

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO - MÉTODO  
EMPÍRICO USANDO VIGA BENKELMAN  
MONITOREO DE CONSERVACIÓN  
CARRETERA CAÑETE - HUANCAYO  
Km. 106+000 AL Km. 108+000**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**FLOR RIVERA GÓMEZ**

Lima - Perú

2010

A Dios, a mis padres Marina y  
Oswaldo, a mis hermanos y a  
Marcos, por ser el impulso, la  
fuerza para ser siempre mejor.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	03
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	04
<b>LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS</b> .....	05
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	06
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	07
<b>CAPÍTULO I: PERFIL DEL PROYECTO</b>	
<b>1.1. Aspectos Generales</b> .....	08
1.1.1. Nombre del Proyecto .....	08
1.1.2. Participación de las entidades involucradas y de los beneficiarios .....	08
1.1.3. Marco de Referencia .....	08
<b>1.2. Identificación</b> .....	09
1.2.1. Diagnóstico de la Situación Actual.....	09
1.2.2. Descripción del Problema y sus Causas .....	10
1.2.3. Objetivo Central .....	10
1.2.4. Alternativas de Solución .....	11
<b>1.3. Formulación y Costos</b> .....	12
1.3.1. Horizonte del Proyecto .....	12
1.3.2. Análisis de la Demanda .....	12
1.3.3. Demanda Actual .....	12
1.3.4. Alcances .....	13
1.3.5. Estudio Volumétrico .....	13
1.3.6. Estaciones de Control .....	13
1.3.7. Metodología para hallar el Promedio Diario Anual (IMD) .....	15
1.3.8. Obtención de los Factores de Corrección Mensual .....	15
1.3.9. Resultados de los Conteos Vehiculares .....	16
1.3.10. Análisis de la Oferta.....	21
1.3.11. Costos .....	22
<b>1.4. Evaluación</b> .....	24

1.5. La Viga Benkelman y su aplicación en la conservación vial .....	25
<b>CAPÍTULO II: VIGA BENKELMAN</b>	
2.1 Descripción del Equipo .....	26
2.2 Ensayo de Deflectometría .....	27
2.2.1 Equipo requerido .....	28
2.2.2 Procedimiento en el campo .....	28
2.2.3 Calculo de deflexiones y análisis .....	33
2.2.4 Método Racional (Modelo Matemático de Hogg) .....	33
2.2.5 Método Empírico (CONREVIAL) .....	51
2.2.6 Evaluación del sector km 106+000 – 108+000, perteneciente al Tramo Capillucas 94+640 - Dv. Yauyos 127+001 .....	61
2.3 Análisis y Resultados .....	62
2.4 Propuestas de Conservación .....	68
<b>CONCLUSIONES</b> .....	69
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	71
<b>ANEXOS</b> .....	72

## RESUMEN

El presente trabajo contiene los estudios para la evaluación estructural del pavimento de la Carretera “Cañete – Chupaca” en el tramo del Km 106+000 al km 108+000 (se encuentra dentro del Sector Zúñiga - Dv. Yauyos), a través de un Ensayo No destructivo (END), utilizando la Viga Benkelman de doble Brazo, siendo un equipo portátil que permite medir deflexiones elásticas que sufre un pavimento flexible al paso de una carga rodante estándar. El procesamiento y análisis de datos será interpretado mediante el método empírico del estudio CONREVIAl, obteniéndose de este método una Deflexión Característica ( $D_c$ ), Deflexión Admisible ( $D_a$ ) y el Radio de Curvatura ( $R_c$ ), con los cuales será posible evaluar estructuralmente al pavimento.

Como resultado del END en el tramo de estudio resultó que la capacidad estructural del pavimento tiene un comportamiento adecuado, pero se debe dar mantenimiento a algunos sectores que presentan fallas superficiales, como grietas, huecos, baches y que son indicadores de la necesidad de mantenimiento.

**LISTA DE CUADROS**

Cuadro 1.1	: Situación actual de los tramos a Enero del 2010 .....	09
Cuadro 1.2	: Ubicación de las estaciones de control .....	13
Cuadro 1.3	: Factor de corrección del mes de Mayo del 2006 .....	16
Cuadro 1.4	: Volumen diario clasificado: Estación (E1) .....	17
Cuadro 1.5	: Volumen diario clasificado: Estación (E2) .....	18
Cuadro 1.6	: Volumen diario clasificado: Estación (E3) .....	18
Cuadro 1.7	: Volumen diario clasificado: Estación (E4) .....	19
Cuadro 1.8	: Volumen diario clasificado: Estación (E5) .....	19
Cuadro 1.9	: Volumen diario clasificado: Estación (E6) .....	20
Cuadro 1.10	: Determinación del tráfico del 2009 .....	20
Cuadro 1.11	: Características de los tramos .....	21
Cuadro 1.12	: Costos de mantenimiento del tramo 4 .....	22
Cuadro 1.13	: Costos de mantenimiento con tratamiento Slurry Seal .....	23
Cuadro 1.14	: Costos de mantenimiento con sello bituminoso Otta Seal ....	23
Cuadro 1.15	: Costos de mantenimiento con Micropavimentos .....,.....	24
Cuadro 1.16	: Cuadro resumen de costos de mantenimiento .....,.....	25
Cuadro 2.1	: Coeficientes para el cálculo de R5 en el Modelo de Hogg ,,,..	51
Cuadro 2.2	: Coeficientes para el cálculo de $I\phi$ en el Modelo de Hogg .....	51
Cuadro 2.3	: Factores de corrección por estacionabilidad .....	54
Cuadro 2.4	: Análisis combinado de los resultados de evaluación .....	60
Cuadro 2.5	: Valores recomendados para R .....	61
Cuadro 2.6	: Cálculo de deflexiones sin corregir .....	63
Cuadro 2.7	: Cálculo de Deflexión Característica (Dc) .....	65
Cuadro 2.8	: Cálculo de Deflexión Admisible (Da) .....	67

## LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1.1	: Ubicación de las estaciones de control Reg. Lima .....	14
Figura 1.2	: Ubicación de las estaciones de control Reg. Junín .....	14
Figura 2.1	: Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman .....	27
Figura 2.2	: Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con Viga Benkelman .....	29
Figura 2.3	: Esquematación del proceso de medición con Viga Benkelman .....	31
Figura 2.4	: Hoja de campo para recopilación de deflexiones .....	32
Figura 2.5a	: Esquema del Modelo de Hogg .....	34
Figura 2.5b	: Parámetros del Modelo de Hogg .....	34
Figura 2.6	: Curva de deflexiones en el Modelo de Hogg para la configuración de carga para la Viga Benkelman.....	36
Figura 2.7	: Nomograma para evaluación estructural basado en el Modelo de Hogg para la Viga Benkelman .....	37
Figura 2.8	: Significado cualitativo de los diferentes tipos de curvas de deflexiones .....	46
Figura 2.9	: Tipos de deflexiones .....	55
Gráfico 2.1	: Deflectograma .....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS:

CONREVIAL	: Consorcio de Rehabilitación Vial
CBR	: California Bearing Ratio
CGS	: Consorcio Gestión de Carreteras
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
OPP - MTC	: Oficina General de Presupuesto y Planificación del MTC



## INTRODUCCIÓN

Este informe tiene como objetivo determinar las condiciones estructurales del pavimento y estimar la vida útil remanente de la vía, mediante la medición de deflexiones usando el deflectómetro conocido como Viga Benkelman.

El informe se ha dividido en 2 capítulos y cada capítulo ha sido subdividido en sub capítulos de la siguiente manera:

En el Capítulo I: En el primer capítulo se describen los aspectos generales del Proyecto, el estado actual de la Carretera Cañete - Chupaca, se propondrán alternativas de mantenimiento para la vía y finalmente se verá la Viga Benkelman y su aplicación en la Conservación Vial.

En el Capítulo II: En el desarrollo del informe se describe la Viga Benkelman, se presenta el marco teórico de los métodos para analizar los datos recogidos de campo, siendo los métodos matemático y el empírico CONREVIAl MTC, este último es aplicado para deflexiones obtenidas de un deflectómetro Viga Benkelman de dos brazos, es por tal motivo que el análisis de los datos de campo se realizará con el Método CONREVIAl. Con estos análisis se podrá obtener la condición estructural del pavimento y determinar si necesita refuerzo, finalmente se planteará propuestas de conservación.

## CAPÍTULO I: PERFIL DEL PROYECTO

### 1.1. Aspectos Generales

#### 1.1.1 Nombre del Proyecto:

“Evaluación Estructural con Viga Benkelman, carril izquierdo, Monitoreo de Conservación Carretera Cañete – Huancayo km. 106+000 al km. 108+000”.

#### 1.1.2 Participación de las entidades involucradas y de los beneficiarios:

La principal entidad involucrada es Provias Nacional a través del Proyecto Perú, el cual es un programa de Infraestructura Vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de la Red Vial Nacional 022.

Los beneficiarios serían los usuarios de la vía y los pobladores de las localidades de Lunahuaná, Pacarán, Zúñiga, San Juan, San Gerónimo, Catahuasi, Chichicay, Capillucas, Calachota, Magdalena, Yauyos, Tincco Huantan, LLapay, Alis, Tomas, Tinco de Yauricocha, Abra Chaucha, Abra Negrobueno, San José de Quero, Chaquicocha, Collpa, Roncha y Chupaca.

#### 1.1.3 Marco de Referencia:

El 27 de Diciembre del 2007 se suscribió el Contrato N° 288-2007-MTC/20 para el servicio de “Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera: Cañete – Lunahuaná – Pacarán - Chupaca y Rehabilitación del Tramo Zúñiga – Dv. Yauyos – Ronchas”, entre PROVÍAS NACIONAL y el CONSORCIO GESTIÓN DE CARRETERAS, conformado por los Ingenieros Civiles y Contratistas S.A. Corporación Mayo S.A.C. y Empresa de Mantenimiento Vial La Marginal S.R.L.

El 22 de Agosto del 2008 se firma el Convenio de Cooperación Interinstitucional entre el Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional – PROVÍAS NACIONAL y la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA – UNI, para el acompañamiento y monitoreo de los Trabajos de Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor vial N° 13: Cañete – Lunahuaná – Pacarán Chupaca (Rehabilitación del Tramo Zúñiga – Dv. Yauyos – Ronchas) y conducentes a elaborar una Norma o un Manual.

Los contratos por niveles de servicio en el campo de la conservación en este momento, consisten en tomar y llevar a cabo las decisiones conducentes a mantener las vías siempre mejor o a lo sumo igual que los límites admisibles de

deterioro que se hayan fijado. En consecuencia, en un contrato por niveles de servicio de conservación, es el contratista el que decide qué tareas deben realizarse y en qué dimensión, siempre y cuando respete las condiciones fijadas para las vías.

## 1.2. Identificación

### 1.2.1 Diagnostico de la Situación Actual:

De acuerdo a los trabajos de monitoreo que viene realizando la UNI por medio del Convenio de Cooperación Interinstitucional entre en proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional Provías Nacional y la Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, da a conocer los siguientes avances realizados por el contratista hasta Enero del 2010 en el tramo de la carretera Cañete - Yauyos - Huancayo, la situación hasta esa fecha es la siguiente:

CUADRO 1.1: SITUACIÓN ACTUAL DE LOS TRAMOS A ENERO DEL 2010

TRAMO INICIAL	km inicio	TRAMO FINAL	km fin	LONGITUD DEL SUB-TRAMO	TIPO DE PLATAFORMA	N°TRAMOS	KM x TRAMOS
CAÑETE	1+805	LUNAHUANÁ	42+755	40+950	CARPETA ASFALTICA	1	40+950
LUNAHUANA	42+755	PACARAN	54+662	11+907	TSB (3/4 Y 3/8)	2	11+907
PACARÁN	54+662	ZÚÑIGA	58+405	3+743	SLURRY SEAL	3	24+143
ZÚÑIGA	58+405	SAN JUAN	67+405	9+000			
SAN JUAN	67+405	SAN JERÓNIMO	73+005	5+600			
SAN JERÓNIMO	73+005	CATAHUASI	78+805	5+800	MONOCAPA	4	86+100
CATAHUASI	78+805	CHICHICAY	93+915	15+110			
CHICHICAY	93+915	CAPILLUCAS	96+445	2+530			
CAPILLUCAS	96+445	CALACHOTA	106+845	10+400			
CALACHOTA	106+845	PUENTE AUCCO	114+605	7+760			
PUENTE AUCCO	114+605	DV. YAUYOS MAGDALENA	128+805	14+200			
DV. YAUYOS MAGDALENA	128+805	TINCO HUANTAN	142+165	13+360			
TINCO HUANTAN	142+165	LLAPAY	156+105	13+940			
LLAPAY	156+105	ALIS	164+905	8+800	SLURRY SEAL	5	62+095
ALIS	164+905	TOMAS	172+895	7+990			
TOMAS	172+895	TINCO YAURICOCHA	183+485	10+590			
TINCO YAURICOCHA	183+485	ABRA CHAUCHA	195+315	11+830	SLURRY SEAL	6	26+000
ABRA CHAUCHA	195+315	ABRA NEGROBUENO	213+125	17+810			
ABRA NEGROBUENO	213+125	S/N	227+000	13+875			
S/N	227+000	SAN JOSÉ DE QUERO	231+105	4+105	SLURRY SEAL	7	3+990
SAN JOSÉ DE QUERO	231+105	CHAQUICOCHA	241+405	10+300			
CHAQUICOCHA	241+405	COLLPA	248+005	6+600			
COLLPA	248+005	S/N	253+000	4+995	SLURRY SEAL	8	16+541
S/N	253+000	RONCHA	256+990	3+990			
RONCHA	256+990	CHUPACA	273+531	16+541	CARPETA ASFALTICA	8	16+541
<b>TOTAL</b>				<b>271+726</b>			<b>271+726</b>

Fuente: Monitoreo realizado por la UNI y MTC (Avance del contratista)

## 1.2.2 Descripción del Problema y sus Causas

### Problema Central:

Deficiente nivel de transitabilidad de la Carretera Cañete - Yauyos - Huancayo que perjudica el traslado de carga y pasajeros, lo que origina altos costos de operación de transportes, tiempos de viaje excesivos, perjudicando las actividades económicas y productivas de la zona.

### Causas Indirectas:

- Carencia de obras que protejan la vía (inestabilidad de taludes).
- Fenómenos meteorológicos.
- Falta de Diseño geométrico en toda la vía.
- Geografía agreste a lo largo de toda la vía.
- Señalización vial confusa (doble señalización en un mismo tramo).

### Causas Directas:

- Deterioro de la superficie de rodadura.
- Incremento de accidentes de tránsito.

## 1.2.3 Objetivo Central:

El objetivo general del proyecto es alcanzar un adecuado nivel de transitabilidad de la vía en estudio, mediante la ejecución permanente de actividades de conservación rutinaria y periódica.

### Medios de Primer Nivel:

- Mantener en buen estado la superficie de rodadura.
- Garantizar la seguridad vial.

### Medios Fundamentales:

- Tratamiento superficial de la capa de rodadura.
- Limpieza de obras de arte.
- Eliminación de desmonte y remoción de derrumbes.

#### **1.2.4 Alternativas de Solución:**

Tenemos las siguientes alternativas de solución para mantenimiento:

##### **Alternativa de Mantenimiento No 1**

Mantener el trazo de la vía, mejorando su superficie con tratamiento superficial utilizando mortero asfáltico (Slurry Seal); y actividades de mantenimiento rutinario.

##### **Alternativa de Mantenimiento No 2**

Mantener el trazo de la vía, mejorando su superficie con tratamiento superficial utilizando un sello bituminoso (Otta Seal); y actividades de mantenimiento rutinario.

##### **Alternativa de Mantenimiento No 3**

Mantener el trazo de la vía, mejorando su superficie con tratamiento superficial utilizando micropavimentos y actividades de mantenimiento rutinario.

##### **Slurry Seal:**

Es una mezcla líquida homogénea de agua, emulsión asfáltica, filler mineral y un agregado bien graduado, que bien aplicado, corrige las demandas del pavimento. Así mismo su versatilidad reduce el deterioro de los caminos y el costo de mantenimiento de los caminos de un 50% a un 60% abajo dentro de un periodo de 10 años. A diferencia de otros métodos de sello de los pavimentos, el Slurry Seal no contiene piedras que producen el rayado y problemas en el drenaje, por lo que permite que rápidamente se extienda. Tiene estabilidad, muy baja permeabilidad, un alto resistencia a la fricción e hidropeleneo.

##### **Otta Seal:**

El Otta Seal es una técnica de pavimento de origen noruego, que consiste en un sello bituminoso consistente en un riego de ligante blando (CA 150 – 200g.) recubierto con una capa de agregado pétreo de graduación continua uniformemente distribuida.

##### **Micro-pavimento.**

El micro-pavimento (micro-surfacing) es una mezcla compuesta por emulsión asfáltica catiónica modificada con polímeros (tipo quick-setting), agregados pétreos 100% triturados, finos minerales, agua y aditivos de control de ruptura en campo.

Como material de finos se usa generalmente cemento portland tipo I; sin embargo muchos materiales inertes pueden usarse. La cal hidratada ha sido usada en algunos sistemas. El aditivo de control en campo se usa para ajustar el tiempo de rompimiento durante la aplicación.

El micro-pavimento es básicamente un tipo de mortero asfáltico (slurry seal) con un ligante modificado con polímeros que requiere agregados de alta calidad.

### **1.3 Formulación y Costos**

#### **1.3.1 Horizonte del Proyecto:**

El proyecto tendrá un horizonte de 3 años en el cual la carretera en estudio debe mantenerse en óptimas condiciones, se evaluará alternativas de mantenimiento y se evaluará la rentabilidad del proyecto para los próximos tres años y se propondrá una norma para llevar a efecto estos trabajos.

#### **1.3.2 Análisis de la Demanda:**

Para estimar la demanda actual, se ha considerado el comportamiento y características del flujo vehicular, así como sus principales determinantes.

Este análisis comprende la demanda de transporte que atenderá el proyecto, que servirá de base para estimar los beneficios por ahorro en costos de operación vehicular y beneficios por ahorro en tiempo.

Para el presente estudio, el análisis de la demanda ha considerado la medición del tráfico de la mencionada vía, el cual ha sido realizado para efecto de conocer el volumen diario de vehículos que transitan por la vía.

#### **1.3.3 Demanda Actual:**

Los resultados del estudio del tráfico actual se reflejan en términos del Índice Medio Diario (IMD) y que se han identificado por el nivel de tráfico existente en la vía. A la fecha se han realizado los correspondientes conteos de tráfico, tanto en forma diaria, con conteos horarios, así como conteos en intervalos de quince minutos para los periodos de máxima demanda.

### 1.3.4 Alcances:

El Estudio de tráfico para evaluar la demanda actual se realizará considerando: Conteos de tráfico en ubicaciones estratégicas, estos conteos serán volumétricos y clasificados por tipo de vehículo, durante 7 días continuos. Con los correspondientes factores de corrección (horario, diario, estacional), se obtendrá el Índice Medio Diario Anual (IMDA) de tráfico que corresponda al tramo o subtramo, por tipo de vehículo y total.

### 1.3.5 Estudio Volumétrico:

El estudio volumétrico comprende la determinación de las características actuales y futuras del tráfico, estas características varían a lo largo de la carretera, existiendo tramos de características más o menos iguales llamados tramos homogéneos, como principales zonas generadoras y atractivas de viajes. No sería posible, ni necesario, determinar el volumen ni la composición del tráfico en cada uno de los tramos en los que existan pequeñas variaciones.

### 1.3.6 Estaciones de Control:

La programación de estaciones de control vehicular, se efectuó de acuerdo a los antecedentes entregados por el Consorcio Gestión de Carreteras 2, considerando las actividades de mantenimiento requeridas y según los tramos más o menos homogéneos en volumen y composición vehicular, en que se subdivide el eje vial en estudio, los cuales se indican en el cuadro siguiente:

**CUADRO 1.2: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE CONTROL**

CÓDIGO	TRAMO	NOMBRE	TAREA
E 1	Cañete (Imperial)-Lunahuaná	Lunahuaná	Conteo Continuo
E 3	Lunahuaná- Pacarán -Zuñiga	Pacarán	Conteo Continuo
E 3	Zuñiga-Dv. Yauyos-San José de Quero	Zuñiga	Conteo Continuo
E4	San José de Quero-Ronchas	Yauyos	Conteo Continuo
E5	Ronchas-Chupaca	Ronchas	Conteo Continuo

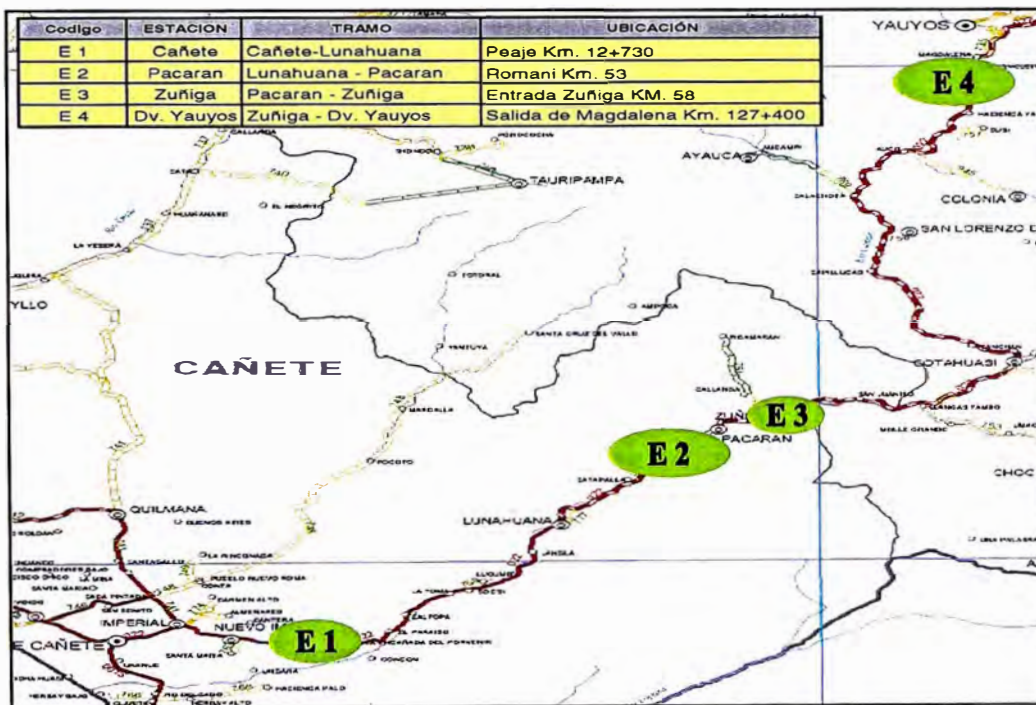
Fuente: Elaboración propia



De acuerdo al cronograma de trabajo de campo, se iniciaron los conteos vehiculares el día 21 de abril al 25 de mayo, según cuadro adjunto. Los formatos de campo utilizados, son los aplicados para estas actividades por la **OPP-MTC**.

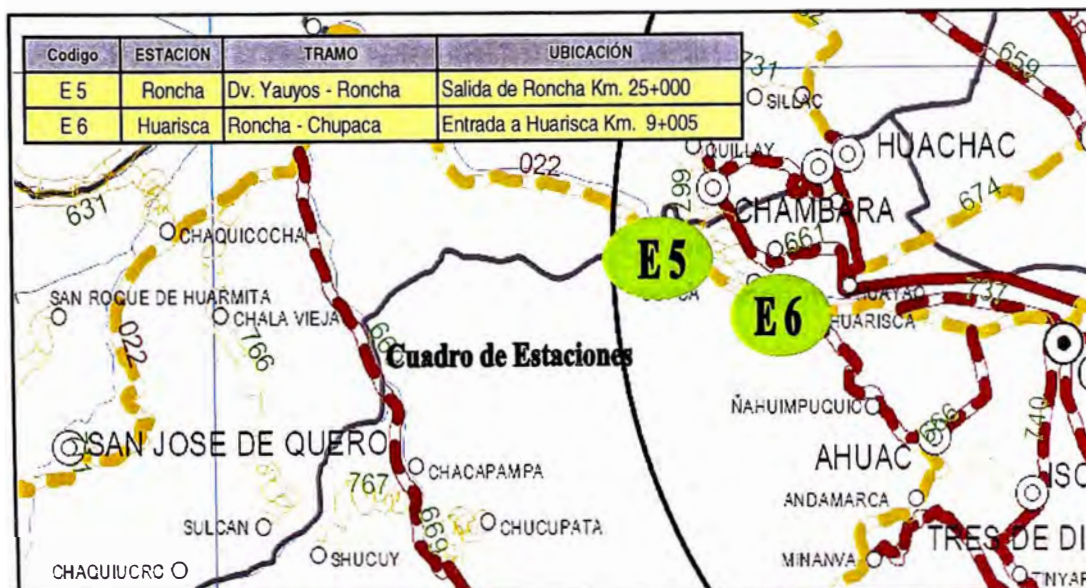
A continuación incluimos las ubicaciones de las estaciones de control:

**FIGURA 1.1: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE CONTROL REGIÓN LIMA**



Fuente: ICCGSA

**FIGURA 1.2: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE CONTROL REGIÓN JUNÍN**



Fuente: ICCGSA



### 1.3.7 Metodología para hallar el Promedio Diario Anual (IMD):

La metodología para hallar el Índice Medio Diario anual (IMD), corresponde a la siguiente fórmula:

$$\text{IMD} = \text{IMDs} * \text{FC m}$$

$$\text{IMDs} = [(\sum \text{VI} + \text{Vs} + \text{Vd}) / 7] \text{ (Estaciones de 7 días)}$$

Donde:

IMDs = Volumen clasificado promedio de la semana

VI = Volumen clasificado día laboral (lunes a viernes)

Vnl = Volumen clasificado días no laborables (día sábado (Vs), domingo (Vd))

FC m = Factor de corrección según el mes que se efectuó el aforo

### 1.3.8 Obtención de los Factores de Corrección Mensual:

El factor de corrección estacional, se determina a partir de una serie anual de tráfico registrada por una unidad de Peaje, con la finalidad de hacer una corrección para eliminar las diversas fluctuaciones del volumen de tráfico por causa de las variaciones estacionales debido a factores recreacionales, climatológicos, las épocas de cosechas, las festividades, las vacaciones escolares, viajes diversos, etc.; que se producen durante el año.

Para el cálculo del factor de corrección mensual (FCm), se obtuvo de la información proporcionada por Provías Nacional – Gerencia de Operaciones Zonales del año 2006, de las Unidades de Peaje de Lunahuaná ubicada en el tramo vial Cañete-Lunahuaná y Huacrapuquio, ubicada en la carretera Huancayo-Imperial; dichas Unidades de Peaje son representativas de las variaciones mensuales del volumen vehicular en la carretera en estudio.

$$\text{FC m} = \frac{\text{IMD anual}}{\text{IMD del mes del Estudio de la Unidad Peaje}}$$

Donde:

FC m = Factor de corrección mensual clasificado por cada tipo de vehículo

IMD = Volumen Promedio Diario Anual clasificado de la U. Peaje

IMD mes del Estudio = Volumen Promedio Diario, del mes en U. Peaje

El cuadro 1.3, presenta el factor de corrección mensual (FC m), hallado asumiendo el mismo Factor de Corrección para ambos sentidos.

**CUADRO 1.3: FACTOR DE CORRECCIÓN DEL MES DE MAYO DEL 2006**

PUNTO DE CONTROL	UNIDAD DE PEAJE ASUMIDA	CÓDIGO	MES	F.C. VEH. LIGEROS	F.C. VEH.PESADOS
Cañete-Dv. Yauyos	Lunahuaná	E1-E2-E3	Mayo	0.99655	0.81409
Dv. Yauyos- Ronchas	Huacrapuquio	E4 y E5	Mayo	1.04545	0.96032

Fuente: Gerencia de Operaciones Zonales – Provías Nacional

El resultado alcanzado en el cuadro 1.3, establece los Factores de Corrección, por cada gran tipo de vehículo, tomando como base para los factores de corrección mensual, la información de las Unidades de Peaje de Lunahuaná y Huacrapuquio.

### 1.3.9 Resultados de los Conteos Vehiculares:

Los resultados obtenidos, indican que el mayor volumen vehicular, se da en el tramo Imperial-Lunahuaná”, con 1,010 veh/día; sigue el “Chupaca-Ronchas”, con 454 veh/día, “Lunahuaná-Pacarán” y Pacarán-Zúñiga con casi similar tráfico de 417 y 418 veh/día, respectivamente” y “San José de Quero-Ronchas”, con 317 veh/día y por último el tráfico de larga distancia entre Zúñiga-San José de Quero con 53

veh/día. Cabe hacer mención al Tráfico Temporal que se presenta en el Tramo “San Juan-Capilluca”, debido a la construcción de la Hidroeléctrica del Platanal, con un volumen vehicular entre 569 y 461 veh/día.

El transporte de carga de vehículos acoplados, en el tramo “Chupaca-Ronchas-Dv. Yauyos”, corresponde esencialmente al servicio de las minas de su área de influencia física, hacia las provincias de Concepción, Huancayo y Lima.

Los cuadros siguientes desde 1.4 al 1.9, contienen el resumen del volumen clasificado diario de las Estaciones de control vehicular comprendidas E1 a E 7.

**CUADRO 1.4: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN E1**

Tipo de Vehículo	Imperial-Lunahuaná	Lunahuaná-Imperial	Ambos	%
Auto	177	124	301	30%
Camioneta	203	203	406	40%
C.R.	104	105	209	21%
Micro	6	5	11	1%
Ómnibus 2	6	5	11	1%
Ómnibus +2	0	0	0	0%
Camión 2 Ejes	23	22	45	4%
Camión 3 Ejes	4	4	8	1%
Camión 4 Ejes	0	0	0	0%
Semitráilers	10	9	19	2%
Tráilers	0	0	0	0%
TOTAL	533	477	1010	100%
% sentido	53%	47%	100%	

**Fuente:** Estudio de tráfico 2008

**CUADRO 1.5: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN (E2)**

Tipo de Vehículo	Lunahuaná-Pacarán	Pacarán-Lunahuaná	Ambos	%
Auto	12	9	21	5%
Camioneta	93	96	189	45%
C.R.	62	58	120	29%
Micro	5	7	12	3%
Ómnibus 2	5	5	10	2%
Ómnibus +2	0	0	0	0%
Camión 2 Ejes	22	22	44	11%
Camión 3 Ejes	3	2	5	1%
Camión 4 Ejes	0	0	0	0%
Semitráilers	9	7	16	4%
Tráilers	0	0	0	0%
TOTAL	211	206	417	100%
% sentido	51%	49%	100%	

Fuente: Estudio de tráfico 2008

**CUADRO 1.6: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN (E3)**

Tipo de Vehículo	Pacarán - Zúñiga	Zúñiga-Pacarán	Ambos	%
Auto	35	41	76	18%
Camioneta	73	74	147	35%
C.R.	52	53	105	25%
Micro	9	8	17	4%
Ómnibus 2	4	4	8	2%
Ómnibus +2	0	0	0	0%
Camión 2 Ejes	18	18	36	9%
Camión 3 Ejes	4	4	8	2%
Camión 4 Ejes	1	1	2	0%
Semitráilers	9	10	19	5%
Tráilers	0	0	0	0%
TOTAL	205	213	418	100%
% sentido	49%	51%	100%	

Fuente: Estudio de tráfico 2008

**CUADRO 1.7: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN (E4)**

Tipo de Vehículo	Zúñiga-Dv. Yauyos-San José de Quero	San José de Quero-Dv, Yauyos- Zúñiga	Ambos	%
Auto	0	1	1	2%
Camioneta	10	10	20	38%
C.R.	2	2	4	8%
Micro	0	0	0	0%
Ómnibus 2	4	4	8	15%
Ómnibus +2	0	0	0	0%
Camión 2 Ejes	4	5	9	17%
Camión 3 Ejes	7	4	11	21%
Camión 4 Ejes	0	0	0	0%
Semitráilers	0	0	0	0%
Tráilers	0	0	0	0%
TOTAL	27	26	53	100%
% sentido	51%	49%	100%	

Fuente: Estudio de tráfico 2008

**CUADRO 1.8: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN (E5)**

Tipo de Vehículo	San José de Quero-Roncha	Roncha-San José de Quero	Ambos	%
Auto	5	4	9	3%
Camioneta	106	102	208	60%
C.R.	19	18	37	11%
Micro	3	2	5	1%
Ómnibus 2	4	4	8	2%
Ómnibus +2				
Camión 2 Ejes	19	18	37	11%
Camión 3 Ejes	3	4	7	2%
Camión 4 Ejes				
Semitráilers	25	11	36	10%
Tráilers				
TOTAL	184	163	347	100%
% sentido	53%	47%	100%	

Fuente: Estudio de tráfico 2008

**CUADRO 1.9: VOLUMEN DIARIO CLASIFICADO: ESTACIÓN (E6)**

Tipo de Vehículo	Chupaca- Ronchas	Ronchas- Chupaca	Ambos	%
Auto	8	9	17	4%
Camioneta	164	155	319	70%
C.R.	18	15	33	7%
Micro	3	2	5	1%
Ómnibus 2	6	3	9	2%
Ómnibus +2				
Camión 2 Ejes	20	16	36	8%
Camión 3 Ejes	3	2	5	1%
Camión 4 Ejes				
Semitráilers	9	21	30	7%
Tráilers				
TOTAL	231	223	454	100%
% sentido	51%	49%	100%	

Fuente: Estudio de tráfico 2008

A continuación se muestra el IMD del 2009, con proyección del IMD del 2008.

**CUADRO 1.10: DETERMINACIÓN DEL TRÁFICO DEL 2009**

Tipo de Vehículo	IMD 2008 (*)				Tasa de Crec.	IMD 2009(**)		
	Zúñiga 56+600 P. Nvo. 66+580	P. Nuevo 66+580 Chichicay 92+110	Chichicay 92+110 Capillucas 94.640	Capillucas 94+640 Dv. Yauyo 127+000		Zúñiga 56+600 P. Nvo. 66+580	P. Nuevo 66+580 Capillucas 94+640	Capillucas 94+640 Dv. Yauyo 127+000
Automóvil	6	3	2	1	2.6	6	3	1
Camioneta	194	289	58	20	2.6	199	297	21
Combi rural	74	61	18	4	2.6	76	63	4
Microbus	48	68	8	0	1.4	49	69	0
Ómnibus 2E	15	14	13	8	1.4	15	14	8
Ómnibus 3E	1	0	1	0	1.4	1	0	0
Camión 2E	47	42	30	9	4.6	49	44	9
Camión 3E	9	4	2	11	4.6	9	4	12
Camión 4E	1	2	2	0	4.6	1	2	0
Semitráilers	28	53	98	0	4.6	29	55	0
Tráilers	38	33	0	0	4.6	40	35	0
TOTAL						475	585	55

Fuente: Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete - Chupaca

**1.3.10 Análisis de la Oferta:**

La oferta vial existente se detalla a continuación (información recabada del inventario vial):

Carretera a nivel de tratamiento superficial en buen estado Cañete hasta Lunahuaná con carpeta asfáltica, tratamiento superficial bicapa de Lunahuaná a Pacarán, Slurry Seal desde Pacarán a Catahuasi y de Alis al Km. 227, Tratamiento superficial Monocapa desde Catahuasi hasta Alis y trocha de regular a mal estado en el resto de la carretera del Km. 227 al Km. 253 y de Roncha hasta Chupaca.

El cuadro 3.16 se ha elaborado con la información recopilada de los informes del Convenio de Cooperación Interinstitucional entre el Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional – PROVÍAS NACIONAL y la Universidad Nacional de ingeniería – UNI (Plano Clave Abril 2010)

**CUADRO 1.11: CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMOS**

TRAMO	PAVIMENTO	Km INICIO	Km FINAL	LONG. (Km)
Tramo I Cañete - Lunahuaná	Carpeta Asfáltica	1+805.00	42+755.00	40.950
Tramo II Lunahuaná - Pacarán	Tratamiento Superficial Bicapa	42+755.00	54+662.00	11.907
Tramo III Pacarán - Catahuasi	Slurry Seal	54+662.00	78+805.00	24.143
Tramo IV Catahuasi - Alis	Tratamiento Superf. Monocapa	78+805.00	164+905.00	86.100
Tramo V Alis – Km. 227+000	Slurry Seal	164+905.00	227+000.00	62.095
Tramo VI Km. 227+000 – 253+000	Slurry Seal	227+000.00	253+000.00	26.000
Tramo VII Km. 253+000 - Roncha	Slurry Seal	253+000.00	256+990.00	3.990
Tramo VIII Roncha - Chupaca	Carpeta Asfáltica	256+990.00	273+531.00	16.541
TOTAL				271.726

Fuente: Elaboración propia



### 1.3.11 Costos

Para la evaluación de costos se ha utilizado como guía las partidas y metrados de los Términos de Referencia del Contrato de Conservación de la Carretera Cañete – Chupaca, los análisis de precios unitarios de los productos Slurry Seal y Macro Seal fueron tomados de los proyectos viales de la empresa Graña y Montero (encargada su formulación a la firma Bituper), estos precios se detallan en el ANEXO 03, los precios unitarios de las demás partidas han sido tomados del Proyecto “Estudio de mantenimiento periódico de la Panamericana Sur, tramo Puente Santa Rosa - Puente Montalvo Km 1041+600 al Km 1139+795”, la evaluación se ha realizado por tramos (estos tramos se pueden apreciar en el CUADRO 1.11), perteneciendo el sector en estudio al TRAMO IV.

Los costos de mantenimiento del tramo IV se detallan de la siguiente manera:

**CUADRO 1.12: COSTOS DE MANTENIMIENTO DEL TRAMO 4: CATAHUASI – ALÍS**

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	METRADO	P.U.	PARCIAL
1	LIMPIEZA GENERAL	GLB	0.7	7229.25	4949.06
2	ELIMINACION DE DERRUMBES	M3	2,396.1	9.26	22187.50
3	ROCE	M2	49,701.1	0.28	13916.31
4	REPARACION Y LIMPIEZA DE BAJADAS DE AGUA	M	24.6	75.52	1861.20
5	TRATAMIENTO DE FISURAS CON SELLANTE ELASTOMERICO	M	14,910.3	8.07	120326.35
6	TRATAMIENTO DE FISURAS EN BLOQUE	M	14,910.3	5.65	84243.35
7	PARCHADO	M3	50.0	91.88	4591.70
8	BACHEO DE BERMAS	M3	6.8	28.03	191.89
9	SELLO	M2	29,779.6	37.41	1114054.12
10	ENCAUZAMIENTO DE CURSOS DE AGUA	M3	684.6	6.51	4456.67
11	LIMPIEZA DE ALCANTARILLAS	UNID	23.3	41.82	973.40
12	LIMPIEZA DE CUNETAS	M	49,701.1	1.47	73060.61
13	LIMPIEZA DE PUENTES	UNID	4.8	112	536.72
14	REPINTADO DE MUROS	M2	13.7	5.16	70.65
15	LIMPIEZA DE SEÑALES	UNID	98.6	1.75	172.52
16	LIMPIEZA DE HITOS	UNID	50.0	1.75	87.46
17	LIMPIEZA DE GUARDAVIAS	M	2,738.4	2.17	5942.22
18	REPOSICION DE SEÑAL INFORMATIVA	UNID	2.1	504	1035.10
19	REPOSICION DE SEÑAL PREVENTIVA	UNID	2.1	265.08	544.41
20	REPOSICION DE SEÑAL REGLAMENTARIA	UNID	2.1	408.8	839.58
21	REPOSICION DE HITOS KILOMETRICOS	UNID	2.1	39.41	80.94
22	REPOSICION DE GUARDAVIAS	UNID	2.7	164.81	451.31
23	MARCAS DEL PAVIMENTO	M2	11,638.0	10.1	117543.77
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X AÑO (S/.)</b>					<b>1,572,116.83</b>
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X MES (S/.)</b>					<b>131,009.74</b>
<b>PAGO POR MANTENIMIENTO MENSUAL (S/.)</b>					<b>103,353.80</b>

Fuente: Partidas y metrados de los Términos de Referencia del Contrato de Conservación de la Carretera Cañete – Chupaca. Precios Unitarios tomados de “Estudio de mantenimiento periódico de la Panamericana Sur, tramo Puente Santa Rosa - Puente Montalvo Km 1041+600 al Km 1139+795”



**CUADRO 1.13: COSTOS DE MANTENIMIENTO CON TRATAMIENTO SLURRY SEAL**

<b>TRAMO:</b>	Tramo Zuñiga - Yauyos	<b>KM INICIO:</b>	78+805.00
<b>ESTADO:</b>	Conservación Rutinaria, sobre monocapa	<b>KM FINAL:</b>	127+000.00
<b>INCIDENCIA:</b>	68%	<b>LONGITUD:</b>	48.20

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	METRADO	P. U.	PARCIAL
1	LIMPIEZA GENERAL	GLB	0.68	7229.25	4,949.06
2	ELIMINACIÓN DE DERRUMBES	M3	2,396.1	9.26	22,187.50
3	ROCE	M2	49,701.1	0.28	13,916.31
4	REPARACIÓN Y LIMPIEZA DE BAJADAS DE AGUA	M	24.6	75.52	1,861.20
5	TRATAMIENTO DE FISURAS CON SELLANTE ELASTOMERICO	M	14,910.3	8.07	120,326.35
6	TRATAMIENTO DE FISURAS EN BLOQUE	M	14,910.3	5.65	84,243.35
7	PARCHADO	M3	50.0	91.88	4,591.70
8	BACHEO DE BERMAS	M3	6.8	28.03	191.89
9	<b>SELLO CON SLURRY SEAL e=10mm</b>	M2	29,779.6	6.91	205,776.90
10	ENCAUZAMIENTO DE CURSOS DE AGUA	M3	684.6	6.51	4,456.67
11	LIMPIEZA DE ALCANTARILLAS	UNID	23.3	41.82	973.40
12	LIMPIEZA DE CUNETAS	M	49,701.1	1.47	73,060.61
13	LIMPIEZA DE PUENTES	UNID	4.8	112	536.72
14	REPINTADO DE MUROS	M2	13.7	5.16	70.65
15	LIMPIEZA DE SEÑALES	UNID	98.6	1.75	172.52
16	LIMPIEZA DE HITOS	UNID	50.0	1.75	87.46
17	LIMPIEZA DE GUARDAVÍAS	M	2,738.4	2.17	5,942.22
18	REPOSICIÓN DE SEÑAL INFORMATIVA	UNID	2.1	504	1,035.10
19	REPOSICIÓN DE SEÑAL PREVENTIVA	UNID	2.1	265.08	544.41
20	REPOSICIÓN DE SEÑAL REGLAMENTARIA	UNID	2.1	408.8	839.58
21	REPOSICIÓN DE HITOS KILOMETRICOS	UNID	2.1	39.41	80.94
22	REPOSICIÓN DE GUARDAVÍAS	UNID	2.7	164.81	451.31
23	MARCAS DEL PAVIMENTO	M2	11,638.0	10.1	117,543.77
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X AÑO (S/.)</b>					<b>663,839.61</b>
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X MES (S/.)</b>					<b>55,319.97</b>
<b>PAGO POR MANTENIMIENTO MENSUAL (S/.)</b>					<b>103,353.80</b>

Fuente: Precios Unitario del Slurry Seal tomado del Proyecto Vial de la empresa Graña y Montero

**CUADRO 1.14: COSTOS DE MANTENIMIENTO CON SELLO BITUMINOSO OTTA SEAL**

<b>TRAMO:</b>	Tramo Zuñiga - Yauyos	<b>KM INICIO:</b>	78+805.00
<b>ESTADO:</b>	Conservación Rutinaria, sobre monocapa	<b>KM FINAL:</b>	127+000.00
<b>INCIDENCIA:</b>	68%	<b>LONGITUD:</b>	48.20

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	METRADO	P. U.	PARCIAL
1	LIMPIEZA GENERAL	GLB	0.7	7229.25	4,949.06
2	ELIMINACIÓN DE DERRUMBES	M3	2,396.1	9.26	22,187.50
3	ROCE	M2	49,701.1	0.28	13,916.31
4	REPARACIÓN Y LIMPIEZA DE BAJADAS DE AGUA	M	24.6	75.52	1,861.20
5	TRATAMIENTO DE FISURAS CON SELLANTE ELASTOMERICO	M	14,910.3	8.07	120,326.35
6	TRATAMIENTO DE FISURAS EN BLOQUE	M	14,910.3	5.65	84,243.35
7	PARCHADO	M3	50.0	91.88	4,591.70
8	BACHEO DE BERMAS	M3	6.8	28.03	191.89
9	<b>SELLO CON OTTA SEAL e=32mm</b>	M2	29,779.6	7.44	221,560.08
10	ENCAUZAMIENTO DE CURSOS DE AGUA	M3	684.6	6.51	4,456.67
11	LIMPIEZA DE ALCANTARILLAS	UNID	23.3	41.82	973.40
12	LIMPIEZA DE CUNETAS	M	49,701.1	1.47	73,060.61
13	LIMPIEZA DE PUENTES	UNID	4.8	112	536.72
14	REPINTADO DE MUROS	M2	13.7	5.16	70.65
15	LIMPIEZA DE SEÑALES	UNID	98.6	1.75	172.52
16	LIMPIEZA DE HITOS	UNID	50.0	1.75	87.46
17	LIMPIEZA DE GUARDAVÍAS	M	2,738.4	2.17	5,942.22
18	REPOSICIÓN DE SEÑAL INFORMATIVA	UNID	2.1	504	1,035.10
19	REPOSICIÓN DE SEÑAL PREVENTIVA	UNID	2.1	265.08	544.41
20	REPOSICIÓN DE SEÑAL REGLAMENTARIA	UNID	2.1	408.8	839.58
21	REPOSICIÓN DE HITOS KILOMETRICOS	UNID	2.1	39.41	80.94
22	REPOSICIÓN DE GUARDAVÍAS	UNID	2.7	164.81	451.31
23	MARCAS DEL PAVIMENTO	M2	11,638.0	10.1	117,543.77
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X AÑO (S/.)</b>					<b>679,622.79</b>
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X MES (S/.)</b>					<b>56,635.23</b>
<b>PAGO POR MANTENIMIENTO MENSUAL (S/.)</b>					<b>103,353.80</b>

Fuente: Precios Unitario del Otta Seal tomado del Proyecto Vial de la empresa Graña y Montero

**CUADRO 1.15: COSTOS DE MANTENIMIENTO CON MICROPAVIMENTOS**

<b>TRAMO:</b>	Tramo Zuñiga - Yauyos	<b>KM INICIO:</b>	78+805.00
<b>ESTADO:</b>	Conservación Rutinaria, sobre monocapa	<b>KM FINAL:</b>	127+000.00
<b>INCIDENCIA:</b>	68%	<b>LONGITUD:</b>	48.20

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	METRADO	P.U.	PARCIAL
1	LIMPIEZA GENERAL	GLB	0.7	7229.25	4,949.06
2	ELIMINACION DE DERRUMBES	M3	2,396.1	9.26	22,187.50
3	ROCE	M2	49,701.1	0.28	13,916.31
4	REPARACION Y LIMPIEZA DE BAJADAS DE AGUA	M	24.6	75.52	1,861.20
5	TRATAMIENTO DE FISURAS CON SELLANTE ELASTOMERICO	M	14,910.3	8.07	120,326.35
6	TRATAMIENTO DE FISURAS EN BLOQUE	M	14,910.3	5.65	84,243.35
7	PARCHADO	M3	50.0	91.88	4,591.70
8	BACHEO DE BERMAS	M3	6.8	28.03	191.89
9	MICROPAVIMENTO e= 10 mm	M2	29,779.6	7.51	223,644.65
10	ENCAUZAMIENTO DE CURSOS DE AGUA	M3	684.6	6.51	4,456.67
11	LIMPIEZA DE ALCANTARILLAS	UNID	23.3	41.82	973.40
12	LIMPIEZA DE CUNETAS	M	49,701.1	1.47	73,060.61
13	LIMPIEZA DE PUENTES	UNID	4.8	112	536.72
14	REPINTADO DE MUROS	M2	13.7	5.16	70.65
15	LIMPIEZA DE SEÑALES	UNID	98.6	1.75	172.52
16	LIMPIEZA DE HITOS	UNID	50.0	1.75	87.46
17	LIMPIEZA DE GUARDAVIAS	M	2,738.4	2.17	5,942.22
18	REPOSICION DE SEÑAL INFORMATIVA	UNID	2.1	504	1,035.10
19	REPOSICION DE SEÑAL PREVENTIVA	UNID	2.1	265.08	544.41
20	REPOSICION DE SEÑAL REGLAMENTARIA	UNID	2.1	408.8	839.58
21	REPOSICION DE HITOS KILOMETRICOS	UNID	2.1	39.41	80.94
22	REPOSICION DE GUARDAVIAS	UNID	2.7	164.81	451.31
23	MARCAS DEL PAVIMENTO	M2	11,638.0	10.1	117,543.77
<b>COS TO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X AÑO (S/.)</b>					<b>681,707.36</b>
<b>COSTO DE MANTENIMIENTO RUTINARIO X MES (S/.)</b>					<b>56,808.95</b>
<b>PAGO POR MANTENIMIENTO MENSUAL (S/.)</b>					<b>103,353.80</b>

Fuente: Precios Unitario del Micropavimento tomado del Proyecto Vial de la empresa Graña y Montero.

#### 1.4 Evaluación:

De los cuadros anteriores se hará un cuadro resumen y se determinará la diferencia entre el costo por mantenimiento de la carretera sin considerar las alternativas de mantenimiento y considerándolas, así se podrá concluir cual de las alternativas resulta más conveniente.

Alternativas de Mantenimiento:

Alternativa 1: Utilización del Slurry Seal.

Alternativa 2: Utilización del Otta Seal.

Alternativa 3: Utilización de Micropavimentos.

**CUADRO 1.16: CUADRO RESUMEN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO**

TRAMO	LONG. (KM)	PAGO MENSUAL (S/.)	COSTO POR MANTEN. SIN ALTERNATIVAS	COSTOS CON ALTER. 1	COSTOS CON ALTER. 2	COSTOS CON ALTER. 3
4	48.20	103 353.80	131 009.74	55,319.97	56,635.23	56,808.95

Fuente: Elaboración Propia

Del cuadro anterior se observa que la mejor alternativa económica para mantenimiento es el Tratamiento Superficial Slurry Seal, siempre que se cumpla las siguientes condiciones:

- La mezcla no se aplicará cuando las condiciones climáticas obliguen a la apertura del tráfico antes de las 24 horas de fraguado del Slurry Seal.
- El Slurry Seal se colocará a temperaturas por encima de los 10°C ya que mezclas puestas a temperaturas más bajas por lo general no fraguan correctamente debido a la deshidratación.

### 1.5 La Viga Benkelman y su aplicación en la conservación vial.

La Viga Benkelman mide las deflexiones de las capas del pavimento, entonces la deflexión es una medida de la respuesta del conjunto Pavimento-Subrasante, frente a una determinada sollicitación, ubicando la adecuabilidad del mismo desde el punto de vista estructural. Esta capacidad estructural cumple con el diseño de refuerzos un rol de cierta forma semejante a la determinación del CBR o Módulo Resiliente del suelo de subrasante en el diseño de estructuras nuevas. La existencia de una correlación de deflexiones y la presencia o rápido desarrollo de fallas por fatiga y la posibilidad de establecer un orden favorable en relación al tránsito, constituye la base de su difundida utilización, es por tal razón que el Ensayo de Deflectometría con el uso de la Viga Benkelman es utilizado para la Conservación Vial.

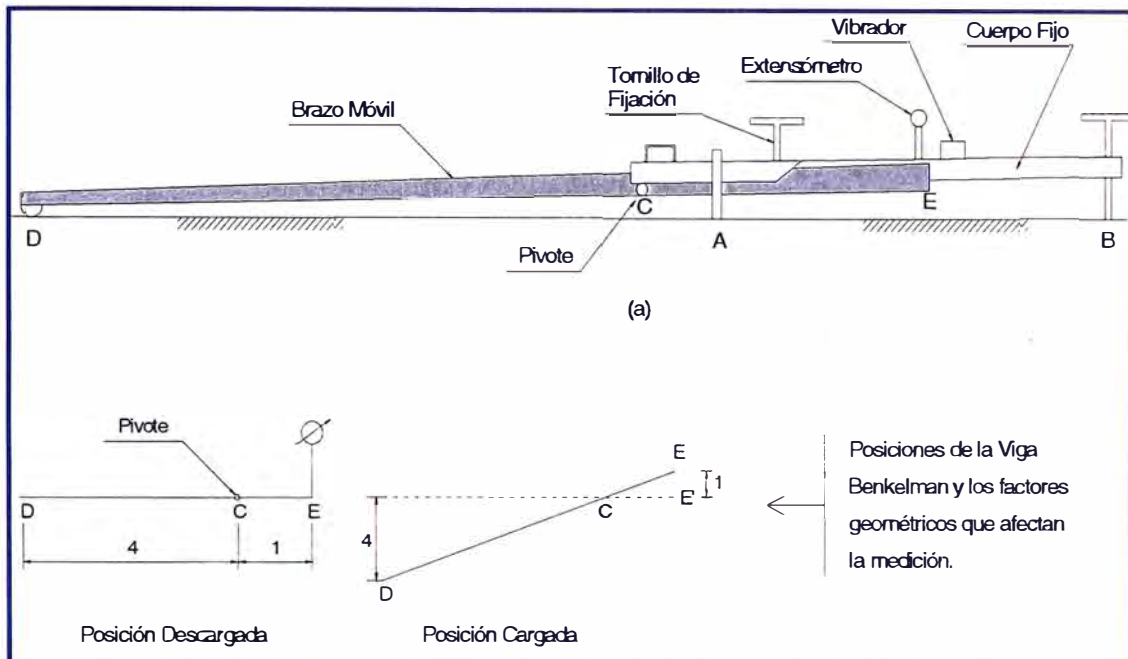
## CAPÍTULO II: VIGA BENKELMAN

### 2.1. Descripción del equipo:

El deflectómetro Viga Benkelman pertenece al grupo de los ensayos estáticos o quasi-estáticos, fue diseñada como parte del programa de ensayos viales de la WASHO (WASHO Road Test) por Daniel Benkelman, es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple y versátil, funciona según el principio de la palanca.

Según se esquematiza en la figura 2.1a, 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 (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 extensómetro 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, como se verá más adelante. El extremo "D" o "punta de la viga" es de espesor tal que puede ser colocado entre una de las llantas dobles del eje trasero de un camión cargado. Por el peso aplicado se produce una deformación del pavimento, consecuencia de lo cual la punta baja una cierta cantidad, con respecto al nivel descargado de la superficie. Como efecto de dicha acción el brazo DE gira en torno al punto fijo "C", con respecto al cuerpo AB, determinando que el extremo "E" produzca un movimiento vertical en el vástago del extensómetro apoyado en él, generando así una lectura en el dial indicador. Si se retiran luego las llantas cargadas, el punto "D" se recupera en lo que a deformación elástica se refiere y por el mismo mecanismo anterior se genera otra lectura en el dial del extensómetro. La operación expuesta representa el "principio de medición" con la Viga Benkelman. Lo que se hace después son sólo cálculos en base a los datos recogidos. Así, con las dos lecturas obtenidas es posible determinar cuánto deflectó 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

extensómetro (EE') no están en escala real sino que dependen de la relación de brazos existentes (Ver figura 2.1b).



**FIGURA 2.1: ESQUEMA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN**

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

## 2.2 Ensayo de Deflectometría:

La Deflectometría comprende las fallas de la superficie de rodadura. Los pavimentos al ser sometidos a cargas, sufren una deformación elástica, (se recupera al retirar la carga), que genera tracciones por lapsos muy cortos, las que debido a la frecuencia con que se repiten producen un fatigamiento del material. Ello significa que, con el tiempo, las sollicitaciones que impone el tránsito y el conjunto de factores climáticos de cada lugar, comienzan a superar el límite elástico de la estructura y las cargas producen deformaciones no elásticas o permanentes, para finalmente alcanzar la rotura. En consecuencia, la deflexión que presenta un pavimento en un determinado momento al ser sometido a una carga conocida, es un muy buen indicador de su capacidad estructural remanente. En la corrección de este tipo de fallas es necesario un refuerzo sobre el pavimento existente para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado.



### 2.2.1 Equipo requerido:

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

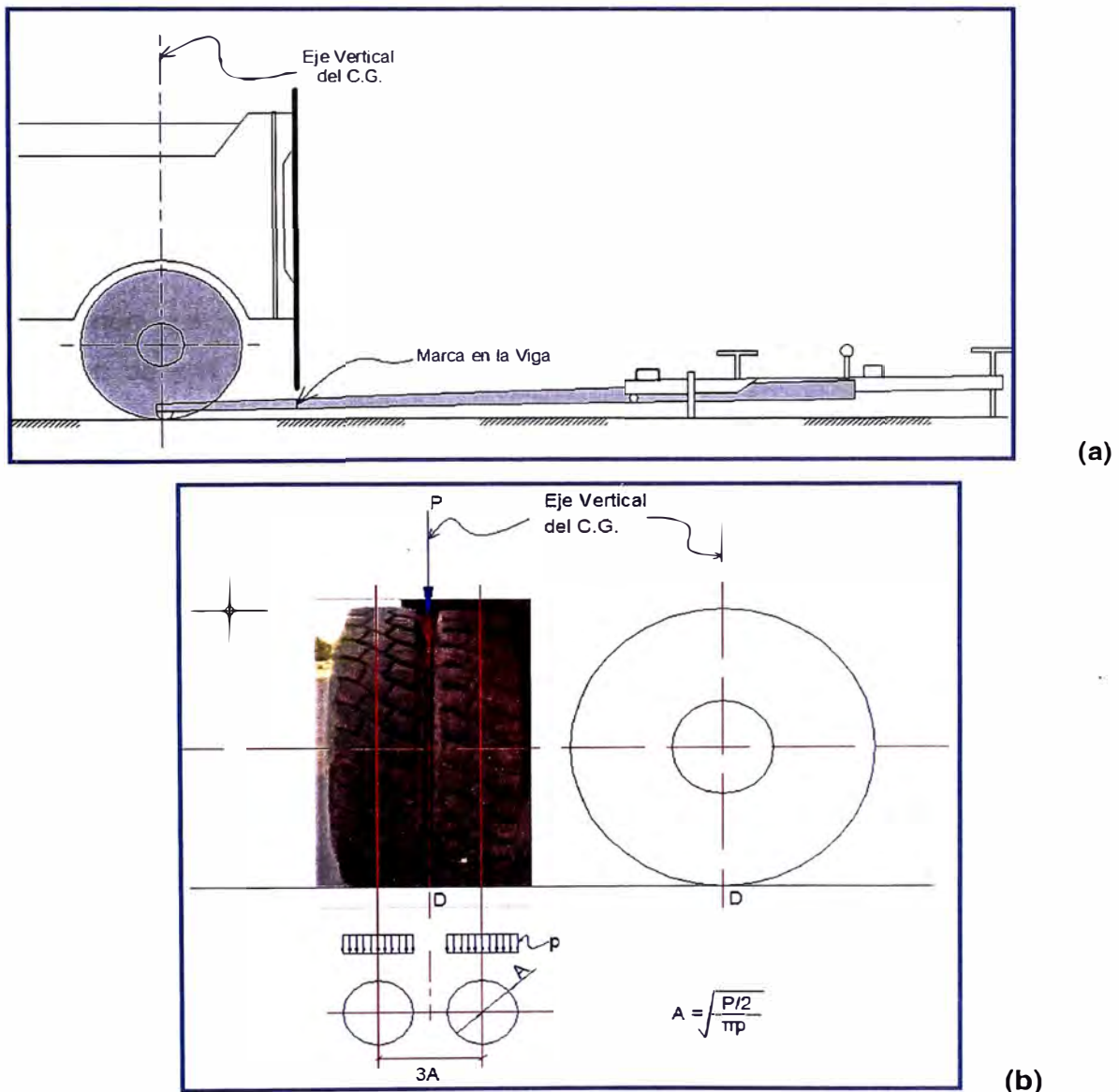
- i. Deflectómetro Viga Benkelman, tal como el modelo Soiltest HT-350 (con relación de brazos 1:2).
- ii. Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm (Modelo Soiltest HT-300M).
- iii. Camión cargado, con eje trasero de 18000 libras igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- iv. Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo misceláneo (camioneta).
- v. Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- vi. Accesorios de medición y varios (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 de amarre, etc.)

### 2.2.2 Procedimiento en el campo:

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 9000 libras (4090 kg), y es proporcionada por una de las llantas dobles del eje trasero de un camión. 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 2.2a, punto "D").

Para esta operación es aceptable una tolerancia en el rango de 3 pulgadas alrededor del punto. Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Dado que esto último se dificulta por la inaccesibilidad tanto visual como manual, se realizará previamente la siguiente operación: Se

coloca la Viga en la posición como si estuviera entre las llantas pero en la parte exterior de las mismas, haciendo coincidir, empleando una plomada, el extremo del brazo móvil con el eje vertical del centro de gravedad. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura 2.2.b), se efectúa una marca en la viga de manera tal que, en adelante, basta con hacerlas coincidir (la marca con la varilla vertical) para asegurarse que el extremo de la viga coincide con el centro de las llantas, en el momento de iniciar las mediciones.



**FIGURA 2.2: CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA EN ENSAYOS CON VIGA BENKELMAN**

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

De igual forma se puede efectuar, a partir de la primera, sucesivas marcas a distancias elegidas a las cuales se desee medir deflexiones adicionales (puede ser a 50 y 100 cm). 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, o si es que se desea tener una idea gráfica del tipo de curvas de deflexiones que se producen.

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 (obtenida en la marca inicial).

La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional. Estas dos distancias se determinarán específicamente para cada proyecto de evaluación que se emprenda. Esto deberá hacerse por medio de tanteos previos, antes de comenzar la recolección masiva de datos.

Es común que se observen variaciones durante la realización de los ensayos, pero no deberá hacerse modificaciones mientras que las deflexiones tomadas en la primera marca adicional estén en el rango entre 35% y 65% de la deflexión máxima.

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir la varilla vertical y la marca inicial (Ver figura 2.3a), se verificará que ésta esté 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 la primera y segunda marcas adicionales (figuras 2.3b,c) y una lectura final cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5m), registro que corresponde al punto de referencia con “deflexión cero” (figura 2.3d).



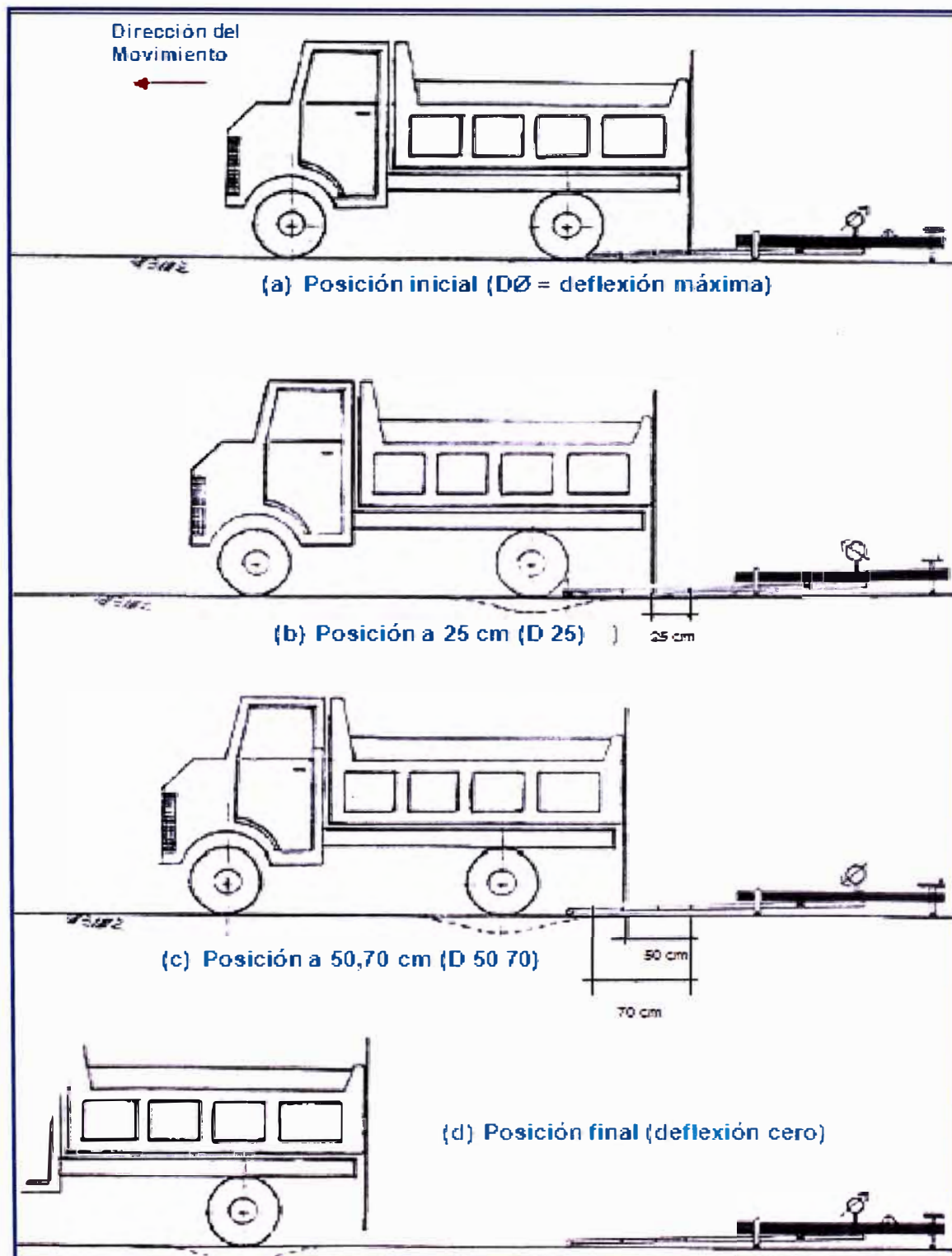


FIGURA 2.3: ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON VIGA BENKELMAN  
Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

<b>MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN - HOJA DE CAMPO</b>										
<b>SECTOR</b>			<b>OPERADOR:</b>							
<b>CARRIL</b>			<b>RELACION DE BRAZOS:</b>							
<b>SUPERFICIE</b>			<b>Relación Promedio del Brazo Corto:</b>							
<b>FECHA</b>			<b>Relación Promedio del Brazo Largo:</b>							
Nº	Progresiva (km)	Carril	Lecturas de Campo Brazo Largo (10-2mm)				L.C.B. Corto	Espesor (mm)	Ahuellamiento (mm)	Temp(°C)
			L25	L50	L70	Lmáx	Lmáx			
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

**FIGURA 2.4: HOJA DE CAMPO PARA RECOPIACIÓN DE DEFLEXIONES.**  
Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

Para la realización de esta rutina será necesario del concurso de 3 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 dé aviso cuando la varilla adosada al camión vaya coincidiendo con las marcas hechas en la viga. Todo el trabajo deberá ser supervisado permanentemente por un Ingeniero de Campo quien verificará los valores que se vayan obteniendo así como tomará anotación de cualquier factor que a juicio pueda explicar los resultados (Corte, relleno, tipo de material, presencia de alcantarillas, napa freática, estado del pavimento, etc.). La figura 2.4 muestra un formato adecuado para la recopilación de los datos de campo.

### 2.2.3 Cálculo de deflexiones y análisis

Una vez tomados los datos de campo, se procede al cálculo de las deflexiones para cada estación consiste en sustraer la lectura final (punto de referencia de deflexión cero) a cada una de las otras, representando las respectivas diferencias la deformación en dichos puntos, las cuales en conjunto definen la curva de deflexión de superficie del pavimento.

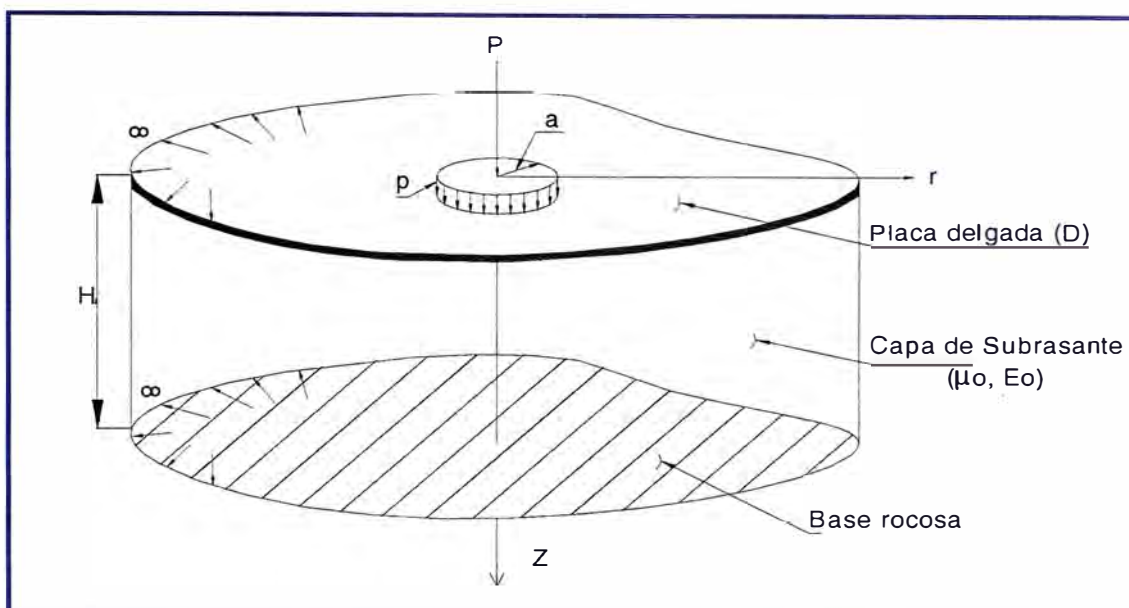
Para realizar el análisis de los numerosos datos de ensayos que se recopilan en un típico proyecto de evaluación estructural se han utilizados dos métodos, que son el Racional y el Empírico.

### 2.2.4 Método Racional (Modelo Matemático de Hogg)

La compleja realidad del pavimento en cuanto a su funcionamiento y estructura real, es un problema que los investigadores intentan solucionar, proponiendo modelos teóricos y, su adecuada representación matemática, a fin de reproducir y solucionar, con la mejor aproximación, el comportamiento del pavimento. El método de evaluación propuesto está basado en la interpretación de curvas de deflexiones reemplazando la estructura real con un modelo teórico. Para tal fin se hace uso del Modelo de Hogg. Este método es usado para analizar deflexiones obtenidas con la Viga Benkelman simple de un solo brazo.

#### a. El Modelo de Hogg.

En los años 1938 y 1944, A.H.A. Hogg presentó solución matemática del modelo que se conoce con su nombre, dicho modelo cumple con los requisitos mencionados en el ítem anterior. Éste representa al pavimento como una placa elástica de espesor delgado, horizontalmente infinita y, emplazada en una subrasante como una capa elástica homogénea, isotrópica y semi-infinita. Las cargas externas aplicadas al modelo pueden ser de distribución uniforme en un área circular de radio "a" o puntual, con respecto al espesor de la subrasante, Hogg, en el primer artículo lo representa como infinito más en el segundo como espesor finito, limitada por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa. La figura 2.5a describe la geometría y la figura 2.5b describe los parámetros del modelo de Hogg.



**FIGURA 2.5a: ESQUEMA DEL MODELO DE HOGG**

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

<b>PARÁMETROS BÁSICOS DEL MÓDULO</b>	$D = \frac{E_1 t^3}{12(1-\mu_1^2)}$	(t-m)	Rígidez a la flexión de la placa
	$l_0 = \frac{D(1+\mu_0)(3-4\mu_0)^{1/3}}{2(1-\mu_0)E_0}$	(cm)	Longitud característica
	$E_0$	(Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad de la Subrasante
	$\mu_0$	(Adimensional)	Módulo de Poisson de la Subrasante
	$H$	(cm)	Profundidad del estrato rocoso
<b>Parámetros de Evaluación</b>	$l_0, E_0, D$		Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas.

**FIGURA 2.5b: PARÁMETROS DEL MODELO DE HOGG**

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

## b. 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 cual para el caso de una carga uniformemente distribuida circular de radio “a” tiene la siguiente forma:

$$\Delta_{(z=0;r)} = \frac{(1+\mu_o)(3-4\mu_o)p.a}{2(1-\mu_o)E\phi} \int_0^{\infty} \frac{J_o(mr/1_o)J_1(ma/1_o)}{m^4 + m\phi(mh/1_o)} dm$$

donde  $\mu_o$ ,  $E\phi$ ,  $p$ ,  $1_o$ , están definidos en la ecuación anterior, “r” es la distancia horizontal en la superficie de la placa desde el eje de carga, y “ $\phi$ ” viene dada por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{\text{Senh } m \text{ Cosh } m + \frac{m}{3-4\mu_o}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3-4\mu_o)^2}}$$

Siendo “m” la variable de integración. Hoffman (1977) presentó la solución computarizada para la ecuación (2.1), la cual permitió la confección de nomogramas y tablas para el cálculo de deformaciones teóricas en cualquier punto de la superficie del sistema.

## c. 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 superficies teóricas, diseñadas mediante la ecuación 2.1, dependen solamente de la longitud elástica  $L\phi$  (Ver figura 2.6), lo que constituye una ventaja toda vez que, la experiencia demuestra, en la gran mayoría de los pavimentos evaluados o se desconoce el espesor o es difícil controlar su variación.

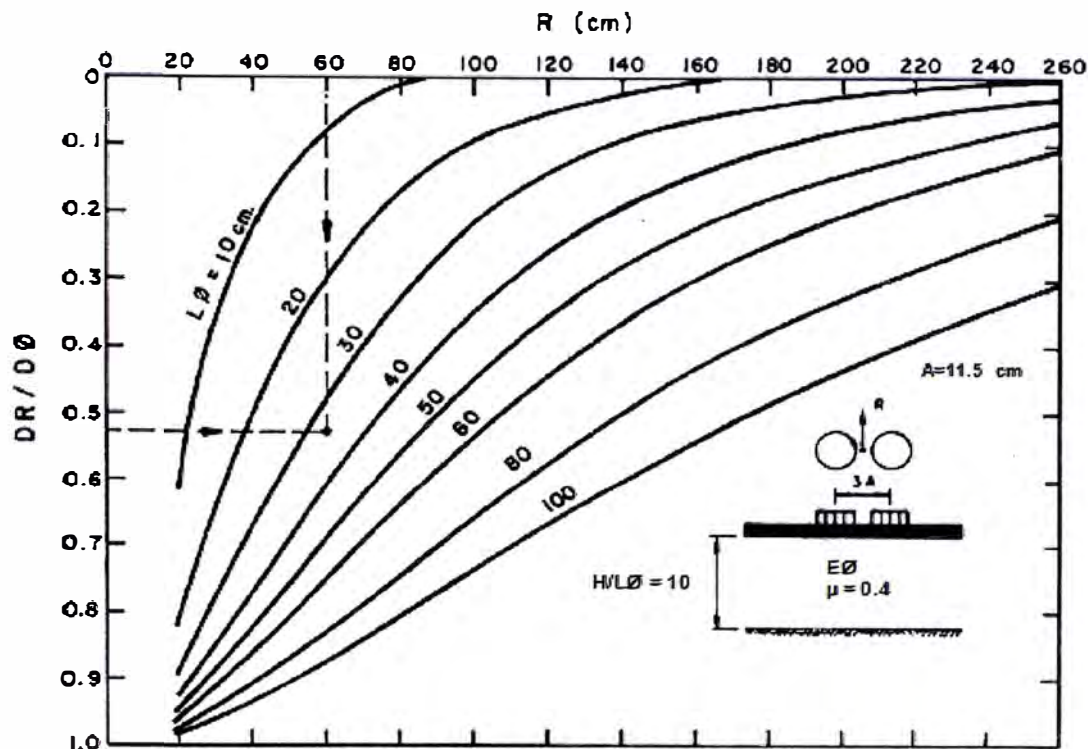


FIGURA 2.6: CURVA DE DEFLEXIONES EN EL MODELO DE HOGG PARA LA CONFIGURACIÓN DE CARGA PARA LA VIGA BENKELMAN

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara – Cancas

- 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 pueden obedecer a una conducta no lineal de los materiales del pavimento y subrasante y no implica necesariamente que realmente existe 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 ( $h=l_0$ ).



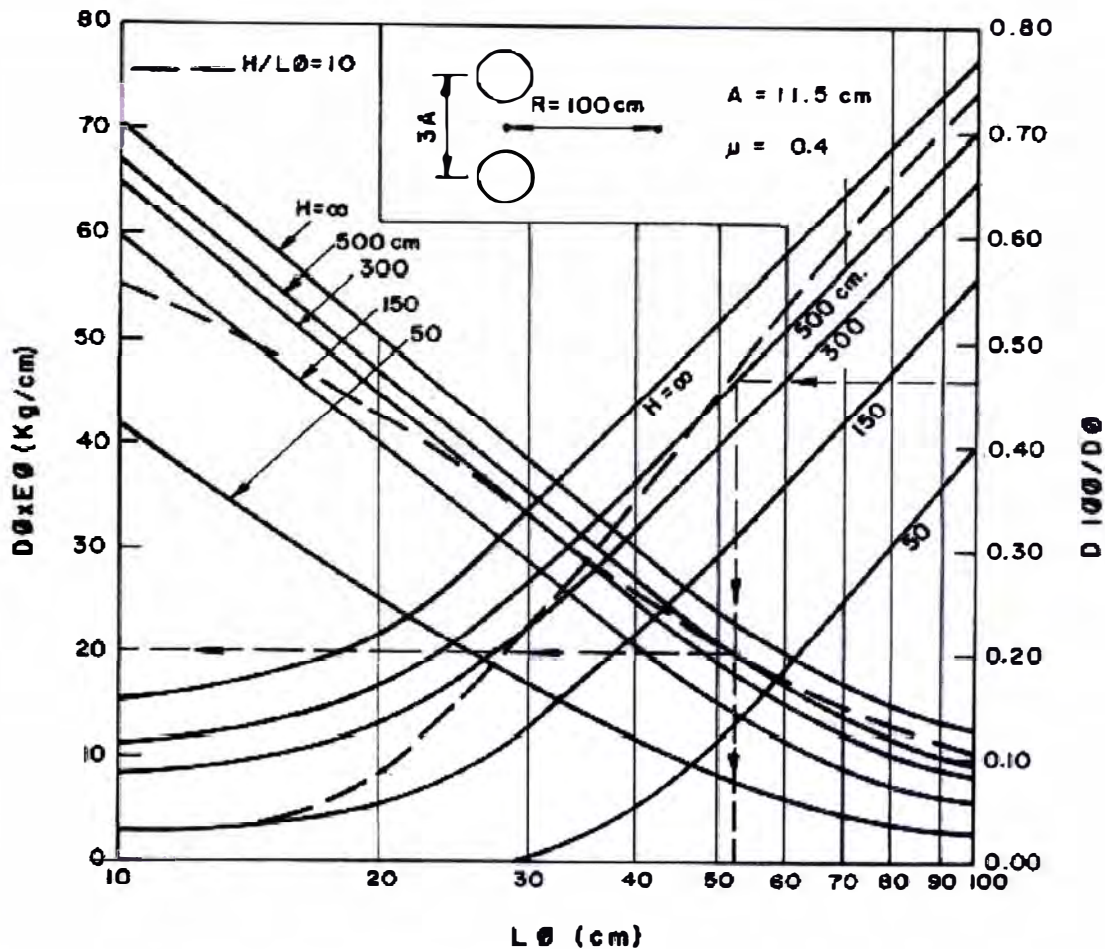


FIGURA N° 2.7: NOMOGRAMA PARA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL BASADO EN EL MODELO DE HOGG PARA LA VIGA BENKELMAN.

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

Las curvas y nomogramas como los presentados en las figuras 2.6 y 2.7, constituyen la implementación práctica del modelo para la evaluación estructural de pavimentos. La figura 2.2.5 muestra las curvas de deflexiones adimensionales ( $DR/D\phi$ ) 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  $D\phi=60 \times 10^{-2} \text{mm}$  y un  $DR=32 \times 10^{-2} \text{mm}$  a una distancia  $R$  de 60 cm., se obtiene un valor  $DR/D\phi=0.53$  que corresponde a un valor  $L\phi=34$  cms. La figura 2.7 muestra un nomograma preparado en base a las soluciones rigurosas del modelo de Hogg para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante ( $E\phi$ ). 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 capa rocosa. Así, por ejemplo, para  $D\phi=50 \times 10^{-2} \text{mm}$ .,  $D100/D\phi=0.46$  y  $h=500$  cm. se obtiene  $L\phi=52$  cm,  $D\phi E\phi=20$

kg/cm y  $E\delta=20/D\delta=20/0.05=400$  kg/cm<sup>2</sup>. Para facilitar su uso en la interpretación de curvas de deflexiones se han desarrollado programas de computadoras de fácil acceso y que pueden utilizarse en microcomputadoras o computadoras personales que pueden ser usadas en el campo. Estos programas contemplan desarrollos basados en el análisis numérico de los conceptos vertidos en ésta y en secciones sucesivas de este informe.

Para facilitar el análisis de los numerosos datos de ensayos que se recopilan en un típico proyecto de evaluación estructural, se han computarizado los procedimientos de interpretación. A continuación se presentan los diferentes pasos de interpretación con los respectivos algoritmos y ejemplos de su utilización.

Estos algoritmos pueden resolverse manualmente cuando no se dispone de una computadora. A pesar que la metodología presentada es para ensayos con la Viga Benkelman, ésta es adaptable a mediciones con otros aparatos o métodos de medición de deflexiones.

#### **d. Modelo de Carga**

La carga en el ensayo con la viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga del eje es del orden de las 18,000 libras y la presión de inflado es de 75 a 85 psi. En el modelo de carga (ver figura 2.2.1b) se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto, que la huella de contacto de cada llanta es circular y de radio "A" y, que hay una distancia de "3A" entre los centros de cada llanta. Por equilibrio se establece la siguiente relación:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (2.2.1)$$

Donde:

A= Radio de la huella circular de contacto

P = Carga sobre una llanta

p = Presión de inflado



De esta manera, si la carga del eje es 18,000 libras (4,500 libras por llanta) y la presión de inflado es 80 psi:

$$A = \sqrt{\frac{4,500}{\pi 80}} = 4.23" = 10.7 \text{ cm}$$

El análisis y el programa de computadora aceptan cualquier valor de carga y presión de inflado.

#### e. Determinación de R5

R5 es la distancia "R" del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación  $DR/D\phi=0.5$  en la curva de deflexiones. Para el modelo de Hogg se ha establecido que R5 puede determinarse usando la siguiente ecuación:

donde:

$$R5 = R \frac{A^C - B}{[A(D\phi / DR - 1)]^C - B} \quad (2.2.2)$$

R = Distancia a la que se mide la deflexión DR

(Ejem.: R=60 cm)

$D\phi$  = Deflexión máxima

DR = Deflexión a la distancia R

A, B y C = Coeficientes de correlación cuyo valor se indica en el cuadro 2.2.1

Ejemplo:

$\mu = 0.4$ ;  $H/L\phi = 10$ ;  $D\phi = 0.85 \text{ mm.}$ ;  $DR = 0.34 \text{ mm.}$

$R = 40 \text{ cm.}$ ;  $DR/D\phi = 0.34/0.85 = 0.40$

Usando la ecuación (2.2.2) se obtiene:

$$R5 = 40 \frac{2283.4^{0.2004} - 3}{(2283.4(2.5 - 1))^{0.2004} - 3}$$

$$R5 = 32.4 \text{ cm.}$$

El valor de R5 sirve de insumo para determinar la longitud elástica ( $L\phi$ ) del pavimento según se explica a continuación:

#### f. Determinación de La longitud Elástica ( $L\phi$ )

La longitud elástica ( $L\phi$ ) del pavimento puede calcularse usando la ecuación (2.2.3).

$$L\phi = \frac{Y.R5 + \sqrt{(Y.R5)^2 - 4.A.X.R5}}{2} \quad (2.2.3)$$

Donde:

R5 = Calculado en la ecuación (2.2.3)

A = Radio de la huella circular de carga

X, Y = Coeficiente de correlación cuyo valor se indica en el cuadro 2.2.1

Ejemplo:

$\mu = 0.4$ ;  $H/L\phi = 10$ ;  $R5 = 32.4 \text{ cm.}$ ;  $A = 10.7 \text{ cm}$

Usando la ecuación (2.2.3) se obtiene

$$L\phi = \frac{0.602 \times 32.4 + \sqrt{(0.602 \times 32.4)^2 - 4 \times 10.7 \times 0.192 \times 32.4}}{2}$$

$L\phi = 15.1 \text{ cm}$

El valor de  $L\phi$  sirve de insumo para determinar el módulo de elasticidad de la subrasante ( $E\phi$ ) según se explica a continuación:

**g. Determinación del Módulo de Elasticidad de la Subrasante ( $E\phi$ ):**

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante constituye un punto central de la metodología de evaluación. Para desarrollar soluciones numéricas programables en computadora, esta determinación se efectúa en 2 pasos:

- Primer Paso: El primer paso consiste en establecer la relación teórica entre la rigidez para carga puntual y la rigidez para carga distribuida sobre un área, para un cociente dado del valor  $A/L\phi$ . La rigidez se define como el cociente entre la carga y la deflexión ( $S=P/D\phi$ ).

La relación teórica se calcula por medio de la ecuación

$$S_o/S = 1 - M (A/L\phi - 0.10) \quad (2.2.4)$$

donde:

$S_o$  = Rigidez para carga puntual

$S$  = Rigidez para carga de área

$M$  = Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para  $H/L\phi = 10$ ;  $\mu = 0.5$ :  $M=0.52$

Para  $H/L\phi = 10$ ;  $\mu = 0.4$ :  $M=0.48$

Para  $H/L\phi = \infty$ ;  $\mu =$  Cualquier valor:  $M=0.44$

Por ejemplo: para  $A/L\phi=10.7/15.1=0.71$

$H/L\phi=10$   $\mu= 0.4$

Se obtiene:  $S_o/S = 1 - 0.48 (0.71-0.10)$

$S_o/S=0.71$

- Segundo Paso: Una vez determinado el valor de  $S_o/S$ , se calcula el módulo de elasticidad de la subrasante por medio de la siguiente ecuación:

$$E\phi = \frac{K.I.P}{L\phi.D\phi} S_o/S \quad (2.2.5)$$

donde :

K = Coeficiente numérico que depende del coeficiente de Poisson de la subrasante y que adopta los siguientes valores:

Para  $\mu = 0.5$ ;  $K=1.5$

Para  $\mu = 0.4$ ;  $K = 1.633$

I= Coeficiente numérico que adopta los siguientes valores:

Para  $H/L\phi = 10$ ;  $\mu = 0.4$        $I = 0.1689$

Para  $H/L\phi = 10$ ;  $\mu = 0.5$        $I = 0.1614$

Para  $H/L\phi = \infty$ ;  $\mu =$  cualquier valor :  $I = 0.1925$

P = Carga total en la llanta doble

$L\phi$ =Longitud elástica (ecuación 2.2.5)

$D\phi$ = Deflexión medida máxima

Ejemplo:

$H/L\phi = 10$ ;  $\mu = 0.4$ ;  $P = 9000$  lbs. (4086 kg)

$L\phi = 15.1$  cm.;  $D\phi = 0.85$  mm.;  $S_o/S = 0.71$

Entonces:

$K = 1.633$

$I = 0.1689$

Y usando la ecuación (2.2.5)

$$E\phi = \frac{1.633 \times 0.1689 \times 4086 \times 0.71}{15.1 \times 0.085}$$

$$E\phi = 623 \text{ kg/cm}^2$$

**h. Cálculo del módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E\*)**

El módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E\*) representa a todas las capas del pavimento por encima de la subrasante. Para un pavimento flexible típico, compuesto de carpeta asfáltica y base granular, el módulo E\* representa a la carpeta y la base combinadas con un espesor total igual a la suma de los espesores de cada capa.

Una solución programable aproximada ha sido propuesta por Ullidtz (1977, 1980) y se basa en los siguientes conceptos. El módulo combinado (E\*) de la carpeta asfáltica y la base, con un espesor HC=H1+H2 se determina usando el concepto del espesor equivalente. Este espesor equivalente se determina de la siguiente ecuación:

$$HE=0.9 \times HC (E^*/E\phi)^{1/3} \quad (2.2.6)$$

La relación entre la deflexión máxima (D $\phi$ ), el módulo de elasticidad de la subrasante (E $\phi$ ) y el módulo de elasticidad del pavimento (E\*) está expresada por la siguiente ecuación:

$$D\phi = \frac{(1+\mu)P}{2\pi} \left\{ \frac{1}{E^*} \left[ \frac{2(1-\mu)}{r} - \frac{1}{R1} (2(1-\mu) + \left(\frac{Z1}{R1}\right)^2) \right] + \frac{1}{E\phi} \left[ \frac{1}{R2} (2(1-\mu) + \left(\frac{Z2}{R2}\right)^2) - \frac{1}{R3} (2(1-\mu) + \left(\frac{Z3}{R3}\right)^2) \right] \right\} \quad (2.27)$$

donde:

$$r = 1.5 A$$

$$R1 = \sqrt{Z1^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z1 = HC + 0.6A^2/HC$$

$$R2 = \sqrt{Z2^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z2 = HE + 0.6A^2/HE$$

$$HE = \text{Ecuación (2.2.6)}$$

$$R3 = \sqrt{Z3^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z3 = (HE + NL\emptyset) + 0.6A^2 / (HE + NL\emptyset)$$

N= 10 para base rocosa a espesor finito ( $H/L\emptyset=10$ )

N = 100 para base rocosa a espesor infinito ( $H/L\emptyset=\infty$ )

P= Carga de ensayo =  $\pi A^2 p$  (p=presión de inflado)

La ecuación (2.2.7) se resuelve iterativamente en la computadora para determinar el valor de  $E^*$  para cualquier combinación de valores de  $E\emptyset$ , HC, P, p,  $D\emptyset$ , R, DR,  $H/L\emptyset$  y  $\mu$ .

#### **i. 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:

- i) Datos de carga (P y p)
- ii) Deflexiones medidas ( $D\emptyset$ , DR y R)
- iii) Datos de pavimento (Espesores y características de las capas)
- iv) Parámetros del modelo ( $H/L\emptyset$  y  $\mu$ )

La metodología, por su parte, produce los siguientes datos de salida:  $L\emptyset$ ,  $E\emptyset$  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 proyecto y del criterio del Ingeniero, aunque es común y práctico medir, como mínimo,  $D\emptyset$ , D50 y D100 a distancias de 0, 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  $L_0$  y  $E_0$  siendo esta una característica importante del modelo de Hogg. El significado de los parámetros del modelo se discute a continuación.

**j. Significado de  $L_0$ :**

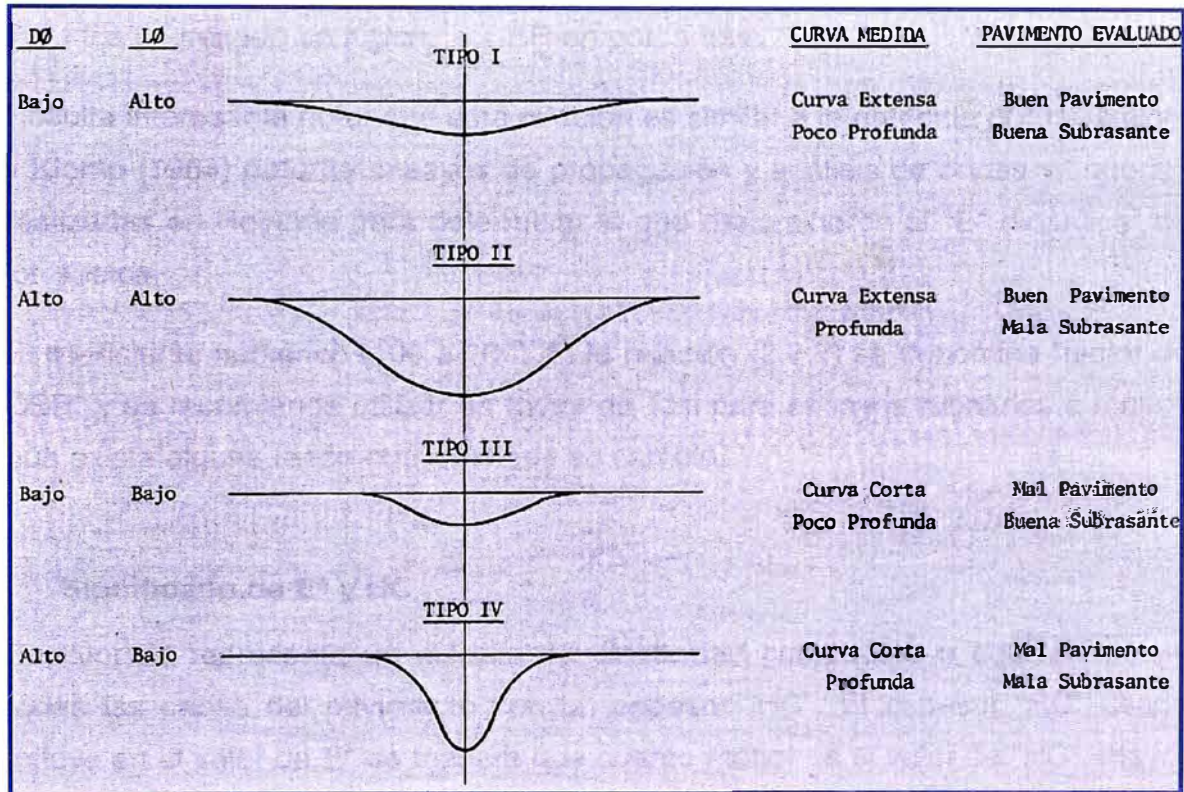
La longitud característica ( $L_0$ ) del pavimento es, por definición, un parámetro que refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante. Por tratarse de una relación de rigideces, el valor de  $L_0$  permite una rápida evaluación cualitativa del sistema pavimento-subrasante.

En un extremo de la escala puede pensarse en un pavimento rígido (losa de concreto) sobre una subrasante débil con un  $L_0$  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  $L_0$  del orden de los 15 cm. No hay que olvidar que se trata de una relación de rigideces de manera que un valor bajo de  $L_0$  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  $L_0$  en el proceso de evaluación depende solamente del cociente  $DR/D_0$  y del valor R. Es decir que 2 pavimentos cualesquiera con igual cociente  $DR/D_0$  a una misma distancia R dada, tiene el mismo  $L_0$  aunque DR y  $D_0$  sean diferentes. Los valores específicos de  $D_0$  y DR influyen en los módulos  $E_0$  y  $E^*$  según se explica más adelante.

**k. Significado de  $E_0$  y su relación con el CBR:**

El parámetro  $E_0$  representa el módulo de elasticidad de la masa de subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante. En la ecuación (2.2.6) puede verse que  $E_0$  es inversamente proporcional a  $D_0$  y a  $L_0$ , es decir que  $E_0$  es menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces  $S_0/S$  dada, y viceversa.

El primer caso corresponde a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y, en general pueden establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema que se ilustra en la figura 2.8.



**FIGURA 2.8: SIGNIFICADO CUALITATIVO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CURVAS DE DEFLEXIONES**

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

Cabe insistir que las de la figura 2.2.7 son relaciones comparativas generales que pretenden ayudar en la visualización del significado de  $E\theta$  y el pavimento en relación con las características de la curva de deflexiones medida.

A pesar que el módulo  $E\theta$  es un parámetro mecánico fundamental del subsuelo, se ha establecido, además, una relación entre este valor y el valor de CBR de la subrasante, para facilitar el diseño del refuerzo requerido o para verificar diseños usando métodos tradicionales. Esta relación ha sido establecida experimentalmente, comparando los valores de  $E\theta$  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:

$$E_{\emptyset} = 100 \text{ á } 160 \text{ CBR} \quad (2.2.8)$$

Para  $E_{\emptyset}$  expresado en  $\text{Kg/cm}^2$  y CBR en porcentaje.

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp (1964) 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 relación (2.2.8) se denomina “factor de CBR” y se recomienda utilizar un factor de 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio.

### I. Significado de $E^*$ y HC

El valor  $E^*$  representa un módulo de elasticidad compuesto o equivalente de todas las capas del pavimento con un espesor “HC”. El espesor “HC” usado influye en el valor de  $E^*$  de manera que cuanto menor es el valor de “HC”, mayor es el valor de  $E^*$  obtenido.

Los valores HC y  $E^*$  están interconectados y son, en cierta medida, intercambiables. Para ilustrar este concepto es conveniente pensar en términos de diseño: para una subrasante y tráfico dados el ingeniero de diseño puede optar por un espesor pequeño de excelentes materiales (bajo HC y alto  $E^*$ ) o un espesor grande de materiales mediocres (alto HC y bajo  $E^*$ ). En ambos casos el ingeniero trata de proteger a la subrasante contra esfuerzos excesivos y cuenta para esto con varias combinaciones de HC y  $E^*$  (los extremos serían un pavimento rígido vs. un pavimento flexible).

En base a consideraciones de diseño y a la teoría de capas elásticas, Hoffman (1977) ha establecido que un pavimento flexible, adecuadamente diseñado, debe guardar una relación modular  $EP/E_{\emptyset}$  entre 2 y 4, pudiéndose usar, para fines prácticos, la relación.

$$EP = 3 E_{\emptyset} \quad (2.2.9)$$

En base al concepto de rigidez flexionante, se plantea que si el pavimento evaluado con módulo de elasticidad  $E^*$  y espesor HC es equivalente a un pavimento nuevo con módulo EP y espesor HEQ, se debe guardar la siguiente relación entre la rigidez flexionante del pavimento evaluado y la del pavimento nuevo:

$$E^* (HC)^3 = EP (HEQ)^3 \quad (2.2.10)$$

Introduciendo la relación (2.2.9) en la ecuación (2.2.10) se obtiene que:

$$E^* (HC)^3 = 3E\phi (HEQ)^3 \quad (2.2.11)$$

$$\text{ó} \quad \frac{HEQ}{HC} = \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{E^*}{E\phi} \right)^{1/3} \quad (2.2.12)$$

La ecuación (2.2.12) constituye la base para asignar un crédito estructural al pavimento existente con módulo  $E^*$  y espesor HC desde el punto de vista del diseño. Por ejemplo, si un pavimento evaluado tiene una relación modular  $E^*/E\phi$  de 3, su HC es totalmente utilizable desde el punto de vista estructural ( $HEQ/HC=1$ ). En cambio, si la relación modular evaluada es 2, sólo un 87% del HC cuenta como espesor estructural utilizable. Por el contrario, si la relación modular evaluada es 5, el espesor estructuralmente utilizable es igual al 118% de HC dando así crédito al buen módulo  $E^*$  evaluado en el pavimento existente. El espesor HEQ puede considerarse entonces como el espesor efectivo en términos de “base granular” del pavimento existente de acuerdo a los valores de HC,  $E^*$  y  $E\phi$  evaluados.

El siguiente paso consiste en la comparación entre este espesor efectivo y el espesor requerido para una demanda anticipada de tráfico, para establecer las necesidades de refuerzo estructural.

$$DH = HD - HEQ \quad (2.2.13)$$

donde:

DH = Espesor del refuerzo de material granular

HD = Espesor requerido de diseño

HEQ= Espesor efectivo del pavimento existente

**m. Diseño del Refuerzo:**

Para ilustrar el concepto del diseño del refuerzo considérese el método de diseño para pavimentos de mediano volumen de tráfico propuesto por el Laboratorio de Investigación del Transporte Vial Británico (TRRL, 1982). Las curvas de diseño originales, basadas en el concepto de CBR, pueden aproximarse analíticamente por medio de la siguiente expresión:

$$HD = \text{CBR}^{-0.59} (4.63 + 6.09 \log N_{18}) \quad (2.2.14)$$

donde:

HD = Espesor requerido de diseño en pulgadas de material de base (CBR=80%)

CBR = CBR de diseño de la subrasante

N<sub>18</sub> = Número de aplicaciones de diseño del eje de carga equivalente de 18 kilolibras

La aproximación señalada es válida para valores de N<sub>18</sub> entre 10<sup>4</sup> y 10<sup>6</sup>. Por ejemplo, para un CBR de diseño de 4% y un N<sub>18</sub> de 10<sup>6</sup> aplicaciones, la ecuación (2.2.13) da un espesor requerido de diseño de 18.2 pulgadas (46.0 cm) de base granular.

Supóngase ahora que en un pavimento evaluado se han establecido los siguientes valores:

$$HC = 40 \text{ cm}, E^*/EO=2.0, \text{ CBR}=4\%$$

De acuerdo a la ecuación (2.2.13) el espesor equivalente de este pavimento es:

$$\frac{HEQ}{HC} = \left( \frac{1}{3} \cdot 2 \right)^{1/3} = 0.87$$

$$\text{y HEQ} = 0.87 \times 40 = 35 \text{ cm}$$

Si se planteara reforzar estructuralmente este pavimento para una demanda adicional de tráfico de 10<sup>6</sup> aplicaciones del eje de 18 kilolibras, el espesor del refuerzo sería, de acuerdo a la ecuación (2.2.13)

$$DH = 46.0 - 35 = 11.0 \text{ cm}$$



Este DH obtenido representa un espesor requerido de base granular, el cual puede ser convertido en espesor requerido de carpeta asfáltica usando factores de equivalencia, que en la literatura fluctúan entre 1.5 y 4.0 cm. de base por cm de carpeta asfáltica (1.5 para la FAA y 3.2 a 4.0 para la AASHTO). Adoptando un factor de equivalencia de 3.0 (a tono ilustrativo) y siguiendo con el ejemplo analizado, se requiere un refuerzo asfáltico de unos 4.0 cm. En forma similar se pueden determinar las necesidades de refuerzo de cualquier pavimento.

Una de las ventajas destacables de la metodología propuesta radica en el cálculo del espesor efectivo del pavimento evaluado (HEQ) dando crédito estructural al espesor existente (HC) de acuerdo a su condición ( $E^*$ ).

#### **n. Los parámetros $H/L\phi$ y $\mu$**

La metodología de evaluación permite la selección de la profundidad de la “capa rocosa” y puede optarse por el valor  $H/L\phi = 10$  ó  $H/L\phi = 100$  que corresponde a una capa rocosa en el infinito. La adopción de uno u otro valor de  $H/L\phi$  influye en todos los resultados de la evaluación:  $L\phi$ ,  $E\phi$  (CBR) y  $E^*$ .

Para estudios rutinarios se recomienda el uso del  $H/L\phi = 10$  que implica que la capa rocosa se encuentra a una profundidad igual a 10 veces la longitud característica del pavimento. Así, para un  $L\phi$  de 20 cm. se asume una capa rocosa de 2.0 m de profundidad, para  $L\phi$  igual a 40 cm. la capa rocosa se encuentra a 4.0 m de profundidad, y así sucesivamente. Como se indicó previamente, el uso de un  $H/L\phi$  finito (10 en este caso) produce resultados de evaluación más satisfactorios y representativos.

El valor  $H/L\phi = 100$  (capa rocosa en el infinito) puede usarse para evaluar la sensibilidad de los resultados o para verificar el grado de concordancia entre curvas de deflexiones medidas y curvas teóricas cuando se cuenta con varios valores de deflexiones medidos a diferentes distancias de eje de la carga. Este chequeo es, a propósito, un método legítimo para verificar los resultados de evaluación según se ilustra más adelante. En cuanto al coeficiente de Poisson,  $\mu$ , las soluciones aceptan los valores de 0.4 y 0.5, recomendándose el uso del valor 0.4 para trabajos rutinarios. De todas maneras, las diferencias en los resultados entre uno u otro valor no exceden típicamente del 10%.



**CUADRO 2.1: COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE R5 EN EL MODELO DE HOGG**

H/L $\phi$	$\mu$	A	B	C
$\infty$	Cualquier Valor	3.115	0	0.584
10 DR/D $\phi$ >0.7	0.5	2.460	0	0.592
10 DR/D $\phi$ <0.7	0.5	371.1	2	0.219
10 DR/D $\phi$ >0.426	0.4	2.629	0	0.548
10 DR/D $\phi$ <0.426	0.4	2283.4	3	0.2004

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

**CUADRO 2.2: COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DE L $\phi$  EN EL MODELO DE HOGG**

H/L $\phi$	$\mu$	X	Y
10	0.5	0.183	0.620
10	0.4	0.192	0.602
$\infty$	Cualquier Valor	0.180	0.525

Fuente: Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Carretera Talara - Cancas

### 2.2.5 Método Empírico (CONREVIAl)

Para la presente evaluación se ha adoptado la metodología del Estudio del MTC CONREVIAl (desarrollada por el Dr. Celestino Ruiz, en la década del 70, en Argentina), el cual calcula la Deflexión Característica (Dc) y la Deflexión Admisible (Da) para luego realizar una comparación y determinar si  $Da > Dc$ , si resultara afirmativa ésta condición, se afirmaríA que la capacidad estructural del pavimento tiene un adecuado comportamiento, de lo contrario se concluiríA que la capacidad estructural necesitaríA un refuerzo. Adicionalmente se ha

determinado el Radio de Curvatura, que depende directamente de la deformación por tracción y del espesor de las capas asfálticas.

### a. Deflexiones

La deflexión es una medida de carácter elástico, pero intervienen esfuerzos plásticos. Los primeros desaparecen en cuanto se renuevan las cargas y los segundos son permanentes y su acumulación a través de las reiteraciones de las cargas produce las distorsiones de ahuellamiento en la superficie del pavimento.

Por ese motivo, se distinguen tres tipos de deflexiones:

- i) Deflexión Total ( $D_T$ ): Es la deformación vertical puntual de una superficie bajo la acción de una carga.
- ii) Deflexión recuperable o Elástica ( $D_r$ ): Es la recuperación Elástica de la superficie que se produce al retirar la carga.
- iii) Deflexión permanente o residual ( $D_p$ ): Es la diferencia entre la posición original de la superficie antes de aplicar la carga y después de retirarla.

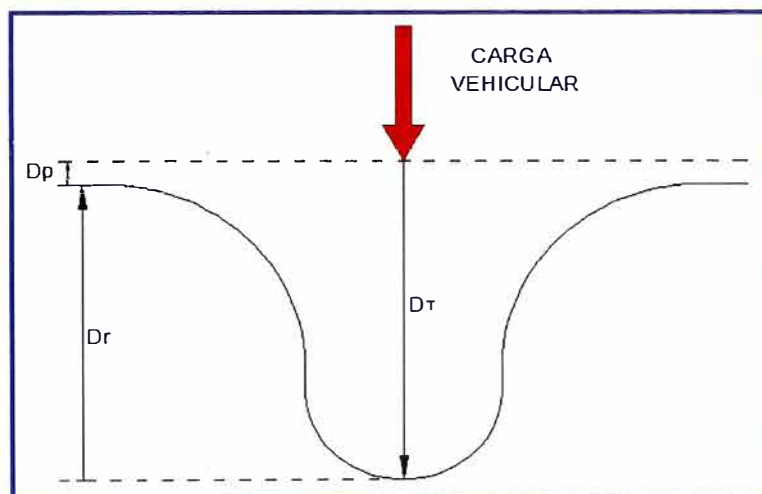


FIGURA 2.9: TIPOS DE DEFLEXIONES

Fuente: Estudio CONREVIAl

### b. Cálculo de Deflexiones Recuperables ( $D_r$ )

El procedimiento para el cálculo de las deflexiones es simple. Para el caso de la deflexión máxima, se debe calcular la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final. Para el caso de la deflexión a 25 cm se debe encontrar la diferencia entre

la lectura a 25 cm y la lectura final. Las diferencias entre ambos casos se multiplican por la relación de brazos de la Viga Benkelman empleada.

### c. Corrección por temperatura

La temperatura de la capa asfáltica de rodadura, afecta al valor de la magnitud de la deflexión, esto se debe a la disminución de rigidez de las mezclas bituminosas, por lo que el efecto dependerá del espesor de dichas capas y de la rigidez de las capas subyacentes. Por lo cual las deflexiones medidas sobre la superficie de un pavimento asfáltico deben ser corregidas en función a una temperatura estándar.

Si las carpetas asfálticas son de espesor grueso, se especifica que el rango de temperatura para la ejecución de los ensayos, este entre 5 a 30°C, con la finalidad que no se produzcan deformaciones plásticas considerables; y para el caso de tratamientos superficiales bituminosos de dicho rango se ha ampliado hasta 38°C, y en virtud al escaso aporte estructural de los mismos CONREVIAl considera no necesario efectuar corrección por temperatura.

A fin de referir todas las deflexiones a una temperatura estándar de 20°C, se emplea la siguiente expresión según la Metodología de la División Vial Nacional (DNV – Argentina).

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

Donde:

$D_{(20^{\circ}\text{C})}$  : Deflexión recuperable a la temperatura estándar 20°C (0.01 mm).

$D_t$  : Deflexión recuperable a la temperatura "t" (0.01 mm).

$K$  :  $1 \times 10^3$ ; constante para capas granulares (1/cm $\times$ °C)

$t$  : Temperatura de la carpeta asfáltica de pavimento (°C).

$e$  : Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

#### d. Corrección por estacionabilidad

La capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimenta, por lo tanto, es deseable realizar las mediciones de deflexiones en el periodo más crítico del año, en relación a los factores ambientales predominantes en la zona en estudio, pero debido a la dificultad que existe en realizar las pruebas en situaciones ambientales críticas, se debe efectuar la corrección de las medidas de deflexiones a fin de tomar en cuenta dicho aspecto.

Para fines prácticos se propone el uso de los siguientes factores de corrección, Factor de Estacionabilidad (FE), según los estudios basados en Brasil, considerando el tipo de suelo de la subrasante y la época en que se realiza los ensayos.

CUADRO N° 2.3 FACTORES DE CORRECCIÓN POR ESTACIONABILIDAD

TIPO DE SUELO DE SUBRASANTE	ESTACION LLUVIOSA	ESTACION SECA
Arenosa - permeable	1.0	1.1 a 1.3
Arcillosa - sensible al agua	1.0	1.2 a 1.4

Fuente: Estudio CONREVIAL

#### e. Determinación del Radio de Curvatura ( $R_c$ )

El radio de curvatura de la línea elástica de Deflexión es una característica de fundamental importancia, que determina la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas elásticas al flexionar bajo las cargas, y en consecuencia, en el desarrollo del fisuramiento en forma de piel de cocodrilo.

Las primeras tentativas para expresar numéricamente la curvatura se basaron en relacionar la Deflexión máxima con el diámetro del área superficial deformada (índice de curvatura), lo que resulta algo aleatorio por las dificultades para fijar el punto donde la línea de deflexión es tangencial a la horizontal. Un análisis de los diversos procedimientos de medición permite comprobar que uno del más simple es el que está basado en la comprobación experimental; así 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,

la curvatura de la parábola queda definida por su parámetro, que en la zona de máxima curvatura se confunde practicante con el radio del círculo osculador en dicho punto. El radio de curvatura queda definido por la siguiente relación:

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

Donde:

$R_c$  = Radio de Curvatura en metros

$D_0$  = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de Milímetros.

$D_{25}$  = Deflexión recuperable en el eje vertical de la carga, en centésimas de milímetros, A 25 del eje de carga.

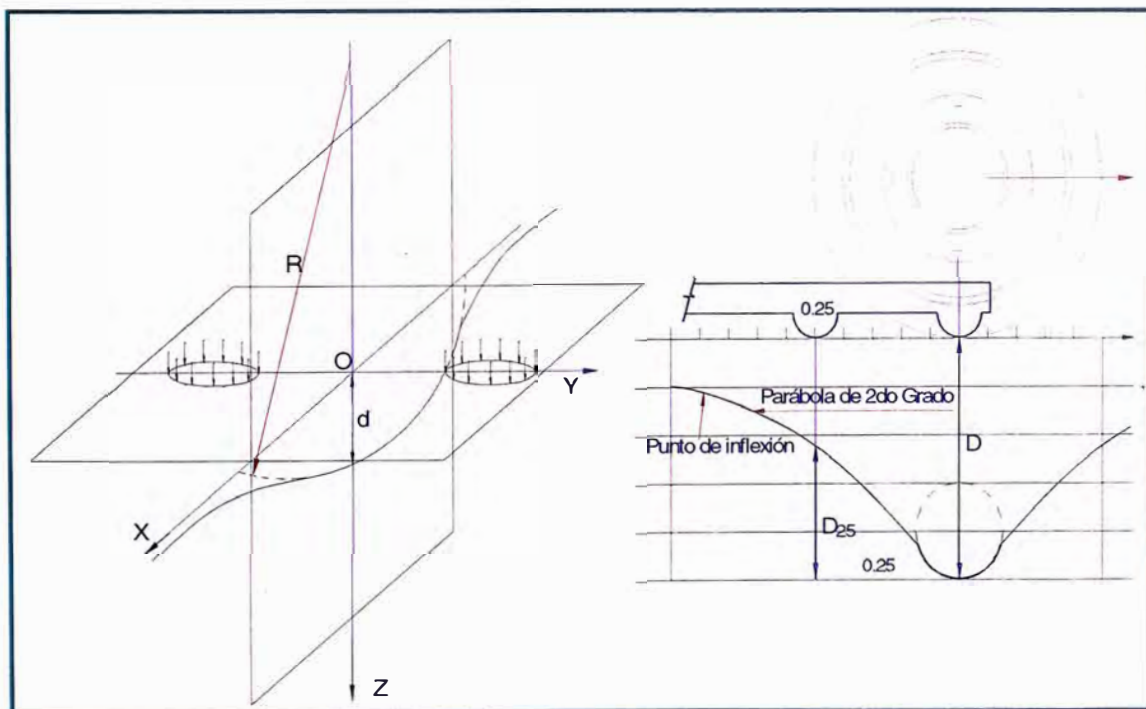


FIGURA 2.10: ESQUEMA CONCEPTUAL DEL RADIO DE CURVATURA

Fuente: Estudio CONREVAL

## f. Análisis Estadístico

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 ( $Cv$ ).

- **Deflexión Característica ( $D_c$ ):** Es un parámetro estadístico empleado para la caracterización representativa de la magnitud de deformación de pavimentos. Para su determinación es necesario contar con una base de datos de deflexiones máximas ( $D_o$ ), del tramo que se requiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos, siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se puede establecer como el valor:

$$D_c = D + t * \delta$$

Donde:

$D_c$  = Deflexión característica

$t$  = Coeficiente que representa el porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la  $D_c$ .

En el estudio del CONREVIAl se utiliza un valor  $t = 1.645$  que corresponde al 95 %, lo que equivale a considerar que, sólo un 5 % del área total del pavimento, tendrá deflexiones mayores a  $D_c$ , coincidentemente con lo propuesto por el Dr. Ruiz de Argentina. Dado que el estudio de deflexiones recuperables ha 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 ha determinado la deflexión media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Usando las siguientes expresiones:



**Deflexión media**

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

$D_i$  : Valor individual de un ensayo.

$n$  : Número de ensayos individuales

**Desviación estándar**

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

(\*  $n$  para  $n > 30$ )

**Coefficiente de variación**

$$Cv = \frac{\sigma}{D} \times 100$$

(Cv varía entre 10% a 40%)

- **Deflexión admisible ( $D_a$ )**, es un parámetro definido en función al tráfico de diseño, que establece un límite para la deflexión característica, por encima del cual no se garantiza un comportamiento satisfactorio de la estructura, durante el periodo considerado. La expresión analítica que define este parámetro según la metodología del Dr. C. Ruiz (Argentina):

$$D_a = (1.15 / N_{18})^{1/4}$$

Donde:

$D_a$  Deflexión Admisible inicial en mm

$N_{18}$  Número esperado de repeticiones de Ejes Equivalentes a 8.2 ton en el periodo de diseño (en millones).

La determinación del número de ejes equivalentes soportados se detalla en el ANEXO 2 del presente informe, el cual sigue las normas establecidas en el Manual de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de tránsito del MTC.

### **g. Deflectogramas**

El deflectograma constituye un elemento fundamental para el análisis de la variabilidad de la capacidad estructural, donde se podrá diferenciar secciones de distinta capacidad estructural en un mismo tramo. Con el Deflectograma se identifica secciones de diferente capacidad estructural y/o comportamiento, las que posteriormente serán procesadas estadísticamente; valores extremos aislados, que luego se eliminan ya que distorsionan los resultados, y también nos permite identificar los sectores donde se realizan las perforaciones representativas de buen y mal comportamiento estructural (calicatas).

### **h. Juicio de la capacidad estructural del pavimento.**

Una vez finalizadas las distintas tareas de campo y procesamiento de dato de campo, obteniendo resultado necesario, se debe llevar a cabo un análisis de los mismos, que conduzca a establecer la capacidad estructural del pavimento, en relación al tránsito que deba soportar la calzada.

Para lo cual existe la necesidad de establecer el tipo de rehabilitación requerida, de acuerdo a tres situaciones representativas, que se resume en:

Estructura adecuada, requiere de mejora superficial, estructura de fatiga, requiere de un esfuerzo estructural y estructura deficiente, requiere de reconstrucción parcial o total.

### **i. Espesor de refuerzo.**

Sabiendo que para la determinación de los espesores de refuerzo, se utiliza el método de reducción de las deflexiones con varias formulas que propone el documento CONREVIAl, se puede indicar que este método se basa sobre la reducción de la elongación vertical sobre la subrasante provista por una capa adicional de carpeta asfáltica de espesor "h". Ella sola es utilizable, si esta elongación es representativa del modo de ruptura del pavimento y de su daño, es decir, solamente en el caso de pavimentos flexibles con pocos espesores de carpeta asfáltica que continúan flexibles después del refuerzo. Es el caso de la mayoría de las carreteras en su primera rehabilitación. Para el cálculo de

espesor de refuerzo en los casos 1° y 2°, se emplea la Fórmula de Ruiz (Argentina), cuya expresión es:

$$h = \frac{R}{0.434} \log \frac{D_o}{D_h}$$

Donde:

h : Espesor de Refuerzo ( cm. )

Do : Deflexión Recuperable, característica del pavimento antes del refuerzo en centésimas de milímetros.

Dh : Deflexión Recuperable, característica del pavimento después del refuerzo en centésimas de milímetros.

R : Coeficiente con dimensiones de un espesor.

El coeficiente R, según el estudio CONREVIAL, menciona que, para el empleo de mezclas asfálticas de tipo superior como material de refuerzo, recomienda considerar el valor "R" mostrado en el cuadro 2.4.

CUADRO 2.4 ANÁLISIS COMBINADO DE LOS RESULTADOS DE EVALUACIÓN

DEFLECTOMETRÍA	ESTADO VISUAL	ESTADO ESTRUCTURAL	RECOMENDACIÓN
<p>La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son elevados o aceptables (en relación a la estructura). Dc &gt; Da</p> <p>Rc+</p>	No hay fallas de origen estructural.	<p>Estructura infradiseñada, que necesita con urgencia un esfuerzo estructural para resistir el tránsito futuro. Es necesario realizar perforaciones que avalen los espesores, naturaleza y estado de las capas. La capacidad portante de las capas decrece en profundidad. (No existe capa débil inmediatamente debajo capa asfáltica.</p>	<p>Examinar la fecha y tipo de las últimas obras ejecutadas para justificar estado del pavimento....1CASO.</p>
	<p>Hay fallas de origen estructural generalizadas a causa ajenas a la presencia de un espesor de base débil.</p>		<p>Hay acuerdo entre todas las variables a) Las deflexiones son empleadas para el cálculo del esfuerzo b) Para deflexiones muy fuertes analizar económicamente reconstrucción. Verificar refuerzo con métodos... 2° caso</p>
<p>La deflexión característica es superior a la admisible. Los radios de curvatura son pequeños (aun para deflexiones reducidas) Dc &gt; Da</p> <p>Rc-</p>		<p>Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfáltica (relación entre módulos de elasticidad menor de 1) La fallas por fatiga (agrietamiento, fisuras, tipo cuero de cocodrilo) observadas derivan de este caso.</p>	<p>Se trata de neutralizar el efecto de la capa que falla ya sea por reconstrucción parcial o por refuerzo. No es conveniente emplear la deflexión ya que puede no ser representativa. 3° caso</p>
<p>La deflexión característica es inferior a la admisible. Los radios de curvatura son reducidos. Dc &gt; Da</p> <p>Rc-</p>	<p>Hay fallas de origen estructural por fatiga (fisuras tipo piel de cocodrilo)</p>	<p>Existe una capa débil inmediatamente debajo de las capas asfálticas.</p>	<p>Analizar fecha de mediciones y tipo estructura. Neutralizar el efecto de la capa débil (reconstrucción o refuerzo) de ninguna manera se puede considerar las deflexiones para el proyecto; emplear métodos de diseño 4° caso.</p>
<p>La deflexión característica es inferior a la admisible. Los radios de curvatura son reducidos. Dc &gt; Da</p>	<p>Hay fallas de origen estructural: Deformaciones permanentes de la fundación.</p>	<p>Estructura degradada no adecuada para fundación.</p>	<p>Evaluar aporte estructural de la calzada existente (reconstrucción o refuerzo). la deflexión no es representativa... 4° caso</p>
	<p>No hay fallas de origen estructural.</p>	<p>Estructura bien diseñada.</p>	<p>Corregir fallas de origen superficial, las soluciones dependerán de los defectos observados y sus causas. Mejora superficial...5° caso.</p>

Fuente: Estudio CONREVIAl

El valor de "R" expresa la capacidad del material de refuerzo para reducir la deflexión del pavimento subyacente. Depende del material de refuerzo y de la rigidez relativa entre pavimento existente – refuerzo.

**CUADRO 2.5: VALORES RECOMENDADOS PARA R.**

Deflexión Característica antes del refuerzo en (0.01 mm)	Espesor de refuerzo "h"			
	5	10	15	20
50	20	21.5	(23)	(24.5)
70	18	19.5	21	22.5
90	17	18	19.5	21
120	15	16.5	18	19.5
150	13.5	15	16.5	18
170	13	14.5	16	17.5
200	12	13.5	15	16.5

Fuente: Estudio CONREVIAL

### 2.2.6 Evaluación del sector km 106+000 – km 108+000, perteneciente al Tramo Capillucas 94+640 – Dv. Yauyos 127+001.

En la visita de campo a la carretera en estudio el 15 de Mayo del 2010, se recopiló las mediciones de deflexiones recuperables con la Viga Benkelman de doble brazo, con la relación de brazos de 4:1 (promedio, debido a que la relación exacta es de 3.099/1.01) y un dial de precisión de 0.01 mm. También se midió la temperatura, espesor de carpeta de rodadura y el ahuellamiento en cada punto de ensayo. Esta recopilación de datos se realizó en hojas cuyo formato y datos se detalla a continuación:

**MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN - HOJA DE CAMPO**

SECTOR : CAÑETE - YAUYOS - CHUPACA OPERADOR : Varios

TRAMO : km 106+000 al km 108+000 RELACIÓN VP : 4:1 (prom.)

CARRIL : Izquierdo Relación Promedio del brazo corto : 3.99

SUPERF. : Carpeta Asfáltica Relación Promedio del brazo largo : 4.01

N°	Progresiva (km)	Lecturas de campo Brazo largo				LCB corto	Espesor (mm)	Ahuell. (mm)	Temp. (°C)	Ancho de Vía (m)	Obs.
		L25	L50	L70	Lmax	Lmax					
1	106+000	8	10	12	17	3	7.5	5	29	3.95	Monoc.
2	106+200	1	7	9	13	8	10	3	30	4.13	
3	106+400	2	9	13	24	19	10	1	32	4.67	Slurry
4	106+600	1	3	5	10	9	10	2	30	5.42	
5	106+800	3	5	6	8	5	5	2	31	3.63	Monoc.
6	107+000	2	6	9	14	9	5	3	29	4.2	
7	107+200	1	5	10	28	22	5	4	31	4.92	
8	107+400	3	9	11	14	8	4	4	33	4.5	
9	107+600	1	3	5	5	3	10	3	32	3.04	
10	107+800	1	5	7	11	4	5	2	31	4.34	
11	108+000	2	6	8	9	5	5	2	33	4.74	

**FIGURA N° 2.11: DATOS DE CAMPO**

Fuente: Elaboración propia

**2.3 Análisis y resultados**

Para el procesamiento de datos de las deflexiones, se utilizó el Método CONREVAL, con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel se obtuvo la Deflexión Característica (Dc) y la Deflexión Admisible (Da), los pasos que se siguieron se detallan a continuación:

- i. El dato de campo Lmax del Brazo Corto de la Viga Benkelman es tomado como L<sub>25</sub> y la lectura Lmax del brazo Largo será Lmax, como se observa en el Cuadro. 2.6.



- ii. La Viga Benkelman de doble brazo tiene una relación de brazos de 3.99:1.01, entonces se obtiene las “Deflexiones sin corregir”, multiplicando  $L_{25}$  por 4.01 y  $L_{max}$  por 3.99, es decir para la primera fila de la Cuadro 2.6:

$$L_{25} = 3 \times 10^{-2} \times 4.01 = 12.03 \times 10^{-2} \text{ mm.}$$

$$L_{max} = 17 \times 10^{-2} \times 3.99 = 67.83 \times 10^{-2} \text{ mm.}$$

CUADRO 2.6: CÁLCULO DE DEFLEXIONES SIN CORREGIR.

Progresiva (km)	Carril	Lecturas de Campo ( $10^{-2}$ mm)		Deflexiones sin corregir ( $10^{-2}$ mm)		Espesor (m)	Ahuellamiento (mm)	Temp (°C)
		$L_{25}$	$L_{m\acute{a}x}$	$D_{25}$	$D_{m\acute{a}x}$			
106+000	lzq.	3	17	12.03	67.83	0.008	5	32
106+200	lzq.	8	13	32.08	51.87	0.010	3	30
106+400	lzq.	19	24	76.19	95.76	0.010	1	31
106+600	lzq.	9	10	36.09	39.9	0.010	2	31
106+800	lzq.	5	8	20.05	31.92	0.005	2	32
107+000	lzq.	9	14	36.09	55.86	0.005	3	31
107+200	lzq.	22	28	88.22	111.72	0.005	4	29
107+400	lzq.	8	14	32.08	55.86	0.004	4	34
107+600	lzq.	3	5	12.03	19.95	0.010	3	33
107+800	lzq.	4	11	16.04	43.89	0.005	2	33
108+000	lzq.	5	9	20.05	35.91	0.005	2	33

Fuente: Elaboración propia

- iii. Para realizar el cálculo de las “Deflexiones corregidas” se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{25} (10^{-2} \text{ mm}) = \frac{FE \times D_t}{K \times (t - 20^\circ\text{C}) \times e + 1}$$

Donde:

FE : Factor de Estacionalidad.

$D_{(20^\circ\text{C})}$  : Deflexión sin corregir a la temperatura estándar  $20^\circ\text{C}$  (0.01 mm).

$D_t$  : Deflexión recuperable a la temperatura "t" (0.01 mm).

$K$  :  $1 \times 10^3$ ; constante para capas granulares (1/cm $\times$ °C)

$T$  : Temperatura de la carpeta asfáltica de pavimento (°C).

$e$  : Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

Reemplazando con datos del Cuadro 2.6, se obtiene la  $D_{25}$  Corregida:

$$D_{25} (10^{-2} \text{mm}) = \frac{1.1 \times 12.03}{10^{-3} \times (32 - 20) \times (7.5/10) + 1} = 13.11 (10^{-2} \text{mm})$$

Se realiza el mismo procedimiento para los demás datos, los resultados se pueden ver en el Cuadro 2.7

iv. Seguidamente se calcula el  $R_c$  con la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{10 \times 25^2}{2(D_0 - D_{25})} = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})}$$

$$R_c = \frac{3125}{73.95 - 13.11} = 51.37 \text{ (m)}$$

De igual manera para el resto de datos, los resultados se pueden ver en el Cuadro 2.7

v. Luego se debe calcular la  $D_{prom}$ , la Desviación Estándar ( $\delta$ ), y la Covarianza ( $C_v$ ) con los datos de las filas  $D_0 \times 10^{-2}$  mm del cuadro 2.7.

Entonces se obtuvo:

$$D_{prom} = 60.58 (10^{-2} \text{ mm})$$

$$\text{Desviación estándar } (\delta) = 29.99 (10^{-2} \text{ mm}).$$

$$\text{Covarianza } (C_v) = 49.51 (10^{-2} \text{ mm}).$$

Con estos datos obtenemos la Deflexión Característica  $D_c$ :

$$D_c = D_{prom} + t * \delta = 60.58 + 1.645 * 29.99 = 109.92 (10^{-2} \text{ mm}).$$

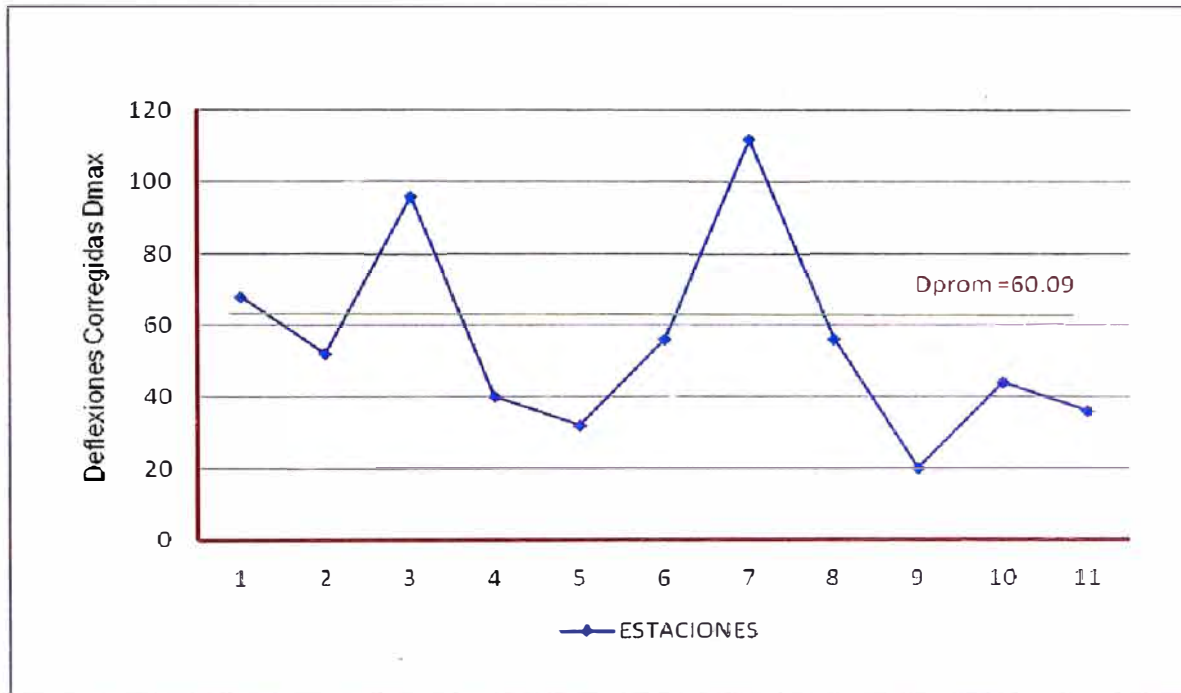
CUADRO 2.7: CÁLCULO DE DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA (Dc)

Progresiva (km)	Carril	Lecturas de Campo (10 <sup>-2</sup> mm)		Deflexiones sin corregir (10 <sup>-2</sup> mm)		Espesor (mm)	Ahuell. (mm)	Temp (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS		Radio C. (m)	Dprom	Coef. Variación	Desv.	Dc.
		L <sub>25</sub>	L <sub>máx</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>máx</sub>				Deflexiones corregidas						
									D <sub>25</sub> x 10 <sup>-2</sup> mm	D <sub>0</sub> x 10 <sup>-2</sup> mm					
106+000	lzq.	3	17	12.03	67.83	7.5	5	32	13.11	73.95	51.37	60.58	49.51	29.99	109.92
106+200	lzq.	8	13	32.08	51.87	10	3	30	34.94	56.49	144.99				
106+400	lzq.	19	24	76.19	95.76	10	1	31	82.90	104.19	146.76				
106+600	lzq.	9	10	36.09	39.9	10	2	31	39.27	43.41	753.85				
106+800	lzq.	5	8	20.05	31.92	5	2	32	21.92	34.90	240.77				
107+000	lzq.	9	14	36.09	55.86	5	3	31	39.48	61.11	144.49				
107+200	lzq.	22	28	88.22	111.72	5	4	29	96.61	122.34	121.43				
107+400	lzq.	8	14	32.08	55.86	4	4	34	35.09	61.10	120.14				
107+600	lzq.	3	5	12.03	19.95	10	3	33	13.06	21.66	363.36				
107+800	lzq.	4	11	16.04	43.89	5	2	33	17.53	47.97	102.67				
108+000	lzq.	5	9	20.05	35.91	5	2	33	21.91	39.25	180.29				

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de deflexiones corregidas se grafica el Deflectograma que indicará la variabilidad de la capacidad estructural del pavimento, donde se podrá diferenciar secciones de distinta capacidad estructural en un mismo tramo, en este caso el Tramo del km 106+000 – km 108+000.

**GRAFICO 2.1: DEFLECTOGRAMA**



Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de  $D_{prom} = 60.58$  ( $10^{-2}$  mm) y Desviación Estándar ( $\delta$ ), = 29.99, se deduce que los datos de deflexiones en las estaciones del tramo en estudio no se encuentran muy dispersos.

- vi. Se calcula la Deflexión Admisible ( $D_a$ ) en función al tráfico proyectado. Para ello se calcula el Numero esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 Ton en el periodo de diseño ( $N_{18}$ ). Se usará los IMD del 2009, obtenidos de los informes de ICCGSA (Mantenimiento por Niveles de servicio “Carretera Cañete- Dv. Yauyos – Ronchas).

Estos datos estarán dados en el ANEXO 01, y calculados en el ANEXO 02.

Los resultados obtenidos se observan en el Cuadro 2.8.

CUADRO 2.8: CÁLCULO DE DEFLEXION ADMISIBLE (Da)

Progresiva (km)	Carril	Dprom	Coef. Variación	Desv. Estándar	Dc	Tramo a evaluar 106+00 - 108+000 que está incluido en el Tramo Capillucas 94+640 - Dv. Yauyos 127+001							
						n=1	n=2	n=3	n=5	Conclusión			
						N <sub>18</sub> 0.021	N <sub>18</sub> 0.043	N <sub>18</sub> 0.066	N <sub>18</sub> 0.115	n=1	n=2	n=3	n=5
106+000	lzq.	60.58	49.51	29.99	109.92	272.03	227.41	204.31	177.83	Capacidad estructural del pavimento tendrá un comportamiento adecuado	Capacidad estructural del pavimento tendrá un comportamiento adecuado	Capacidad estructural del pavimento tendrá un comportamiento adecuado	Capacidad estructural del pavimento tendrá un comportamiento adecuado
106+200	lzq.					DEFLEXION ADMISIBLE (Da)							
106+400	lzq.												
106+600	lzq.												
106+800	lzq.												
107+000	lzq.												
107+200	lzq.												
107+400	lzq.												
107+600	lzq.												
107+800	lzq.												
108+000	lzq.												

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 Propuestas de Conservación:

Para cumplir con el objetivo de Conservación de las Carreteras, es importante resaltar que esta tarea está dada tanto para el Estado como para el usuario, partiendo de esta idea, se puede plantear las siguientes Propuestas de Conservación de carreteras:

- El estado debe mejorar el inventario vial calificado. Realizar inventarios anuales en el caso de vías asfaltadas y bianual en el caso de afirmadas. Para que el Estado pueda determinar el momento oportuno de intervención a la vía y evaluar la efectividad de las obras de rehabilitación y mantenimiento debe tener información puntual sobre los estados de las vías.
- Implantar la política de asignar recursos suficientes para la conservación vial que a largo plazo es sostenible y permitirá una óptima relación entre costos y beneficios. Lo que muchos países hacen, incluido el Perú, es tratar de “ahorrar” recursos que deben utilizarse en la conservación de los caminos, sin percatarse de que este “ahorro” significa un gasto futuro mucho mayor.
- Capacitar técnicamente a los administradores de las Carreteras, ya sean Gobiernos departamentales, regionales para la Conservación de Carreteras. Y a su vez estas entidades instruyan a los usuarios al correcto uso de las vías, respetando las velocidades permitidas, los pesos autorizados, las señales de tránsito, etc.
- Crear un derecho para la conservación que deben pagar los usuarios, preferentemente a través de la compra de gasolinas. Buscar acuerdos para el cobro de derechos específicos para mantenimiento a grandes usuarios de segmentos localizados de la red.
- Para el tramo en estudio, se plantea realizar trabajos de estabilidad de taludes, limpieza de cunetas artesanales, reparación de grietas.
- Realizar trabajos de Mantenimiento Rutinario y Periódico.



## CONCLUSIONES

- De los datos obtenidos de campo y al realizar el análisis de los mismos, se obtuvo como resultado que la Deflexión Característica ( $D_c$ ) es menor que la Deflexión Admisible ( $D_a$ ), entonces se podrá concluir que la estructura del pavimento tiene un adecuado comportamiento para el 2010, y para los próximos 5 años tendrá la misma tendencia.
- La toma de datos de campo con la Viga Benkelman es el procedimiento más importante del ensayo de evaluación estructural, ya que de esto depende que los datos sean comparables e indiquen el estado estructural de la vía y ante datos errados se obtendrá resultados errados.
- La desviación estándar de las deflexiones tuvo un valor igual a 29.99 ( $10^{-2}$  mm) que al compararlo con la  $D_{prom} = 60.58$  ( $10^{-2}$  mm) se puede concluir que los valores están dispersos en 30 ( $10^{-2}$  mm), pero están dentro de lo tolerable, según la estadística.
- Los radios de curvatura ( $R_c$ ) obtenidos de los análisis de datos de campo están comprendidos entre 51 y 700 m por lo tanto se concluye que son resultados elevados, lo que indica un adecuado comportamiento del pavimento.
- Del estudio del perfil del Proyecto analizado de las tres alternativas propuestas se eligió que la más viable es el mantenimiento de la vía con tratamiento superficial Slurry Seal, debido a los bajos costos que presenta en comparación de las otras alternativas.

## RECOMENDACIONES:

- Existen sectores del tramo que presentan fallas, grietas, fisuras en la superficie de rodadura, esto debido a la presencia de filtraciones de agua, y al exceso de velocidad de los vehículos; se recomienda hacer limpieza de cunetas, alcantarillas, colocar señales de tránsito de límites de velocidad en puntos estratégicos, así como controlar que se cumplan estas señales.
- En el recorrido de campo al tramo en estudio, se observaron taludes inestables, con suelos de roca fija y suelta a punto de desprenderse pudiendo ocasionar accidentes de tránsito y deterioro de la vía, se recomienda dar tratamientos de estabilidad de taludes.
- Es recomendable realizar el ensayo con Viga Benkelman en épocas de baja transitabilidad, debido a que este ensayo requiere de un camión, operadores, conos de seguridad que obstaculizan el libre tránsito.
- Se recomienda realizar el ensayo con Viga Benkelman con mucha precisión y concentración al momento de la toma de datos, pues de esto depende una correcta evaluación del pavimento.
- El Estado debe auscultar mediante modernas técnicas, el estado del pavimento de las carreteras, calles, etc.; para determinar su estado actual, poder ejecutar intervenciones oportunas y asegurar la transitabilidad.

## PROPUESTAS DE NORMA:

- Se recomienda realizar el Ensayo con Viga Benkelman en fechas con temperaturas medias, templadas, pues el tener altas o bajas temperaturas ocasiona que la Viga metálica sufra dilataciones o acortamientos que afecten las medidas de deflexión.
- Del análisis de datos tomados en campo de deflexiones, se podrán calcular valores estadísticos que darán información de cómo se tomaron los datos en campo, los errores que se pudieron cometer al efectuar las mediciones, entonces se recomienda fijar márgenes de tolerancia para determinar si se realizó una correcta toma de datos en campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cáceres Flores, Roberto, Evaluación estructural de pavimentos flexibles con deflectómetro Benkelman, Universidad Nacional San Agustín, Cusco, Perú, 1999.
- Gutiérrez Lazares, José Wilfredo, Modelación geotécnica de Pavimentos Flexibles con fines de Análisis y Diseño en el Perú, tesis para optar el grado de Magister en Ciencias en Mención de Ingeniería Geotécnica, Perú, 2007.
- Hoffman, Mario Del Águila, Pablo M., Estudio de evaluación Estructural de Pavimentos basados en la interpretación de la Curva de Deflexiones (Ensayos No Destructivos), Publicación, Lima, Perú, 1985.
- Melchor Areche, José Ygnacio, Evaluación Integral del Pavimento, Experiencia Profesional, Lima, Perú, 1999.
- Quiñones Elifio, Court Eduardo, Viga Benkelman, Clases de Titulación Facultad de Ingeniería Civil UNI, Lima, Perú, 2010.
- Rico Rodríguez, Alfonso, La ingeniería de Suelos en las vías terrestres 2: Carreteras, ferrocarriles y autopistas, México, 2005.
- [www.astm.org/Standards/D4695.htm](http://www.astm.org/Standards/D4695.htm)
- [www.camineros.com](http://www.camineros.com)
- [www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/verdes/1979/356\\_79\\_73.pdf](http://www.carreteros.org/normativa/otros/nlt/pdfs/verdes/1979/356_79_73.pdf)
- [www.proviasdep.gob.pe](http://www.proviasdep.gob.pe)
- [www.proviasnac.gob.pe](http://www.proviasnac.gob.pe)

## ANEXOS

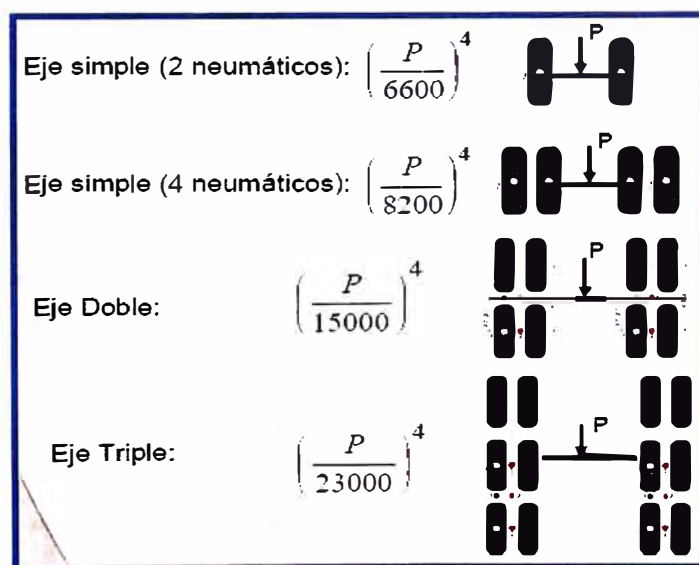
### ANEXO 01: DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES

#### Análisis de tránsito – Eje equivalente

En el funcionamiento estructural de las capas de la estructura del pavimento influye el tipo de suelo de la subrasante, el número total de los vehículos pesados por día o durante el periodo de diseño, incluido las cargas por eje y la presión de los neumáticos. La demanda o volumen de tráfico, requiere ser expresado en términos de Ejes equivalentes acumulados para el período de diseño. El concepto de ejes equivalentes se basa en la posibilidad de evaluar el daño que produce determinada carga y compararla con otra referencia.



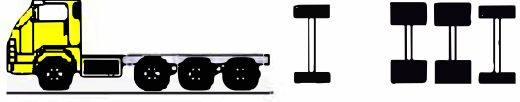
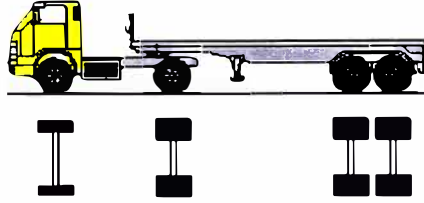
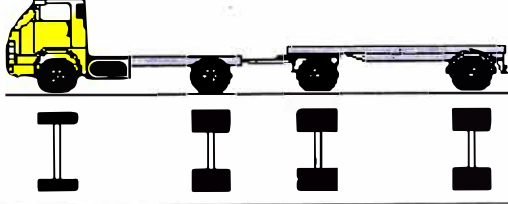

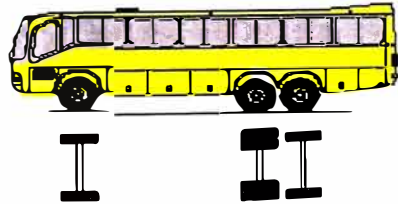
#### Factores de equivalencia de carga.

Para el cálculo de los factores de equivalencia de carga (FEC) se han obtenido ecuaciones crecientes, de relación exponencial del orden 4, entre la carga real y la del eje referencial. Estas experiencias ampliamente difundidas, dan lugar a establecer factores de carga, tanto para cada tipo de composición vehicular, que permiten cuantificar el tremendo efecto destructivo de los vehículos más pesados. El eje estándar adoptado es un eje simple de 8.2 ton, se puede tomar el criterio simplificado de la metodología AASHTO, aplicando las siguientes relaciones para vehículos pesados, buses y camiones.



Fuente: Manual de Diseño de carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito.

La determinación del EE por tipo de vehículo pesado, camiones y buses, resulta de la suma de EE por tipo de eje, para cada vehículo específico, para lo cual se ha tomado en cuenta los pesos de vehículos máximas permitidas.

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°
C2		12.30	7	11	—	—	—	18
C3		13.20	7	18	—	—	—	25
C4		13.20	7	23 <sup>(1)</sup>	—	—	—	30
T2S2		20.50	7	11	18	—	—	36
C2R2		23.00	7	11	11	11	—	40
B2		13.20	7	11	—	—	—	18
B3-1		14.00	7	16	—	—	—	23

Fuente: Pesos y medidas máximas permitidas – Reglamento Nacional de Vehículos

### Determinación del número de repeticiones del eje estándar de 8.2 ton.

Para el cálculo del Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 Ton (N<sub>18</sub>), se debe considerar principalmente a los vehículos que tengan un alto factor equivalente de carga en el pavimento como vehículos pesados (<8tráiler y semi-tráiler), camiones y buses, se desprecia los vehículos ligeros (autos, camionetas, etc.). Así también se debe considerar el año que fue determinado el IMD y las tasas de crecimiento.

Para la Gua AASHTO corresponde al EAL afectado por coeficientes que representan el sentido y el número de carriles que tendrá la vía.

$$N_{18} = FD \times FC \times EAL_{8.2T} \dots\dots\dots \text{Ecuación (1)}$$

$$EAL_{8.2T} = 365 \times \left( \sum IMD_v \times FEC_v \right) \times \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

**N<sub>18</sub>**: Numero esperado de repeticiones de ejes equivalente a 8.2 Ton en el periodo de diseño.

**FD**: 0.5, corresponde a caminos de dos direcciones por calzada (recomendable).

**FC**: 1.0, corresponde a un carril por dirección o sentido.

**EAL 8.2T**: Número de ejes equivalentes a 8.2 ton en el periodo de diseño.

**365**: Número de días del año.

**IMD<sub>v</sub>**: Índice medio Diario de cada tipo de vehículo correspondiente al año base.

**FEC<sub>v</sub>**: factor equivalente de carga 8.2 ton por cada tipo de vehículo.

**i**: Tasa de crecimiento de los vehículos.

**n**: Período de diseño.



## ANEXO 02: ESTUDIO DE TRÁFICO Y CARGAS

CUADRO N°1: DETERMINACIÓN DEL TRÁFICO ACTUAL

TIPO	IMD 2008 (*)	Tasa de Crecimiento	IMD 2009
	CHICHICAY 92+110 - Dv. YAUYOS 127+000		CHICHICAY 92+110 - Dv. YAUYOS 127+000
Microbus	0	1.4	0
Bus 2E	8	1.4	8
Bus 3E	0	1.4	0
Camión 2E	9	4.6	9
Camión 3E	11	4.6	11
Camión 4E	0	4.6	0
Semitráilers	0	4.6	0
Tráilers	0	4.6	0
Total			55

Fuente: Informe de ICCGSA.

CUADRO N°2: DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.

TIPO	Descripción	Eje delantero	Ejes posteriores			EE <sub>8,2</sub> TN
			1er Eje	2do Eje	3er Eje	
Microbus	Carga (tn)	7	11			18
	F.E.C.	1.265	3.238			4.503
Bus 2E	Carga (tn)	4	18			22
	F.E.C.	1.265	2.019			3.284
Bus 3E	Carga (tn)	7	7			14
	F.E.C.	1.265	1.265			2.53
Camión 2E	Carga (tn)	7	11			18
	F.E.C.	1.265	3.238			4.503
Camión 3E	Carga (tn)	7	18			25
	F.E.C.	1.265	2.019			3.284
Camión 4E	Carga (tn)	7	23			30
	F.E.C.	1.265	1.018			2.283
Semitráilers	Carga (tn)	7	11	18.0		18
	F.E.C.	1.265	3.238	2.0		4.503
Tráilers	Carga (tn)	7	11	11.0	11.0	18.0
	F.E.C.	1.265	3.238	3.238	3.238	4.503

Fuente: Manual de Diseño de carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito.

## CÁLCULO DE N18 Y DEFLEXIÓN ADMISIBLE

Con los datos de los cuadros 1, 2 y las fórmulas de las Ecuaciones (1) y (2), se obtienen los siguientes resultados:

CUADRO N° 3: TRAMO CHICHICAY 92+110 – Dv. YAUUYOS 127+000											
TIPO	Factor de Carga	IMD 2009	Tasa Crec. (i %)	Proyección							
				n (años)	EAL <sub>2010</sub>	n (años)	EAL <sub>2011</sub>	n (años)	EAL <sub>2012</sub>	n (años)	EAL <sub>2015</sub>
Microbus	4.504	0	1.4	1	0	2	0	3	0	5	0
Bus 2E	4.504	8	1.4	1	13152	2	26487	3	40009	5	67625
Bus 3E	3.285	0	1.4	1	0	2	0	3	0	5	0
Camión 2E	4.504	9	4.6	1	14795	2	30271	3	46460	5	81104
Camión 3E	3.285	12	4.6	1	14388	2	29438	3	45180	5	78871
Camión 4E	2.283	0	4.6	1	0	2	0	3	0	5	0
Semitr.	6.523	0	4.6	1	0	2	0	3	0	5	0
Traylers	10.98	0	4.6	1	0	2	0	3	0	5	0
<b>EAL</b>				4.26*10 <sup>4</sup>		8.67*10 <sup>4</sup>		1.32*10 <sup>5</sup>		2.29*10 <sup>5</sup>	
<b>N18</b>				0.021		0.043		0.066		0.115	
<b>Da(x 10<sup>-2</sup> mm)</b>				271.1		226.9		204.1		178.0	

Nota: N<sub>18</sub> número total de ejes equivalentes a 18 klb o 8.2 ton (en millones)

## ANEXO 03: ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

- SLURRY SEAL:**

PRECIO DE LA EMULSIÓN MODIFICADA	7.15 SOLES/GALÓN + I.G.V. PUESTO EN PLANTA LIMA
PRECIO EMULSIÓN ESTÁNDAR	6.3 SOLES/GALÓN + I.G.V. PUESTO EN PLANTA LIMA
FLETE	25 SOLES GALON + IGV (OBRA LIMA )
TIPO DE CAMBIO (T.C.)	1.0 SOLES

### SLURRY SEAL

ESPESOR	10 mm	RENDIMIENTO	3000 m2/dia
PESO UNIT ARIDO	1900 Kg/m3	ESPONJ.	25 %
% EMULSIÓN CSS-1h	14.0 %		
% AGUA	10.0 %		
% FILLER	2.0 %	<b>COSTO/M2=</b>	<b>6.91</b>

### DESCRIPCION

INSUMO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
ARIDO	M3		0.0125	30.00	0.38
EMULSIÓN CSS-1h	GAL		0.7028	6.55	4.60
AGUA	GAL		0.5020	0.02	0.01
CEMENTO PORTLAND TIPO I	BOLS		0.0089	18.0	0.16
					<b>5.15</b>
<b>MANO DE OBRA</b>					
CAPATAZ	HH	1	0.0027	12.26	0.03
OPERARIO	HH	2	0.0053	9.2	0.05
OFICIAL	HH	2	0.0053	8.5	0.05
PEON	HH	4	0.0107	7.62	0.08
					<b>0.21</b>
<b>MAQUINARIA Y EQUIPO</b>					
MÁQUINA EXTENDEDORA DE MORTERO	HM	1	0.0027	305	0.81
CARGADOR FRONTAL	HM	0.5	0.0013	175	0.23
CISTERNA DE EMULSIÓN 4000 GAL	HM	0.5	0.0013	130	0.17
CISTERNA DE AGUA 2000 GAL	HM	0.5	0.0013	90	0.12
BARREDORA MECÁNICA	HM	0.5	0.0013	150	0.20
HERRAMIENTAS MANUALES	HM	0.010			0.010
					<b>1.55</b>

• **MICROPAVIMENTO:**

PRECIO DE LA EMULSIÓN MODIFICADA	7.15 SOLES/GALÓN + I.G.V. PUESTO EN PLANTA LIMA
PRECIO EMULSIÓN ESTÁNDAR	6.3 SOLES/GALÓN + I.G.V. PUESTO EN PLANTA LIMA
FLETE	25 SOLES GALÓN + IGV (OBRA LIMA )
TIPO DE CAMBIO (T.C.)	1.0 SOLES

**MICROPAVIMENTO**

ESPEJOR	10 mm	RENDIMIENTO	3000 m2/dia
PESO UNIT ARIDO	1900 Kg/m3	ESPONJ.	25 %
% EMULSIÓN CSS-1h	14.0 %		
% AGUA	10.0 %		
% FILLER	2.0 %	<b>COSTO/M2=</b>	<b>7.51</b>

**DESCRIPCION**

INSUMO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
ARIDO	M3		0.0125	30.00	0.38
EMULSIÓN MODIFICADA	GAL		0.7028	7.4	5.2
AGUA	GAL		0.5020	0.02	0.01
CEMENTO PORTLAND TIPO I	BOLS		0.0089	18.0	0.16
					<b>5.75</b>

**MANO DE OBRA**

	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
CAPATAZ	HH	1	0.0027	12.26	0.03
OPERARIO	HH	2	0.0053	9.2	0.05
OFICIAL	HH	2	0.0053	8.5	0.05
PEON	HH	4	0.0107	7.62	0.08
					<b>0.21</b>

**MAQUINARIA Y EQUIPO**

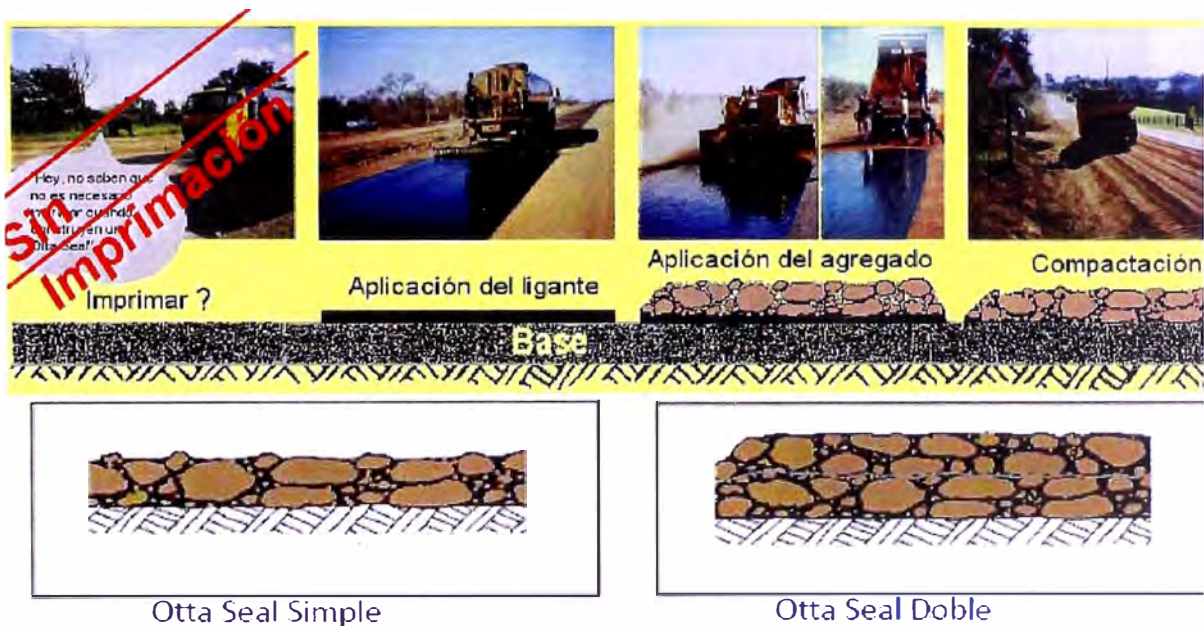
	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
MAQUINA EXTENDEDORA DE MORTERO	HM	1	0.0027	305	0.81
CARGADOR FRONTAL	HM	0.5	0.0013	175	0.23
CISTERNA DE EMULSIÓN 4000 GAL	HM	0.5	0.0013	130	0.17
CISTERNA DE AGUA 2000 GAL	HM	0.5	0.0013	90	0.12
BARREDORA MECNICA	HM	0.5	0.0013	150	0.20
HERRAMIENTAS MANUALES	HM	0.010			0.010
					<b>1.55</b>



• **OTTA SEAL:**

**Procedimiento constructivo:**

- 1- La base debe ser sellada con bastante agua y rodillo
- 2- Luego se coloca con gravilladora la primera carga, la que se riega con el cemento asfáltico, se compacta con rodillos neumáticos durante 30 minutos para luego ser compactado con rodillos autopropulsados.
- 3- Cuando el asfalto aflora superficialmente se aplica la segunda etapa, la que es igual a la primera, esta se sella con rodillos neumáticos y autopropulsados.



Fuente: Dirección de Vialidad – Chile, Oswaldo Aguayo - Taller Internacional de Mantenimiento Vial, Corporación Andina de Fomento.

Información de Costo obtenido de la página web Otta Seal:

Costo por suministro y aplicación: U\$S 34.000 /milla (ancho=28 pies, e= 32 mm).

Equivalente: U\$S 2.48 por m<sup>2</sup> (e= 32 mm)

= **S/7.44** por m<sup>2</sup> (e= 32mm).

## PANEL FOTOGRÁFICO



Foto 1: Inicio del tramo de la carretera en estudio:  
Km 106+000 – Km 108+000



Foto 2: Posicionamiento del personal para realizar la primera medición  
con el Equipo Deflectómetro Viga Benkelman





Foto 3: Calibración del equipo Deflectómetro Viga Benkelman para realizar las mediciones.

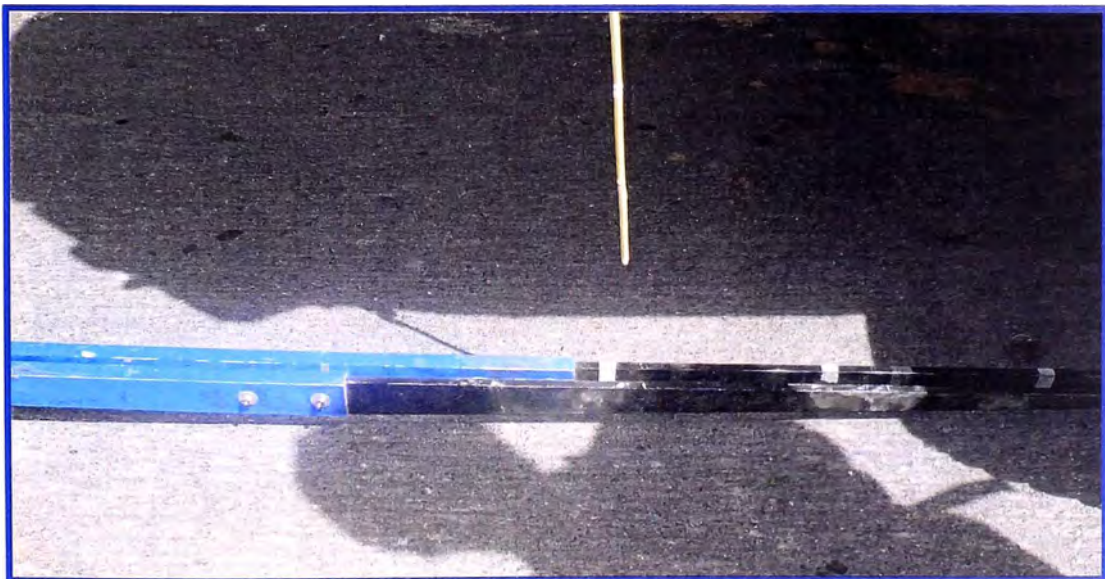


Foto 4: Proceso de medición de lecturas en el dial de deformación.





Foto 5: Extracción de la muestra de superficie de rodadura para la determinación del espesor de la vía.



Foto 6: Proceso de medición del espesor de la carpeta de rodadura.





Foto 7: Medición de la temperatura de la carpeta de rodadura con termómetro digital.



Foto 8: Medición del ahuellamiento en el punto de toma de datos, con una regla de aluminio de 3 m de longitud y wincha.



Foto 09: Último hito del tramo evaluado: Km 108+000