

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON VIGA BENKELMAN DEL
CAMBIO DE ESTÁNDAR**

**MONITOREO DE CONSERVACIÓN CARRETERA
CAÑETE - HUANCAYO Km 118+000 AL Km 120+000**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JUAN GREGORIO CAMACHO ROBLES

Lima - Perú

2010

ÍNDICE	
RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	4
LISTA DE GRÁFICOS	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: PERFIL DEL PROYECTO	9
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	9
1.1.1 Diagnóstico de la Situación Actual.....	9
1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	10
1.2.1 Objetivo Principal.....	10
1.2.2 Objetivo Específico	10
1.3 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	10
1.4 PROYECTO: CAMBIO DE ESTÁNDAR DE LA CARRETERA.....	13
CAÑETE-YAUYOS-CHUPACA	
1.5 PARTICIPACIÓN DE LAS ENTIDADES INVOLUCRADAS Y	14
Y DE LOS BENEFICIARIOS	
1.6 MARCO DE REFERENCIA	16
CAPÍTULO II: GENERALIDADES	18
2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	18
2.1.1 Índice de Servicio	18
2.1.2 Durabilidad	18
2.1.3 Seguridad	18
2.1.4 Realibilidad	19
2.2 PROCEDIMIENTOS Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO	19
2.2.1 Análisis Estructural	19
2.2.2 Análisis Económico.....	20
2.2.3 Sistema de Gestión de Pavimentos	21
CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS	30
3.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FUNCIONAL	30
3.1.1 Método para Determinar El PSI y PSR.....	30
3.1.2 Método para Determinar La Rugosidad.....	35
3.2 Evaluación de la Capacidad Estructural.....	37
3.2.1 Métodos No Destructivos	37
3.2.2 Métodos Deflectométricos	38

CAPÍTULO IV: GESTIÓN DE PAVIMENTOS	60
4.1 GESTIÓN DE PAVIMENTOS	60
4.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO	60
4.3 CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS.....	62
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS	68

RESUMEN

El presente Informe de Suficiencia, es parte del estudio realizado para el Monitoreo de Conservación de la Carretera Cañete – Huancayo, tramo Km 118+000 al Km 120+000, siendo el objetivo principal, determinar con la Viga Benkelman el estado de los pavimentos flexibles para la conservación de ellos.

La evaluación estructural del pavimento se ha llevado a cabo mediante Ensayos No Destructivos, empleando la medición de deflexiones con el deflectógrafo de tipo estático conocido como Viga Benkelman, siendo un instrumento portátil, que permite medir las deformaciones elásticas que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar, de una manera sencilla, práctica y económica. El procesamiento de datos de medición de deflexiones y el análisis de los resultados de estas, será interpretado mediante el método empírico del estudio CONREVIAl, con esta metodología se determinan la deflexión característica, la deflexión admisible y el radio de curvatura, con los cuales es posible evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura del pavimento debido a las solicitaciones del tránsito que lo utiliza.

Con el ensayo de la Viga Benkelman se obtuvo las siguientes medidas: $D_c = 82.63 \times 10^{-2} \text{ mm} < D_a$ (ANEXO 10) y el $R_c = 214.92 \text{ m} > R_{ci} = 100 \text{ m}$, según el Análisis Combinado de Los Resultados de Evaluación (cuadro 3-4) y de la Relación Cuantitativa entre la Deformada y la Calidad del Pavimento (gráfico 3-6) el sistema estructural del pavimento se calificará como bueno, por lo que la rehabilitación se limitará a una corrección de las deficiencias superficiales.

En síntesis se emplea el método del CONREVIAl para evaluar y analizar las deflexiones y radio de curvatura del pavimento y sus ecuaciones utilizadas para correlacionar los resultados.

LISTA DE CUADROS

N°	Descripción	Pág.
1-1	Situación Actual de La Carretera	9
1-2	Población	15
3-1	Escala de Calificación de la Serviciabilidad Según AASHO	31
3-2	Factores de Corrección por Estacionalidad	46
3-3	Valores de Coeficientes de Variación	49
3-4	Análisis Combinado de Los Resultados de Evaluación	54
3-5	Valores Recomendados para R	57

LISTA DE GRÁFICOS

N°	Descripción	Pág.
1-1	Ubicación del Proyecto	13
3-1	Tipos de Deflexiones	40
3-2	Esquema y Principio de Operación de La Viga Benkelman	42
3-3	Configuración Geométrica del Sistema de Carga en Ensayos con Viga Benkelman	42
3-4	Esquemmatización del Proceso de Medición con La Viga Benkelman	44
3-5	Esquema Conceptual del Radio de Curvatura	47
3-6	Relación Cuantitativa entre La Deformada y La Calidad del Pavimento	55
3-7	Formato de Hojas Para la Recopilación de Datos de Medidas de Deflexiones en Campo	58
3-8	Formato de Hojas Para el Procesamiento de Datos	59

LISTA DE SIMBOLOS Y DE SIGLAS

Símbolo o sigla	Descripción
IMD	Índice Medio Diario
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
COV	Costo de Operación Vehicular
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa de Interés de Retorno
HDM	Highway Design and Maintenance Standards Model
ISOHDM	International Study of Highway Development and Management
GP	Gestión de Pavimentos
SGP	Sistema de Gestión de Pavimentos
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social de las sociedades ha estado estrechamente ligado al mejoramiento de los sistemas de transporte.

Los países crecen cultural, social y económicamente en la medida de que existan posibilidades de comunicarse y de transportar carga y pasajeros. Dicho en el sentido inverso, el crecimiento de una región o país puede verse limitado por insuficiencia de conectividad, ya sea al interior de la comunidad misma, como hacia otras comunidades vecinas.

Debido al comportamiento de los pavimentos, existe la necesidad de adoptar métodos de diseño que consideren los diversos factores que afectan su desempeño durante su vida útil. Esta no es una tarea fácil, porque involucra el análisis de los aspectos estructurales del pavimento, también los factores económicos, nivel de servicio de la vía y grado de seguridad que le brinda al usuario.

Los resultados de la evaluación efectuada sirven para determinar la mejor alternativa para prolongar la vida útil del pavimento, generalmente mediante la colocación de capas de refuerzo, empleando diversas metodologías de diseño para calcularlas. La importancia del uso adecuado de los equipos de medición en este proceso y su análisis es evidentemente muy importante.

Lo que se describe en este informe, es una muestra de cómo se puede evaluar la condición de la capacidad estructural de un pavimento, usando una metodología sencilla, práctica, económica y no destructiva. Para lo cual este informe se ha dividido en cuatro capítulos.

Capítulo I, en este capítulo se describe el perfil del proyecto.

Capítulo II, en este capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos y los análisis que permitirán elegir un mejor diseño.

Capítulo III, en este capítulo se estudia los diferentes métodos para analizar los pavimentos, la capacidad del pavimento para soportar las cargas de tráfico actuantes durante su vida útil. Esta evaluación puede efectuarse con ensayos no

destructivos, siendo estos últimos frecuentemente empleados por no causar daño al pavimento existente y por su facilidad de ejecución.

Capítulo IV, en este capítulo se analiza la diferencia entre el proceso de Gestión y un Sistema de Gestión de Pavimentos. Gestión de pavimentos es un proceso seguido para tomar decisiones sobre actividades de mantenimiento y rehabilitación que deben ejecutarse, mientras que un Sistema de Gestión de Pavimentos es un conjunto de herramientas que asisten durante el proceso de toma de decisiones.

CAPÍTULO I: PERFIL DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Diagnóstico de la Situación Actual

La actual Carretera Central, se encuentra con un elevado volumen de tráfico, debido a que alberga gran parte de la demanda vehicular de la ciudad de Lima. Es así como el corredor Cañete – Yauyos – Chupaca, sirve para aliviar la pesada carga vehicular de la mayor parte de la zona sur de Lima y alrededores, asimismo colaboraría con el Plan Nacional de Inversión Descentralizada, lo cual incrementaría el desarrollo en la zona en mención.

Entre los principales problemas se encuentran: diseño geométrico deficiente, sección inadecuada para el paso de camiones pesados, problemas de erosión y sub-drenaje debido principalmente a su cercanía al río.

Cuadro 1-1 SITUACION ACTUAL DE LA CARRETERA

TRAMO	TIPO DE SUPERFICIE DE RODADURA	PROG. INICIO	PROG. FINAL	LONGITUD (km)
Cañete-Lunahuaná	Carpeta Asfáltica	Km 1+805	Km 42+755	40.95
Lunahuaná-Pacarán	Slurry Seal	Km 42+755	Km 54+662	11.91
Pacarán-Zúñiga	Slurry Seal	Km 54+662	Km 58+405	3.74
Zúñiga - Dv. Yauyos	Monocapa	Km 58+405	Km 128+805	70.40
Dv. Yauyos – San José de Quero	Monocapa	Km 128+805	Km 231+105	102.30
San José de Quero - Roncha	Afirmado	Km 231+105	Km 256+990	25.89
Ronchas - Chupaca	Afirmado	Km 256+990	Km 273+531	16.61

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo Principal

Determinar con la Viga Benkelman el estado de los pavimentos flexibles para la conservación de ellos.

1.2.2 Objetivo Específico

Estudiar diversos métodos para el mantenimiento o conservación de los pavimentos flexibles.

1.3 UBICACIÓN DEL PROYECTO

La carretera Cañete – Lunahuaná – Pacarán – Zuñiga – Dv. Yauyos – Ronchas – Chupaca se encuentra ubicado en la región central del país, abarcando los departamentos de Lima y Junín, pasando la vía por los poblados de: Imperial, Nuevo Imperial, La Encañada, Caltopa, Socsi, Incahuasi, Jita, Lunahuana, Jacayita, Jacaya, Romani, Pacaran, Zuñiga, San Juan, San Jerónimo, Huayampi, Catahuasi, Canchan, Chichicay, Capillucas, Calachota, Pte. Auco, Dv. A Yauyos (Magdalena), Huayñía, Tinco Huantan, LLapay, Tinco Alis, Alis, Tomas Huancachi, Tinco Yauricocha, Abra Chaucha, Abra Negro Bueno (Lima); así como San José de Quero, Chaquicocha, Collpa, Ronchas, Angasmayo, Huarisca y Chupaca (Junín); pertenecientes a la ruta nacional 024.

POBLADO	<u>PROGRESIVA</u>
• CAÑETE	01+805
• IMPERIAL	04+988
• NUEVO IMPERIAL	08+925
• LA ENCAÑADA	16+855
• CALTOPA	22+905
• SOCSI	27+805

<u>POBLADO</u>	<u>PROGRESIVA</u>
• INCAHUASI	29+405
• JITA	37+335
• LUNAHUANA (Pueblo)	38+975
• LUNAHUANA (Uchupampa)	42+755
• JACAYITA	45+405
• JACAYA	48+935
• ROMANI	51+185
• PACARAN	54+662
• ZUÑIGA	58+405
• SAN JUAN	67+405
• SAN JERONIMO	73+005
• HUAYLLAMPI	77+105
• CATAHUASI	78+805
• CANCHAN	83+345
• CHICHICAY	93+915
• CAPILLUCAS	96+445
• CALACHOTA	106+845
• PTE. AUCCO	114+605
• MAGDALENA – DV. YAUUYOS	128+805
• HUAYÑIA	136+305
• TINCO HUANTAN	142+165
• LLAPAY	156+105
• TINCO ALIS	161+805
• ALIS	164+905
• TOMAS	172+895
• HUANCACHI	176+605
• TINCO YAURICOCHA	183+485
• ABRA CHAUCHA	195+315
• ABRO NEGROBUENO	213+125
• SAN JOSE DE QUERO	231+105
• CHAQUICOCHA	241+405
• COLLPA	248+005

POBLADO

PROGRESIVA

- RONCHAS 256+990
- ANGASMAYO 260+305
- HUARISCA 265+800
- CHUPACA 273+531
- HUANCAYO 284+531

Pertenecientes a la ruta nacional 024.

Gráfico 1-1 UBICACIÓN DEL PROYECTO



1.5 PROYECTO: CAMBIO DE ESTÁNDAR DE LA CARRETERA CAÑETE – YAUYOS – CHUPACA

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones viene desarrollando su política de mantenimiento y conservación de la Red Vial Nacional; es así que a través del Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional - PROVIAS NACIONAL está tercerizando estos trabajos por Niveles de Servicio.

De esta forma se busca mantener las vías nacionales con una adecuada serviciabilidad, interviniendo en forma oportuna mediante las actividades de Conservación Rutinaria, Conservación Periódica, Reparaciones Menores y Atención De Emergencias Viales.

Todas las actividades están previstas para su desarrollo bajo los lineamientos de las correspondientes Especificaciones Técnicas y con las Normas actualmente vigentes.

Mediante el Contrato: N° 288-2007-MTC/20, del 27 de Diciembre del 2007 celebrado con PROVIAS NACIONAL, el Consorcio Gestión de Carreteras asume la responsabilidad de efectuar el servicio de Conservación del Corredor

Vial Cañete – Lunahuaná – Pacarán – Dv. Yauyos – Ronchas – Chupaca (281,73 km) y el Mejoramiento del Tramo Zúñiga – Dv. Yauyos – Ronchas a nivel de solución básica.

Con esta solución básica se busca obtener un “Cambio de Estándar” de la vía, desde el punto de vista del mejoramiento de la serviciabilidad, respecto del actualmente brindado, mediante la colocación de material granular estabilizado y protegida con una capa bituminosa. Los Términos de Referencia señalan que esta Solución Básica se debe aplicar sobre la superficie actual de la vía, previamente reconformada, no se realizan cambios en la geometría.

1.6 PARTICIPACIÓN DE LAS ENTIDADES INVOLUCRADAS Y DE LOS BENEFICIARIOS

Los beneficiarios principales serían los usuarios de la vía: Transportistas, Sociedad Minera Corona, Minera Yauricocha, Minera San Valentín, Presa El Platanal, comerciantes, turistas de canotaje, estudiantes escolares y de nivel superior y los pobladores de las localidades de Lunahuaná, Pacarán, Zúñiga, Calachota, Magdalena, Yauyos, Alis, Tomas, Tinco de Yauricocha, San José de Quero, Chaquicocha, Collpa, Ronchas, Huarisca, Chupaca y zonas aledañas.

Entre las principales entidades involucradas tenemos las siguientes:

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC a través de PROVIAS NACIONAL.
- Autoridades de los Gobiernos Regionales de Lima y Junín.
- Autoridades de los Gobiernos Locales y Distritales de las provincias de Cañete, Yauyos, Concepción y Chupaca.

Cuadro 1-2 POBLACIÓN

ID	Descripción	Progresiva	Altitud (msnm)	Piso Altitudinal
1	Cañete	01+805	71	CHALA
2	Imperial	04+988	103	
3	Nuevo Imperial	08+925	165	
4	La Encañada	16+855	333	
5	Caltopa	22+905	290	
6	Socsi	27+805	332	
7	Incahuasi	29+405	368	
8	Jita	37+335	492	
9	Lunahuana (Pueblo)	38+975	494	
10	Lunahuana (Uchupampa)	42+755	523	YUNGA
11	Jacayita	45+405	593	
12	Jacaya	48+935	632	
13	Romani	51+185	679	
14	Pacaran	54+662	710	
15	Zuñiga	58+405	821	
16	San Juan	67+405	928	
17	San Jeronimo	73+005	1019	
18	Huayllampi	77+105	1125	
19	Catahuasi	78+805	1206	
20	Canchan	83+345	1260	
21	Chichicay	93+915	1553	
22	Capillucas	96+445	1581	
23	Calachota	106+845	1740	
24	Pte. Aucco	114+605	2051	
25	Magdalena – Dv Yauyos	128+805	2289	
26	Huayña	136+305	2487	
27	Tinco Huantan	142+165	2640	QUECHUA
28	Llapay	156+105	2950	
29	Tinco Alis	161+805	3100	

ID	Descripción	Progresiva	Altitud (msnm)	Piso Altitudinal
30	Alis	164+095	3261	QUECHUA
31	Tomas	172+895	3566	PUNA O JALCA
32	Huancachi	176+605	3737	
33	Tinco Yauricocha	183+485	4040	
34	Abra Chaucha	195+315	4751	
35	Abra Negrobueno	213+125	4666	
36	San José de Quero	231+105	3908	SUNI
37	Chaquicocha	241+405	3650	
38	Collpa	248+005	3508	
39	Ronchas	256+990	3458	QUECHUA
40	Angasmayo	260+305	3445	
41	Huarisca	265+800	3341	
42	Chupaca	273+531	3270	
43	Huancayo	284+531	3249	

Número de los Beneficiarios Directos con el proyecto en estudio: 25,806 (N° de personas).

1.6 MARCO DE REFERENCIA

La Carretera Central es una vía de conexión entre los Corredores Económicos Costa, Sierra y Selva del país, mediante la cual se hace posible el intercambio comercial entre Lima, Los Valles Interandinos y La Selva Peruana.

El mejoramiento de la carretera en estudio nace de la necesidad de optar por un desvío alternativo para la Carretera Central la cual actualmente no cuenta con un tránsito fluido y rápido debido a características propias de clima y topografía.

A su vez dicho proyecto forma parte del Programa de Desarrollo Vial "Proyecto Perú", el cual, mediante Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC-02, modificada por Resolución Ministerial N° 408-2007-MTC/02, se crea con la finalidad de mejorar las vías de integración de corredores económicos, conformando ejes de desarrollo sostenido con el fin de elevar el nivel de competitividad de las zonas rurales, en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal.

El proyecto se enmarca dentro de los lineamientos y funciones de las regiones en lo referente a la atención de las necesidades básicas de la población a través del desarrollo de obras de infraestructura social y económica que contribuyan con el mejoramiento de la calidad de vida de la población.

CAPÍTULO II: GENERALIDADES

2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

2.1.1 Índice de Servicio

Es el grado de comodidad que la vía brinda al usuario. Existen diferentes maneras para analizar y cuantificar el grado de servicio. Un parámetro usado es el índice de servicio, que establece una escala subjetiva de calificación de 0 a 5, siendo 5 la condición calificada como excelente. Otro indicador es la rugosidad, o irregularidades en el pavimento, que en buena cuenta son ondas aleatorias multifrecuentes de diferente amplitud y longitud de onda, que pueden ser analizadas utilizando transformadas de Fourier. Los datos para calcular la rugosidad pueden ser obtenidos mediante una nivelación de precisión, perfilómetros ópticos tipo lasero, perfilómetros tipo respuesta como el "Bump Integrator" entre otros, siendo usualmente expresada en términos de IRI (Índice Internacional de Rugosidad).

2.1.2 Durabilidad

El diseño debe evitar o minimizar la aparición de fallas en el pavimento. En el caso de los pavimentos flexibles, los pavimentos deben ser diseñados para prevenir la aparición de fallas como fisuras longitudinales, fisuras transversales, fisuramiento en bloque, fisuramiento "tipo piel de cocodrilo", fisuras por reflexión, desniveles, ahuellamientos, exudación, corrugaciones, depresiones, baches, agregado pulido y disgregación, por citar algunos. El diseñador debe conocer las posibles causas que producen cada una de las fallas a fin de efectuar un análisis que pondere la posibilidad de ocurrencia de cada falla durante su vida útil, buscando mejorar la performance y durabilidad del pavimento.

2.1.3 Seguridad

El pavimento debe proveer una adecuada superficie de rodadura, con la suficiente fricción para evitar la pérdida de control del vehículo por deslizamiento, especialmente cuando esta húmedo. Un indicador empleado para medir este factor es el índice de deslizamiento, el cual se obtiene multiplicando el

coeficiente de fricción por 100, pudiendo ser medido con el procedimiento descrito en la norma ASTM E 274.

2.1.4 Realibilidad

Es la probabilidad de que el pavimento se comporte según lo asumido en el análisis. Generalmente se define en términos de probabilidad de éxito, empleando la distribución normal de Gauss para su cálculo. Diseños distintos se obtienen si se varía el nivel de realibilidad para cada parámetro, ponderado cada factor según su grado de importancia.

2.2 PROCEDIMIENTOS Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO

2.2.1 Análisis Estructural

Es fundamental efectuar el análisis empleando el modelo que mejor represente el comportamiento de la estructura ante las solicitaciones de carga. Con este propósito, es recomendable utilizar un procedimiento mecánico calibrado de diseño de pavimentos. Estos métodos utilizan modelos para simular el efecto del medio ambiente en la estructura, modelos que estimen el índice de servicio y la probabilidad de aparición de fallas en el pavimento. Con el uso de modelos integrados, se puede proyectar la condición de pavimentos a lo largo de su vida útil, verificando si los niveles de realibilidad es seleccionada como solución de diseño. Evidentemente, esta metodología requiere de conocimiento y experiencia para ingresar los parámetros adecuados en los modelos.

En el caso de proyectos de rehabilitación, el logro de este propósito es una tarea de mayor cuidado. Generalmente, la condición del pavimento es evaluada midiendo las deflexiones ante la acción de una carga, empleando equipos sofisticados como el "Falling Weight" deflectómetro o simples como la Viga Benkelman. Para estimar los espesores y otras características de las capas de pavimento, se pueden emplear sistemas geo-radar que detectan los espesores de cada capa, profundidad de napas freáticas y características de la mezcla, o simplemente efectuar prospecciones geotécnicas. Asimismo para poder caracterizar otras propiedades o calibrar el modelo.

Son tres los puntos que se consideran en el análisis estructural:

Características de las capas: Dentro de las características de las capas las más importantes son: materiales utilizados, módulos de elasticidad, coeficiente de Poisson, espesor y estado de adherencia entre ellas.

Tipo de solicitaciones: Por tipo de solicitaciones se entienden el peso del vehículo y el tipo de ejes.

Número de aplicaciones de carga: El número de aplicaciones de carga hace referencia a la cantidad acumulada de solicitaciones de carga durante su vida de diseño. Se clasifican según el tipo de solicitaciones que produzcan.

2.2.2 Análisis Económico

Los aspectos económicos son importantes al momento de seleccionar el diseño final del pavimento. El análisis debe considerar todos los costos posibles durante el ciclo completo de vida del pavimento: costos de construcción, costos de mantenimiento o rehabilitación. Otros costos se consideran en el análisis económico para estimar relaciones beneficio/costo, calcular tasas internas de retorno (TIR), y valor actual neto (VAN), son los costos de operación vehicular, costos de tiempo de transporte, costos de accidentes. Sin embargo, es difícil cuantificar este tipo de costos y una mayor sofisticación en el proceso de análisis se efectuara en el caso que el proyecto lo requiera. Sin embargo hay una serie de ítems de ingeniería económica aplicables a la evaluación económica de caminos. La aplicación de estos principios permitirá realizar una auténtica evaluación, sin dejar escapar detalles importantes, lo que podría traducirse en un elemento erróneo para la toma de decisiones.

Los principios enunciados son los siguientes:

- a) Prefactibilidad, el cual consiste en el estudio a grandes rasgos de la situación actual, y las posibles soluciones a aplicar. Aquí se hace una recopilación total de antecedentes y se analizan todos los factores que influyen sobre el proyecto.
- b) El nivel de gestión donde se va a realizar la evaluación debe estar claramente definido. Es decir, si se va a trabajar a nivel de proyecto o a nivel de red, tal como se definió anteriormente.
- c) La evaluación económica realizada es una herramienta que nos ayudará a

realizar la elección de una estrategia de inversión, la que consideremos es más adecuada a nuestros intereses; en sí mismo esta evaluación no representa una decisión.

- d) La evaluación económica no tiene relación con el método o fuente de los recursos de financiamiento. Las fuentes no pueden limitar el número o factibilidad de proyectos, o limitar la cantidad de recursos para un proyecto en particular. Tampoco deben afectar la metodología o principios que rigen la evaluación económica en sí.
- e) Los criterios de aplicación para la decisión deben definirse antes de que los resultados de la evaluación sean aplicados.
- f) En una evaluación económica deben considerarse todas las alternativas posibles dentro del tiempo disponible para el análisis. Esto incluye la comparación con la situación existente, y también con cada una de las restantes.
- g) Las comparaciones deben realizarse para el mismo periodo. Aun cuando la vida útil de las alternativas consideradas puedan ser distintas. Para ello se deben complementar las soluciones en un menor plazo o acortar las de mayor plazo.
- h) Además de los costos de construcción y mantención, en la evaluación deben incluirse los costos de operación y los beneficios esperados.

2.2.3 Sistema de Gestión de Pavimentos

La condición de una determinada sección de pavimento puede afectar la transitabilidad de toda la red vial. Es conveniente analizar en que medida una solución en particular, o soluciones a implementar en distintos sectores viales pueden afectar la condición de la red vial en conjunto. Los sistemas de gestión de pavimentos son herramientas utilizadas para asistir en la toma de decisiones sobre que estrategias de mantenimiento y/o rehabilitación son las más efectivas, seleccionando aquellos proyectos que representen la mejor alternativa de inversión. La red vial en su totalidad es considerada en el análisis, comparando los beneficios y costos de programas alternativos, seleccionando el programa que permita obtener el mayor beneficio en el periodo de análisis.

En el área de gestión de pavimentos se han desarrollado una serie de herramientas de apoyo a la gestión, que tienen como objetivo principal aumentar

el poder de análisis de las agencias encargadas de realizar una gestión de infraestructura vial. Se entrega a continuación las características de estas:

Sistema HDM-III y HDM-4 para la Gestión de Pavimentos

El modelo del Banco Mundial, Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM) ha sido ampliamente utilizado por consultores y agencias administradoras de pavimentos para investigar las consecuencias económicas que tienen las inversiones de infraestructura vial. La versión HDM-III, fue liberada en 1987 y sus elementos han sido utilizados en proyectos en más de 98 países diferentes. Sin embargo, limitaciones tales como poder ser empleado sólo en el análisis de pavimentos flexibles, obligó al desarrollo de la versión HDM-4 que cubre ésta y otras deficiencias. La principal aplicación de estos sistemas está en su empleo para la evaluación social a nivel de red de proyectos viales.

El Estudio ISOHDM y la Estructura Conceptual del HDM-4

El International Study of Highway Development and Management (ISOHDM) pretendía extender el alcance del modelo HDM-III para proporcionar unos sistemas armonizados que se acercaran más a las agencias de dirección de carreteras, con herramientas de software adaptables y amistosas para los usuarios. El nuevo sistema Highway Development and Management (HDM-4) es el resultado de este estudio.

Para el desarrollo HDM-4 se contó con el patrocinio de importantes instituciones internacionales además de contar con el apoyo de gobiernos nacionales y de otras organizaciones, destacándose particularmente:

- Asian Development Bank (ADB)
- Overseas Development
- Swedish National Roads Administration (SNRA de Suecia)
- World Bank (IBRD)

El objetivo del estudio era producir herramientas mejoradas para el desarrollo de estrategias técnicas y económicas en el sector caminero; para ser utilizadas en la planificación, determinación de presupuestos, seguimiento y administración de redes camineras ya sea dentro de la organización contando con los sistemas de administración existente o como herramientas analíticas de asistencia a la administración de redes camineras.

El comité de dirección, a cargo del Banco Mundial, tenía bajo su responsabilidad la dirección y guía de todos los proyectos relacionados, bajo la supervisión de los patrocinadores del ISOHDM. La secretaría establecida en la Universidad de Birmingham, facilitó la coordinación y comunicación entre proyectos y la comunidad internacional.

Los objetivos que perseguía el proyecto ISOHDM fueron:

- Regularizar el análisis económico y técnico de los costos del camino.
- Racionalizar lo planeado, lo programado y el presupuesto, con la apreciación y formulación de las políticas.
- Mejorar las deficiencias de la versión anterior considerando entre otros aspectos los siguientes:
 - Proporcionar una interface más amigable.
 - Modernizar la flota vehicular utilizada en los análisis.
 - Contemplar los efectos de congestión de tráfico.
 - Contemplar los efectos de clima frío.
 - Un rango más amplio de tipos de pavimento y estructuras.
 - Seguridad de carreteras.
 - Efectos medioambientales (consumo de energía, ruido de tráfico y emisiones del vehículo).

El proyecto entonces se desarrolló en dos fases que fueron:

Fase I: 1993-1996

- Mejoramiento de relaciones técnicas e incorporación de algunas nuevas.
- Desarrollo del software.
- Documentación.

Fase II: 1996-2000

- Ensayos piloto.
- Juego de datos de calibraciones regionales.
- Publicación y software release.
- Entrenamiento y soporte a usuarios.

Modelos empleados por HDM-4

Dentro del análisis técnico de HDM-4 se emplean cuatro grupos de modelos que son:

- RD (Road Deterioration – Modelos de deterioro): Predice el deterioro del pavimento ya sea asfalto, hormigón o sin capa pavimentada de rodadura.
- WE (Works Effects – Modelo de Efectos de Intervenciones): Simula los efectos de trabajos de conservación del camino en la condición del pavimento y determina los costos correspondientes.
- RUE (Road User Effects – Modelo de Efectos sobre los Usuarios de las Carreteras): Determina los costos de operación del vehículo, accidentes del camino y tiempo de viaje.
- SEE (Social and Environment Effects – Modelos de Efectos Sociales y Ambientales): Determina los efectos de emisiones del vehículo y consumo de energía.

Estructura General del Programa Computacional

Herramientas de análisis

* Proyecto:

Este nivel de análisis permite a los usuarios evaluar la factibilidad física, funcional y económica de alternativas, comparando con un caso base, o una alternativa del sin-proyecto.

En el análisis a nivel de proyecto los procesos más importantes son:

- Análisis del costo del ciclo de vida del pavimento y su desempeño estructural.
- Predicción de deterioros del camino.
- Estimación de costos de los usuarios del camino (costos de operación, tiempos de viaje y accidentes).
- Modelar los efectos de trabajos de conservación y los costos de éstos para la administración.
- Cálculo de beneficios económicos o financieros comparando alternativas para el proyecto. Siendo el objetivo determinar que alternativa es la más rentable.

El análisis a nivel de proyecto se realiza de una de las siguientes formas:

- **Análisis por Sección:** El análisis se hace individualmente de cada una de las secciones del camino que constituyen el proyecto. Pueden definirse varias alternativas para cada sección, con una alternativa designada como situación base, se comparan contra ella todas las otras alternativas. Los indicadores económicos se calculan para cada alternativa de la sección. El análisis por Sección no soporta ni nuevas secciones ni el tráfico desviado.
- **Análisis por proyecto:** El análisis de Secciones de camino se hace en conjunto considerando un paquete de alternativas de proyecto como la unidad básica por realizar análisis económico. Primero, se suman los costos anuales y beneficios de todas las alternativas de la sección dentro de cada alternativa del proyecto y luego se obtienen totales anuales. Se calculan indicadores económicos para cada alternativa del proyecto que se comparan contra una alternativa base. En este análisis se pueden involucrar nuevas secciones y el tráfico desviado.

* Programa:

El propósito del análisis de programa es evaluar las opciones de mantenimiento, intentando seleccionar el conjunto de inversiones que deben hacerse en las secciones de una red vial. Así, el problema puede proponerse como la combinación de alternativas de inversión que perfeccionan la función objetivo, bajo un presupuesto restringido.

Se proporcionan dos métodos para el análisis del programa:

- **Ciclo de Vida:** Esta opción permite comparar dos o más alternativas comprendiendo diferentes trabajos para las secciones seleccionadas.
- **Programa futuro Multi-anual:** Esta opción es una simplificación del método de ciclo de vida. Compara el beneficio de realizar trabajos importantes al primer año después del periodo del presupuesto.

En ambos casos, la optimización se hace usando la proporción (Valor Presente Neto)/(Costo incremental), donde el problema puede definirse como la selección de esa combinación de opciones de inversión en secciones que máximan la relación, sujeto a que la suma de los costos de inversión sean menores al presupuesto disponible.

En resumen las etapas o elementos que conforman el nivel de análisis por programa son:

- Identificación de proyectos candidato.
- Determinación de alternativas de mejoramiento.
- Especificación de límite y periodos de los presupuestos.
- Optimizar utilizando un objetivo determinado.
- Generación de una lista óptima de proyectos para el periodo del presupuesto.

* Estrategia:

El concepto de nivel de análisis por estrategia de una red vial trata de considerar a largo plazo los gastos en que una organización debe incurrir considerando los requisitos y recursos necesarios. Así, el análisis de estrategia se trata de redes o sub-redes manejadas por una agencia de caminos.

Para predecir a mediano plazo los requisitos de una carretera conectada a una red vial, HDM-4 aplica el concepto de una matriz de caminos que comprende categorías definidas según los atributos más importantes que influyen en el desempeño del pavimento junto con el costo de los usuarios. Aunque es posible modelar secciones de carretera individuales en la aplicación a nivel del análisis de estrategia, la mayoría de las administraciones de caminos serán a menudo responsables de varios miles de kilómetros de carreteras, por eso a nivel individual el modelo no suele emplearse. La matriz de caminos puede ser definida por los usuarios para representar los factores más importantes en los costos de transporte en un país. Una matriz típica de redes de caminos puede ser categorizada según lo siguiente:

- Volumen de tráfico
- Tipos de pavimento
- Condición del pavimento
- Ambiente o zonas climáticas

El análisis de estrategia puede usarse para analizar una red escogida, preparando un rango medio de estimaciones de necesidades de gasto para el desarrollo del camino y la conservación del mismo bajo presupuestos diferentes. Se producen estimaciones de requisitos de gasto para periodos que van normalmente entre 5 a 40 años.

Aplicaciones típicas para el análisis a nivel de estrategia incluyen:

- Plan de gastos a largo tiempo.
- Predicción de impactos sobre la red.

- Asignación de presupuestos de mantenimiento, rehabilitación, mejoramiento y desarrollo.

La forma de llevar a cabo lo descrito anteriormente es optimizando a través de alguno de estos métodos:

- Maximizando el VAN: Maximizando el Valor Presente Neto al realizar una optimización del presupuesto.
- Minimizar el costo para un IRI designado: minimiza el costo para una meta de rugosidad al realizar una optimización del presupuesto.

Administrador de Datos

* Red de Carreteras

Es el medio básico de almacenar la información de las características de una o más secciones de carretera. Permitiendo a los usuarios definir redes y sub-redes diferentes. Las entidades de los datos de este módulo son:

- Secciones: Tramos de carretera donde las características físicas son bastante constantes.
- Arcos: Comprende uno o más secciones donde las del tráfico son bastante similares.
- Nodos: Intersecciones que conectan arcos o otros puntos a que hay un cambio significativo en el tráfico, en las características del carril, o los límites administrativos.

* Flota Vehicular

La flota vehicular es el medio de almacenamiento y recuperación de las características de los vehículos para que a partir de las velocidades de operación se establezcan los costos y tiempos de viaje y otros efectos relacionados con los vehículos. El método representa una flota de vehículos considerablemente más adaptable a la que usó en HDM-III, sin el límite en el número o tipos de vehículos que pueden especificarse. Motocicletas y vehículos no motorizados pueden ser incluidos. Existe un juego múltiple de vehículos con una gama amplia de datos predefinidos que pueden usarse en diferentes análisis.

* Trabajos de mantenimiento y mejoramiento

En HDM-4 el mantenimiento y los mejoramientos representan espacios o niveles de condición y respuesta ante ciertas circunstancias y situaciones que pueden ser usadas para elevar o conservar la condición de una vía. Las mantenciones se definen como los trabajos para mantener la red del camino al nivel designado. Cada mantención consiste en un conjunto de uno o más trabajos. Cada intervención se define en términos de cuando se aplica, el nivel de la intervención, el tipo (sello, recapado, etc.), y el efecto resultante en el pavimento. Los mejoramientos se definen como los trabajos sobre un camino que son llevados a cabo debido a la caída del estado de la red por debajo de un cierto nivel. Cada mejoramiento se define en términos del nivel de la intervención, del tipo de mejora, de los costos y la duración de los trabajos, y el efecto resultante en el pavimento en términos de su condición, geometría, etc.

Algunos de los tipos de mejora incluyen la ampliación de la calzada, ensanchamiento parcial, reconstrucción, y actualización. El usuario del programa puede crear un conjunto de mantenciones y mejoras que pueden asignarse a las secciones del camino en muchos Proyectos, Programas y Estrategias que el usuario cree.

* Configuración de HDM-4

El módulo de configuración de HDM-4 proporciona la facilidad para personalizar funcionamiento del sistema permitiendo reflejar las normas base en las que por defecto se trabaja en un estudio. Los datos predefinidos y coeficientes de calibración pueden definirse de manera flexible para minimizar la cantidad de datos que deben cambiarse para cada aplicación de HDM-4. El programa proporciona valores por defecto, pero éstos son todos redefinibles por parte del usuario. Los factores que influyen en este módulo están relacionados con los siguientes aspectos:

- Modelos de Flujo de Trafico: Se usan modelos de Flujo de Tráfico para representar las intensidades de tráfico variantes que ocurren en caminos a lo largo del día. Las diferentes Secciones del camino exhiben modelos de flujo de tráfico diferentes según su uso. Se definen Modelos de Flujo de Trafico como un conjunto de periodos de flujo. Un periodo de flujo representa las horas del día (encima del curso de un año) con el mismo flujo de tráfico.
- Tipos de Flujo de Velocidad: La función primaria de los Tipos de Flujo de Velocidad es representar las características de capacidad de diferentes tipos

de camino. Se definen las características de capacidad en términos de los varios parámetros (como capacidad última y la capacidad de flujo libre) eso constituye la curva modelo velocidad contra flujo.

- Zonas Climáticas: Se usan para representar las condiciones climáticas encontradas en diferentes partes de una red vial. Los datos que representan estas condiciones climáticas afectan el deterioro del pavimento. Los datos de Zona de clima están divididos en dos categorías: Humedad y Temperatura.
- Parámetros agregados: Los valores de los parámetros que el usuario define (por ejemplo: bueno, regular, malo) corresponden a valores detallados por los parámetros relacionados en la Sección de Tablas de Datos Agregados de la Configuración. El sistema HDM-4 puede, por consiguiente, tener una definición diferente de lo que constituye bueno, malo o regular que satisfaga las condiciones locales. Entre los aspectos que contempla este módulo para que el usuario defina condiciones base para los análisis están los siguientes:
 - Volumen de tráfico (AADT)
 - Clase de carretera y rodadura (rugosidad)
 - Geometría
 - Calidad de construcción
 - Suficiencia estructural (fuerzas sobre el pavimento)
 - Calidad de rodadura (rugosidad)
 - Condición superficial (daños superficiales)
 - Textura superficial

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

3.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD FUNCIONAL

3.1.1 Método para determinar el PSI y PSR

Calificación de la serviciabilidad

La metodología consiste en que se selecciona un grupo de personas para formar un panel evaluador, que representen a la población de usuarios de los caminos. Este panel entonces evalúa un conjunto preseleccionado de tramos de acuerdo a las instrucciones que se les da. Cada miembro de este panel expresa su opinión propia y subjetiva acerca de la calidad de rodado de cada tramo. Adicionalmente se estima de interés que los miembros del cuerpo calificador den su opinión global en el sentido de encontrar aceptable o no el estado del pavimento, siempre desde el punto de vista de usuario del camino porque así es posible determinar el umbral de serviciabilidad final.

La serviciabilidad es entonces la percepción que tienen los usuarios del nivel de servicio del pavimento. Es por esta razón que la opinión de ellos es la que debe ser medida para calificar la serviciabilidad. Se definió una escala de evaluación de 0 a 5. En ella una evaluación con nota 5 significa una superficie perfecta, mientras que una nota 0 significa intransitable. Los investigadores Carey e Irick desarrollaron una prueba AASHO cuyas suposiciones básicas son:

- El pavimento debe proporcionar confort y seguridad al usuario.
- El confort y la calidad de rodado es un aspecto subjetivo o de opinión del usuario.
- La serviciabilidad puede determinarse a partir del promedio de las evaluaciones de todos los usuarios. Este promedio da origen al índice Present Serviciability Rating (PSR), el cual por naturaleza, tiene carácter subjetivo.
- Hay algunas características físicas del pavimento que pueden medirse objetivamente y pueden relacionarse con las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento permite obtener un índice objetivo denominado Present Serviciability Index (PSI).
- El comportamiento del pavimento puede ser representado por la historia de la serviciabilidad de dicho pavimento.

Cuadro 3-1 ESCALA DE CALIFICACIÓN DE LA SERVICIABILIDAD SEGÚN AASHO

AASHO [AASHO, 1962].

Calificación		Descripción
N Numérica	V Verbal	
5.0 4.0	Muy Buena	Sólo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasificarían como muy buenos.
4.0 3.0	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de abuellamiento y fisuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como desconches y fisuras menores.
3.0 2.0	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir abuellamiento, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento, escalonamiento y pumping.
2.0 1.0	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y abuellamiento, y ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye desconche de juntas, escalonamiento, parches, agrietamiento y bombeo.
1.0 0.0	Muy Mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.

Determinación del Índice de Serviabilidad en la Prueba AASHO

En forma simultánea a la calificación de la serviabilidad de tramos característicos realizada por la prueba AASHO, se buscó establecer una relación entre esta calidad de servicio y otros indicadores del deterioro de la superficie de

rodado. Desde el punto de vista de los usuarios, quedó en evidencia que las causas determinantes en la calificación de la serviciabilidad eran las deformaciones del perfil longitudinal (pavimentos de hormigón y asfalto), las irregularidades producidas por parches y sellado de grietas (pavimentos de hormigón y asfalto), las variaciones de perfil transversal (pavimentos de asfalto) y las pérdidas de material en los bordes de juntas y grietas (pavimentos de hormigón). Se realizaron, en consecuencia, medidas de los diferentes parámetros que caracterizan el estado físico del pavimento para los tramos calificados con la serviciabilidad (PSR).

a) Medida de los indicadores de deterioro. En primer término, y como indicador de la deformación longitudinal, se midió la irregularidad superficial del pavimento, es decir de las desviaciones del perfil longitudinal. En un tramo homogéneo, la dispersión de esta distribución es constante en todo el tramo. Sin embargo el valor de la distribución en un punto no es independiente de los valores en los puntos próximos.

Para facilitar el trabajo de otras agencias, el personal del AASHO Road Test desarrolló un perfilómetro simplificado, designado perfilómetro CHLOE, éste presenta un comportamiento muy similar al AASHO.

Se trata de un perfilómetro, remolcado por un vehículo a una velocidad de 5 mph (8 km/h). La irregularidad del pavimento es de medida mediante el cambio de ángulo entre dos líneas de referencia, una de las cuales está determinada por la línea CD que une los centros de dos pequeñas ruedas, separadas a 23 cm (9 in), y la otra línea GH que une el punto de apoyo del eje de ruedas trasero del vehículo de arrastre. Por tratarse de ángulos pequeños, la tangente del ángulo A es interpretada como la pendiente del pavimento sobre una distancia entre ejes de 23 cm. Un mecanismo de funcionamiento permanente permitió obtener el registro continuo de la pendiente a intervalos de 30 cm (1 ft.), a medida que el perfilómetro recorría el tramo a medir.

De entre las múltiples variables con que se midió la irregularidad o aspereza del pavimento, el promedio de las varianzas de la pendiente en ambas huellas, demostró la mejor correlación estadística con la calificación de serviciabilidad, por lo que se adoptó como una de las variables claves en el deterioro de un pavimento. La varianza de la pendiente longitudinal (SV, SLOPE VARIANCE) es

un parámetro que representa la rugosidad de la sección de pavimento, y corresponde a la varianza de la distribución de irregularidades (AASHO, 1962).

En cuanto a las deformaciones transversales, para los pavimentos de asfaltos se midieron las diferencias de cota existentes entre el centro de cada huella y una línea que conecta dos puntos ubicados (transversalmente) a 61 cm (2 ft) de su eje. Estas medidas se repitieron para ambas huellas cada 6m (20 ft), calculándose finalmente el promedio de la profundidad del ahuellamiento (RD), parámetro que demostró, una buena correlación con la calificación de la serviciabilidad.

En el caso en pavimentos de hormigón se midió el desnivel entre ambos lados de una junta o grieta, sobre el eje de cada huella.

Esta medida no demostró sin embargo, una relación significativa con la serviciabilidad.

En cuanto al deterioro de la superficie en los pavimentos de asfalto, se midió la superficie afectada por agrietamiento tipo piel de cocodrilo(C), en (ft²) por cada 1000 ft² de pavimento. Se encontró que la grieta aislada y fina no influye en la calificación de la serviciabilidad. Por último, se consideró la superficie parchada (P), en (ft²) por cada 1000 ft² de pavimento.

En los pavimentos de hormigón se consideraron las grietas selladas o aquellas abiertas y con desconche superior a tres pulgadas: éstas se midieron considerando el total acumulado de agrietamiento transversal y longitudinal (C) en (ft) por cada 1000 ft² de pavimento. Análogamente el caso del asfalto, se computó además el total del área parchada (P) en ft² por cada 1000 ft² de pavimento. Se midió también la superficie desconchada (considerando sólo las saltaduras de diámetro superior a 3 pulgadas), aunque esta variante no resultó relevante.

b) Expresión analítica del índice de serviciabilidad

Una vez medidos los diferentes indicadores del deterioro señalados en el punto anterior, en los tramos de los pavimentos, seleccionados en la prueba AASHO para diferentes localidades de modo de cubrir todo el espectro de posibilidades de formas y grados de deterioro, tanto en asfalto como en hormigón se procedió a buscar una posible correlación entre la calificación de la serviciabilidad y los

valores numéricos de los mencionados indicadores de deterioros de medidos. Sobre el pavimento de cada tramo de prueba.

Fue hecho entonces un análisis de regresión estadístico que correlacionó el PSR con los deterioros medidos. Como resultado de estos se obtuvieron las ecuaciones de Serviciabilidad Presente (PSI) el cual es una estimación del PSR basado en la rugosidad y el deterioro (Carey 1960).

Así, el índice obtenido por la ecuación de regresión incluye los términos de rugosidad y deterioro los cuales se correlacionan bien con la estimación subjetiva (PSR) de un grupo de usuarios. Las ecuaciones originales del PSI para pavimentos de asfalto y hormigón desarrolladas en la prueba AAHSTO se muestran en las siguientes ecuaciones (AAHSTO, 1993):

$$\text{Asfalto PSI} = 5,03 - 1,91 * \log(1 + SV) - 1,38 * (RD)^2 + 0,01$$

$$\text{Hormigón PSI} = 5,41 - 1,78 * \log(1 + SV) - 0,09$$

Donde:

SV = Varianza de la pendiente longitudinal (Slope Variance), medida con un perfilómetro CHLOE, $\text{rad} \times 10^{-6} (\text{in}/\text{ft})^2$.

RD = Ahuellamiento promedio en pavimentos de asfalto, in.

C (en asfalto) = Superficie agrietada, $\text{ft}^2/1000 \text{ft}^2$.

C (en hormigón) = Longitud total (transversales y longitudinales) de grietas, selladas o abiertas, $\text{ft}^2/1000 \text{ft}^2$.

P = Superficie bacheada, $\text{ft}^2/1000 \text{ft}^2$.

Considerando el alto grado de correlación existente entre la calificación de la serviciabilidad por parte del usuario y ciertas variables que miden cuantitativamente el deterioro físico de un pavimento, el concepto inicial de serviciabilidad (en términos de una opinión del usuario) fue reemplazado por el de un índice de serviciabilidad (en términos de una opinión del usuario) fue reemplazado por el de un índice de serviciabilidad (PSI) calculado según la relación anterior, a partir de ciertos parámetros medidos con absoluta objetividad.

Una vez encontrada la forma de establecer la calificación de la serviciabilidad sobre bases claras y precisas, y al aplicar una cierta escala de valoración de los

usuarios a sectores de con pavimentos en muy diversos estados de deterioro, es posible establecer una relación cuantitativa entre esta calificación de la serviciabilidad y ciertos parámetros que miden el deterioro físico de la carpeta de rodado. Entonces es posible reemplazar la calificación subjetiva de serviciabilidad por un índice numérico calculado a partir de variables físicas medibles. Este índice de serviciabilidad, determinado sobre bases estrictamente objetivas, reemplaza con ventajas apreciables la calificación original de la calidad de servicio, en especial cuando se trata de evaluar un número apreciable de sectores de carretera en forma permanente o al menos, con relativa frecuencia.

3.1.2 Método Para Determinar la Rugosidad

Equipo de medición estático

MERLIN (Machine for Evaluating Roughness using Low – Cost Instrumentation): Consiste en una estructura metálica de 1.8 m de longitud, con una rueda al frente, un pie de apoyo fijo atrás y un apoyo central oscilante, este último mide las desviaciones de cota de un punto respecto a la rasante que definen los otros dos puntos. El apoyo central está unido a un brazo que en su extremo superior posee un puntero que permite registrar estas desviaciones en una planilla de papel.

Relaciones entre PSI e IRI

La relación entre la serviciabilidad y la rugosidad se establece a partir de los valores de rugosidad y los resultados de PSR. El IRI es el Índice de Rugosidad Internacional, que fue obtenido en cada tramo a través de un perfilómetro láser, y que se expresa en m/Km. Se debe recordar que el IRI del tramo es el promedio del IRI sobre el perfil de cada huella, y considerado para la longitud total del tramo que debe ser 400 metros. El PSR es el promedio para cada tramo de las calificaciones individuales de los miembros del panel evaluador. Cuando se establecen ecuaciones que predicen los valores de PSR a partir de mediciones objetivas como las de rugosidad, entonces se habla de PSI o "Present

Serviceability Index” para diferenciarlo del “Present Serviceability Rating” que proviene directamente del panel de usuarios.

A continuación se presentan distintas ecuaciones desarrolladas a partir de este concepto.

a) Modelo empleado por el HDM III (Paterson, 87)

Esta relación se desarrolló para pavimentos de asfalto y se dedujo en base a datos recogidos de cuatro fuentes distintas: Brasil, Texas, Sudáfrica y Pennsylvania. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$PSI = 5 \times e^{(-IRI/5.5)}$$

b) Modelo desarrollado por B. Al-Omari y M.I. Darter (Al-Omari, 1994)

Estas relaciones fueron desarrolladas separadamente para pavimentos asfálticos, de hormigón y recapados (sobre hormigón) en base a información de los estados de Louisiana, Michigan, New Jersey, New México, Ohio e Indiana en los Estados Unidos de América. A pesar de lo anterior, por la inexistencia de diferencias significativas entre los modelos, este estudio recomendó el uso de la siguiente relación no lineal para todo tipo de pavimento:

$$PSI = 5 \times e^{(-0.26IRI)}$$

c) Modelo desarrollado por Dujisin – Arroyo (Dujisin, 95)

En las ecuaciones originales de la AASHTO Road Test (AAHSTO, 1993), el término de rugosidad (SV) controla el cálculo de la serviciabilidad. En la práctica, esto significa que la rugosidad tiene el mayor efecto en la evaluación de los usuarios de la calidad de rodado de un pavimento. Por esto no se comete un gran error al relacionar directamente el índice de serviciabilidad con las mediciones de rugosidad. Así, a partir de los datos obtenidos por el equipo de investigación del AAHSTO Road Test (AAHSTO, 62), se puede correlacionar el PSR solamente con las mediciones de rugosidad (SV), obteniéndose las siguientes ecuaciones:

Hormigón

$$PSI = 5.93 - 2.62 \log (1 + SV)$$

Asfalto

$$PSI = 4.95 - 2.01 \log (1 + SV)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden combinar con la relación generada a partir de una simulación computacional que relaciona el IRI con la varianza de la pendiente longitudinal (SV). Con lo que finalmente se obtienen las siguientes relaciones para cada tipo de pavimento:

Hormigón

$$PSI = 7.10 - 2.19 (IRI)^{0.5}$$

Asfalto

$$PSI = 5.85 - 1.68 (IRI)^{0.5}$$

3.2 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL

3.2.1 Métodos No Destructivos

Un método simple y conveniente para determinar la capacidad estructural del pavimento es mediante el uso de ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos de evaluación estructural de pavimentos han sido utilizados tradicionalmente para identificar las posibles causas de fallas y proponer alternativas de rehabilitación para el pavimento existente.

Sin embargo, otra de las aplicaciones de los ensayos no destructivos es durante la etapa de control de calidad de las obras de pavimentación mediante la medición deflectométrica en las distintas capas que componen el pavimento. Con este propósito se recopila la información en campo para luego efectuar el análisis estructural mediante la aplicación de modelos matemáticos utilizando métodos racionales para obtener valores de esfuerzo, deformación y deflexiones esperadas a nivel de carpeta asfáltica.

Las técnicas para medir deflexiones de pavimentos son numerosas y según las características de la carga que se aplica en la superficie del pavimento se clasifican en: carga estática, carga dinámica vibratoria o carga dinámica con impulso. Las respuestas generadas con cada equipo de medición de deflexiones son distintas. Es por ello, que con el objeto de comparar los valores de respuesta esperada durante la fase de estudio y los resultados finalmente obtenidos luego de la rehabilitación es preferible utilizar el mismo tipo de equipo de medición.

La Viga Benkelman es uno de los equipos de mayor uso en el Perú para la medición de deflexiones. Como parte de un procedimiento de control de calidad este equipo es utilizado para la medición de deflexiones en las distintas capas del pavimento durante la ejecución de la obra.

Los resultados obtenidos son comparados con límites de deflexión admisible y parámetros de capacidad estructural obtenidos mediante métodos empíricos y también con métodos racionales.

3.2.2 Métodos Deflectométricos

La evaluación estructural tiene por objeto estudiar la capacidad del pavimento para "soportar" las cargas de tráfico actuantes durante su vida útil. Esta evaluación puede efectuarse mediante prospecciones geotécnicas con ensayos "no destructivos", siendo estos últimos frecuentemente empleados por no causar daño al pavimento existente y por su factibilidad de ejecución.

En general, las fallas estructurales fundamentales dependen de la magnitud y frecuencia de las deformaciones recuperables y de las deformaciones permanentes en las estructuras. Así, el criterio predominante para valorar la capacidad estructural se basa en la deformabilidad de las calzadas bajo cargas normalizadas.

En sus orígenes las medidas de deflexión típicamente involucraban la medida de la deflexión máxima bajo la carga aplicada, relacionándola con procedimientos empíricos estandarizados.

Usualmente los resultados estadísticos de la medición de las deflexiones en el pavimento son comparados con un nivel de "deflexión tolerable" ante el tráfico esperado para la estructura en evaluación. Si el valor medido excede la deflexión tolerable, se emplean procedimientos empíricos para determinar las medidas correctivas requeridas, usualmente un esfuerzo, para reducir el valor de las deflexiones a un nivel tolerable.

Con el avance en el análisis y diseño de pavimentos, basado fundamentalmente en principios de ingeniería, el uso de la información de las deflexiones se ha vuelto más sofisticado. Información completa de las curvas deflectométricas es usada en un proceso de cálculo regresivo (Back calculation) para estimar "in situ" el módulo elástico para cada capa de pavimento. El conocimiento de los espesores de las capas que componen la estructura es típicamente necesario

para seguir este procedimiento. El modulo “retrocalculado” es un indicador de la condición estructural de la capa a la cual representa.

Estos datos también son utilizados en programas que emplean modelos elásticos multicapas o de elementos finitos para calcular esfuerzos y tensiones de relevamiento de falla y fatiga para evaluar la acumulación de daño ante el tráfico y predecir la probable falla del pavimento. También puede emplearse esta información para evaluar mediante correctivas como esfuerzo, rehabilitación o reconstrucción de pavimentos.

Siendo la deflexión una medida de la respuesta estructural del conjunto pavimento-subrasante frente a una determinada sollicitación de carga, puede efectuarse el análisis deflectométrico para los siguientes fines:

- Análisis estadístico de las deflexiones del tramo en evaluación.
- Determinar los periodos críticos en que se origina un mayor deterioro del pavimento, basándose en la variación estacional de las deflexiones.
- Como un indicador para estimar “la capacidad de soporte” del pavimento para resistir las cargas de tráfico durante su vida útil.
- Análisis de la relación deterioro-fatiga usando procedimiento de cálculo regresivo.
- Correlación entre los valores de deflexiones y la presencia o rápido desarrollo de fallas por fatiga y la posibilidad de establecer un rango de valores tolerables en relación al tránsito.
- Esbozar estrategias de mantenimiento en los sistemas de gestión de pavimentos.

Los siguientes principios básicos acerca de las deflexiones deben tenerse en cuenta:

Un nivel de deflexión tolerable es función del tráfico (tipo y volumen) y de la estructura del pavimento.

El esfuerzo que se coloca en un pavimento reduce las deflexiones. El espesor necesario para reducir las deflexiones a un nivel tolerable puede ser establecido.

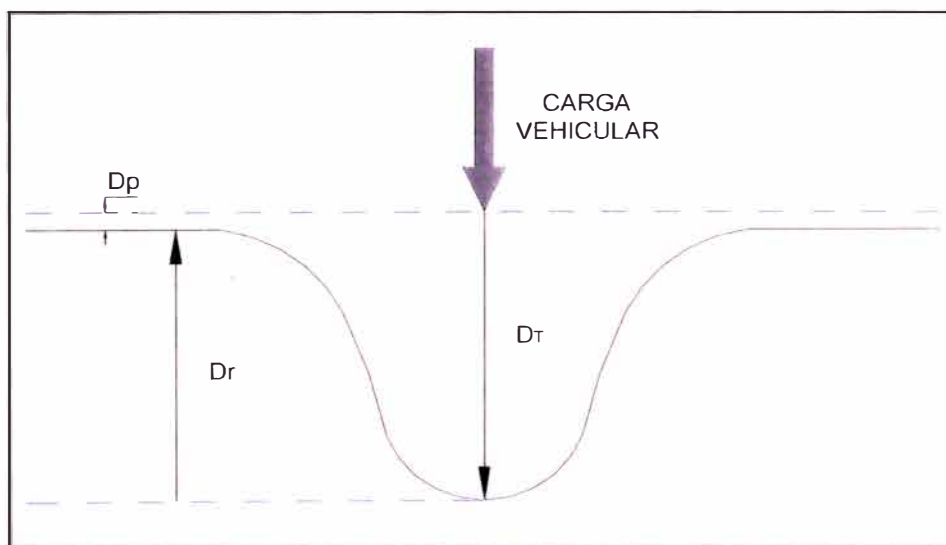
Las deflexiones medidas en un pavimento varía a través del año dependiendo del tipo de pavimento, efectos de la temperatura de pavimento flexible, la magnitud de las deflexiones superficiales se incrementan en la temperatura del ligante asfáltico.

DEFLECTOMETRÍA MÉTODO EMPÍRICO CONREVIAL

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 este motivo, se distingue tres tipos de deflexiones:

- a. Deflexión Total (D_T): Es la deformación vertical puntual de una superficie bajo la acción de una carga.
- b. Deflexión recuperable o elástica (D_r): Es la recuperación elástica de la superficie que se produce al retirar la carga.
- c. 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.

Gráfico 3-1 TIPOS DE DEFLEXIONES



(Fuente: Estudio CONREVIAL)

Medición de deflexiones

Las mediciones de deflexión en la superficie del pavimento, se pueden realizar con el equipo portátil denominado Viga Benkelman, cuya evaluación permite conocer los diferentes estados y propiedades del pavimento, de gran utilidad para el diseño, construcción y conservación de su estructura.

La Viga Benkelman es un dispositivo mecánico, que mide el desplazamiento de un punto de contacto colocado entre las ruedas duales de un camión bajo el eje de carga, con una determinada presión de inflado en los neumáticos y una carga pre-establecida en el eje.

a. Relación de Equipos

- Camión volquete de 8-12 m³ de capacidad, llantas 12-20 (11-20) de 16 lonas en óptimo estado, presión de inflado de llantas de 80 psi, eje trasero cargado con 8.2 Ton de peso.
- Balanza de plataforma para pesado del eje trasero del camión volquete.
- Viga Benkelman con sistema de bloqueo de brazo pivotante y sistema de vibración. Con dial indicador para toma de lecturas.
- Varilla guía para referenciar la medición en los puntos indicados.
- Termómetro electrónico digital para la medición de la temperatura del asfalto.
- Herramientas para medir el espesor del asfalto (cincel y comba de 10 lb)
- Tablero de campo con formatos para toma de datos.
- Juego de herramientas básicas (martillo, desarmador, alicate, alambre negro de construcción, marcador de tinta indeleble, cinta plástica, tiza blanca, lápices, clavos de 2 " y 3 ").
- Elementos de seguridad (Chalecos de seguridad fosforescente y dos ó tres banderolas de tela color roja).
- Tope de madera para trabar llanta de camión en subidas.

b. Relación de Personal

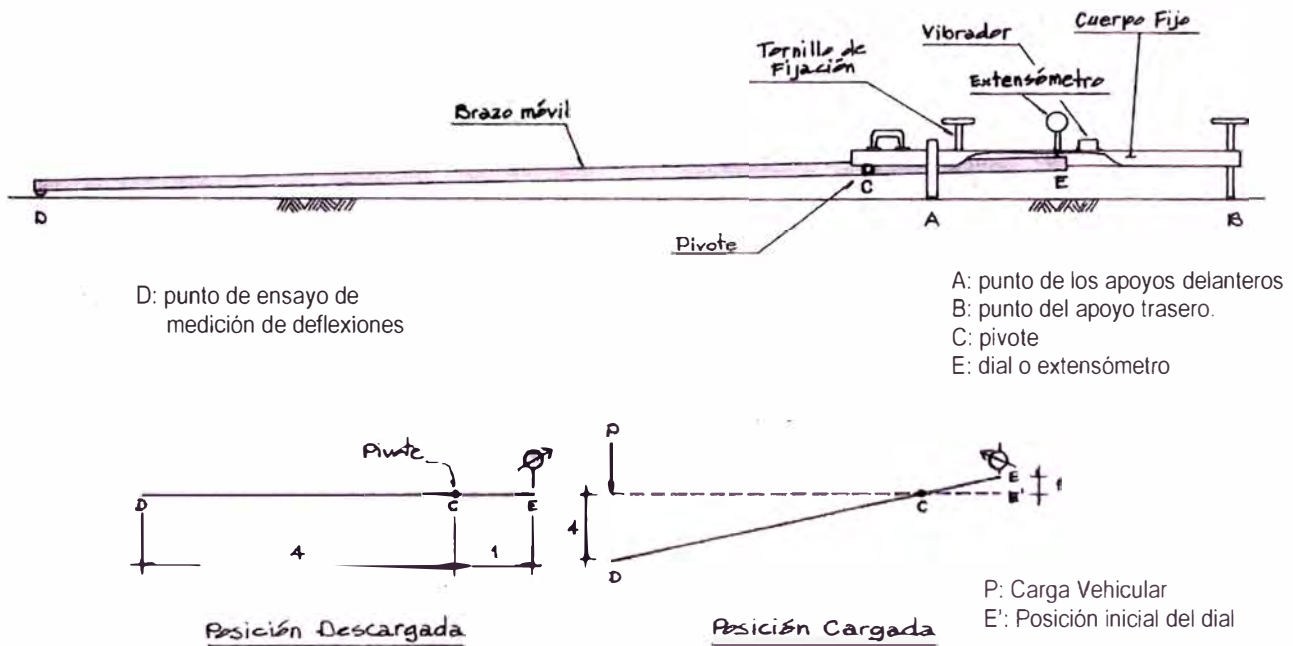
- Ingeniero de campo.
- Técnico de laboratorio para ejecución de lecturas.
- Técnico de laboratorio para anotación de datos de ensayos.
- Auxiliar de laboratorio para medición de temperaturas.
- Ayudante para transporte y colocación de Viga Benkelman.
- Chofer de volquete.
- Ayudante para seguridad (2).

c. Procedimiento de medición en campo

La Viga Benkelman es un instrumento que funciona según el principio de una palanca, uno de cuyos extremos se apoya en el pavimento deformado ante la aplicación de una carga, mientras que el otro está en contacto sensible con un deformímetro de precisión, con dial de lecturas graduado en centésimas de mm. Dependiendo de la relación de brazos del equipo y de la

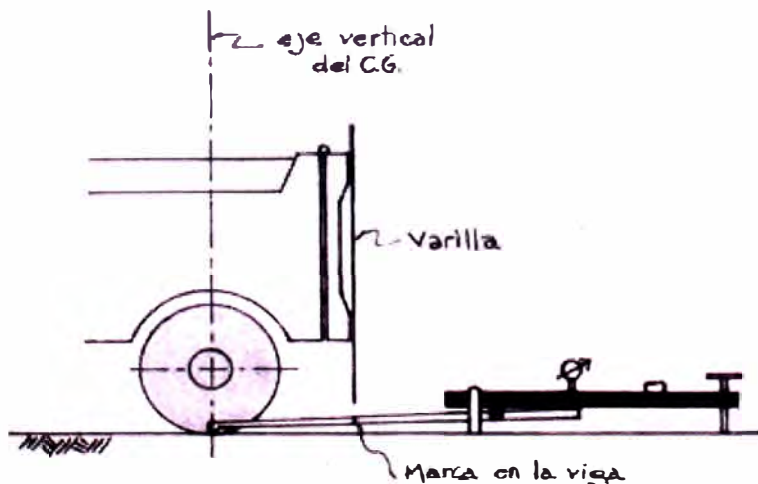
factibilidad que el dial proporcione la verdadera magnitud de las medidas, en forma automática, se establece si es necesario corregir o no las lecturas. La carga de ensayo es del orden de 8.2 Ton, que la proporciona el eje posterior simple de llanta doble de un camión. La presión de inflado de las llantas debe verificarse en 80 psi. Eventualmente la carga usada en los ensayos puede tener una variación en el orden de $\pm 1\%$.

Gráfico 3-2 ESQUEMA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN



(Fuente: Estudio CONREVIAL)

Gráfico 3-3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA EN ENSAYOS CON VIGA BENKELMAN



(Fuente: Estudio CONREVIAL)

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

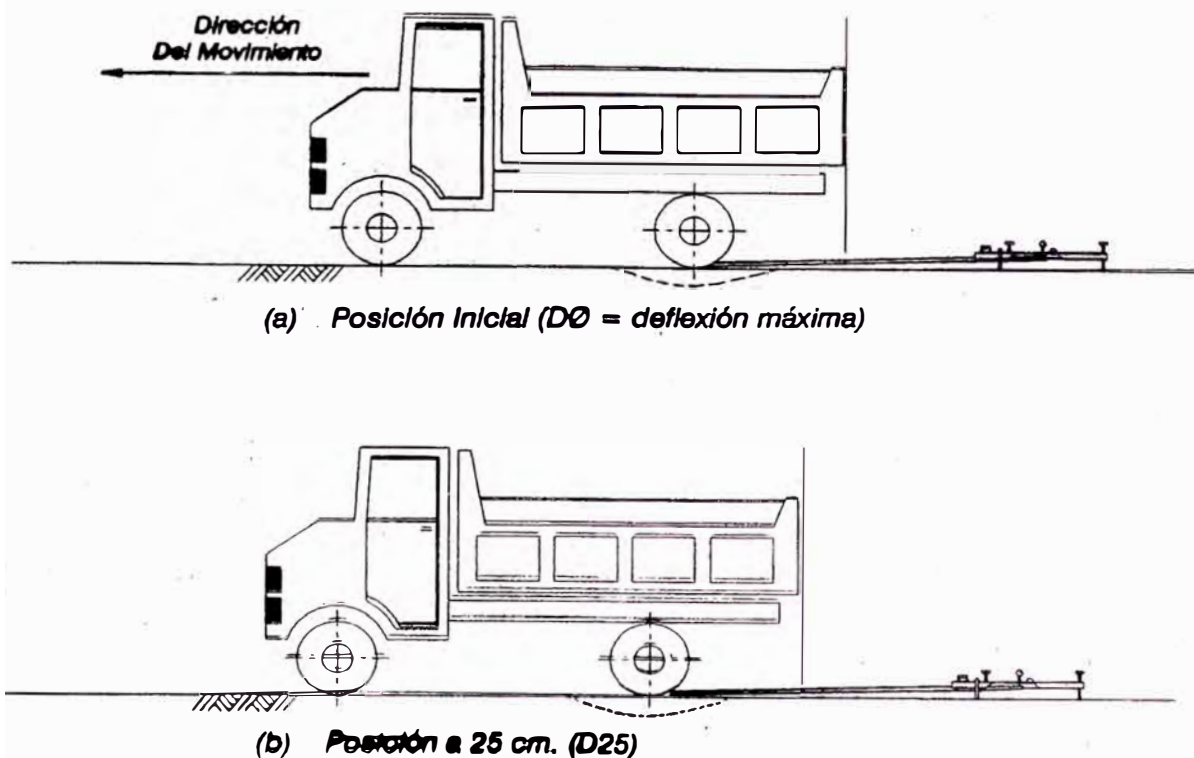
Para ello se coloca la punta del instrumento, en un punto "D" seleccionado, bajo el centro de gravedad de una de las llantas dobles del camión que aplica la carga, y que inicialmente se encuentra estacionado. El pavimento, en consecuencia, por efecto del peso aplicado por las llantas experimenta una deformación elástica. En esa posición se gradúa el dial en "cero", que sería la lectura inicial.

Luego, el camión avanza a una velocidad muy baja (1 a 3 Km/h), como consecuencia el punto "D" del pavimento, donde está apoyada la punta de la Viga Benkelman, es liberado progresivamente de la carga a la que inicialmente estaba sometido, y por lo tanto, el pavimento en ese punto empieza igualmente a recuperarse del estado de deformación en que se encontraba.

Cuando el camión avanza 25 cm, el pavimento en el punto "D" seguirá todavía parcialmente deformado; en esa posición se tomará una segunda lectura.

Finalmente, la llanta del camión se aleja completamente del punto "D" dejándolo completamente liberado de la influencia de su carga, y, en consecuencia, el pavimento en dicho punto se recuperará casi completamente del estado inicial de deformación, condición en la cual se toma una última lectura en el dial del deflectómetro.

Gráfico 3-4 ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON LA VIGA BENKELMAN



(Fuente: Estudio CONREVIAL)

Cálculo de deflexiones recuperables

El procedimiento para el cálculo de las deflexiones es simple. Para el caso de la deflexión máxima, se debe calcular la lectura final. Para el caso de la deflexión a 25 cm, se debe encontrar la lectura a 25 cm. En ambos casos se multiplican por la relación de brazos de la Viga Benkelman empleada.

Corrección por temperatura

La temperatura de la capa asfáltica de rodadura, afecta al valor de la magnitud de la deflexión, esto se debe a una 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, esté entre 5 a 30 °C, con la finalidad de que no se produzcan deformaciones plásticas considerables; y para el caso de tratamiento superficiales bituminosos 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 Nacional Vial (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 : 1×10^{-3} ; constante para capas granulares (1/ cm x°C).

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

e : Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

Corrección por estacionalidad

La capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación que experimentan, 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 según estudios basados en Brasil, considerando el tipo de suelo de la subrasante y la época en que se realiza los ensayos.

Cuadro 3-2 FACTORES DE CORRECCION POR ESTACIONALIDAD

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)

ANALISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE EL MÉTODO EMPÍRICO

Cálculo del radio de curvatura

El radio de curvatura, permite determinar la magnitud de la deformación lineal por tracción que sufren las capas asfálticas, al flexionar bajo la acción de las cargas de tránsito. El método para determinar el radio de curvatura, se basa en la hipótesis de que la línea de deflexiones de la distancia hasta el eje de carga, se aproxima a una parábola hasta una distancia superior a 25 cm, sufriendo luego una inflexión para tender asintóticamente hacia la horizontal. La curvatura de la parábola queda entonces definida por su parámetro, el cual en la zona de máxima curvatura, se confunde con el radio del arco oscular en dicho punto, o sea exactamente bajo el centro del eje de la rueda cargada. El radio de curvatura según la metodología francesa se expresa mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

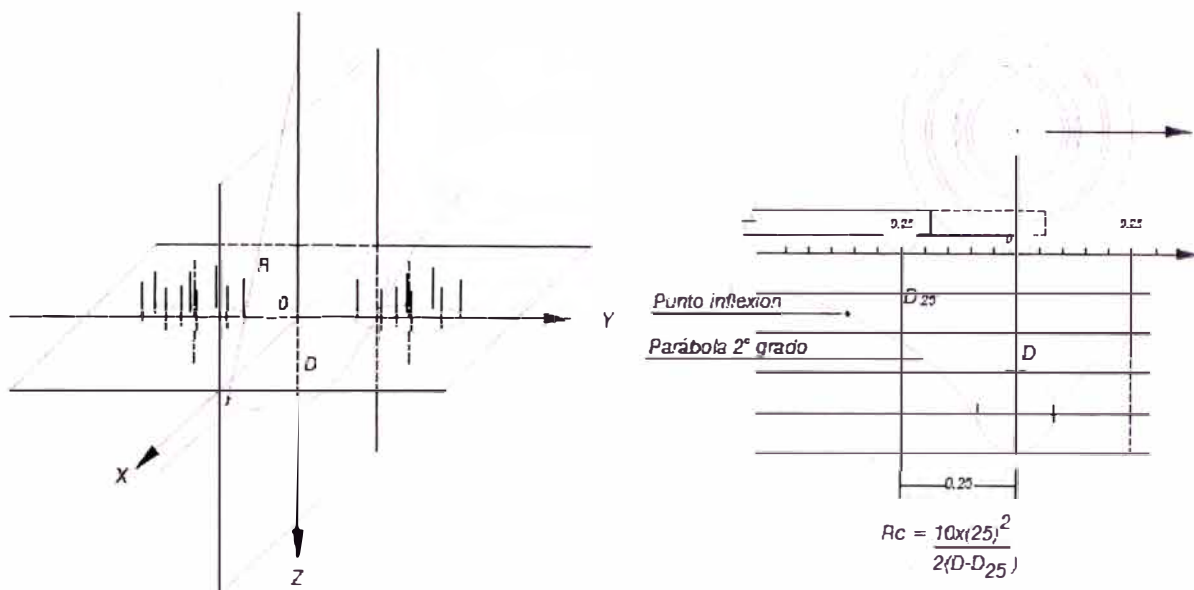
R_c : Radio de curvatura (m)

D_0 : Deflexión máxima corregida por temperatura (0.01 mm)

D_{25} : Deflexión a 25 cm corregida por temperatura (0.01 mm)

10 : Coeficiente por cambio de unidades.

Gráfico 3-5 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL RADIO DE CURVATURA



(Fuente: Estudio CONREVIAL)

Deflexión característica

La deflexión característica, es un parámetro estadístico, empleado para la caracterización representativa de la magnitud de deformación de los pavimentos. Para su determinación, es necesario contar con una base de datos de deflexiones recuperables máximas (D_0), del tramo que se requiere evaluar, y establecer los parámetros estadísticos de dichos datos.

La deflexión característica (D_c), se define con conceptos de la estadística clásica, el cual se representa mediante siguiente expresión:

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

Donde:

D_c : Deflexión característica

\bar{D} : Deflexión promedio de los valores individuales de D_0 corregidos por temperatura y estacionalidad

σ : Desviación estándar

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

Dado que el estudio 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 ende, 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:

a. Deflexión media

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

D_i : Valor individual de un ensayo

n : numero de ensayos individuales

b. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n}} \quad (n: \text{ para datos no agrupados})$$

c. Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{D}} \times 100 \quad (C_v \text{ varía entre } 10\% \text{ a } 40\%)$$

Cuadro 3-3 VALORES DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Valor de Diseño (%)	Deflexión Característica	Extensión del pavimento con $D > D_c$ (%)	Método que considera
50	σ	50	
75	$D_p + 0.674\sigma$	25	
85	$D_p + \sigma$	15	
90	$D_p + 1.30\sigma$	10	
95	$D_p + 1.645\sigma$	5	Ing. Ruiz en Argentina
98	$D_p + 2\sigma$	2	Instituto de Asfalto en Canadá
99	$D_p + 2.33\sigma$	1	
99.9	$D_p + 3\sigma$	0.1	

(Fuente: Estudio Definitivo para el Mantenimiento Periódico de la Carretera Panamericana Sur Tramo: Puente Santa Rosa - Puente Montalvo)

El criterio expuesto es conducente a obtener la deflexión característica del tramo que sea representativo de las condiciones críticas del pavimento y cuyo valor, al estar calculado en base a la deflexión media más 1.645 veces la desviación estándar, hace que, si el histograma de los valores individuales sigue una ley de distribución normal, el 95% de los valores individuales sea inferior a la deflexión característica.

Deflexión admisible

La deflexión admisible, es un parámetro definido en función al tránsito 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 período considerado. La expresión analítica que define este parámetro es según la metodología del Dr. C. Ruiz (Argentina):

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

Donde:

D_a = Deflexión admisible inicial (en mm)

N_{18} = Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 ton en el período de diseño (en millones).

La determinación del número de ejes equivalentes soportados se detalla en el ANEXO 03 del presente informe, el cual sigue las normas establecidas en el manual de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito del MTC.

Juicio de la capacidad estructural del pavimento

Mediante el análisis de los resultados obtenidos se llega a establecer la capacidad estructural actual del pavimento en relación al tránsito que debe soportar la calzada; a la vez se determinará los siguientes factores:

- a) La necesidad y tipo de rehabilitación requerida de acuerdo a tres situaciones representativas que se resumen en:
 - Estructura adecuada, requiere mejora superficial.
 - Estructura de fatiga, requiere un refuerzo estructural.
 - Estructura deficiente, requiere reconstrucción parcial o total.
- b) El parámetro determinante y/o método que se empleará para el diseño de las obras de rehabilitación.
- c) La estimación de la vida útil remanente o residual de la estructura del pavimento.

Según la metodología propuesta a partir del estudio CONREVIAl, se adopta un criterio racional combinando tres factores principales:

- La apariencia de la superficie en relación a la observación de fallas (particularmente de carácter estructural) de acuerdo a los resultados de la inspección visual.
- La deflexión recuperable del pavimento, como parámetro indicativo de la respuesta mecánica del mismo, complementando con el radio de curvatura de la deflexión.
- La estructura del pavimento, determinado en base a los sondeos y antecedentes disponibles, que implica una compleja relación entre espesores

y calidad de las capas del pavimento, calidad del suelo de la subrasante, drenaje, etc.

Para la relación de estos parámetros y la diferenciación de casos típicos fundamentales que se relacionen con las distintas soluciones posibles se ha adoptado el procedimiento propuesto por el Ing. Ruiz en el "Manual para el Proyecto de Obras de Mejoramiento de Pavimentos flexibles" (1972, Argentina)

El cuadro 3-4 es una adaptación del propuesto en el citado manual para la definición de casos típicos, los cuales se describen a continuación:

- Primer Caso

Se caracteriza porque la deflexión característica D_c es superior a la tolerable para el tránsito actual o futuro previsto y por no presentar fallas estructurales generalizadas. Se trata de pavimentos infradiseñados que necesitan con urgencia un refuerzo estructural para resistir el tránsito futuro, sin esperar que el deterioro que se producirá agrave en elevada proporción la capacidad estructural que posee en el presente.

Debe prestarse especial atención que no exista inmediatamente debajo de la capa asfáltica un cierto espesor de capa de base degradada y/o con elevado contenido de humedad. En forma no destructiva la presencia de esta zona débil puede ser detectada a través de reducidos valores del radio de curvatura en relación a la deflexión. Así también, causas externas al propio pavimento son responsables de las altas deflexiones medidas, lo recomendable en estas situaciones es eliminar primero la causa motivante, y una vez estabilizada la condición, llevar a cabo nuevamente la auscultación deflectométrica.

- Segundo Caso

La característica que lo diferencia del primero es la generalización del desarrollo de fallas estructurales, que obedecen a causas ajenas a la presencia de un espesor de base débil, inmediatamente debajo de la capa asfáltica; es decir que concurren los resultados de los tres parámetros considerados.

Es el paso avanzado del primer caso cuando no se ha tomado a tiempo las medidas necesarias. Las deflexiones son empleadas para el cálculo de refuerzo. Sin embargo para valores excesivamente altos se recomienda verificar el refuerzo calculado en base a métodos de diseño racionales.

- Tercer Caso

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

El origen de fallas por fatiga (agrietamiento, fisuras tipo cuero de cocodrilo) observadas deriva en este caso de la interrelación entre los espesores de las capas asfálticas, radio de curvatura de la línea de deflexión y deformación por tracción de las mismas al flexionar repetidamente bajo cargas. Para determinado material de la capa superficial asfáltica, carga y espesor, la deformación por tracción al flexionar es inversamente proporcional al radio de curvatura; de ahí que cuando la curvatura es marcada se alcancen valores críticos de deformación, que por repetición llevan al fisuramiento.

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

- Cuarto Caso

Este caso se estima poco probable para los pavimentos del Perú, ya que se trata generalmente de antiguos pavimentos reforzados con grandes espesores asfálticos que evitan fallas por fatiga, pero que no compensan la debilidad de la fundación primitiva, por lo que se observan deformaciones permanentes que afectan toda la estructura (no atribuidas a las capas asfálticas)

- Quinto Caso

En este caso no se observan signos de degradación estructural, las deflexiones son inferiores a la tolerable y la estructura del pavimento no revela infradiseño. Los parámetros resultan concurrentes, la capacidad estructural del pavimento es satisfactoria por lo que la rehabilitación se limitará a una corrección de las deficiencias superficiales que se observen en la superficie de rodadura.

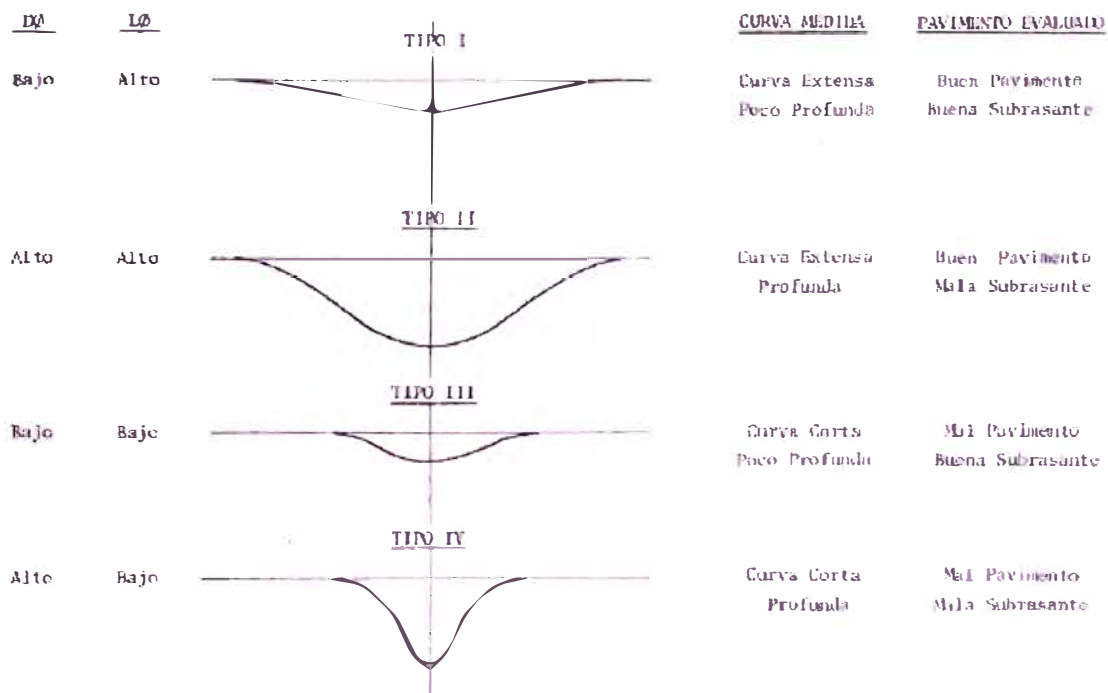
Cuadro 3-4 ANALISIS COMBINADO DE LOS RESULTADOS DE EVALUACIÓN

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

(Fuente: Jose Wilfredo Gutiérrez L, Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú. Lima Perú. 2007)

Se puede entender aun más el significado de las deflexiones ocurridas en el pavimento graficando la curva de deformación para cada punto de ensayo con la Viga Benkelman. En el gráfico 3-6 se muestra las relaciones entre la forma de la curva y la calidad del pavimento y la subrasante.

Gráfico 3-6 RELACIÓN CUANTITATIVA ENTRE LA DEFORMADA Y LA CALIDAD DEL PAVIMENTO



(Fuente: Estudio CONREVIAl)

En síntesis se considerará que el pavimento sujeto de evaluación tiene la capacidad estructural adecuada para resistir los esfuerzos del tráfico de diseño, para las condiciones de resistencia del suelo, si se cumple que la deflexión característica es menor que la deflexión admisible ($D_c < D_a$).

Además el comportamiento estructural del pavimento evaluado se calificará como satisfactorio, si se cumple que los valores de radio de curvatura calculados son mayores de 100m ($R_{ci} > 100m.$)

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

Espesor de refuerzo

Sabiendo que para la determinación de los espesores de refuerzo, se utiliza el método de reducción de las deflexiones con varias fórmulas 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 del 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).

D_o : Deflexión característica antes del refuerzo (1/100 mm).

D_h : Deflexión característica luego del refuerzo (1/100mm); (D_{adm} de diseño)

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 de "R" mostrado en el Cuadro 3-4.

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 3-5 VALORES RECOMENDADOS PARA R

Deflexion Característica antes del refuerzo en (0.01mm)	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)

Para los casos 3° y 4°, se emplearán métodos racionales para diseño de pavimentos, como por ejemplo el método AASHTO

Aplicación al tramo Km 118+000 – Km 120+000

En la visita efectuada en campo a la carretera en estudio, se recopiló las mediciones de deflexiones recuperables con la Viga Benkelman con la relación de brazos de 4:1 y con un dial de precisión de 0.01 mm. Adicionalmente se midió la temperatura, espesor de la carpeta de rodadura y el ahuellamiento en cada estación de ensayo. Esta recopilación de datos se realizó en hojas cuyo formato se detalla a continuación:

Gráfico 3-7 FORMATO DE HOJAS PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS DE MEDIDAS DE DEFLEXIONES EN CAMPO

MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

SECTOR : CARRETERA CAÑETE - YAUYOS - CHUPACA SUPERFICIE : Monocapa
 TRAMO : Km 118+000 - Km 120+000 CARGA EJE : 8200 Kg
 FECHA : 22/05/2010 RESPONSABLE : UNI PRESION : 80 PSI
 CARRIL : Derecho OPERADOR : UNI R. BRAZOS : 1 a 4

N°	Progresiva (km)	Lecturas de Campo Brazo Largo (10 ⁻² mm)				L.C.B. Corto	Espesor (mm)	Ahuellamiento (mm)	Temp. (°C)
		L ₂₅	L ₅₀	L ₇₀	L _{máx}	L _{máx}			

(Fuente: Elaboración Propia)

La base de datos de la recopilación de medidas de deflexiones en campo, se detalla en el ANEXO 04 del presente informe.

Procesamiento de datos

El procesamiento de datos de medición de deflexiones, se realizó con la teoría descrita en el capítulo anterior, con los cuales se obtuvo las deflexiones corregidas y el radio de curvatura, estos cálculos se realizaron en hojas cuyo formato se detalla a continuación:

Gráfico 3-8 FORMATO DE HOJAS PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS

PROCESAMIENTO DE DATOS DE DEFLEXIONES

SECTOR : Carretera CAÑETE – YAUYOS - CHUPACA SUPERFICIE : Monocapa
 TRAMO : Km 118+000 - Km 120+000 REL. PROMEDIO BRAZO LARGO : 3.99
 FECHA : 22/05/2010 REL. PROMEDIO BRAZO CORTO : 4.01
 CARRIL : Derecho DIAL : 0.01

N°	Prog. (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)		Deflexiones sin Corregir (10 ⁻² mm)		Esp. (mm)	Ahuell (mm)	Temp (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS		Radio Curvatura (m)
		L ₂₅	L _{máx}	D ₂₅	D _{máx}				Deflexiones Corregidas		
									D ₂₅ x 10 ⁻² mm	D ₀ x 10 ⁻² mm	

(Fuente: Elaboración Propia)

Con los datos de deflexiones corregidas calculadas, se realizó el gráfico del deflectograma, para luego analizar y definir sectores homogéneos. Definidos los sectores se procedió a hallar la deflexión característica, deflexión admisible y el radio de curvatura promedio.

Para una mayor comprensión se cita a continuación un ejemplo completo del procesamiento de datos de medición de deflexiones recuperables, particularmente en el tramo en estudio.

CAPÍTULO IV: GESTIÓN DE PAVIMENTOS

4.1 GESTIÓN DE PAVIMENTOS

La gestión de pavimentos y los sistemas de gestión han sido definidos de varias maneras, pero la "American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO) ha publicado dos definiciones muy similares:

La Federal Highway Administration ha definido un sistema de gestión de pavimentos como "una serie de herramientas o métodos que asisten a quienes toman decisiones a encontrar estrategias costo-efectivas para evaluar y mantener los pavimentos en buenas condiciones de serviciabilidad.

"Un sistema de gestión de pavimentos es un conjunto de herramientas o métodos que asisten a quienes toman decisiones a encontrar la estrategia óptima para proveer, evaluar y mantener pavimentos en buenas condiciones de serviciabilidad en un periodo determinado de tiempo".

El uso del término "conjunto de herramientas" para describir un sistema de gestión de pavimentos es importante para entender el rol de los sistemas de gestión de pavimentos y la diferencia entre el proceso de gestión y un sistema de gestión de pavimentos. La gestión de pavimentos es un proceso seguido para tomar decisiones sobre qué actividades de mantenimiento y rehabilitación deben ejecutarse, mientras que un sistema de gestión de pavimentos es un conjunto de herramientas que asisten durante el proceso de toma de decisiones.

4.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo está programado para lograr una meta definida. El mantenimiento preventivo no es definido por el tipo de tratamiento aplicado. El estudio H-101 demostró que un mismo tipo de tratamiento puede ser utilizado como preventivo, correctivo o de emergencia. Un sello asfáltico es un buen ejemplo de cómo un tipo de tratamiento puede ser utilizado como preventivo, correctivo o de emergencia. Un sello asfáltico es un buen ejemplo de cómo un tipo de tratamiento puede ser utilizado para prevenir el deterioro, corregir una superficie ante un problema de fricción o atenuar el daño de un pavimento seriamente deteriorado hasta que existan los fondos disponibles para aplicar un tratamiento de rehabilitación. Es así, que es el propósito de la aplicación del

tratamiento el que lo identifica como preventivo. Otro aspecto importante del mantenimiento preventivo es que forma parte de una estrategia previamente establecida para aplicar una serie de tratamientos que permitan conseguir la mayor rentabilidad de los fondos invertidos.

FHWA señala que los programas de mantenimiento preventivo se aplican en pavimentos que estructuralmente están en buenas condiciones y es eficaz solamente cuando se aplica el tratamiento correcto en el momento preciso. Colocar un sello asfáltico en un pavimento no debería ser considerado como un tratamiento de mantenimiento preventivo a menos que sea parte de una estrategia de mantenimiento basada en el conocimiento de que el pavimento tratado tiene la capacidad estructural suficiente para que el mantenimiento preventivo sea eficaz. Es así que el mantenimiento preventivo ayudaría a preservar la capacidad estructural del pavimento, pero no a incrementarla.

Importancia del Mantenimiento Preventivo

Un curso desarrollado por el National Highway Institute en mantenimiento identifica varios beneficios de un programa de mantenimiento preventivo incluyendo:

- Un mayor grado de satisfacción de los usuarios.
- Decisiones basadas en una mejor información.
- Aplicación de técnicas y estrategias de mantenimiento mejoradas.
- Mantener el pavimento en buenas condiciones por un mayor periodo de tiempo.
- Ahorro de costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil.
- Incremento de la seguridad vial.

Con la gran cantidad de tramos que requieren mantenimiento y/o rehabilitación y la limitación de fondos disponibles, un programa de mantenimiento preventivo eficiente es necesario para conservar los pavimentos en buenas condiciones al menor costo posible durante su ciclo de vida, así se dispondrán de más fondos para ser invertidos en tramos que requieran trabajos que demanden un mayor monto de inversión.

4.3 CONSERVACIÓN DE PAVIMENTOS

El memorándum de la Federal Highway Administration Policy Memorandum de 1994 sobre ISTEA referente a sistemas de gestión de pavimentos incluye una referencia al desarrollo de programas de conservación de pavimentos. Sin embargo, la conservación de pavimentos no ha sido bien definida. En un curso dictado en la ciudad de Kansas, la siguiente definición fue utilizada, la conservación de pavimentos es un programa de actividades con el objeto de preservar las inversiones efectuadas en la infraestructura vial, y comprende el monitoreo del comportamiento del pavimento, tratamientos para la extensión de la vida útil del pavimento y la implementación de una política orientada a satisfacer las necesidades de los usuarios, siendo la suma de todas las actividades efectuadas para conservar las carreteras en buenas condiciones de servicio. Ello incluye mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, al mismo tiempo que rehabilitaciones menores y mayores. No considera el mejoramiento de la capacidad estructural, la construcción de pavimentos nuevos o la reconstrucción de pavimentos existentes. Sin embargo, en otra parte de la misma publicación, indica que rehabilitaciones mayores son excluidas de los programas de mantenimiento preventivo.

En otro estado se dio la siguiente definición, la conservación de pavimentos es una estrategia de tratamientos costo-efectivos aplicada a una vía existente para prolongar la vida útil o mejorar la serviciabilidad del pavimento. Es una estrategia concebida con el objeto de disminuir el grado de deterioro, retardar fallas y mejorar la condición funcional o estructural del pavimento. Es una estrategia a ser aplicada en tramos puntuales con la finalidad de optimizar el comportamiento global de la red vial.

La conservación de pavimentos es un programa que identifica los tratamientos particulares a aplicarse en cada tramo de la red vial con el objeto de prolongar la vida útil al menor costo posible de inversión. Los tratamientos incluyen mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y rehabilitación. Un método para identificar los tratamientos de conservación apropiados en cada tramo de la red vial es requerido. Modelos que permitan proyectar el comportamiento del pavimento y el impacto de los tratamientos aplicados son necesarios. Estos modelos deben ser utilizados en el proceso de toma de decisiones para identificar los costos y beneficios de cada alternativa para cada tramo de la red

vial y de la red total en forma integral. Este proceso permite evaluar los efectos a largo plazo de los tratamientos de mantenimiento y rehabilitación. Una base de datos con información de cada tramo y el registro histórico de los tratamientos aplicados, es necesaria para implementar la filosofía de aplicar el tratamiento correcto en el momento preciso.

Importancia de la Conservación de los Pavimentos

Conforme los pavimentos se deterioran, el mantenimiento preventivo no es suficiente para atender los diversos problemas que se presentan. Tratamientos de conservación costo-efectivos para pavimentos dañados severamente y con deficiencia estructural deben ser aplicados. Algunos de los beneficios de un programa de conservación de pavimentos incluye:

- Mayor calidad en el transporte.
- Extensión de la vida útil del pavimento.
- Reducir la incomodidad de los usuarios y tiempos de movilización.
- Reducir costos de conservación en el ciclo de vida útil del pavimento.
- Incrementar la satisfacción del usuario.
- Mejorar el proceso de toma de decisiones.
- Condición más uniforme entre los tramos que componen la red vial.
- Uso más eficiente de los fondos.
- Aplicación de políticas de conservación más coherentes y objetivas.

Interrelación de los Sistemas de Gestión, el Mantenimiento Preventivo y la Conservación de Pavimentos

Los sistemas de gestión, el mantenimiento preventivo y la conservación de pavimentos deben ser tratados en forma integral. A pesar de que las definiciones de gestión de pavimentos mencionan su uso para la determinación de tratamientos costo-efectivos, en algunos casos se utilizan para identificar los tramos que se encuentran en muy malas condiciones y que requieren rehabilitación. Eso resulta en una política en la cual los tramos en peor estado son atendidos primero. Algunos sistemas utilizan un índice de clasificación que es función del estado del pavimento y del tráfico, es así que aquellos tramos con tráfico más alto y en peores condiciones siempre tiene prioridad a los que tienen

menor tráfico y que todavía se encuentran en buenas condiciones. Sin embargo, si bien es cierto que la política de reparar los tramos que están en peor estado primero es parte de un sistema de gestión de pavimentos que permite alcanzar ciertas metas, no sigue la filosofía de “aplicar el tratamiento correcto en el momento preciso” que es la del enfoque de un programa integral de conservación de pavimentos.

CONCLUSIONES

- Con respecto a la recopilación de datos tomados en campo, se obtuvo las siguientes medidas: $D_c = 82.63 \times 10^{-2}$ mm que es menor a la D_a (ANEXO 10) y el $R_c = 214.92$ m es mayor a $R_{ci} = 100$ m por lo tanto el pavimento sujeto de evaluación tiene una capacidad estructural adecuada.
- La $D_c < D_a$ (deflectometría) y además no se aprecia fallas de origen estructural (estado visual) entonces la estructura del pavimento está en el 5° caso del cuadro 3-4, "Análisis Combinado de Los Resultados de Evaluación". La capacidad estructural del pavimento es satisfactoria por lo que la rehabilitación se limitará a una corrección de las deficiencias superficiales que se observen en la superficie de rodadura.
- Los radios de curvatura son mayores a $R_{ci} = 100$ m (ANEXO 06), y las deflexiones son menores a la D_a (ANEXO 10), entonces el pavimento está en el Tipo I del gráfico 3-6, "Relación Cuantitativa entre la Deformada y la Calidad del Pavimento", en síntesis se considerará que el pavimento sujeto de evaluación tiene la capacidad estructural adecuada para resistir los esfuerzos del tráfico de diseño.
- La deflexión característica es un parámetro estadístico; por eso los valores obtenidos deben corresponder al 95 % del área total del pavimento aproximadamente, es decir deben estar en el intervalo $[X - 2S, X + 2S]$ ($[50.37 - 1.645 \times 19.61, 50.37 + 1.645 \times 19.61] = [18.11, 82.63]$), donde X es la media y S es la desviación estándar. En el deflectograma (ANEXO 09) hay 1 valor que sobrepasa este rango representando el 9.09 % de la muestra de 11 valores.
- Se verificó con los ensayos que el comportamiento estructural del pavimento funciona a la temperatura mínima de 20 °C (ANEXO 06), por lo tanto la fórmula de la División Nacional Vial de Argentina es correcta.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar las mediciones de deflexiones en tramos más extensos, ya que en tramos pequeños se obtienen valores que no representan exactamente el estado de todo el pavimento, y por lo mismo el análisis de los resultados pueden llevar a un análisis de la capacidad estructural del pavimento poco confiable.
- Se recomienda realizar el ensayo de deflectometría con la Viga Benkelman después de un periodo de lluvias, porque en éste periodo el comportamiento estructural del pavimento es crítico.
- Siendo observados una cantidad significativa de fallas en el pavimento como baches, fisuras, hundimientos, se recomienda realizar un relevamiento de fallas periódicamente, identificando las que son de origen estructural, y así poder llevar a cabo los trabajos de conservación y/o mantenimiento periódico de la vía.

BIBLIOGRAFÍA

- AYESA - ALPHA CONSULT; Estudio Definitivo Carretera Lunahuaná - Yauyos - Chupaca; Marzo 2005.
- Gestión de Infraestructura Vial; Hernán de Solminihac Tampier; Santiago-Chile-2001.
- Instituto de La Construcción y Gerencia; Pavimentos un Enfoque al Futuro; Lima-Perú-2005.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones; Dirección general de caminos y ferrocarriles; Manual de Técnica de Mantenimiento Periódico para la Red Vial Departamental no Pavimentada, Lima – Perú, 2006.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones; Manual para la Conservación de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito Volumen N° III; Procesos para Ingenieros, Procesos para Técnicos, Anexos; Lima – Perú 2008.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones PROVÍAS NACIONAL Anexo 03; Términos de Referencia Servicio de Conservación Vial de La Carretera: Cañete-Lunahuaná-Pacarán-Chupaca y Rehabilitación del tramo: Zuñiga – Dv. Yauyos-Ronchas; Lima-Perú-2007.
- PINZUAR LTDA; Informe de Calibración N° 7 438; 10-02-2009.

ANEXOS

ANEXO 01	
DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES	69
ANEXO 02	
DETERMINACIÓN DEL TRÁFICO ACTUAL	72
ANEXO 03	
DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA	73
ANEXO 04	
CÁLCULO DE N18	74
ANEXO 05	
MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN	74
ANEXO 06	
PROCESAMIENTO DE DATOS	75
ANEXO 07	
DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA Y RADIO DE CURVATURA	76
ANEXO 08	
RESUMEN DE VALORES Y DE DEFLEXIONES	76
ANEXO 09	
DEFLECTOGRAMA	77
ANEXO 10	
DIAGRAMA DE EVALUACIÓN	78
PANEL FOTOGRÁFICO	79

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 periodo de diseño. El concepto de eje equivalente se basa en la posibilidad de evaluar el daño que produce determinada carga y compararla con otra de referencia.

Factores de Equivalencia de Carga




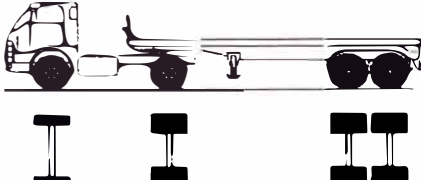
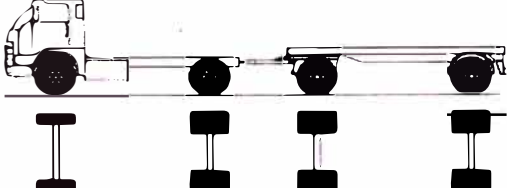


De los estudios experimentales desarrollados, se han obtenido ecuaciones crecientes, de relación exponencial del orden de 4, entre la carga real y la del eje referencial. Estas experiencias ampliamente difundidas, dan lugar a establecer factores de equivalencia de carga, tanto para cada tipo de composición vehicular, que permiten cuantificar el tremendo efecto destructivo de los vehículos más pesados.

El eje estándar de 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:

Tipo de eje	Eje equivalente (EE _{8.2 TN})
Eje Simple de ruedas simples	$EE_{S1} = [P / 6.6]^4$
Eje Simple de ruedas dobles	$EE_{S2} = [P / 8.2]^4$
Eje Tandem de ruedas dobles	$EE_{TA} = [P / 15.1]^4$
Ejes Tridem de ruedas dobles	$EE_{TR} = [P / 22.9]^4$
P = peso real por eje en toneladas	

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.

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS									
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx. (m)	Eje Delant	Peso máximo (t)				Peso bruto máx. (t)	
				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 ⁰¹	—	—	—	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_{18}), se debe considerar principalmente a los vehículos que tenga un alto factor equivalente de carga en el pavimento como vehículos pesados (trayler y semitrailer), 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 guía AASHTO corresponde al EAL afectado por coeficientes que representan el sentido y el número de carriles que tendrá la vía.

$$N_{18} = FD \times FC \times EAL_{(8.2T)}$$

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

Donde:

- N_{18} : Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes 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_v : Índice Medio Diario de cada tipo de vehículo correspondiente al año base.
- FEC_v : Factor equivalente de carga 8.2 ton por cada tipo de vehículo
- i: Tasa de crecimiento de los vehículos.
- n: Periodo de Diseño.

ANEXO 02

DETERMINACIÓN DEL TRÁFICO ACTUAL

Tipo de Vehículo	IMD 2008 (*)				Tasa de crecimiento i (%)	IMD 2009			IMD 2010 (**)		
	Zúñiga 56+600 - P. Nuevo 66+580	P. Nuevo 66+580 - Chichicay 92+110	Chichicay 92+110 - Capillucas 94+640	Capillucas 94+640 - Dv. Yauyos 127+000		Zúñiga 56+600 - P. Nuevo 66+580	P. Nuevo 66+580 - Capillucas 94+640	Capillucas 94+640 - Dv. Yauyos 127+000	Zúñiga 56+600 - P. Nuevo 66+580	P. Nuevo 66+580 - Capillucas 94+640	Capillucas 94+640 - Dv. Yauyos 127+000
Automóvil	6	3	2	1	2.6	6	3	1	6	3	1
Camioneta	194	289	58	20	2.6	199	297	21	204	304	21
Combi Rural	74	61	18	4	2.6	76	63	4	78	64	4
Micro	48	68	8	0	1.4	49	69	0	49	70	0
Ómnibus 2E	15	14	13	8	1.4	15	14	8	15	14	8
Ómnibus 3E	1	0	1	0	1.4	1	0	0	1	0	0
Camión 2 Ejes	47	42	30	9	4.6	49	44	9	51	46	10
Camión 3 Ejes	9	4	2	11	4.6	9	4	12	10	4	12
Camión 4 Ejes	1	2	2	0	4.6	1	2	0	1	2	0
Semitraylers	28	53	98	0	4.6	29	55	0	31	58	0
Traylers	38	33	0	0	4.6	40	35	0	42	36	0
TOTAL	461	569	232	53		475	585	55	489	603	56

(*) Fuente: Conservación Vial Por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete-Lunahuaná-Pacarán-Chupaca y Rehabilitación del Tramo Zúñiga-Dv. Yauyos-Ronchas

(**) Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 03

DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA

Tipo de vehículo	Descripción	Eje delantero	Ejes posteriores			EE _{3,2} TN
			1er eje	2do eje	3er eje	
Omnibus 2E	Carga (Tn)	7	11			18
	F.E.C.	1.265	3.238			4.504
Omnibus 3E	Carga (Tn)	7	18			25
	F.E.C.	1.265	2.019			3.285
Camión 2E-L	Carga (Tn)	7	7			14
	F.E.C.	1.265	1.265			2.531
Camión 2E-P	Carga (Tn)	7	11			18
	F.E.C.	1.265	3.238			4.504
Camión 3E	Carga (Tn)	7	18			25
	F.E.C.	1.265	2.019			3.285
Camión 4E	Carga (Tn)	7	23			30
	F.E.C.	1.265	1.018			2.283
Semitrayler 2S2	Carga (Tn)	7	11	18		36
	F.E.C.	1.265	3.238	2.019		6.523
Semitrayler 2S3	Carga (Tn)	7	11	25		43
	F.E.C.	1.265	3.238	1.420		5.924
Semitrayler 3S1	Carga (Tn)	7	18	11		36
	F.E.C.	1.265	2.019	3.238		6.523
Semitrayler >= 3.	Carga (Tn)	7	18	25		50
	F.E.C.	1.265	2.019	1.420		4.705
Traylers C2R2	Carga (Tn)	7	11	11	11	40
	F.E.C.	1.265	3.238	3.238	3.238	10.980

Fuente: Manual de Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito

Nota: Los pesos de los ejes se han determinado utilizando el reglamento de pesos y medidas máximas permitidas del MTC

ANEXO 04

CÁLCULO DE N18 Y DEFLEXIÓN ADMISIBLE

CUADRO N°5: TRAMO Km 118+000 - Km 120+000

Tipo de Vehículo	Factor de Carga	IMD ₂₀₁₀	Tasa de crecimiento i (%)	Proyección								
				n (años)	EAL (2011)	n (años)	EAL (2012)	n (años)	EAL (2013)	n (años)	EAL (2015)	
Micro	4.504	0	1.4	1	0	2	0	3	0	5	0	
Omnibus 2E	4.504	8	1.4	1	13523	2	27234	3	41138	5	69532	
Omnibus 3E	3.285	0	1.4	1	0	2	0	3	0	5	0	
Camión 2 Ejes	4.504	10	4.6	1	16188	2	33121	3	50833	5	88738	
Camión 3 Ejes	3.285	12	4.6	1	14431	2	29525	3	45314	5	79103	
Camión 4 Ejes	2.283	0	4.6	1	0	2	0	3	0	5	0	
Semitraylers	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	
TOTAL		56	EAL	4.41E+04		8.99E+04		1.37E+05		2.37E+05		
Nota: N ₁₈ número total de ejes equivalentes a 18 Klb o 8.2 Tn (en millones)				N18	0.022		0.045		0.069		0.119	
				Da (x 10⁻²mm)	268.67		224.91		202.31		176.43	

ANEXO 05

MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

SECTOR : CARRETERA CAÑETE - YAUYOS - CHUPACA

SUPERFICIE : Monocapa

TRAMO : Km 118+000 - Km 120+000

CARGA EJE : 8200 Kg

FECHA : 22/05/2010

RESPONSABLE : UNI

PRESION : 80 PSI

CARRIL : Derecho

OPERADOR : UNI

R. BRAZOS : 1 a 4

N°	Progresiva (km)	Lecturas de Campo Brazo Largo (10 ⁻² mm)				L.C.B. Corto L _{máx}	Espesor (mm)	Ahuellamiento (mm)	Temp. (°C)
		L ₂₅	L ₅₀	L ₇₀	L _{máx}				
1	118+000	3	7	9	19	12	0.011	7	39.6
2	118+200	1	4	6	9	3	0.010	5	41.0
3	118+400	2	7	9	13	8	0.014	5	43.3
4	118+600	1	5	8	9	4	0.012	4	39.2
5	118+800	1	5	6	9	5	0.014	10	38.6
6	119+000	1	4	5	8	5	0.012	7	20.0
7	119+200	1	5	6	11	5	0.010	11	38.7
8	119+400	1	3	4	7	2	0.010	6	37.3
9	119+600	1	6	8	9	4	0.008	5	38.9
10	119+800	3	8	10	14	8	0.013	4	39.2
11	120+000	1	4	7	21	17	0.013	3	40.0

ANEXO 06

PROCESAMIENTO DE DATOS

SECTOR : CARRETERA CAÑETE - YAUYOS - CHUPACA SUPERFICIE : Monocapa
 TRAMO : Km. 118+000 - Km. 120+000 RELACION PROMEDIO BRAZO LARGO : 3.99
 FECHA : 22/05/2010 RELACION PROMEDIO BRAZO CORTO : 4.01
 CARRIL : Derecho DIAL : 0.01 mm

N°	Progresiva (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)		Deflexiones sin Corregir (10 ⁻² mm)		Espesor (mm)	Abuellamiento (mm)	Temp (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS		Radio Curvatura (m)
		L ₂₅	L _{máx}	D ₂₅	D _{máx}				Deflexiones Corregidas		
									D ₂₅ x 10 ⁻² mm	D ₀ x 10 ⁻² mm	
1	118+000	12	19	48.12	75.81	11	7	39.6	51.81	81.63	104.81
2	118+200	3	9	12.03	35.91	10	5	41.0	12.96	38.69	121.46
3	118+400	8	13	32.08	51.87	14	5	43.3	34.17	55.25	148.24
4	118+600	4	9	16.04	35.91	12	4	39.2	17.25	38.61	146.27
5	118+800	5	9	20.05	35.91	14	10	38.6	21.50	38.50	183.79
6	119+000	5	8	20.05	31.92	12	7	20.0	22.06	35.11	239.34
7	119+200	5	11	20.05	43.89	10	11	38.7	21.65	47.39	121.39
8	119+400	2	7	8.02	27.93	10	6	37.3	8.67	30.20	145.16
9	119+600	4	9	16.04	35.91	8	5	38.9	17.38	38.91	145.14
10	119+800	8	14	32.08	55.86	13	4	39.2	34.43	59.95	122.45
11	120+000	17	21	68.17	83.79	13	3	40.0	73.09	89.83	186.61

ANEXO 07

DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA Y RADIO DE CURVATURA

Tramo Total Km 118+000 - Km 120+000	Deflexiones (x 10⁻² mm)	Radio de Curvatura (m)
Mínimo	30.20	104.81
Máximo	89.83	239.34
Promedio	50.37	151.33
Desviación	19.61	38.65
Coef. Variación (%)	38.93	25.54
Característico	82.63	214.92

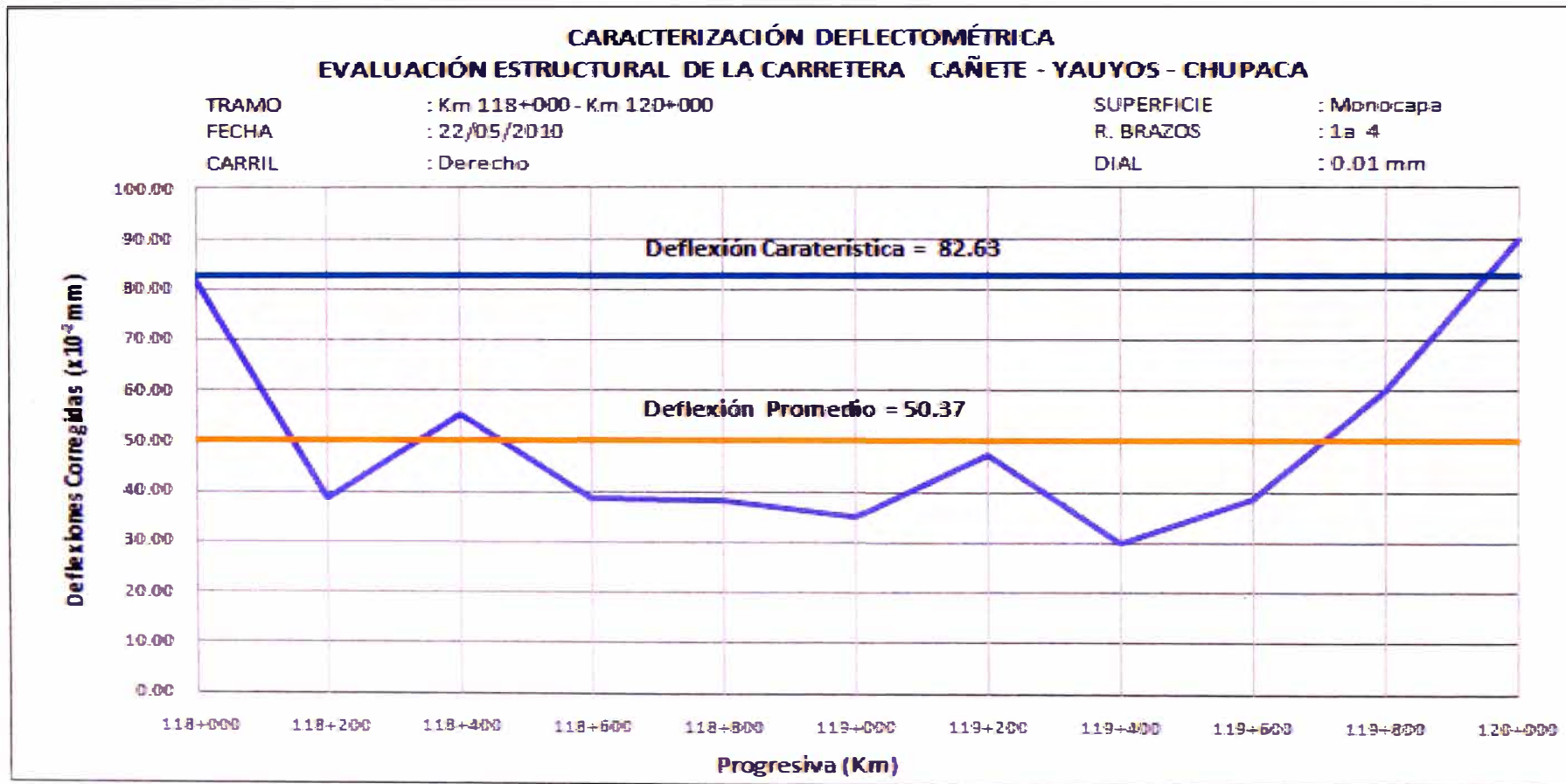
ANEXO 08

RESUMEN DE VALORES DE DEFLEXIONES

Descripción	n (años)	Carretera Cañete - Yauyos - Chupaca
Sector		I
Progresiva Inicial		118+000
Progresiva Final		120+000
Deflexión Característica (X 10 ⁻² mm)		82.63
Deflexión Admisible (x 10 ⁻² mm)	1	268.67
	2	224.91
	3	202.31
	5	176.43
Radio de Curvatura Rc (m)		214.92

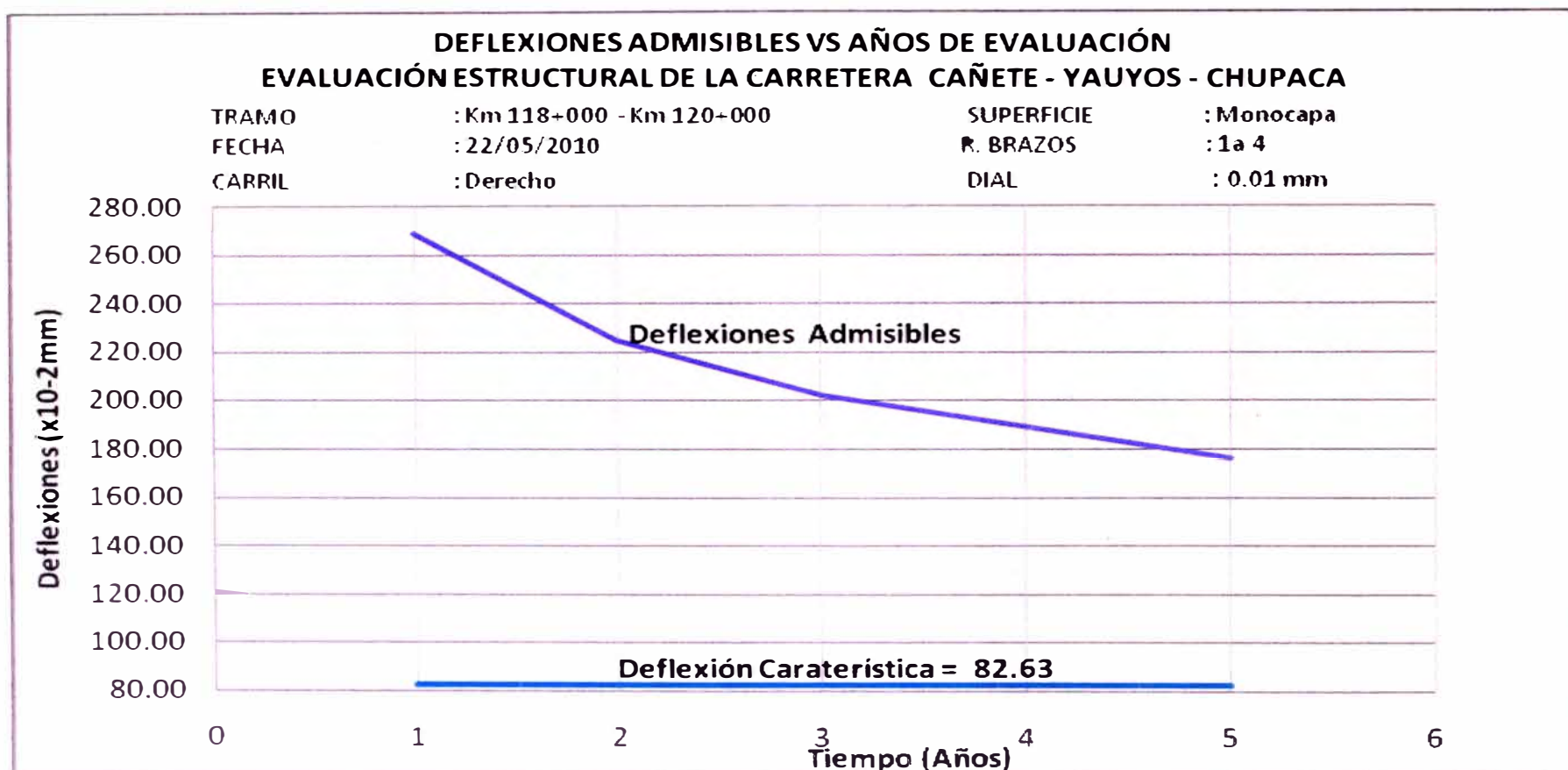
ANEXO 09

DEFLECTOGRAMA



ANEXO 10

DIAGRAMA DE EVALUACIÓN



PANEL FOTOGRÁFICO



Foto 1: Preparación de la Viga Benkelman en el punto de ensayo para realizar las mediciones.

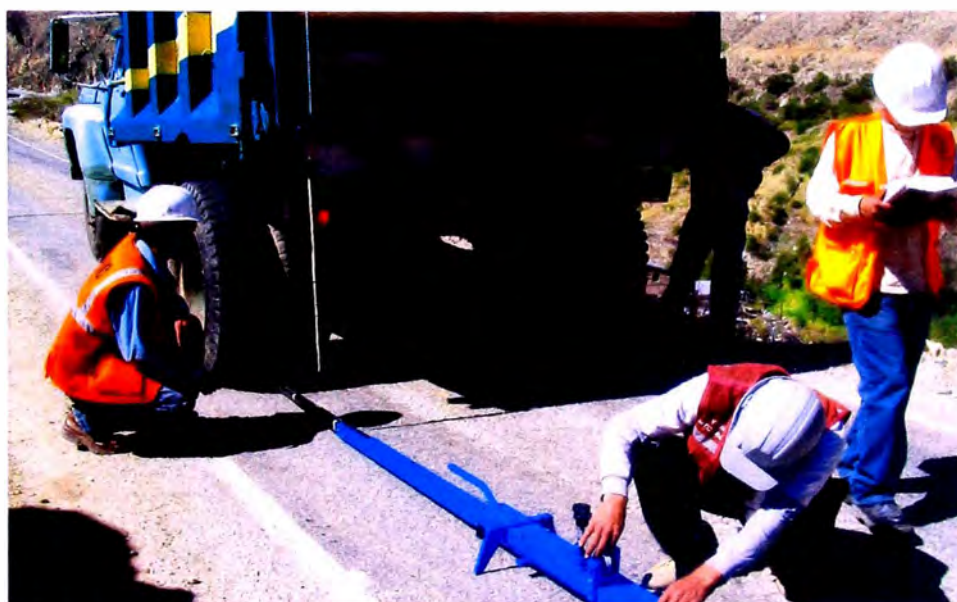


Foto 2: Calibración de la Viga Benkelman en el punto de ensayo, previo a realizar las mediciones de deflexiones.



Foto 3: Proceso de medición de lecturas del dial de deformación, en el Km 118+000 de la carretera en estudio.



Foto 4: Medición de la temperatura de la carpeta de rodadura en el punto de ensayo, con termómetro digital.



Foto 5: Medición del ahuellamiento en el punto de ensayo, con wincha y una regla de aluminio de 3m de longitud.



Foto 6: Extracción de una muestra de la carpeta de rodadura, con comba y cincel para medir su espesor.