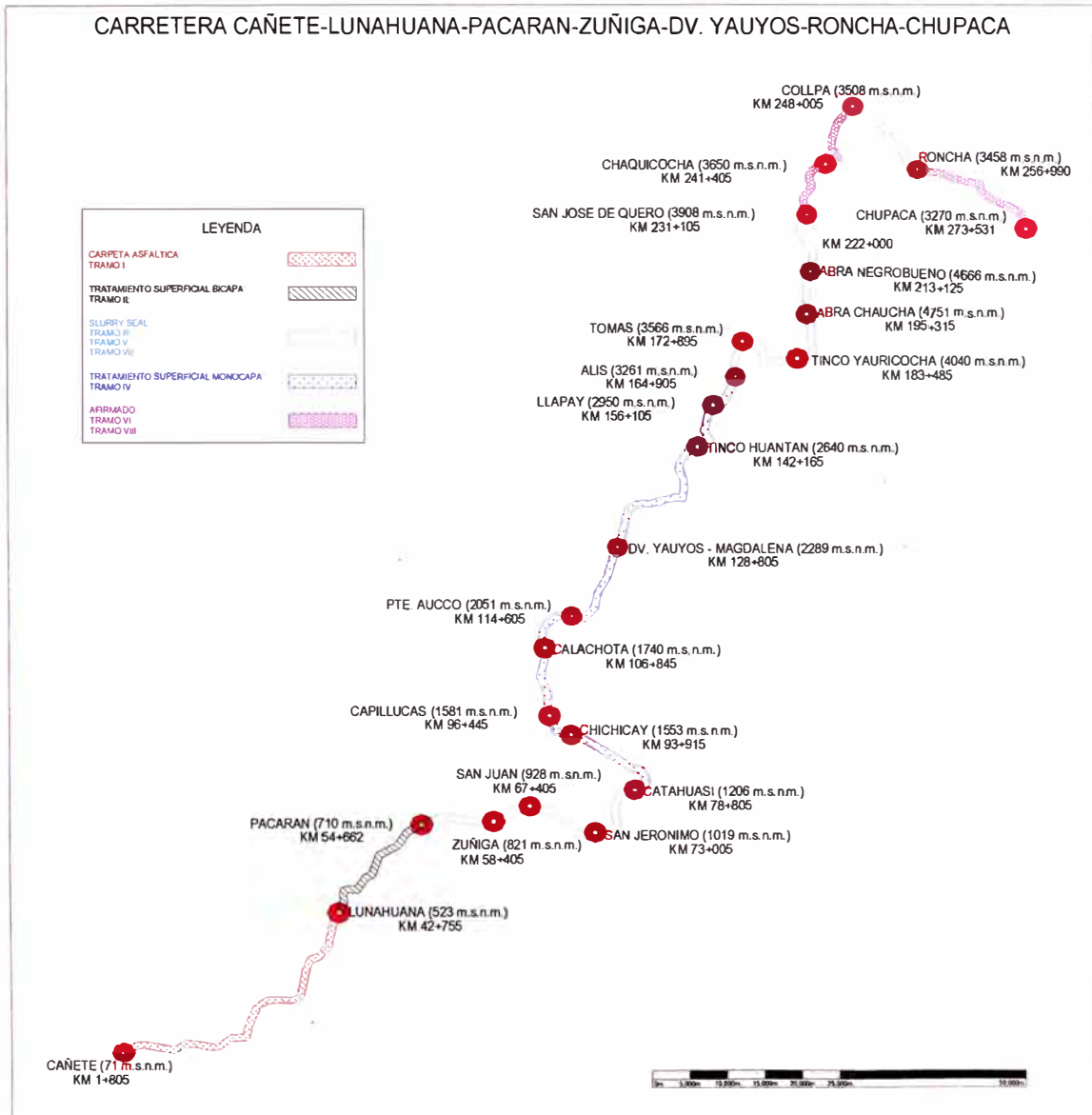
- Elaboración del Plan de Manejo Socio Ambiental.
- Elaboración del informe técnico de la situación inicial de las rutas materia del contrato de Conservación Vial por Niveles de Servicio.
- Elaboración del Plan de Calidad para la ejecución de los servicios.

En la etapa Operativa, se realizarán las siguientes labores como:

- Conservación Rutinaria
- Conservación Periódica
- Cambio de Estándar de afirmado a solución básica
- Reparaciones menores
- Atención de emergencias viales extraordinarias hasta garantizar la transitabilidad
- Relevamiento de información
- Elaboración de informes mensuales e informes finales del proyecto.
- Implementación y puesta en marcha del plan de manejo socio ambiental.

Las alternativas de solución básicas planteadas se realizarán en campo por tramos de prueba. Estos trabajos requieren de evaluaciones superficiales, estructurales y rugosidad de la superficie para el análisis y evolución del comportamiento.

**Figura N° 1.01: Corredor Vial N° 13 (Carretera Cañete – Yauyos - Chupaca)**



Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú

**Cuadro N° 1.01** Tramos y longitudes de la carretera en estudio

Localidad	Progresiva	Tramo	Distancia Km
Cañete	0+000	Cañete-Lunahuaná	40,950
Lunahuaná	40+950	Lunahuaná - Pacarán	11,907
Pacarán	52+857	Pacarán - Zúñiga	3,743
Zúñiga	56+600	Zúñiga - Dv. Yauyos	70,400
Magdalena	127+000	Dv. Yauyos - Roncha	128,185
Roncha	255+185	Roncha - Chupaca	16,541
Chupaca	271+726	<b>Total</b>	<b>271,726</b>

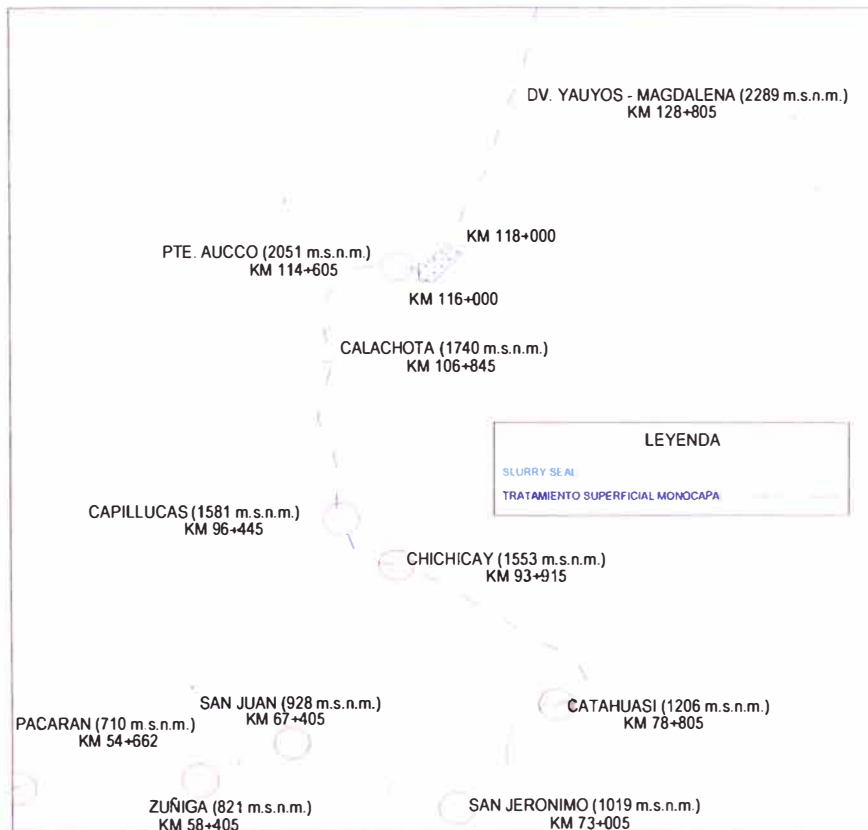
Fuente: Según “plano clave”, elaborado por del Ing. Monitor Edwin Apolinario Morales

## 1.2. TRAMO EVALUADO KM. 116+000 – KM. 118+000

### 1.2.1 Ubicación

El tramo evaluado abarca del Km. 116+000 al Km. 118+000, está comprendido dentro de La carretera Cañete –Yauyos - Huancayo que forma parte del corredor vial N° 22 de la Red Vial Nacional.

**Figura N° 1.02:** Ubicación del Tramo en estudio.



Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú

### 1.2.2 Aspectos Geológicos

La zona Lunahuaná - Tinco Yauricocha, que se considera de media a alta vulnerabilidad ante los riesgos geológicos.

La geología del área presenta rocas ígneas y sedimentarias que van desde el Jurásico hasta el Terciario y los suelos están representados por depósitos de origen aluvial, proluvial, eluvial, deluvial, coluvial, fluvio-glaciario, entre otros.

Los factores geológico estructurales, geomorfológicos e hidrológicos juegan un rol importante en el comportamiento geodinámico de la cuenca del río Cañete,



se han podido detectar eventos como deslizamientos, derrumbes, erosión fluvial, huaycos, erosión de laderas, entre otros que han modificado y modifican el relieve de la cuenca.

### **1.2.3 Geografía e Hidrología**

Políticamente, la cuenca del río Cañete forma parte de las provincias de Cañete y Yauyos, pertenecientes ambas al departamento de Lima.

La cuenca del río Cañete tiene una extensión aproximada de 6192 km<sup>2</sup>, de los cuales el 78.4% (4856 km<sup>2</sup>) corresponde a la cuenca húmeda.

La longitud del río Cañete, entre su nacimiento y desembocadura, es de aproximadamente 220 km., presentando una pendiente promedio de 2%; sin embargo, presenta sectores en donde la pendiente es mucho más pronunciada, especialmente en la parte alta, llegando hasta 8% en el tramo comprendido

### **1.2.4 Clima y Meteorología**

La zona presenta un clima variado entre templado - frío y sub húmedo.

La temperatura media anual fluctúa entre 6 y 12°C. Las temperaturas medias mensuales no difieren más de 2°C de la media anual. Las temperaturas medias diarias tampoco difieren significativamente respecto a la temperatura media mensual, se mantienen más o menos uniformes durante las cuatro estaciones del año. Solo durante fines de otoño y durante todo el invierno se presentan temperaturas mínimas extremas por debajo de 0° C hasta -10° C.

El promedio de precipitación pluvial total por año varía entre 300 y 500 mm. que se distribuyen durante los doce meses del año, de acuerdo a las estaciones. En verano es la estación lluviosa donde se concentra el 65 a 70% del volumen total anual; en otoño disminuye hasta el 8 a 12%, en invierno casi no hay lluvia, solo unos días durante los dos últimos meses, que representan 12 y 15% del total; y finalmente en primavera se reinicia el período de lluvias, principalmente a partir de octubre, acumulando durante esta estación 20 a 25% del total anual.

Las lluvias en este tipo climático, más las lluvias de las partes altas, que sobrepasan los 500 mm afectan la conservación de la carretera, mediante avenidas y huaycos provocando desbordes e inundaciones.

### 1.2.5 Aspectos Geotécnicos

En los estudios realizados por el Consorcio Gestión de Carreteras, correspondientes a los suelos y materiales de construcción, se determinó que entre los Km. 57+000 al Km. 130+000, el material predominante es la arena y grava limosa que en el sistema SUCS clasifican como GC-GM, en el sistema AASHTO es variable entre A-1-b(0) y A-2-4(0), con presencia de bolonerías, en poca proporción en la capa superior, mientras que a partir de 0,40m aumenta su presencia a 50%.

### 1.2.6 Tráfico Vehicular

La información de estudio de tráfico corresponde al realizado por el Consorcio encargado del mantenimiento. Para el tramo en estudio se considera los datos de la estación E6 "Yauyos".

**Cuadro N° 1.02:** IMD 2010, estación E6

ESTACION	NOMBRE	TRAMO
E6	Yauyos	Capilluca (Km. 96+445) - Dv. Yauyos (Km. 128+805)

*Fuente: Elaboración propia.*

**Cuadro N° 1.03:** Resumen del IMD 2009 - por estación de control (veh/día)

Tramo	CAÑETE - LUNAHUANA	LUNAHUANA - PACARAN	PACARAN - ZÚÑIGA	ZÚÑIGA - CATAHUASI	CATAHUASI - CAPILLUCA	CAPILLUCA - DV. YAUYOS	DV. YAUYOS - COLPA	COLPA - HUARISCA	HUARISCA - CHUPAGA
Estación	LUNAHUANA	PACARAN	ZUÑIGA	SAN JUAN	CHICHICAY	YAUYOS	COLPA	RONCHA	HUARISCA
Tipo de Vehículo	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Auto	139	31	13	46	6	2	4	13	26
Camioneta	611	242	217	340	355	27	204	296	493
C.R.	406	140	143	306	63	12	22	27	32
Micro	149	14	27	193	81	3	2	3	4
Ómnibus 2	32	14	12	31	32	12	4	6	7
Ómnibus +2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Camión 2 Ejes	86	68	64	58	40	20	36	42	43
Camión 3 Ejes	17	14	18	10	5	14	5	5	5
Camión 4 Ejes	0	2	0	2	0	0	0	0	0
Semitraylers	37	30	25	49	67	0	28	38	32
Traylers	0	0	0	110	73	0	0	0	0
<b>IMDa (Veh/día) 2009</b>	<b>1,477</b>	<b>555</b>	<b>520</b>	<b>1,145</b>	<b>722</b>	<b>90</b>	<b>305</b>	<b>430</b>	<b>642</b>
IMDa (Veh/día) 2008	1010	417	418	461	569	53		347	454
Tasa Prom. Crec. 2009/2008	46.20%	33.10%	24.40%	148.40%	26.90%	69.80%		23.90%	41.40%

Fuente: Estudio de tráfico 2009 – ICGSA

Para la proyección del tráfico de vehículos pesados se utilizará como criterio la tasa de crecimiento anual del PBI nacional (5,00%). Como el proyecto se encuentra ubicado en los departamentos de Lima y Junín las mismas que cuentan con las tasas de crecimiento anual de la población de 2.0% y 1.2% respectivamente, al promediar se obtiene 1.60%, que servirá para la proyección del tráfico de vehículos ligeros y del transporte público; para el cálculo del tráfico generado se ha considerado como un 20% del tráfico normal.

**Cuadro N° 1.04:** Tráfico por Tipo de vehículo para la estación E6

TRAMO	CLASIFICACIÓN VEHÍCULOS	LIGEROS		TRANSPORTE PÚBLICO			TRANSPORTE DE CARGA			TOTAL	
		AUTOS	CAMIONETAS	CAMIONETA RURAL	MICRO	OMNIBUS 2E	OMNIBUS +2E	CAMION 2E	CAMION 3E		ARTICULADOS
CAPILLUCA - DV. YAUYOS	IMD 2009 (*)	2	27	12	3	12	0	20	14	0	90
CAPILLUCA - DV. YAUYOS	IMD 2010 (**)	2	28	12	3	12	0	21	15	0	93

(\*) Fuente: Estudio de Trafico del Consorcio de Gestión de Carreteras del 2009

(\*\*) Fuente: Datos referenciales obtenidos de la elaboración del trabajo grupal.

Cabe señalar que durante el año, el tráfico de una carretera varía constantemente dependiendo del ciclo de actividades y de producción de la zona de influencia del proyecto. Así el tráfico será mayor en estaciones de cosechas y festividades que en otros periodos del año. Por lo que es importante ajustar los resultados por un factor de estacionalidad.

### 1.2.7 Sub-tramo en estudio Km. 116+000 – Km. 118+000

#### Descripción del tramo en estudio

**Nombre del tramo** : Carretera Cañete – Yauyos - Chupaca,  
Km. 116+000 - Km. 118+000.

**Longitud del tramo** : 2.00 Km.

**Inicio** : Km. 116+000 (2010 m.s.n.m)

**Final** : Km. 118+000 (2116 m.s.n.m)

## Descripción de Ingeniería del Tramo en Estudio

<b>Topografía</b>	: Accidentada.
<b>Geología</b>	: Meteorismo físico, Rocas primarias y secundarias.
<b>Hidrología</b>	: Demarcada por el Río Cañete que corre paralela a la carretera.
<b>Geodinámica</b>	: Huaycos, erosión de los taludes del río.

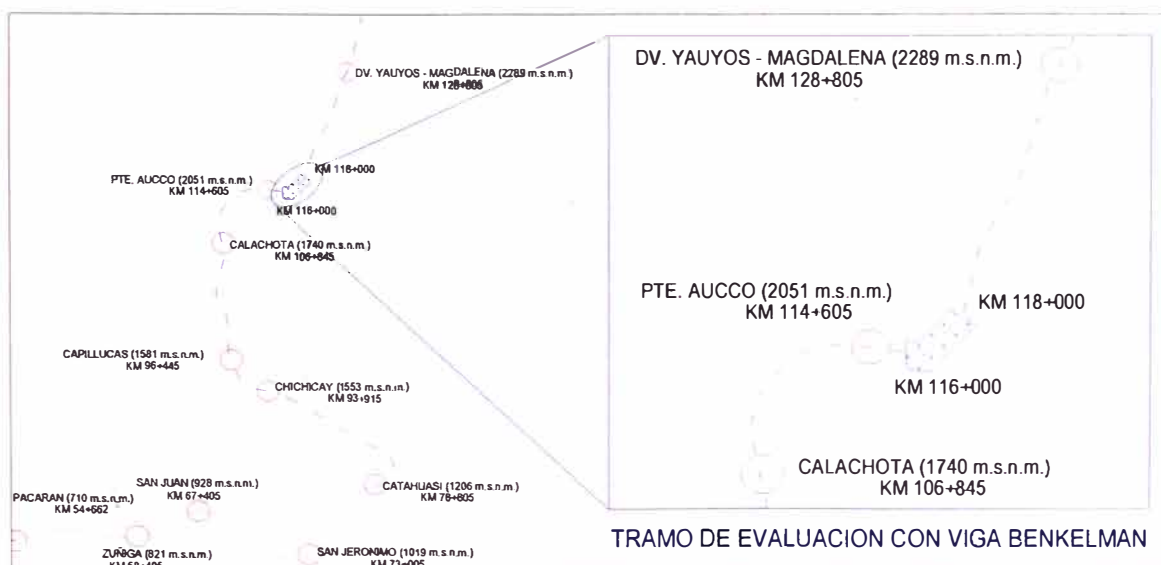
## Infraestructura Vial

- Carretera a media ladera con mejoramiento superficial.
- Anchos variables (3.00 – 4.20m).
- Tratamiento Superficial – Monocapa.
- Diseño geométrico no estandarizado.
- Drenaje superficial escaso – cunetas de tierra – alcantarillas de concreto.
- Moderada vegetación – áreas de cultivo en terrazas.
- Escasa protección de talud, considerando el recorrido del río Cañete.

## Características de Diseño

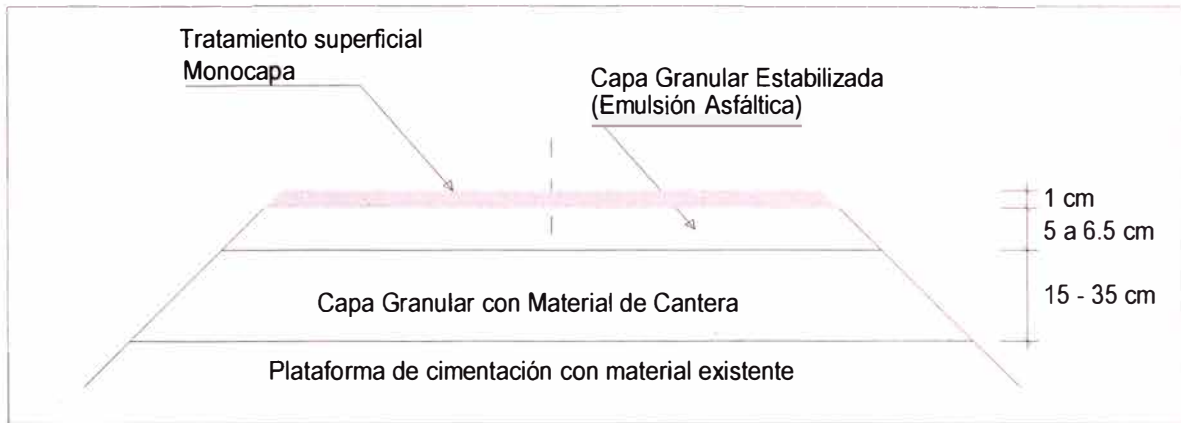
<b>Años de Servicio</b>	: Mas de 50 años
<b>CBR</b>	: 19 – 21
<b>Ejes Projectados</b>	: $W18 = 1.69 * 10^6$

**Figura N° 1.03:** Ubicación detallada del tramo en estudio



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 1.04:** Estructura del Pavimento en Estudio



Como se observa en la figura la estructura del pavimento consta de una subrasante, subbase granular, base granular y un tratamiento superficial tipo monocapa.

## CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE

### 2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS.

A fin de llevar las propiedades y características de los suelos hacia los sistemas de análisis matemáticos es necesario idealizar que tipo de comportamiento tendrá el suelo, a continuación se indica los principales sistemas de análisis.

#### 2.1.1 Sistemas elásticos de capas.

La teoría de capas elástica se desarrolla por la necesidad de predecir la respuesta estructural del pavimento a cargas exteriores. En este desarrollo Burmister asumió que cada capa es representada por un material homogéneo, isotrópico y linealmente elástico. Las capas son asumidas extensas infinitamente en la dirección horizontal y en la capa inferior se asume infinitamente extensa en profundidad. Las demás capas tendrán espesores pequeños.

#### 2.1.2 Sistemas no lineales de capas.

Es bien conocido que los materiales granulares y la subrasante de los suelos son no lineales, con un módulo de elasticidad que varía con los niveles de presión. El módulo que representa al módulo de elasticidad es el de resiliencia obtenido a partir de un ensayo triaxial.

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad (2.1)$$

Donde:  $K_1$  y  $K_2$  son constantes experimentales y  $\theta$  es el esfuerzo invariante.

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2.2)$$

#### 2.1.3 Sistemas lineales Viscoelásticos.

Ciertos materiales pueden presentar combinaciones de características sólidas como líquidas, incluso bajo presiones pequeñas. Si tal material es sometido a un esfuerzo constante, esto continúa la deformación lentamente con el tiempo.

Los sistemas viscoelásticos lineales han tenido amplio desarrollo en las últimas décadas. La temperatura, la humedad son usadas como variables aleatorias en el modelo. El sistema de pavimento generalmente es un sistema tricapa en el cual cada capa tiene propiedades que varían determinísticamente.

## 2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Son aquellos ensayos que se realizan sin la necesidad de realizar excavaciones (calicatas) en la vía, mediante el uso de equipos especializados en medir las deformaciones del terreno mediante las aplicaciones de cargas estáticas y/o dinámicas.

### 2.2.1 Viga Benkelman.

La viga Benkelman es un instrumento manual que consta de de 02 brazos, uno que va en contacto con el terreno y el otro que sirve de pivote donde se realizan las mediciones producidas por la carga estática normalizada (8200 Kg.). Este equipo se verá con más detalle en el capítulo 3.1.

**Figura N° 2.05:** Viga Benkelman



*Fuente: Curso de titulación*

### 2.2.2 Dynaflec.

Es un sistema acoplado, montado y puede ser remolcado por un vehículo estándar. Cuenta con un peso estático de 2000 a 2100 libras (8.9 kN a 9.3 kN) se aplica al pavimento con un par de ruedas de acero rígidas. Un generador dinámico se utiliza para producir una fuerza de hasta 4.45-kN. Para más detalle revisar (HUANG, Yang H. "Pavement analysis and design")



**Figura N° 2.06:** Equipo Dynaflect



Fuente: <http://training.ce.washington.edu>

### 2.2.3 Road Rater.

Existen varios modelos; los que varían sobre todo en la magnitud de las cargas, con las cargas estáticas y dinámicas; emplea cuatro sensores para medir la deflexión base; el dispositivo se mueve a la localización de la prueba, donde se coloca la placa de carga y los sensores de deflexión se colocan sobre el pavimento. Después de termina la prueba, la placa y los sensores se levantan de la superficie, y el dispositivo está listo para moverse al siguiente punto de prueba.

**Figura N° 2.07:** Equipo Road Rater



Fuente: <http://training.ce.washington.edu>

#### 2.2.4 RDD.

El deflectómetro dinámico de balanceo (RDD) es relativamente una nueva herramienta para determinar las condiciones del pavimento. Su principal característica es que trabaja con perfiles continuos de deflexiones

**Figura N° 2.08:** Deflectómetro dinámico de Balanceo



Fuente: <http://training.ce.washington.edu>

#### 2.2.5 FWD.

El FWD empleado frecuentemente en los Estados Unidos es el sistema Dynatest modelo 8000. La fuerza de impulso es creada cayendo un peso. Este aparato mide las deflexiones del pavimento producidos por una carga senoidal, que impacta al mismo en una placa de carga, esta última posee 07 transductores de medida.

**Figura N° 2.09:** Equipo FWD



Fuente: <http://training.ce.washington.edu>

### 2.2.6 KUAB – FWD.

La fuerza de impulso es producida por dos pesos soltados de diferentes alturas. El sistema de pesos se emplean para generar una subida gradual de un pulso de fuerza sobre el pavimento, para detectar la rigidez adecuada de la subrasante.

**Figura N° 2.10:** Equipo KUAB-FWD



Fuente: <http://training.ce.washington.edu>

## CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO

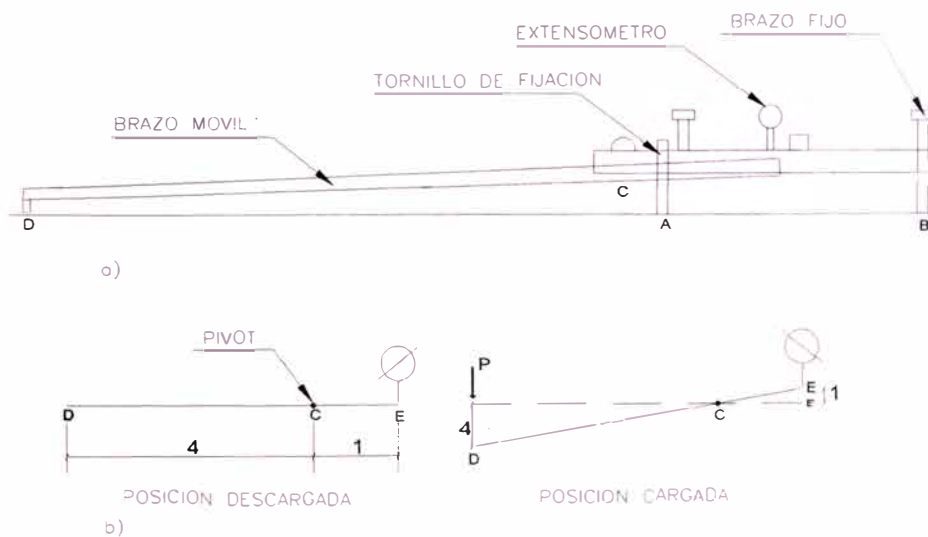
Para obtener las propiedades de la carpeta de rodadura se mide las deflexiones con la Viga Benkelman, luego se emplea un método teórico para estimar los módulos de Young de la subrasante y la carpeta de rodadura, a continuación se describe el proceso de medición de las deflexiones, caracterización del material y metodología para estimar los parámetros anteriormente mencionados.

### 3.1 VIGA BENKELMAN

El deflectógrafo Benkelman funciona mediante el principio de palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura N°11 A su vez la viga consta principalmente de dos partes. Un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

Para la toma de medidas de las deflexiones se debe tener presente que el extremo del brazo móvil (D), es el que varía producto de la carga del vehículo, esta variación conlleva al movimiento del extensómetro.

**Figura N° 3.11:** Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman



### 3.1.1 Metodología de medición de deflexiones con Viga Benkelman.

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg.

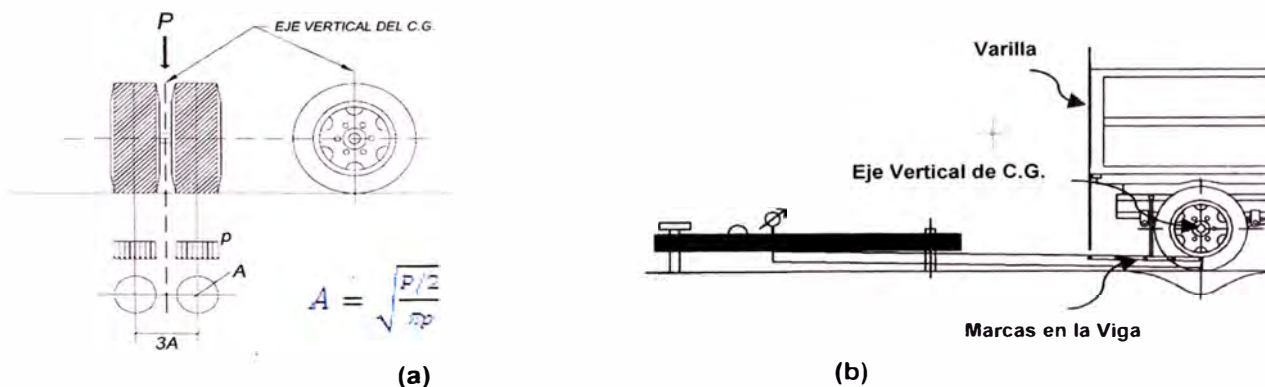
Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida.

Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura N°11 (a), punto "D").

Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado.

Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura N°11 (b)), se hace coincidir (las marcas de la viga con la varilla). Para medir las deflexiones del pavimento.

**Figura N° 3.12:** Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.



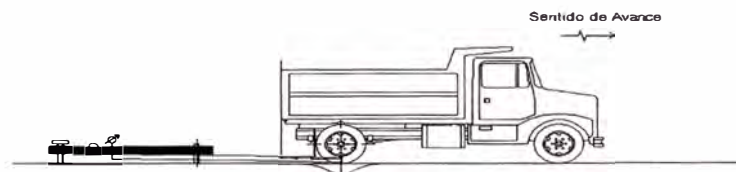
Fuente: Pablo del Águila

Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable si se desea tener una idea gráfica del tipo de curva de deflexión que se produce.

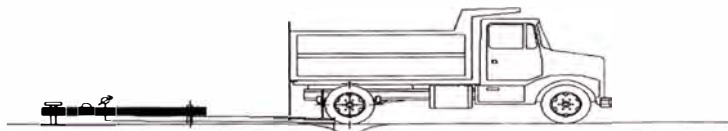
Como norma se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima. La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional. Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial (ver figura N° 13 (a)), se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas (figuras N° 13 (b), (c)), cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo de manera que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5.00 m.), se efectuará una lectura más (ver figura N° 13 (d)).

**Figura N° 3.13:** Esquematación del proceso de medición de la Viga Benkelman

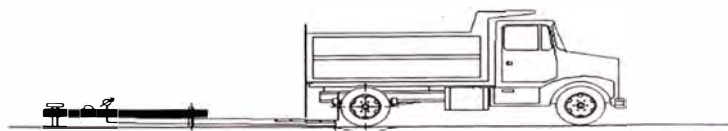
a) Posición Inicial ( $D_{\phi}$ =Deflexión Inicial)



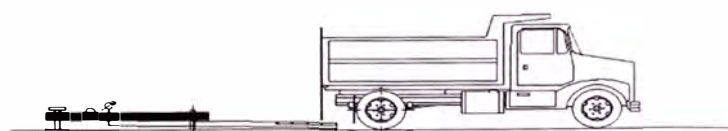
b) Posición a 25cm ( $D_{25}$ ).



c) Posición a 50cm ( $D_{50}$ ).



d) Posición a 100cm ( $D_{100}$ ).



Fuente: Pablo del Águila

Para la realización de esta rutina será necesario del concurso de tres operadores:

Un técnico calificado que lea y dicte las lecturas, un operador que anote las mediciones y un ayudante que coordine con el conductor del camión y a la vez de aviso al técnico que realiza las lecturas.

### 3.1.2. Equipo requerido.

El equipo mínimo para la realización de ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- a) Deflectómetro Viga Benkelman, con relación de brazos 1:4
- b) Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm
- c) Camión cargado, cuyo eje tenga un peso de 8.2 Tn. y un par de llantas dobles infladas a una presión de 80 psi.
- d) Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo (camioneta).
- e) Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- f) Accesorios de medición como: Cinta métrica de 3 m, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre N° 16 para amarre.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Para la caracterización del material se emplea diversos modelos que se definen en los siguientes párrafos.

### 3.2.1 Definiciones previas.

#### a) Módulo resiliente ( $M_r$ )

Es el módulo elástico a ser utilizado con la teoría de la elasticidad.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.1)$$

Donde:

$\sigma_d$ : Es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en un ensayo no confinado.

$\varepsilon_r$ : Deformada Recuperable

b) Ratio de Poisson ( $\mu$ )

Dado un cuerpo elástico sometido a un esfuerzo longitudinal, es la relación que existe entre la deformación lateral y la correspondiente deformación longitudinal.

c) Módulo de elasticidad (E)

Se le designa por  $E$ , está asociado directamente con los cambios de longitud que experimenta el pavimento. Cuando está sometido a la acción de esfuerzos de tracción o de compresión.

d) Peso unitario ( $\gamma$ )

Es el peso por unidad de volumen

e) Relación de soporte de California (CBR)

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (psi) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (psi) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

f) Coeficiente de expansión térmica

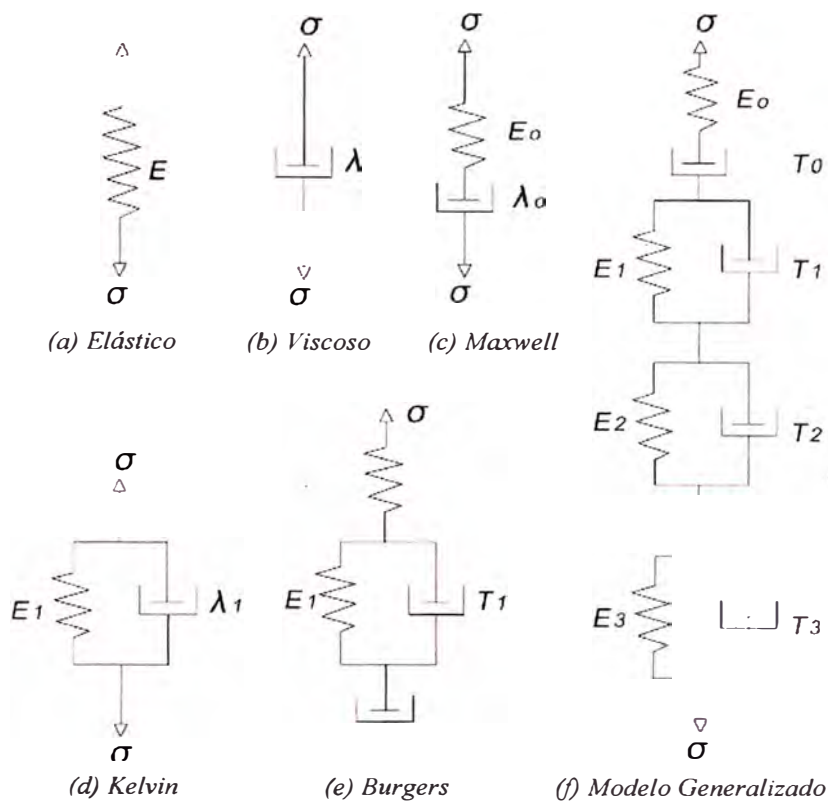
Cambio en las dimensiones de un material por grado de temperatura. También llamado dilatabilidad.

### 3.2.2 Modelos Matemáticos.

Se cuenta con varios modelos mecánicos para caracterizar al material. Los modelos mecánicos se forman de dos elementos básicos un resorte y un amortiguador hidráulico, como se muestra a continuación:



**Figura N° 3.14: Modelos matemáticos.**



**a) Modelo Básico.**

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en la figura N° 14 (a), y obedece la ley de Hooke, y la tensión es proporcional a la deformación:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.2)$$

Un material viscoso es representado por un amortiguador hidráulico, según lo indicado en la figura N° 14 (b), y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo:

$$\sigma = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.3)$$

**b) Modelo de Maxwell.**

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la Figura N° 14 (c)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{E_0} \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (3.4)$$

c) Modelo de Kelvin.

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la figura N° 14 (d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usa el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin,

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.5)$$

d) Modelo de Burgers.

Un modelo de Burgers es una combinación del modelo del Maxwell y de Kelvin, según lo indicado en la figura N° 14 (e).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{T_1} \right) \right] \quad (3.6)$$

e) Modelo Generalizado.

La figura N° 14 (f) muestra un modelo generalizado que se pueda utilizar para caracterizar cualquier material viscoelástico.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left( 1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{t}{T_i} \right) \right] \quad (3.7)$$

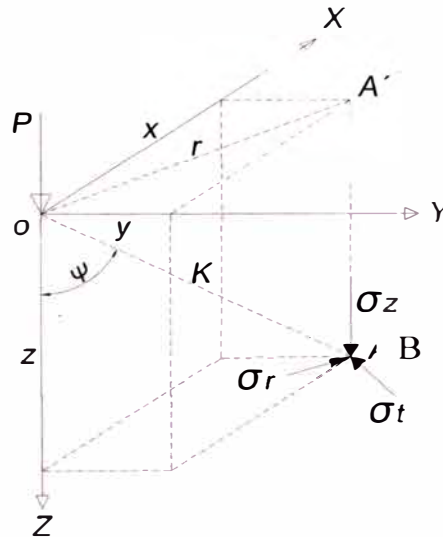
### 3.3 MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.

#### 3.3.1 Modelo de Boussinesq.

Con el modelo de Boussinesq se puede determinar el desplazamiento o deflexión de un punto debido a cargas distribuidas verticales sobre el pavimento, generadas por dos llantas cuya área de contacto son dos circunferencias de radio "A".

En el problema de Boussinesq se plantea las siguientes expresiones para la determinación de los esfuerzos.

**Figura N° 3.15:** Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada.



Los esfuerzos en el punto "B" pueden escribirse:

Esfuerzo vertical:

$$\sigma_z = \frac{3P \cos^5 \Psi}{2\pi z^2} \quad (3.8)$$

Esfuerzo radial:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi z^2} \left[ 3 + \cos^2 \Psi \sin^2 \Psi - (1 - 2\mu) \frac{\cos^2 \Psi}{1 + \cos \Psi} \right] \quad (3.9)$$

Esfuerzo tangencial:

$$\sigma_t = -\frac{(1 - 2\mu)P}{2\pi z^2} \left[ \cos^3 \Psi - \frac{\cos^2 \Psi}{1 + \cos \Psi} \right] \quad (3.10)$$

### 3.3.2 Modelo de Hogg.

Este modelo caracteriza al pavimento con dos capas, La calzada que es una placa de espesor delgado con rigidez a la flexión y una subrasante representada por un medio elástico, lineal, homogéneo e isotrópico.

Dado que es difícil de obtener la solución de las ecuaciones de elasticidad, los problemas de flexión adoptan ciertas hipótesis simplificadas (hipótesis de Navier sobre capas delgadas), lo que lleva a suponer lo siguiente de la calzada.

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

La ecuación que resuelve Hoog es:

$$D\nabla^2\varpi = p \quad (3.11)$$

Donde 
$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (3.12)$$

D = Rigidez de la placa.

$\varpi$  = Desplazamiento vertical de la fibra neutra.

$p$  = suma de presiones verticales  $p = \sigma_z - q_0$  o  $p = \sigma_z$  en el exterior del círculo.

$E_1$  = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

$\mu$  = Ratio de Poisson.

$$\nabla^2 = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \quad (3.13)$$

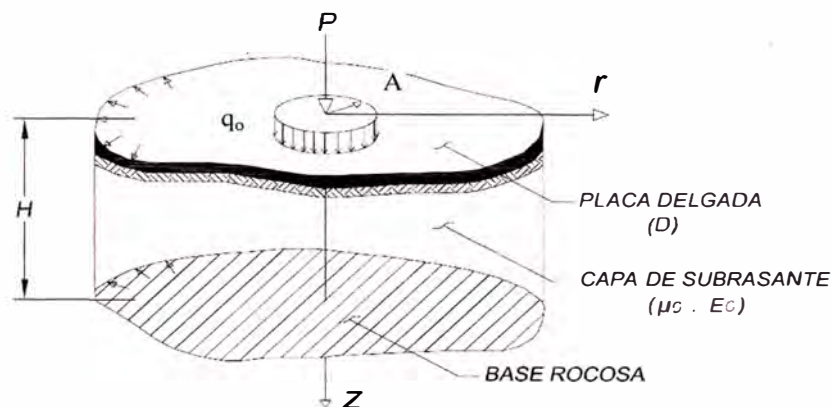
Reemplazando (3.13) en (3.11), resulta:

$$\Delta(0,r) = \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)p \cdot A}{2(1 - \mu_0)E_0} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \times J_1\left(\frac{mA}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mH}{L_0}\right)} dm \quad (3.14)$$

Donde:

$$\phi(m) = \frac{\text{Senh}(m) \cdot \text{Cosh}(m) + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{\text{Senh}^2(m) - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}} \quad (3.15)$$

Figura N° 3.16: Modelo de Hogg.



### 3.3.3 Modelo de Westergaard.

Partiendo del principio de la hipótesis de un masivo de Boussinesq para el soporte de la vía, se obtiene una hipótesis simplificadora. Westergaard aporta otra variable que facilita los cálculos: el suelo soporte se asimila a una serie de resortes, para los cuales el desplazamiento vertical “ $\varpi$ ” es proporcional a la presión vertical “ $\delta$ ” en ese punto.

$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (3.16)$$

D = Rigidez de la placa.

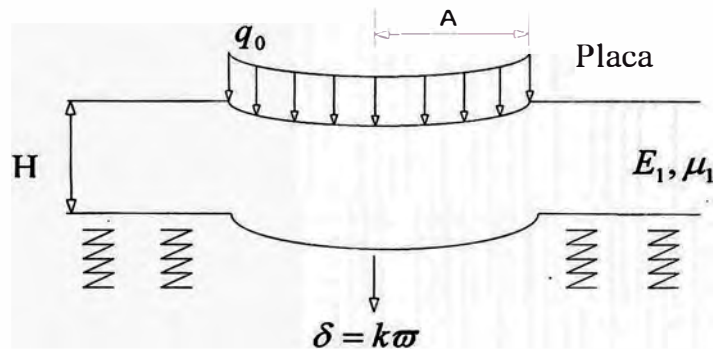
$\varpi$  = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

$E_1$  = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

$\mu$  = Ratio de Poisson.

**Figura N° 3.17:** Modelo de Westergaard.



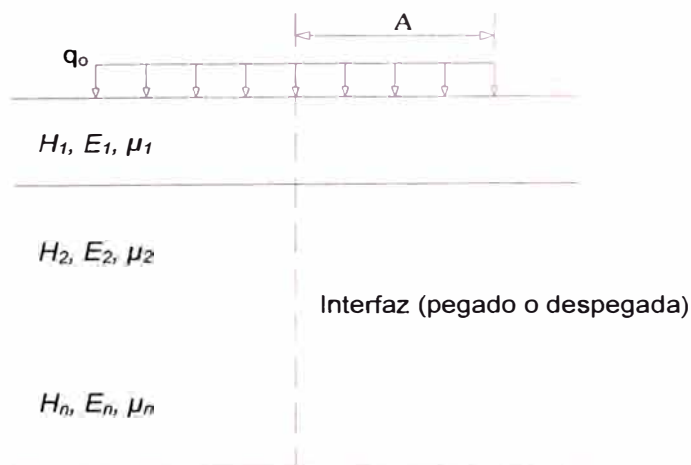
**3.3.4 Modelos bicapas.**

El comportamiento del suelo no es homogéneo, en el caso de los pavimentos es difícil caracterizar la transmisión de esfuerzos del pavimento a la subrasante, por lo que es necesario incluir una capa que representa esta transmisión.

**3.3.5 Modelos multicapas (Burmister, 1943).**

Estos modelos permiten determinar las grandes tendencias de variación (importancia del espesor, relación del modulo entre capas, radio de carga). Los modelos de  $n$  capas facilitan la esquematización de la estructura del pavimento y la subrasante. Una estructura tradicional se representa mejor mediante un esquema tricapa (suelo, cuerpo granular y capa asfáltica).

**Figura N° 3.18:** Modelo multicapas.

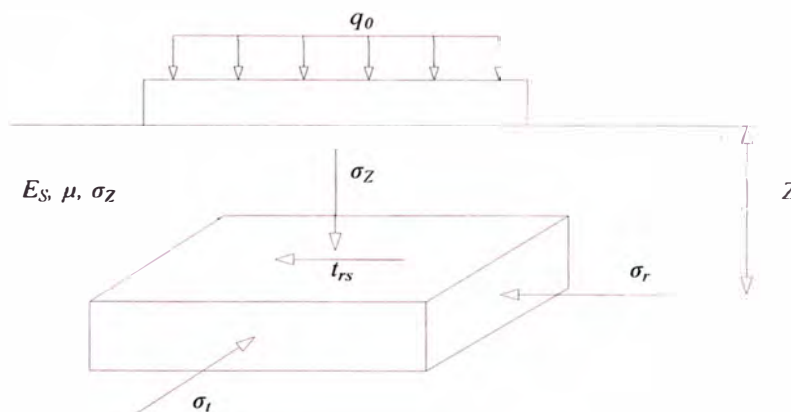


### 3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS.

#### 3.4.1 Fórmulas de Boussinesq.

El masivo semi infinito de Boussinesq se supone lineal, isotrópico, elástico, con modulo de Young  $E_s$  y coeficiente de poisson  $\mu$ .

**Figura N° 3.19:** Representación de un masivo semi infinito.



#### Para ejes gemelos

La formula de Boussinesq para hallar el desplazamiento de un punto en el suelo provocado por una carga puntual, es posible deducir la ecuación para hallar el desplazamiento total producido por la distribución de las cargas de las dos llantas.

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[ 2(1 - \mu) + \left( \frac{Z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (3.17)$$

#### 3.4.2 Fórmula de Westergaard.

La carga  $P$  se aplica sobre un área elíptica.

La calzada es una placa homogénea, isotropita y elástica con modulo de young  $E$  y coeficiente de Poisson  $\mu$ , su espesor  $H$  es constante.

El suelo está en contacto con la placa constantemente y se caracteriza por el módulo de reacción  $k$ .

Una manera de encontrar la rigidez del pavimento es con la siguiente ecuación:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{EH^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (3.18)$$

Donde:

$k$  : Módulo de reacción

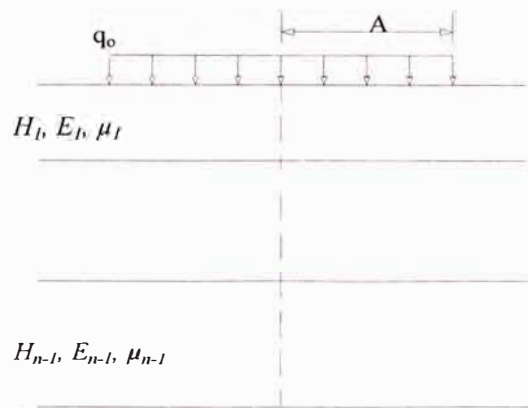
$p$  : Peso total de la carga.

### 3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber generalizada.

La carga sobre la calzada se esquematiza por una presión unitaria  $q_0$ , aplicada sobre un área circular de radio  $A$ .

La calzada está compuesta por  $n-1$  capas horizontales de espesor  $H_i$ , de módulo de Young  $E_i$  y de coeficiente de Poisson  $\mu_i$ , igual a:

**Figura N° 3.20:** Multicapa propuesto con la formula de palmer y baber generalizada.



$$\bar{E} = E_1 \left[ \frac{H_1 + H_2^3 \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} + H_3^3 \sqrt{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + H_{n-1}^3 \sqrt{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} H_i} \right]^3 \quad (3.19)$$

La ecuación 3.19 será necesaria para relacionar los módulos de elasticidad en la aplicación del modulo de Boussinesq.

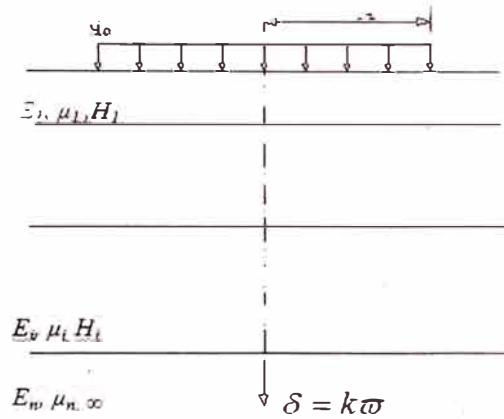
### 3.4.4 Fórmula de Odemark.

La carga sobre la calzada se esquematiza por una presión uniforme  $q_0$  aplicada sobre un área circular de radio  $A$ . La calzada está compuesta por  $n-1$  capas horizontales, de espesor  $H_i$ , módulo de Young  $E_i$  y de coeficiente de Poisson



$\mu_i$ , la caracterización es la base en un masivo semi infinito de características mecánicas  $\bar{E}_n$  y  $\mu_i$ .

**Figura N° 3.21:** Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark

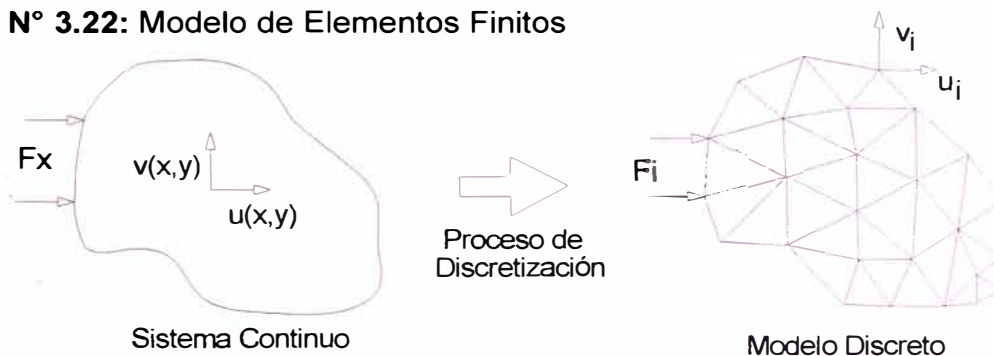


$$H_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} H_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.20)$$

### 3.4.5 Modelo de elementos finitos.

Este modelo resuelve las ecuaciones constitutivas y de compatibilidad mediante la división del medio continuo en un conjunto de subdominios denominados elementos finitos, en este método se cumple principalmente las condiciones de frontera en los nodos del sistema que se resuelve. Los modelos en 3D representan mejores resultados que los modelos en 2D puesto que identifican mejor los efectos de las cargas sobre el pavimento, pero lo desfavorable es que ocupan más memoria en un ordenador personal. Los puntos interiores a los elementos se aproximan con funciones de interpolación. En el caso de pavimentos existen programas MICHIPAVE y EVERSTRESS FE que ayudan a resolver este problema.

**Figura N° 3.22:** Modelo de Elementos Finitos



## CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO KM 116+000 – KM 118+000

### 4.1. APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

El trabajo de campo se realizó el día sábado 22 de Mayo del 2010, se tomó la lectura en 10 estaciones, debidamente marcados para su fácil ubicación.

Para la toma de datos se organizó al personal en diversas tareas (jaloneros, medidores de temperatura, medidores de ahuellamiento, veedores de lectura de extensómetro, entre otros), y se empleó los siguientes equipos y herramientas menores: Volquete (carga según la norma estándar), termómetro, comba, jalones, banderolas, Viga Benkelman, regla de aluminio, wincha.

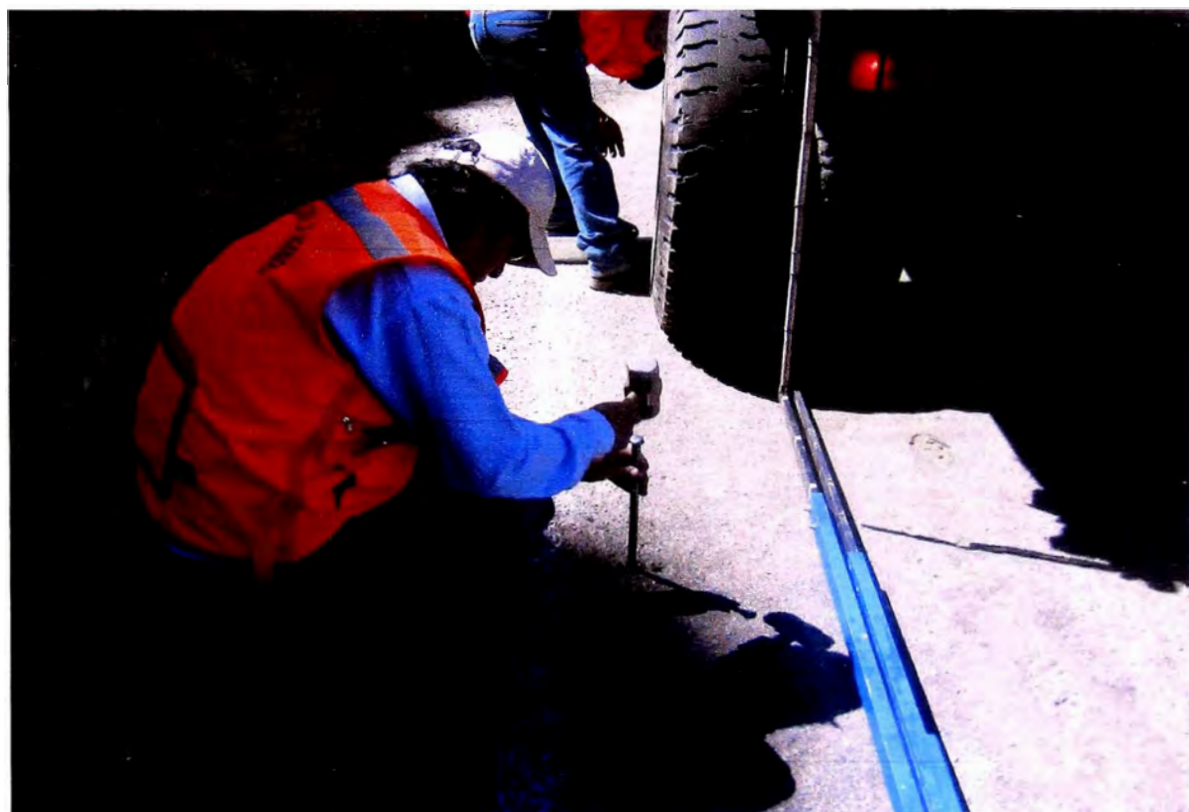
**Figura N° 4.23:** Toma de datos con viga Benkelman progresiva Km. 116+600.



**Figura N° 4.24:** Medida del ahuellamiento.



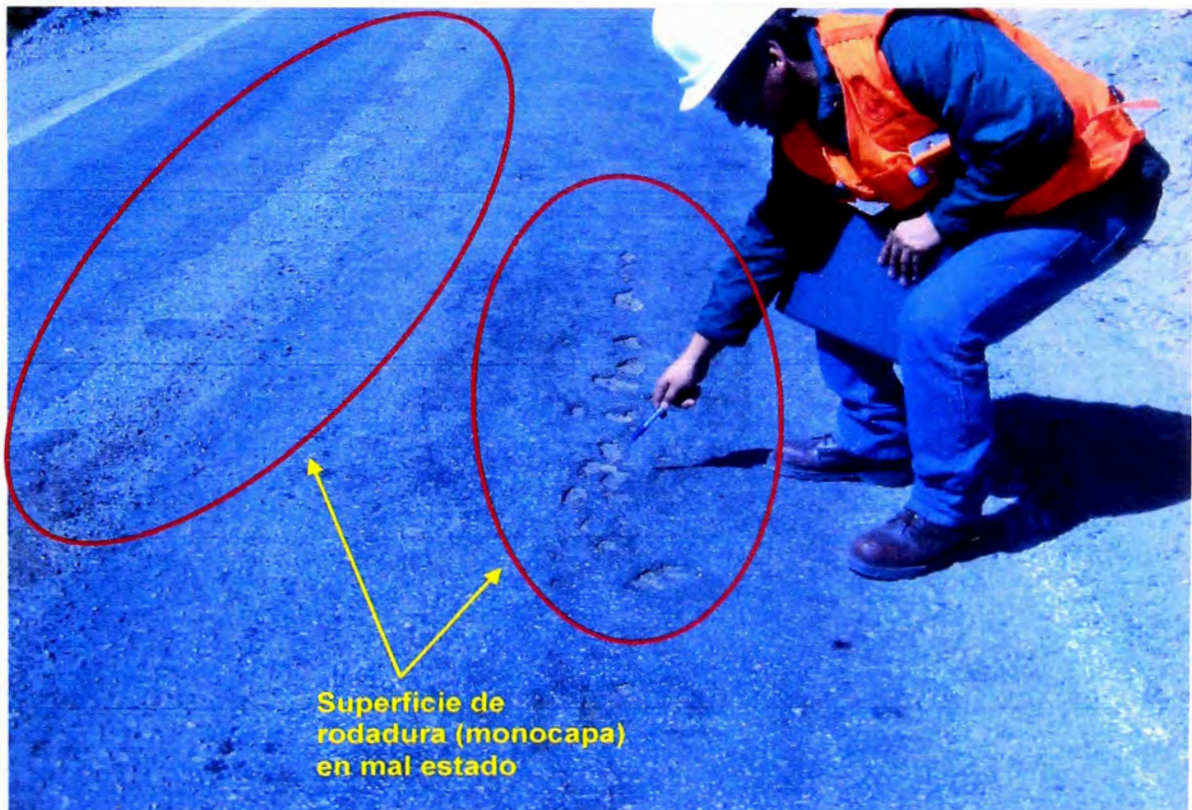
**Figura N° 4.25:** Medida del espesor de la superficie de rodadura (monocapa).



**Figura N° 4.26:** Estado de la superficie de rodadura (monocapa).



Figura N° 4.27: Estado de la superficie de rodadura (monocapa).



Fuente: Grupo 04 -Sección B, Curso Titulación, 2010

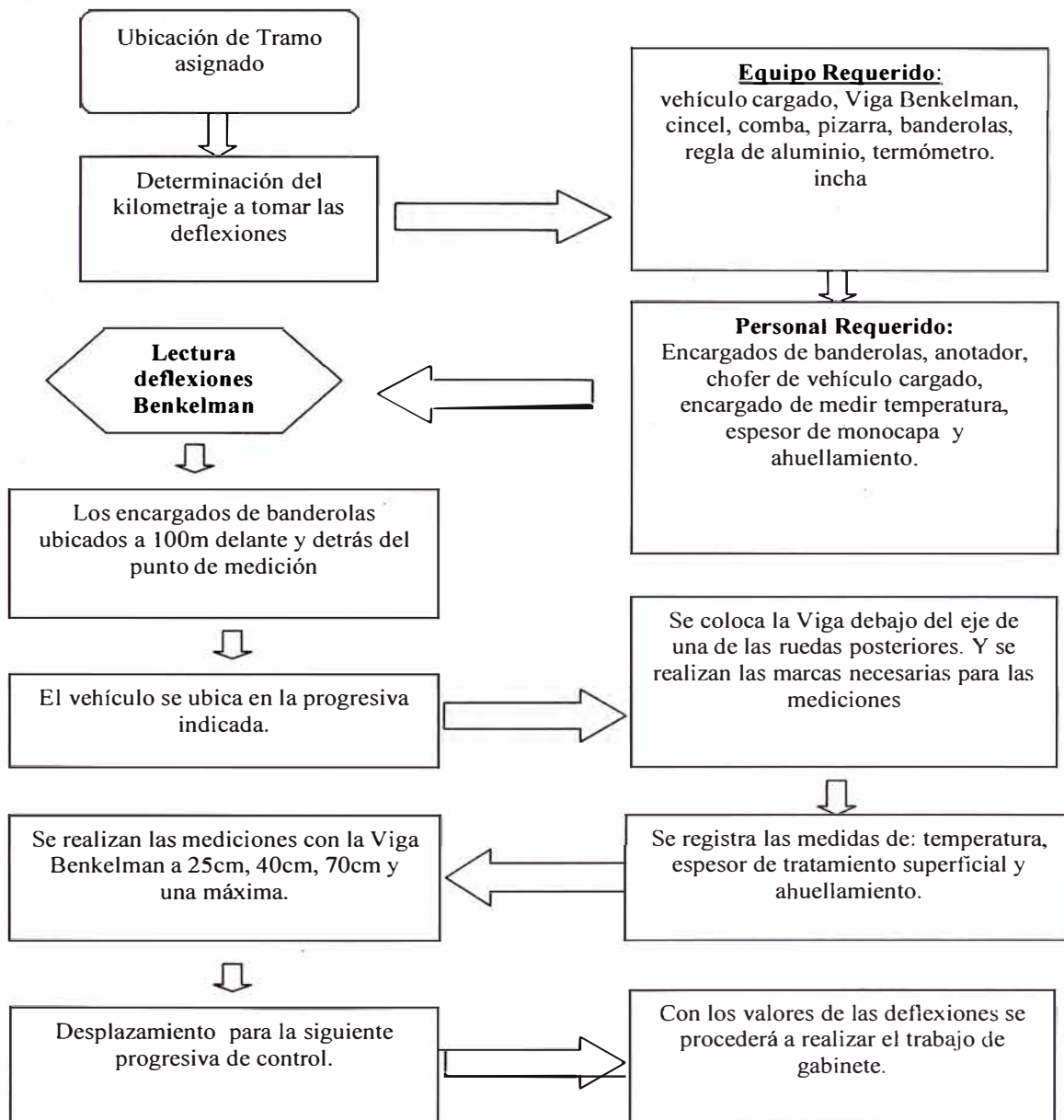
Se observa en las figuras 26 y 27, el mal estado de la superficie de rodadura.

**Cuadro N° 4.05:** Datos tomados en campo.

N°	Progresiva (km)	Lecturas de campo (10 <sup>-2</sup> mm)				Espesor (mm)	Ahuellamiento (mm)	Temperatura (°C)
		L <sub>25</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>70</sub>	L <sub>máx.</sub>			
1	116+000	5	7	9	14	15	3	45
2	116+200	4	11	13	20	10	4	46
3	116+400	2	3	5	14	5	3	46
4	116+600	5	7	9	24	15	2	46
5	116+800	3	11	16	23	10	4	47
6	117+000	4	7	9	14	15	2	46
7	117+200	1	3	6	12	10	3	47
8	117+400	2	4	5	14	15	3	48
9	117+600	5	18	21	30	16	30	47
10	117+800	3	6	9	21	16	3	48

Fuente: Grupo 04 -Sección B, Curso Titulación, 2010

### Diagrama de flujo para la obtención de las deflexiones del pavimento con la Viga Benkelman.



#### 4.2 Aplicación con el Modelo de HOGG

Para la aplicación del modelo de Hogg se ha generado un cuadro desarrollado en EXCEL.

Se realizó la evaluación del pavimento cada 200m., desde el Km. 116+000 al Km. 117+800, del tramo en estudio.

**Cuadro N° 4.06:** Procesamiento de datos mediante el modelo de Hogg

Progresiva	D <sub>máx</sub> (10 <sup>-2</sup> mm)	DR (cm)	R (cm)	Lo (cm)	R5 (cm)	So/S	Hogg		CBR (%)
							Eo kg/cm <sup>2</sup>	psi	
116+000	54	0.27	50.0	27.2	50.0	0.86	659	9357	6.2
116+200	78	0.35	50.0	23.9	44.8	0.83	503	7148	4.8
116+400	55	0.36	70.0	56.4	96.6	0.96	346	4914	3.3
116+600	92	0.58	70.0	53.9	92.6	0.95	216	3062	2.0
116+800	90	0.47	50.0	28.8	52.4	0.87	380	5399	3.6
117+000	54	0.27	50.0	27.2	50.0	0.86	660	9371	6.2
117+200	47	0.23	70.0	39.8	70.0	0.92	557	7908	5.3
117+400	54	0.35	70.0	56.4	96.6	0.96	356	5054	3.4
117+600	115	0.46	50.0	21.2	40.5	0.81	372	5285	3.5
117+800	80	0.46	70.0	47.2	82.0	0.94	279	3957	2.6

Mínimos 46.74 0.23 50.00 21.21 40.55 0.81 216 3,062 2.04

Máximos 115.03 0.58 70.00 56.37 96.60 0.96 660 9,371 6.25

Fuente: Elaboración propia

CBR (promedio)=4.1%

**Cuadro N° 4.07:** Rango de valores del CBR

S0:	SUBRASANTE MUY POBRE	CBR < 3%
S1:	SUBRASANTE POBRE	CBR = 3%-5%
S2:	SUBRASANTE REGULAR	CBR = 6%-10%
S3:	SUBRASANTE BUENA	CBR = 11%-19%
S4:	SUBRASANTE MUY BUENA	CBR > 20%

Fuente: Manual para el Diseño de caminos no pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito del MTC.

### Determinación del Radio de Curvatura

El radio de curvatura queda definido por la siguiente relación:

$$R = \frac{10 \cdot (25^2)}{2(D_0 - D_{25})} = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$$

Donde:

R = Radio de Curvatura en metros

D<sub>0</sub> = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros.

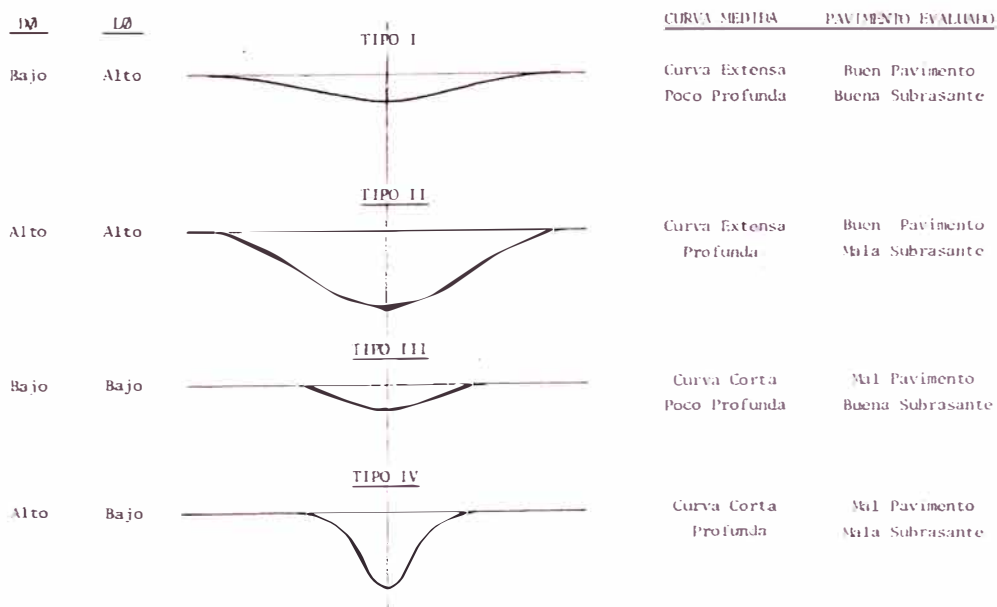
D25 = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros, A 25 del eje de carga.

**Cuadro N° 4.08:** Deflexiones corregidas

Progresiva	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				Radio Curvatura
	Deflexiones Corregidas (10-2mm)				
	0	25	50	70	
116+000	53.98	34.70	0.27	0.19	162.1
116+200	77.97	62.38	0.35	0.27	200.4
116+400	55.28	47.38	0.43	0.36	395.7
116+600	92.40	73.15	0.65	0.58	162.3
116+800	89.58	77.90	0.47	0.27	267.4
117+000	53.90	38.50	0.27	0.19	202.9
117+200	46.74	42.84	0.35	0.23	802.3
117+400	53.74	46.07	0.38	0.35	407.0
117+600	115.03	95.86	0.46	0.35	163.0
117+800	80.40	68.91	0.57	0.46	272.1

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 4.28:** 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) por Ing. Mario Hoffman e Ing. Pablo del Águila.



## Resumen estadístico de deflexiones

Los estudios de Deflexiones recuperables han demostrado que las deflexiones medidas en una sección de pavimento, presentan una distribución de frecuencias que se asemejan a una distribución normal. Por lo tanto, a partir de las deflexiones individuales, asumiendo que se hallan distribuidas de acuerdo a la ley de Gauss se han determinado la Deflexión media (D), la desviación estándar ( $\sigma$ ), y el coeficiente de variación (Cv).

Para efectos de diseños de refuerzos asfálticos se emplea el concepto de Deflexión Característica, que representa mejor a una sección de comportamiento Estructural Homogéneo; siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se puede establecer como Deflexión característica el valor:

$$D_c = D + 1.645 * \sigma$$

En la presente evaluación se ha adoptado como Deflexión característica a aquella que corresponde al 95 %, es decir la que es superada solo por el 5 % de las determinaciones.

El concepto de deflexión admisible, se encuentra íntimamente relacionada al Número de Ejes Standard Equivalentes Acumulados de 8.2 Tn. La fórmula ampliamente difundida por el CONREVIAl (Consortio de Rehabilitación Vial), es la que se muestra a continuación:

$$D = (1.15 / N)^{1/4}$$

Donde:

- D** Deflexión Admisible y
- N** Número de Ejes Standard Equivalentes Acumulados de 8.2 Tn

**Cuadro N° 4.09:** Deflexión admisible vs tiempo

n (años)	EAL	N18 (en millones)	D (10 <sup>-2</sup> mm)
1	7.72E+04	0.039	233.7
2	1.57E+05	0.079	195.5
3	2.41E+05	0.12	175.8

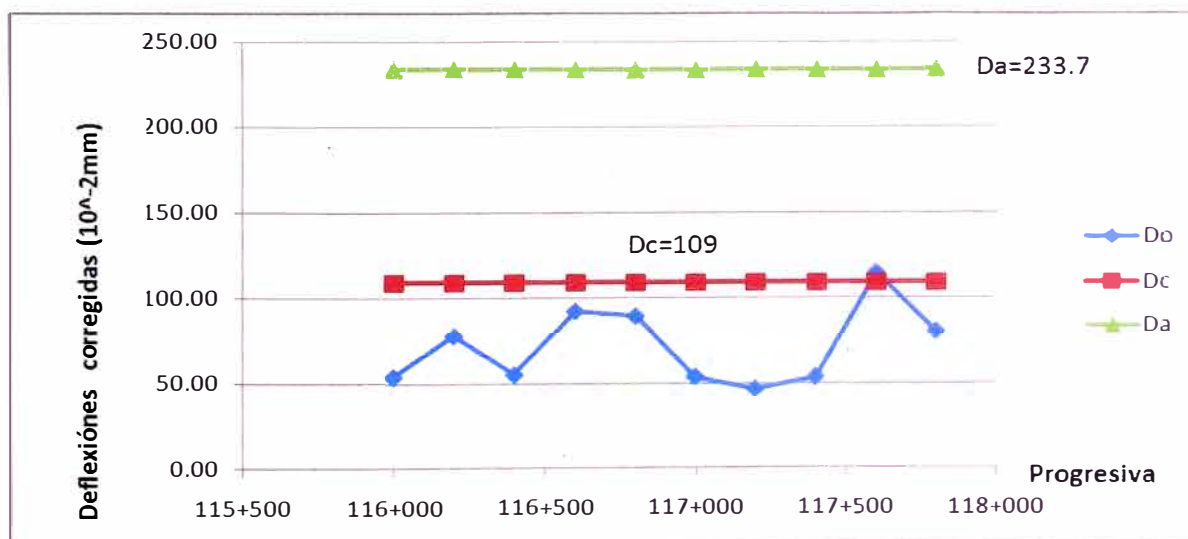
Fuente: Elaboración propia

**Cuadro N° 4.10:** Resumen estadístico

RESUMEN ESTADISTICO	DEFLEXIONES	
PROMEDIO	71.90	x 10 <sup>-2</sup> mm.
DESV. STANDARD	22.57	
COEF. VARIACION	0.31	
Deflexión Característica	109.04	x 10 <sup>-2</sup> mm.
<b>Admisible (CONREVIAL)</b>	<b>233.70</b>	x 10 <sup>-2</sup> mm.

Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 4.29:** Deflectograma



Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- Para el tramo evaluado; Km. 116+000 – Km. 118+000 el CBR varía entre 2.04% y 6.25%, y el CBR promedio es de 4.1%, de acuerdo al MTC corresponde a una subrasante pobre.
- El valor de la deflexión admisible es mayor que la deflexión característica.
- Del análisis del deflectograma (figura 29), se ha obtenido que,  $D_c < D_a$  por lo que se establece que en la actualidad este tramo tiene un buen comportamiento estructural.

## CONCLUSIONES

- 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, dependen solamente de la longitud elástica  $L_0$ , lo que constituye una ventaja toda vez que en la gran mayoría de los pavimentos que son evaluados, ó se desconoce el espesor o es difícil controlar su variación.
- El CBR promedio es 4.1% para el tramo evaluado, esto indica que el pavimento necesita ser mejorado puesto que tiene una subrasante pobre.
- El tramo en estudio km. 116+000 al km. 118+000, se ha obtenido que,  $D_c < D_a$  para los próximos tres años, concluyendo que en la actualidad este tramo tiene un buen comportamiento estructural.
- Según la metodología de los Ingenieros Mario Hoffman y Pablo del Águila sobre el significado cualitativo de las curvas de deflexiones, para el tramo en estudio se concluye que se trata de un mal pavimento sobre una buena subrasante; según la relación  $D_o(\text{bajo})$  y  $L_o(\text{bajo})$  y la curva medida (curva corta poco profunda).
- La ejecución de éste método ha demostrado que es posible llevar un adecuado control en la evaluación de carreteras, teniendo en consideración la realidad de nuestros recursos económicos y técnicos.
- Según el Manual para el Diseño de caminos no pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito del MTC, el tramo en estudio presenta un CBR de 4.1% por lo cual se le clasificaría como un tramo con subrasante pobre del tipo S1.

- En el tramo evaluado se obtuvo un IRI promedio de 3.50m/km. y un IRI característico de 3.90m/km para el cual PSI=2.45 (con monocapa) lo que indica que el tramo evaluado tiene una Transitabilidad Regular.

## RECOMENDACIONES

- Incluir en los términos de referencia la evaluación del pavimento, mediante deflectómetros, debido a que independientemente de las mejoras que se puedan realizar en la superficie de rodadura, subsiste el problema que bajo el esquema de contratación actual de la carretera (ítem 2.1 en la parte de objetivos de los términos de referencia), sólo exige la mejora a nivel superficial siempre y cuando tenga una plataforma de rodadura con un IRI(promedio) igual o menor a 2.5.
- Disponer de estudios de tráfico actualizados, ya que una sobreestimación del IMD genera deflexiones admisibles equivocados y por ende juicios errados.
- Realizar anualmente una evaluación estructural al pavimento para las carreteras de bajo volumen de tránsito, debido a que el IMD podría variar notoriamente, de este modo se identificaría si es necesaria una rehabilitación ó reforzamiento, que en el caso de ser postergada podría requerir soluciones más costosas.
- Realizar la evaluación del pavimento con “Viga Benkelman”, en épocas en que se produzcan condiciones desfavorables como en épocas de lluvias (enero a marzo), en tramos afectados por aguas de riego, quebradas o infiltraciones de alcantarillas y establecer las comparaciones de los resultados obtenidos entre ellos
- Realizar las mediciones de deflexión con Viga Benkelman en tramos cada 100 metros en carril derecho y en el carril izquierdo cada 100 metros, pero en forma alternada de esta manera se estaría evaluando tramos cada 50 metros evitando posibles sectores no evaluados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. DASHKÓ R.E., A.A. KAGÁN “Mecánica de Suelos en la Práctica de la Geología Aplicada a la Ingeniería”, MIR. RUSIA 1980.
2. HAZZARD, JAMES F., YACOUB TRAMER E. “Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study”, University of Toronto, Canada, 2007.
3. HOFFMAN, MARIO S. - LOUIS BERGER INTERNACIONAL INC., PABLO M. DEL AGUILA,. LAGESA INGENIEROS CONSULTORES. “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en La Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos)” Octubre, 1985.
4. HUANG, YANG H. “Pavement Analysis and Design”, Prentice Hall. United States of America, 1993.
5. REYES, FREDY L. “Diseño de Pavimentos por Métodos Racionales”. Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá, 1999.
6. TIMOSHENKO S., WOINOWOSKY-KRIEGER S. “Teoría de Placas y Láminas”, URMO SA, España, 1975

## ANEXOS



### Datos Generales

A (radio=	10.7 cm.
Presión de inflado	80 psi
Peso	4,500 lb/llanta
Ratio de poisson	0.4
H/Lo	10

### Coefficientes de correlación para el cálculo de R5

H/Lo	u	A	B	C
Infinito	Cual. Valor	3.115	0	0.584
DR/Do>0.7	0.5	2.46	0	0.592
DR/Do<0.7	0.5	371.1	2	0.219
DR/Do>0.426	0.4	2.629	0	0.548
DR/Do<0.426	0.4	2283.4	3	0.2004

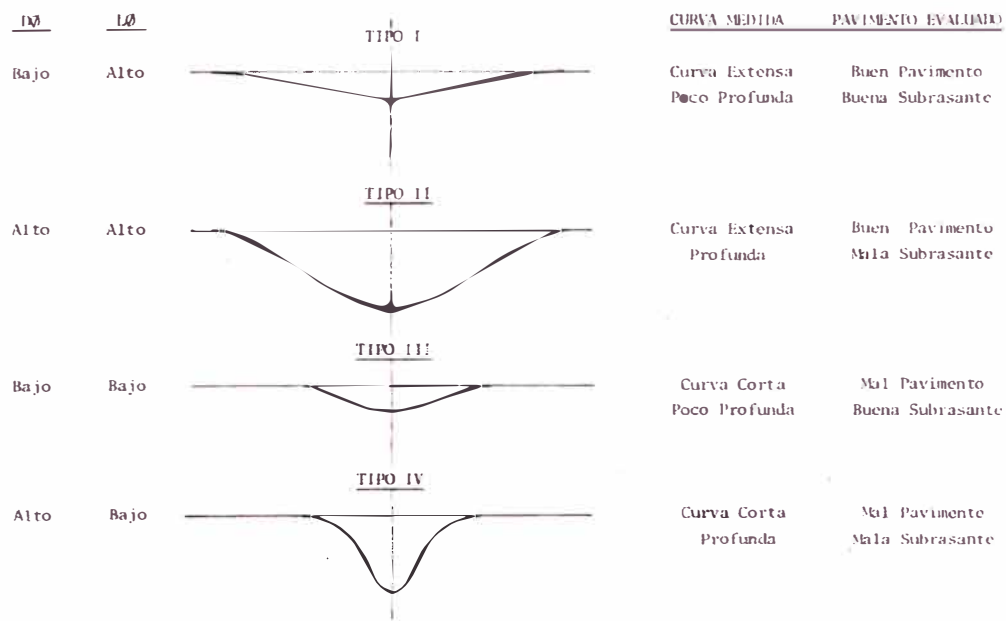
### Coefficientes de Correlación para determinar Lo

H/Lo	u	X	Y
10	0.5	0.183	0.62
10	0.4	0.192	0.602
Infinito	Cual. Valor	0.18	0.525

### Parámetros del Modelo de Hogg

Progresiva	Dmáx (10 <sup>-2</sup> mm)	DR (cm)	R (cm)	Lo (cm)	R5 (cm)	So/S	Mr - Hogg		CBR (%)
							Eo kg/cm2	psi	
116+000	54	0.27	50.0	27.2	50.0	0.86	659	9357	6.2
116+200	78	0.35	50.0	23.9	44.8	0.83	503	7148	4.8
116+400	55	0.36	70.0	56.4	96.6	0.96	346	4914	3.3
116+600	92	0.58	70.0	53.9	92.6	0.95	216	3062	2.0
116+800	90	0.47	50.0	28.8	52.4	0.87	380	5399	3.6
117+000	54	0.27	50.0	27.2	50.0	0.86	660	9371	6.2
117+200	47	0.23	70.0	39.8	70.0	0.92	557	7908	5.3
117+400	54	0.35	70.0	56.4	96.6	0.96	356	5054	3.4
117+600	115	0.46	50.0	21.2	40.5	0.81	372	5285	3.5
117+800	80	0.46	70.0	47.2	82.0	0.94	279	3957	2.6

## Significado cualitativo de los diferentes tipos de Curvas de Deflexiones.



### Rango de valores del CBR

S0:	SUBRASANTE MUY POBRE	CBR < 3%
S1:	SUBRASANTE POBRE	CBR = 3%-5%
S2:	SUBRASANTE REGULAR	CBR = 6%-10%
S3:	SUBRASANTE BUENA	CBR = 11%-19%
S4:	SUBRASANTE MUY BUENA	CBR > 20%

### Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

$$PSI = 5.0 / (e^{(IRI)^{5.5}}); \text{ para } IRI < 12$$

Rango de Serviciabilidad Presente (PSI)	Transitabilidad (Calificativo)
0 - 1	Muy Mala
1 - 2	Mala
2 - 3	Regular
3 - 4	Buena
4 - 5	Muy Buena

**Calculo de N18 y deflexión admisible por periodos**

Tramo 116+000 - 118+000											
Tipo de vehículo	Factor de Carga	IMD <sub>2010</sub>	Tasa de crecimiento (i%)	Proyección							
				n años	EAL <sub>2011</sub>	n años	EAL <sub>2012</sub>	n años	EAL <sub>2013</sub>	n años	EAL <sub>2014</sub>
Micro	4.504	3	1.6	1	4932	2	9942	3	15032	4	20204
Ómnibus 2E	4.504	12	1.6	1	19726	2	39768	3	60130	4	80818
Ómnibus 3E	3.285	0	1.6	1	0	2	0	3	0	4	0
Camión 2 Ejes	4.504	21	5.0	1	34521	2	70767	3	108826	4	148788
Camión 3 Ejes	3.285	15	5.0	1	17983	2	36865	3	56692	4	77509
Camión 4 Ejes	2.283	0	5.0	1	0	2	0	3	0	4	0
Semitrailer	6.523	0	5.0	1	0	2	0	3	0	4	0
Tráiler	10.980	0	5.0	1	0	2	0	3	0	4	0
Nota: N <sub>18</sub> , número total de ejes equivalentes a 18 klb o 8.2 ton (en millones) EAL N <sub>18</sub> Da (x 10-2 mm)				7.72E+04		1.57E+05		2.41E+05		3.27E+05	
				0.039		0.079		0.120		0.164	
				233.7		195.5		175.8		162.8	