

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO CON VIGA
BENKELMAN – MODELO MATEMÁTICO, CARRETERA
CAÑETE CHUPACA
MODELO DE DETERIORO Y CONTRASTACIÓN EN CAMPO**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

GODOFREDO OSWALDO ACOSTA QUIROZ

Lima- Perú

2011

ÍNDICE

RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	8
INTRODUCCIÓN	9
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	11
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME DE SUFICIENCIA	13
1.3 TRAMO EVALUADO: Km. 74+000 – Km. 84+000	15
2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	18
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	18
2.1.1 Modelos Elásticos Lineales de esfuerzo-deformación	19
2.1.2 Modelos Elásticos no-lineales de esfuerzo-deformación	23
2.1.3 Cálculo Inverso	25
2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	28
2.2.1 Viga Benkelman	28
2.2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)	32
3. CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	34
3.1 DEFLECTOMETRÍA	34
3.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL USANDO DEFLECTOMETRÍA	34
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE BASE	35
3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN PAVIMENTOS	39
3.4.1 Métodos Analíticos	40
3.4.2 Métodos de Elementos Finitos	43
4. CAPÍTULO IV: APLICACIÓN TRAMO KM. 74+000 – KM. 84+000	47
4.1 DATOS DE CAMPO CON LA VIGA BENKELMAN	47
4.2 APLICACIÓN DE CÁLCULO INVERSO	54
4.3 APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS (MICHPAVE)	58

4.4	PROPUESTA DE MODELO DE CURVA DE FALLA	66
5.	CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	68
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	80

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una evaluación de la condición estructural del pavimento de un tramo de la carretera Cañete-Chupaca, por medio de ensayos no destructivos y de modelos matemáticos de solución de ecuaciones de esfuerzo – deformación. Los ensayos no destructivos han consistido de mediciones de deflexiones superficiales del pavimento con el uso de la Viga Benkelman, producidas por la aplicación de una carga estándar. Los modelos matemáticos utilizados son los desarrollados para analizar tanto el comportamiento elástico lineal y elástico no lineal de los materiales utilizados en la construcción pavimento y los encontrados en el terreno de fundación de la estructura. La condición estructural del pavimento se ha medido en función de su módulo resiliente.

Las deflexiones permitieron obtener las propiedades de los materiales de comportamiento elástico lineal de la estructura utilizando un procedimiento de cálculo inverso. Conocidas estas propiedades se utilizó diferentes modelos de cálculo directo que emplean modelos lineales y no lineales para compatibilizar las deflexiones medidas con las calculadas y obtener los módulos resilientes en los distintos sitios de evaluación a lo largo del tramo.

Para realizar la evaluación se contaba con dos series de datos de deflexiones, la primera serie tomada durante el año 2008 y la segunda en el 2010. Contar con dos series de deflexiones permite analizar la variación de la condición de la estructura en el tiempo y comparar los resultados a fin de tener una idea del modelo de deterioro que se produce por la carretera. Este deterioro se ha analizado en función de la pérdida en la capacidad estructural del pavimento como una disminución en su módulo resiliente.

Los resultados muestran que en promedio, la capacidad estructural del pavimento y terreno de fundación en el tramo analizado se ha visto ligeramente reducida entre los años 2008 y 2010. Dado que el tramo en estudio ha recibido diferentes tratamientos de conservación y mantenimiento durante ese periodo, la carretera ha conservado, en gran porcentaje, su capacidad estructural a pesar

del incremento del tráfico, demostrado en el crecimiento del Índice Medio Diario Anual vehicular.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.1 Tramos de la carretera Cañete-Chupaca según tipo de rodadura	12
Cuadro N° 1.2 Descripción del tramo en estudio	16
Cuadro N° 3.1 Constantes no lineales K_1 y K_2 para materiales granulares	37
Cuadro N° 3.2 Rangos de constantes no lineales K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados	37
Cuadro N° 3.3 Valores de K_1 y K_2 de relaciones empíricas M_R y CBR	38
Cuadro N° 4.1 Lectura de datos tomados en campo. Primera serie (2008)	52
Cuadro N° 4.2 Lectura de datos tomados en campo. Segunda serie (2010)	53
Cuadro N° 4.3 Módulos iniciales y rangos para el Cálculo Inverso	55
Cuadro N° 4.4 Módulos de elasticidad de CAPA1 calculados por MICHBACK	57
Cuadro N° 4.5 Módulos resilientes del pavimento de la carretera Cañete – Chupaca, para los años 2008 y 2010	65
Cuadro N° 5.1 Módulo resiliente por kilómetro en el año 2008	68
Cuadro N° 5.2 Módulo resiliente por kilómetro en el año 2010	69
Cuadro N° 5.3 Numero de ejes equivalentes de 18 kip (ESAL)	70
Cuadro N° 5.4 Número de años de vida útil remanente. Series 2008 y 2010	72
Cuadro N° 5.5 Vida útil para condiciones actuales del pavimento por kilómetro	73

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1 Corredor Vial N° 13. Carretera Cañete - Chupaca	13
Figura N° 1.2 Tipo de pavimento Carretera Cañete-Chupaca	16
Figura N° 1.3 Ubicación del Tramo en estudio	16
Figura N° 2.1 Sistema multicapa de pavimento flexible	22
Figura N° 2.2 Deformaciones de un pavimento bajo carga dinámica	24
Figura N° 2.3 Diagrama de flujo del Cálculo Inverso	26
Figura N° 2.4 Viga Benkelman	29
Figura N° 2.5 Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman	30
Figura N° 2.6 Configuración geométrica del sistema de carga: Viga Benkelman: a) Carga P en el centro de las llantas. b) Posición inicial de medición	31
Figura N° 2.7 Esquematzación del proceso de medición con la Viga Benkelman	32
Figura N° 2.8 Esquema de medición del FWD y ubicación de sensores	33
Figura N° 2.9 Equipo FWD	33
Figura N° 3.1 Modelo de módulo resiliente en suelos cohesivos	39
Figura N° 3.2 Sistema multi-capa propuesto en la fórmula de Palmer y Barber generalizada	42
Figura N° 3.3 Configuración de elementos finitos usada para análisis de un sistema de capas homogénea	44
Figura N° 4.1 Esquematzación de mediciones con Viga Benkelman	48
Figura N° 4.2 Medición de deflexiones. a) ubicación b) instalación c) calibración d) medición e) temperatura f) espesor	49
Figura N° 4.3 Correlación entre mediciones de deflexiones con FWD y Viga Benkelman	50
Figura N° 4.4 Configuración de capas utilizadas para representar el pavimento	54
Figura N° 4.5 Deflexiones de campo ingresadas en el programa de cómputo	56
Figura N° 4.6 RMS entre deflexiones medidas y calculadas con MICHBACK	56
Figura N° 4.7 Malla típica de elementos finitos generada por MICHPAVE	59
Figura N° 4.8 Ingreso de datos de carga y desempeño del pavimento en MICHPAVE	61
Figura N° 4.9 Ingreso de propiedades de capas elásticas en MICHPAVE	62
Figura N° 4.10 Ingreso de propiedades de capas granulares en MICHPAVE	62

Figura N° 4.11 Malla de elementos finitos para el análisis de la carretera Cañete-Chupaca	63
Figura N° 4.12 Equivalencia entre sistema bicapa analizado y monocapa	64
Figura N° 4.13 Módulo resiliente (MPa) carretera Cañete – Chupaca. Tramo: km 74+000-84+00	66
Figura N° 5.1 Número de Ejes Equivalentes (18 kip ESAL) Series 2008 y 2010	71
Figura N° 5.2 Número de años de vida útil remanente para series 2008 y 2010	73

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

CBR	California Bearing Ratio
FWD	Falling Weight Deflectometer
CF	Factor de correccion de deflexiones por temperatura
NDT	Ensayos no destructivos
D_{VB}	Deflexiones medidas con la Viga Benkelman
D_{FWD}	Deflexiones medidas con el FWD
M_R	Módulo resiliente
ϕ	Función de esfuerzos
a	Radio de la huella de la llanta.
E	Módulo de Young
h₁	Espesor de capa estabilizada
h₂	Espesor de capa equivalente granular.
K^e	Matriz de rigidez del elemento finito axialsimétrico
K1	Coefficiente no lineal del material granular
K2	Exponente no lineal del material granular
ν	Coefficiente de Poisson
q₀	Carga uniformemente repartida.
σ	Esfuerzo
τ_{rz}	Esfuerzo de corte
ε	Deformación unitaria en área circular
θ	Primer esfuerzo Invariante
∇	Operador nabla
SD:	Deflexión superficial bajo la rueda doble, en pulgadas.
FT	Porcentaje de longitud de falla por fatiga permitido sobre la longitud total.
ε_t	Esfuerzo de tensión en el fondo de la capa superficial en psi.
H_{AC}	Espesor de la capa superficial en pulgadas.
KV	Viscosidad cinemática en centistokes.
E_{AC}	Módulo resiliente de la capa superior en psi.
E_{BS}	Módulo resiliente de la segunda capa.

INTRODUCCIÓN

Un componente crítico en la gestión eficiente de las carreteras del país es la predicción confiable del comportamiento estructural del pavimento durante su vida útil. El desempeño del pavimento en términos de capacidad estructural está fuertemente ligado, principalmente, al módulo de elasticidad o módulo resiliente del conjunto estructura-suelo de fundación, el mismo que sufre deterioro en función del tiempo de uso de la vía cuando no ha recibido tratamiento y varían las condiciones de diseño del tránsito vehicular. Se hace necesario para la carretera Cañete – Chupaca, la que se encuentra bajo un Contrato de Conservación Vial por Niveles de Servicio, predecir satisfactoriamente, el deterioro estructural del pavimento con la finalidad de plantear estrategias de conservación y rehabilitación, esto es de interés para el Contratista, el Estado y los usuarios.

El presente informe tiene como objetivo principal evaluar el deterioro estructural del pavimento en el tramo estudiado de la carretera Cañete – Chupaca, mediante el uso de modelos matemáticos de esfuerzo – deformación y datos de deflexiones de campo obtenidos con el deflectómetro denominado Viga Benkelman con el fin de predecir un modelo de deterioro estructural de la vía.

El paso previo al análisis es plantear un modelo conceptual de la estructura. En el caso de esta carretera, la capa superior está conformada por un tratamiento superficial con mortero asfáltico que tiene un espesor promedio de 2 centímetros y de una base granular estabilizada con un cemento asfáltico convencional, mezclados en frío. Bajo esta capa estabilizada de aproximadamente 12 centímetros se encuentra la sub-rasante. Esta sub-rasante tiene más de 60 años de servicio, por lo que sus condiciones de compactación son buenas y poseen, en general, buena capacidad estructural. Para considerar el efecto de esta sub-rasante se ha considerado un espesor arbitrario de 10 centímetros como parte de la estructura del pavimento.

En una primera etapa del análisis, se utiliza un modelo lineal elástico de cálculo inverso para estimar el módulo de elasticidad de la capa superior de la estructura, considerando que es la que soporta los mayores esfuerzos, y

asumiendo que tiene un comportamiento que tiende a lo elástico lineal debido a la presencia del cemento asfáltico. Esto se hace a partir de los datos de campo de deflexiones y de asumir un juego de módulos de elasticidad iniciales de las capas consideradas en el modelo conceptual. La rutina del cálculo inverso es un proceso iterativo de cálculos directos, en la que se calculan las deflexiones modificando el juego de módulos de elasticidad entre una iteración y la siguiente, y comparándolas con las deflexiones medidas. El proceso iterativo se detiene cuando se alcanza un error especificado entre las deflexiones medidas y las calculadas, o cuando se alcanza un error especificado entre dos series de módulos elásticos calculados en iteraciones consecutivas. Como resultado de este análisis se tiene el valor del módulo de elasticidad de la capa superior. Los módulos de las capas inferiores no se consideran como correctos debido a que tienen naturaleza no lineal.

En una segunda etapa de análisis, se utiliza un modelo matemático de cálculo directo de análisis no lineal, con el fin de calcular los módulos resilientes de las capas inferiores. En este modelo se utiliza el módulo de elasticidad determinado en la primera etapa para la capa superior. En el modelo no lineal se compatibilizan las deflexiones medidas con las calculadas para obtener los módulos resilientes de las capas inferiores. Como resultado se obtienen las curvas de deflexión de la estructura en cada sección analizada, y para las condiciones presentes al momento de la toma de datos.

Repetiendo el procedimiento con otro juego de datos de deflexiones tomadas transcurrido un tiempo sin efectuar mantenimiento en el tramo, se podría determinar una curva de deterioro estructural en función del módulo resiliente.

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La carretera entre Cañete - Chupaca, fue proyectada y ejecutada por partes. El primer tramo se construyó durante el gobierno del Sr. Augusto B. Leguía, entre la década de 1920 a 1930 gracias a la Ley de la Conscripción Vial de 1920. Durante el Gobierno del Dr. Manuel Prado Ugarteche, entre los años 1940 y 1944, se terminó el tramo Cañete – Yauyos. Los trabajos se reiniciaron en 1955 y en Mayo de 1957, la carretera llegó al pueblo de Alis. Con la ayuda del Gobierno Central se continuarían los trabajos hasta concluir la carretera.

En 1998, la empresa AYESA - ALPHA CONSULT realiza el estudio de Ingeniería e Impacto Ambiental para la ampliación, construcción y conservación de la carretera Lunahuaná – Huancayo. En el 2003, la Oficina de Planificación y Planeamiento del Ministerio de Transportes y Comunicaciones aprueba el perfil elaborado por el Ing. Floriano Palacios León, autorizando así la elaboración del Estudio de Factibilidad del Proyecto del tramo Lunahuaná – Yauyos – Chupaca. Mediante Resolución Directoral N° 815-2004-MTC/20 de fecha 22-11-2004, se aprobó el “Estudio de Pre inversión a Nivel de Perfil de la carretera Ruta 22, Tramo: Lunahuaná -Yauyos-Chupaca” de 245,15 kilómetros de longitud. El 09 de Diciembre de 2005 se aprueba el Estudio de Factibilidad del Proyecto.

Mediante Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC-02 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones se creó el Programa “Proyecto Perú”; bajo responsabilidad de PROVÍAS NACIONAL. En el marco de programa “Proyecto Perú”, el 27 de diciembre del 2007 se realiza la firma del Contrato N° 288-2007-MTC/20, de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete – Lunahuaná – Pacarán – Zúñiga desvío Yauyos – Roncha - Chupaca, con el Consorcio Gestión de Carreteras, por un monto total de S/.131 589 139,31 y con un plazo de contrato de 5 años para un total de 271, 726 Km e inicio de trabajos para el 01 de Febrero de 2008. El Consorcio Gestión de Carreteras está

conformado por Ingenieros Civiles y Contratistas Generales S.A. (ICCGSA), Corporación Mayo S.A.C. y Empresa de Mantenimiento Vial La Marginal S.R.L.

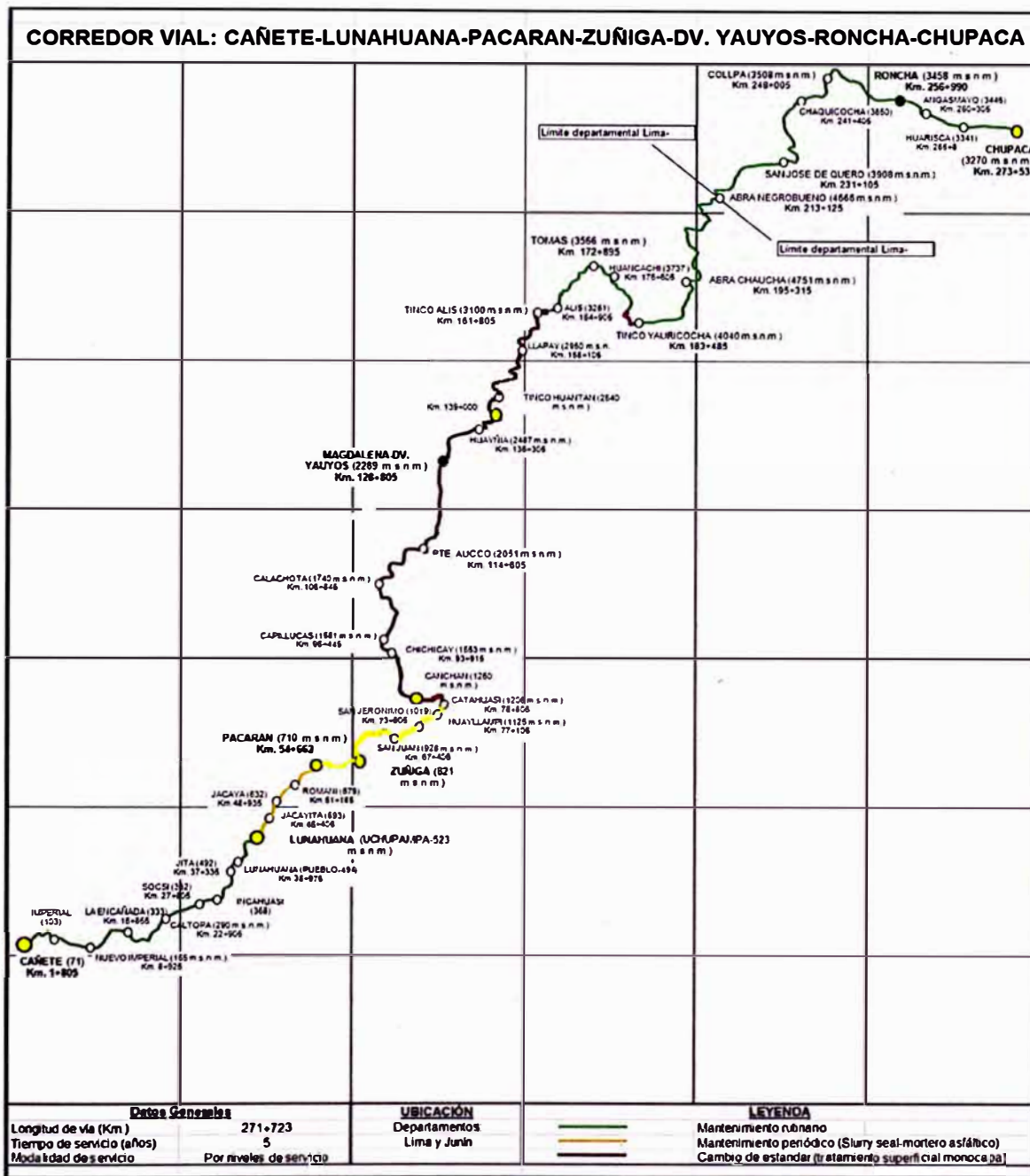
Se ha encontrado en la bibliografía revisada, algunas evaluaciones del comportamiento estructural del pavimento de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca mediante el uso del modelo lineal de esfuerzo-deformación de Hogg y de un modelo no lineal de esfuerzo-deformación (José L. Samaniego, 2009). Los resultados muestran que el modelo no lineal, implementado en el software MICHPAVE, predice satisfactoriamente el comportamiento estructural por medio de deformaciones del pavimento, para la carretera en el tramo de estudio. Sin embargo, el proceso iterativo del tipo prueba-error, realizado para ajustar el módulo de elasticidad podría llegar a ser engorroso cuando la cantidad de datos de deflexiones aumente considerablemente.

Cuadro N° 1.1 Tramos de la carretera Cañete-Chupaca según tipo de rodadura

Tramo	Longitud (km)	Tipo de superficie de rodadura (antes)	Tipo de superficie de rodadura (actual)
Cañete - Lunahuaná	41,0	Carpeta Asfáltica	Carpeta Asfáltica
Lunahuaná - Pacarán	11,9	Tratamiento Superficial	Tratamiento Superficial
Pacarán - Zúñiga	3,7	Afirmado	Slurry Seal
Zúñiga - Dv. Yauyos	70,4	Afirmado	Monocapa
Dv. Yauyos - Roncha	128,2	Afirmado	Monocapa (33 Km.) - Afirmado (91.185 Km.)
Roncha - Chupaca	16,5	Afirmado	Afirmado

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 1.1 Corredor Vial N° 13. Carretera Cañete - Chupaca



Fuente: MTC – Proviás Nacional – Proyecto Perú

1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME DE SUFICIENCIA

En el Capítulo II se presenta el Estado del Arte del análisis estructural de pavimentos flexibles. Este análisis se realiza siguiendo el enfoque mecanístico de análisis, es decir, modelando el comportamiento físico de la estructura. Dado que el pavimento flexible esta frecuentemente compuesto de varias capas de

diferentes materiales, con propiedades que pueden ser muy diferentes en algunos casos, el problema del análisis estructural tiene cierto grado de dificultad al tratar de predecir el comportamiento de toda la estructura. En este capítulo se hace referencia a dos tipos de modelos de análisis estructural de pavimentos flexibles, los modelos elásticos lineales, y los modelos elásticos no lineales. Los primeros han sido utilizados para modelar materiales bituminosos pues estos, a pesar de presentar un comportamiento visco elástico, en la mayoría de pavimentos de carreteras se comportan como estructuras que se pueden aproximar a elásticas para las solicitaciones de las cargas a las que son sometidas. Los materiales de los que están compuestas las capas de base, sub-base, así como el suelo del que está constituida la sub-rasante no presentan el mismo comportamiento lineal. Estos materiales granulares y cohesivos tienen un comportamiento no lineal, por lo que en este Capítulo se presentan modelos de análisis no lineal. Estos modelos elásticos lineales y no lineales están incluidos en el software MICHPAVE, utilizado para analizar el comportamiento estructural de la carretera Cañete – Chupaca en el tramo evaluado en el presente informe. El MICHPAVE es un software de cálculo directo, es decir, se ingresan las propiedades y características de los materiales y capas de la estructura y se obtienen esfuerzos y deformaciones. Sin embargo, no se cuenta con información completa de este tipo para el tramo analizado. Por otro lado, se cuenta con un registro extenso de deflexiones medidas con la Viga Benkelman. Estas medidas de deflexiones son una información fundamental para el desarrollo de un procedimiento de Cálculo Inverso. El Cálculo Inverso parte del conocimiento de las deflexiones del pavimento para determinar mediante un proceso iterativo algunas características de la estructura, como son el módulo de elasticidad de cada capa y, en algunos casos, sus espesores. Este procedimiento de cálculo inverso se ha desarrollado en el presente informe con el software MICHBACK. En la parte final del capítulo se hace mención a la evaluación estructural por medio de ensayos no destructivos. Se describen dos de los más conocidos métodos de ensayo para medir deflexiones en pavimentos, la Viga Benkelman y el Falling Weight Deflectometer (FWD). El primer método ha sido utilizado en la carretera en estudio y el segundo es el método de medición más común en muchos países, siendo el método de medición estándar en la mayoría de programas de cómputo de análisis y diseño de pavimentos.

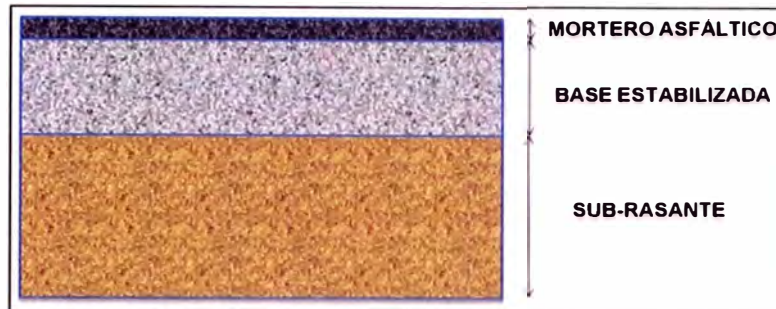
El Capítulo III se inicia con la descripción del marco teórico de la deflectometría y de su uso en la evaluación estructural de pavimentos flexibles. Uno de los inconvenientes más comunes en la evaluación estructural, es el de caracterizar adecuadamente el material de base de la estructura. En esta capítulo se caracteriza el material de la sub-rasante del tramo considerado de acuerdo a los modelos teóricos de materiales granulares y cohesivos presentado en el Capítulo II. El Capítulo termina con el marco teórico de los métodos de solución de las ecuaciones de esfuerzo-deformación. Se presenta el marco teórico de los métodos analíticos y de elementos finitos utilizado para tal fin.

En el Capítulo IV se efectúa la aplicación de la evaluación estructural en el tramo considerado. Se muestran los datos de campo de deflexiones con la Viga Benkelman. Con estos datos de campo se efectúa el análisis de cálculo inverso con el fin de determinar los módulos de elasticidad de los materiales existentes en la carretera Cañete – Chupaca para el tramo estudiado. Una vez determinados estos módulos se aplica la solución de las ecuaciones constitutivas con el uso del método de elementos finitos. Dado que el procedimiento de evaluación se efectúa para dos series de deflexiones en el tiempo, los resultados permitirán conocer el estado estructural del pavimento del tramo considerado para dos instantes en el tiempo, lo que permitirá ubicar dos puntos en una curva de deterioro estructural. El Capítulo termina con la propuesta de una curva de falla de la estructura.

1.3 TRAMO EVALUADO: Km. 74+000 – KM. 84+000

El pavimento analizado en esta carretera es un pavimento no convencional. El pavimento está conformado por una capa de material granular mejorado o estabilizado con un material bituminoso, el proceso constructivo se realizó en frío. En la Figura N° 1.2 se muestra el perfil del pavimento estudiado.

Figura N° 1.2 Tipo de pavimento Carretera Cañete-Chupaca

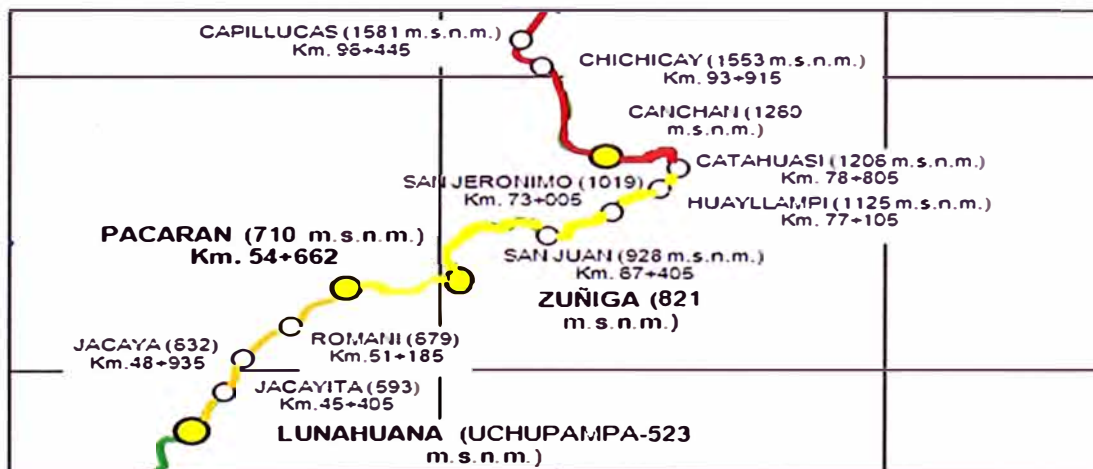


Fuente: Elaboración propia.

Ubicación

El tramo evaluado abarca del km 74+000 - km 84+000, está comprendido dentro de La carretera Cañete –Yauyos - Huancayo que forma parte del corredor vial N° 13 de la Red Vial Nacional, pasando por el poblado San Jerónimo a 1019 msnm y termina en el Km 84+000 pasando el poblado de Catahuasi a 1206 msnm.

Figura N° 1.3 Ubicación del Tramo en estudio



Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú

Cuadro N° 1.2 Descripción del tramo en estudio

Departamento / Región:	Lima
Provincia:	Yauyos
Distrito:	Catahuasi
Localidad:	Catahuasi
Región Geográfica:	Costa
Altitud:	1019 m.s.n.m. - 1206 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

Topografía

El tramo de la carretera asignado, presenta una topografía bastante sinuosa y en media ladera; Plataforma de calzada con un solo carril y tiene un ancho útil que varía de 3.5 a 7.5m.

Geología

La carretera se desarrolla en media ladera, conformada por material aluvial, terrazas de depósitos fluviales y cortes en rocas macizas, cuyo material de plataforma vial se clasifica según el sistema SUCS como SC-SM (arena arcillosa y limosa), presentando bolonerías en la sub-rasante.

Clima

Según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal (expuesta en su "Geografía del Perú"), pertenece a la Región Yunga Marítima, caracterizada por ser de sol dominante durante casi todo el año, la temperatura varía entre 20°C y 27°C durante el día y las noches son frescas a causa de los vientos que bajan de regiones más altas.

2. CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles son llamados así, debido a que la estructura total del pavimento se flexiona bajo la aplicación de una carga. La estructura del pavimento flexible está típicamente compuesta de varias capas de diferentes materiales. Cada capa recibe la carga de la capa superior, la distribuye a lo largo de ella y transmite la carga hacia la capa inferior. En este proceso, los esfuerzos (en términos de fuerza por área), se verán reducidos, siendo máximos en la parte superior de la estructura y mínimos a la altura de la sub-rasante. Con la finalidad de aprovechar esta propiedad de distribución de los esfuerzos, las capas de materiales son usualmente colocadas en orden descendente de capacidad de carga, con la capa de material de mayor capacidad de carga en la superficie y la capa de menor capacidad de carga en la parte inferior de la estructura.

Las primeras representaciones de pavimentos flexibles conformados por capas mediante modelos teóricos surgieron a partir de 1945 con el trabajo de Donald M Burmister denominado *“Teoría General de Esfuerzos y Deformaciones en Sistemas de Suelos por Capas”* (*The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems*), la misma que fue aplicada exitosamente a pavimentos. Esta teoría, basada en la teoría elástica en suelos de V J Boussinesq de 1885, tenía en cuenta espesores y propiedades mecánicas de los materiales que conforman la masa de la estructura del pavimento para calcular el estado de esfuerzos a cualquier profundidad. La solución planteada por Burmister era de aplicación práctica para un sistema de tres capas y cuando la relación de módulos del material en sobre la sub-rasante (normalmente denominada base) y la propia sub-rasante era aproximadamente igual a la unidad. Si esta relación de módulos es mucho mayor que la unidad, la ecuación debe de ser modificada. Estudios posteriores plantearon la generalización del modelo a estructuras multicapa con diferentes condiciones de

frontera, entre estos trabajos se encuentran los de Westergard, Palmer y Barber, Odemark, entre otros.

Con las mejoras sustanciales en la capacidad de cómputo, en los últimos años se ha producido el desarrollo de una gran variedad de alternativas que van desde esquemas de capas elásticas lineales y no lineales, hasta modelos visco elásticos o dinámicos, elaborados en un constante afán de lograr simulaciones cada vez más compatibles con la realidad.

Para el análisis estructural de la carretera Cañete – Chupaca desarrollado en el presente trabajo, se ha considerado que la capa de material granular estabilizado o mejorado con material bituminoso en frío tiene un comportamiento elástico lineal, mientras que la sub-rasante o terreno de fundación presenta un comportamiento elástico no lineal.

A continuación se hace una breve descripción de los modelos elásticos lineales y no lineales de pavimentos flexibles.

2.1.1 Modelos Elásticos Lineales de esfuerzo-deformación

Un modelo elástico de capas tiene como objetivo determinar esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión y desplazamientos en cualquier punto de la estructura del pavimento, que son causados por la aplicación de una carga superficial. Los modelos elásticos de capas asumen que cada capa estructural del pavimento es homogénea, isotrópica y lineal elástica. Como consecuencia de ello, las propiedades del material son las mismas en cualquier punto de la capa y ésta recuperará su forma original una vez que la carga es retirada.

Este enfoque elástico de capas trabaja con modelos matemáticos relativamente simples, los cuales requieren las siguientes simplificaciones básicas:

- Cada capa es homogénea, isotrópica, y linealmente elástica con módulo elástico E y coeficiente de Poisson ν .
- No se considera el peso del material.

- Cada capa tiene un espesor finito, excepto la capa inferior que tiene espesor infinito.
- Una presión uniforme es aplicada en la superficie sobre un área circular.
- Se satisfacen condiciones de continuidad en las interfaces entre capas. De este modo, esfuerzos verticales, esfuerzos de corte, desplazamientos verticales, y desplazamientos radiales son iguales en los puntos que conforman las interfaces.
- Los materiales constituyentes de las capas no son sometidos a esfuerzos más allá de sus rangos elásticos.

De acuerdo a la Ley de Hooke, al actuar normalmente el esfuerzo sobre un elemento del pavimento en la dirección vertical z , se produce una deformación unitaria obedeciendo una relación lineal.

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$$

Al igual que en la teoría de elasticidad clásica, se asume que una función de esfuerzo ϕ , satisface la ecuación diferencial:

$$\nabla^4 \phi = 0$$

Para el problema bi-dimensional, en coordenadas cartesianas se tiene que la función de esfuerzos queda definida por:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$$

Resolviendo la ecuación general que satisfaga las condiciones de frontera, la función encontrada ϕ permite calcular los esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} . Luego, utilizando las ecuaciones de comportamiento lineal del material:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} (-\nu \sigma_x + \sigma_y) \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

Se pueden calcular entonces, las deformaciones unitarias ε_x , ε_y y γ_{xy} . Finalmente, de las ecuaciones que relacionan las deformaciones unitarias y las derivadas de los desplazamientos, por integración, se obtienen los desplazamientos u y v .

En cada una de las capas. Para el análisis de un sistema con distribución de esfuerzos axial simétrico,

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

En la cual r y z son las coordenadas cilíndricas en las direcciones radial y vertical respectivamente. Luego que la función de esfuerzos ϕ es determinada, los esfuerzos y desplazamientos pueden ser determinados mediante las ecuaciones,

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right]$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right]$$

$$w = \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right]$$

$$u = - \frac{1 + \nu}{E} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right]$$

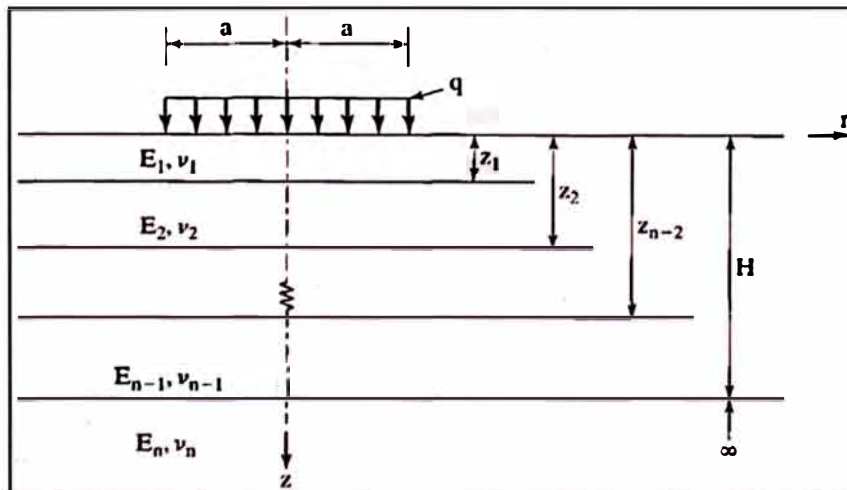
Para la solución de la ecuación diferencial de cuarto orden, son necesarias ecuaciones adicionales, las cuales se obtienen de las condiciones de borde y de continuidad de cada capa.

Los métodos más utilizados de solución son:

- Aproximar ϕ a una expresión polinómica.
- Métodos analíticos.
- El método de diferencias finitas.
- El método de elementos finitos.

La Figura 2-1 muestra un sistema de n capas en coordenadas cilíndricas, la capa inferior de espesor infinito. Los módulos de elasticidad y los coeficientes de Poisson de la i-ésima capa son E_i y ν_i , respectivamente.

Figura N° 2.1 Sistema multicapa de pavimento flexible



Fuente: Huang, Yang H. "Pavement Analysis and Design"

Cabe señalar que en el tramo analizado de la carretera Cañete – Chupaca, la capa estabilizada y mortero asfáltico que la cubre, será tratada como una capa de comportamiento lineal elástico.

2.1.2 Modelos Elásticos no-lineales de esfuerzo-deformación

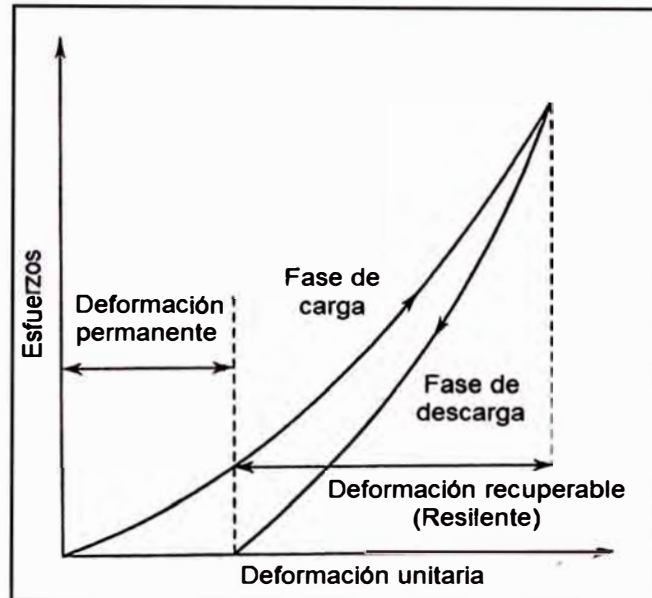
Dado que materiales granulares, tales como los que conforman las bases y sub-bases en pavimentos flexibles, presentan comportamiento elástico no lineal, en los cuales los módulos de elasticidad varían según estado de esfuerzos, es necesario utilizar modelos no lineales para analizar el comportamiento de estas capas granulares. Cabe señalar que para analizar el comportamiento estructural de la carretera Cañete – Chupaca, es necesario plantear un modelo no lineal para modelar la sub-rasante o terreno de fundación.

Es conocido que los materiales granulares son no elásticos y que sufren deformaciones permanentes bajo la sollicitación de cargas estacionarias. Linealidad implica la aplicabilidad del principio de superposición, por lo tanto, la constante elástica no debería de variar con el estado de esfuerzos. En otras palabras, la deformación axial de un material lineal elástico sometido a un esfuerzo axial debería de ser independiente de la presión de confinamiento. Es evidente que esto no se cumple en suelos como el que constituye la sub-rasante de esta carretera, debido a que la deformación axial depende fuertemente de las presiones de confinamiento. Por otro lado, estudios de laboratorio han mostrado que materiales granulares de suelos que conforman bases y sub-bases siguen un comportamiento no lineal, y dependiente de los niveles de esfuerzo a los que están sometidos.

La deformación producida con la aplicación de cada carga se recupera casi completamente y es proporcional a la magnitud de la carga, por lo tanto se le puede considerar como un comportamiento elástico. Por lo tanto, la deformación elástica es casi la misma para todos los ciclos de carga a los que va a estar sometida la estructura, así mismo, el estado de esfuerzos es casi el mismo. Este comportamiento es conocido como comportamiento resiliente. El término resiliente se refiere a la energía que es transmitida por medio de las cargas al material, la misma que se recupera luego que el proceso de descarga ha culminado. El módulo resiliente es el módulo elástico de los materiales del pavimento y del terreno de fundación, con la característica de que presentarán cierta cantidad de deformación permanente previamente acumulada.

En pruebas de determinación de módulo resiliente, ocurren deformaciones permanentes y resilientes durante el estado de aplicación de cargas, tal como se muestra en la Figura 2.2.

Figura N° 2.2 Deformaciones de un pavimento bajo carga dinámica



Fuente: Huang, Yang H. "Pavement Analysis and Design"

En la medida que el número de repeticiones se incrementa, la magnitud de la deformación permanente en cada aplicación de la carga decrece. La propiedad resiliente del material es una variable esencial en el análisis de pavimentos usando un enfoque mecanístico no lineal. El módulo resiliente está definido por:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente.

$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$: Esfuerzo desviador

σ_1 : Esfuerzo principal axial

σ_3 : Esfuerzo principal de confinamiento

ϵ_r : Deformación recuperable

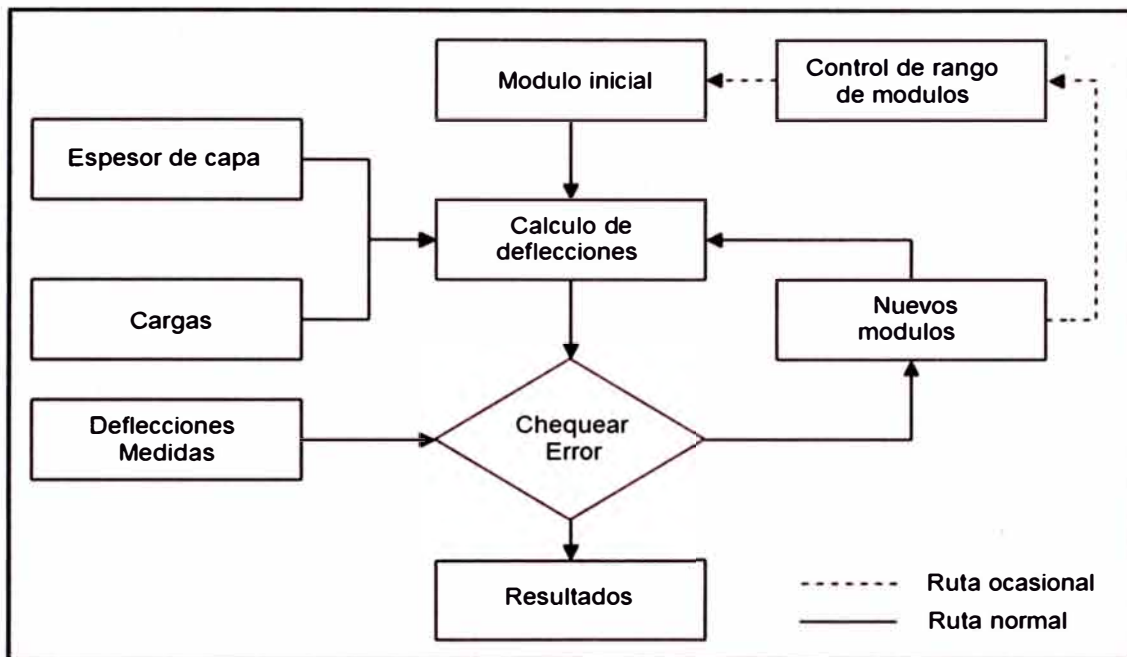
El análisis elástico no lineal multicapa puede ser llevado a cabo si es conocida la relación entre el módulo resiliente y el estado de esfuerzos, mediante un método de aproximaciones sucesivas. Primero, se asume un módulo elástico para cada

capa y se calculan los esfuerzos de la teoría elástica lineal de capas mediante, por ejemplo, el modelo de *Donald M. Burmister*. Una vez conocidos los esfuerzos en cada capa, se determina un nuevo juego de módulos resilientes, utilizando un modelo como el $K - \theta$, con estos nuevos módulos resilientes se determinan los nuevos esfuerzos con el modelo de la teoría lineal de capas. El proceso se repite hasta que el juego de módulos resilientes en dos aproximaciones sucesivas, converja a una tolerancia especificada.

2.1.3 Cálculo Inverso

El cálculo inverso es una evaluación mecánica de las deflexiones de la superficie de un pavimento, que son generadas por una carga estándar y medidas con un instrumento patrón. El cálculo inverso toma una medida de deflexión superficial de pavimento y trata de igualarla (dentro de un error tolerable), con una deflexión superficial generada desde una estructura de pavimento idéntica usando un módulo de elasticidad asumido. Estos módulos de elasticidad asumidos en el cálculo directo son ajustados en un proceso iterativo hasta que se produzca la deflexión superficial que se aproxime suficientemente a la deflexión medida. De esta manera, una vez que se alcanzó la deflexión deseada, el juego de módulos de elasticidad asumidos en el último paso de la iteración es asumido como el real de campo para cada capa de la estructura. Este proceso iterativo es realizado normalmente con un programa de cómputo.

Figura N° 2.3 Diagrama de flujo del Cálculo Inverso



Fuente: Elaboración propia.

Este diagrama incluye:

- *Deflexiones medidas*: Deflexiones superficiales medidas y las asociadas distancias a la carga.
- *Espesores y carga*: Espesores de capas y niveles de carga para un ensayo específico.
- *Módulo inicial*: Es el módulo inicial usado en el programa de cómputo para calcular las deflexiones. Usualmente estos módulos son estimados de la experiencia o de algunas ecuaciones existentes en la literatura.
- *Calculo de deflexiones*: Generalmente se utilizan programas de cómputo de sistemas de capas lineales para determinar el bulbo de deflexiones.
- *Chequear error*: Este elemento compara las deflexiones medidas y las calculadas. Existen varias medidas del error que pueden ser utilizados para la comparación.
- *Nuevos módulos*: Se emplean varios métodos en los diferentes programas de cómputo de cálculo inverso para converger a un juego de módulos de elasticidad que produzcan un error aceptable entre los bulbos de deflexiones medidos y calculados.

- **Control de rango de módulos:** Con el fin de evitar que el programa converja a valores de módulos no razonables, es necesario definir un rango (mínimo y máximo) para cada capa.

En el presente informe, se ha utilizado el programa de computo MICHBACK para realizar el proceso de cálculo inverso. Dentro del MICHBACK cada capa en una sección se asume infinita en la dirección horizontal y la última capa infinitamente profunda. Se asume que todas las capas están consolidadas, de manera que no se produce ningún deslizamiento dentro de ellas producto de la aplicación de las cargas. Se asume también que la presión es uniforme sobre toda el área circular de aplicación. Debido a los supuestos usados, el problema se reduce a uno del tipo axisimétrico. En el MICHBACK, se asume que todas las capas están compuestas de materiales de comportamiento elástico lineal. El programa CHEVRON es utilizado para realizar los cálculos directos.

El MICHBACK utiliza el método de Newton modificado para el cálculo inverso. En este método se utiliza una matriz gradiente para determinar el cambio de los módulos elásticos estimados en cada iteración.

El MICHBACK utiliza dos criterios para controlar la convergencia. Se asume que ha ocurrido la convergencia si se alcanza una de las siguientes condiciones:

- a. La raíz media cuadrática (RMS, por sus siglas en ingles) de los porcentajes de errores entre deflexiones medidas y calculadas es menor que una tolerancia especificada. Este criterio se expresa mediante la ecuación:

$$100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \left(\frac{\bar{w}_j - w_j}{w_j} \right)^2} \leq \varepsilon_1$$

Donde:

w_j : Deflexión medida a una distancia d_j .

\bar{w}_j : Deflexión calculada a la distancia d_j .

m : Número de mediciones en cada sección.

ε_1 : Tolerancia, el valor por defecto es de 1%.

- b. El porcentaje de error en cada juego de los módulos elásticos estimados en dos iteraciones sucesivas es menor que una tolerancia especificada. Este criterio es expresado mediante la ecuación:

$$100 \left(\frac{\vec{E}_k^{i+1} - \vec{E}_k^i}{\vec{E}_k^i} \right) \leq \varepsilon_2, k = 1, 2, 3 \dots n$$

Donde:

\vec{E}_k^i : Es el módulo elástico estimado para la capa k en la iteración i .

ε_2 : Tolerancia, el valor por defecto es de 1%.

Este criterio indica que el esquema iterativo se ha estabilizado y que las variables desconocidas no cambian significativamente de una iteración a otra.

2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Son aquellos ensayos que se realizan sin necesidad extraer testigos. Se usan equipos especializados en medir las deformaciones del terreno mediante las aplicaciones de cargas estáticas y/o dinámicas.

2.2.1 Viga Benkelman

La Viga Benkelman es un instrumento manual que consta de dos brazos, uno que va en contacto con el pavimento y el otro que sirve de pivote. En el segundo se realizan las mediciones producidas por la carga estática normalizada de 8200 kg.

Figura N° 2.4 Viga Benkelman



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

La Viga Benkelman funciona mediante el principio de palanca. Es un instrumento completamente mecánico, según se esquematiza en la Figura N° 2.5. El extremo del brazo móvil es el que varía producto de la carga del vehículo, esta variación produce el movimiento del extensómetro.

La Viga Benkelman 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.

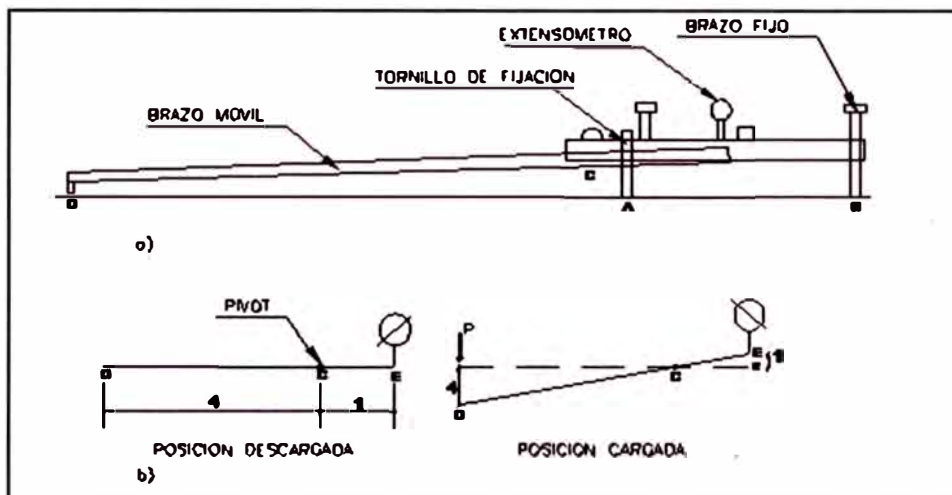
Equipo requerido

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

- a) Viga Benkelman con relación de brazos conocida (normalmente en relación de extensiones de 1:4).
- b) Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm
- c) Camión cargado, cuyo eje tenga un peso de 8200 kg. y un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- d) Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo (camioneta).

- e) Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10000 kg.
- f) Accesorios de medición: Cinta métrica de 3 metros, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2 metros y alambre de amarre.

Figura N° 2.5 Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

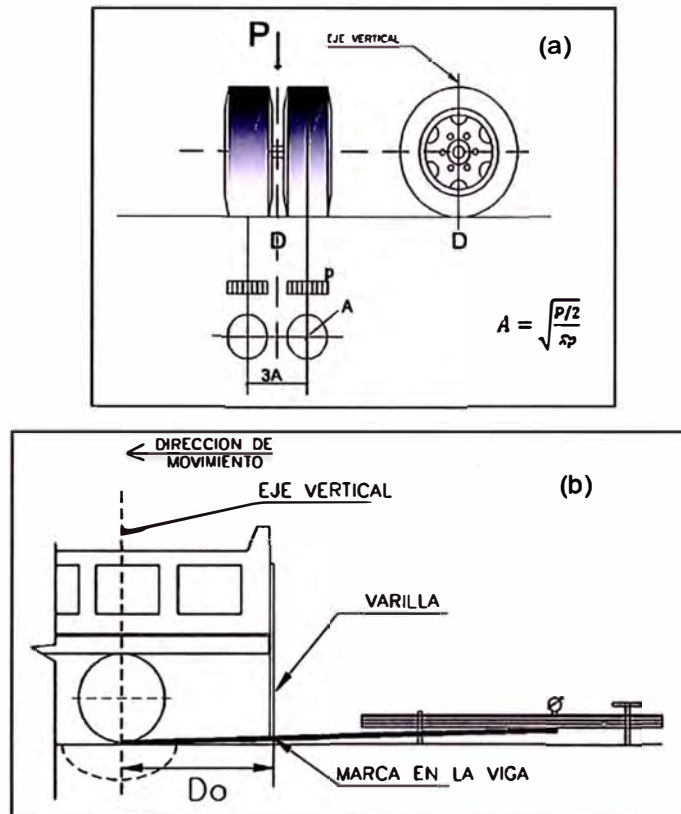


Fuente: <http://www.pavementinteractive.org>

Metodología de medición de deflexiones con la Viga Benkelman

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada en 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas este entre 75 y 85 psi. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo, se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que ésta coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto, el punto "D". Ver Figura N° 2.6 (a). Entre los neumáticos se inserta el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Para medir las deflexiones a las distancias especificadas, se toma como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión se hace coincidir las marcas de la viga con la varilla. Ver Figura N° 2.6 (b).

Figura N° 2.6 Configuración geométrica del sistema de carga: Viga Benkelman: a) Carga P en el centro de las llantas. b) Posición inicial de medición

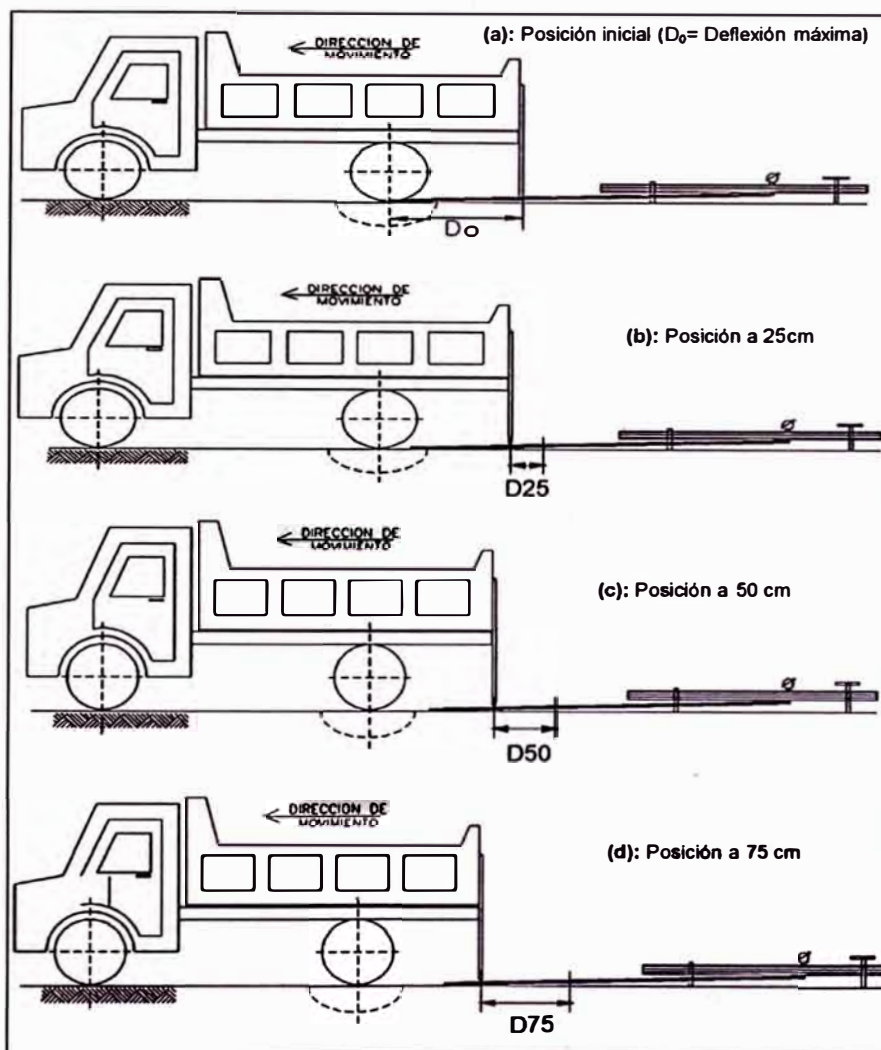


Fuente: Mario S. Hoffman (1977).

La mayoría de programa de computo de Calculo Inverso, requieren de por lo menos cinco (05) mediciones por bulbo de deflexiones.

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial, se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.

Figura N° 2.7 Esquematación del proceso de medición con la Viga Benkelman



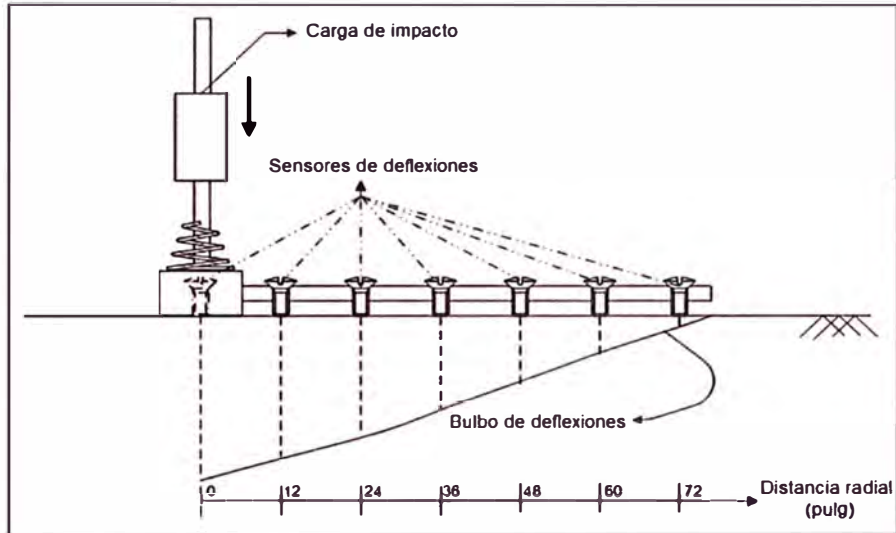
Fuente: Mario S. Hoffman (1977).

2.2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

El FWD es equipo de ensayos no destructivos más utilizado alrededor del mundo. El FWD aplica una carga de impacto sobre la superficie del pavimento y seguidamente registra las deflexiones resultantes a diferentes distancias del punto de aplicación de la carga dinámica. Tal como lo indica su nombre, el FWD deja caer una carga (usualmente entre 50 kg y 300 kg) desde una altura de hasta 40 cm que golpea un plato de radio aproximado de 15 cm colocado sobre el pavimento que transmite uniformemente la carga sobre el pavimento. La carga de impulso del FWD tiene una duración de aplicación aproximada de entre 25 a 30 milisegundos, simulado la misma carga de un vehículo viajando a una velocidad aproximada de entre 65 – 85 kph. Las deflexiones son medidas en el

punto de aplicación de la carga y hasta en otros seis (06) puntos, tal como se muestra en la Figura N° 2.8.

Figura N° 2.8 Esquema de medición del FWD y ubicación de sensores



Fuente: Adaptado de Tutumluer Erol, 2009.

Figura N° 2.9 Equipo FWD



Fuente: <http://www.iowadot.gov/>

3. CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 DEFLECTOMETRÍA

Uno de los más importantes desarrollos en la historia de los pavimentos es el uso de ensayos no destructivos de evaluación estructural o deflectometría y su uso en la selección de estrategias de rehabilitación y reconstrucción dentro de un programa de gestión de carreteras. El rápido crecimiento de procedimientos de diseño mecanístico ha traído consigo una mejora sustancial en los ensayos de no destructivos en pavimentos (NDT por sus siglas en inglés). La evaluación de pavimentos usando ensayos no destructivos es un tipo de proceso de diseño inverso.

El problema que enfrenta el ingeniero de hoy es la inadecuada caracterización de las propiedades de los materiales en pavimentos en servicio. La información es vital para evaluar si el pavimento es el adecuado para soportar un tráfico creciente o para desarrollar estrategias de rehabilitación y mantenimiento basadas en una evaluación estructural que pueda ser llevada a cabo de manera rutinaria.

3.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL USANDO DEFLECTOMETRÍA

El rol de los ensayos no destructivos en pavimentos es alimentar con data esencial, en forma de deflexiones, para la evaluación estructural. La evaluación de las propiedades de los materiales del pavimento a través del paso del tiempo y del creciente tráfico, así como para evaluar su deterioro puede realizarse por dos métodos, por medio de ensayos de laboratorio a través de ensayos no destructivos por medio de la obtención de deflexiones en la estructura.

Tradicionalmente, y con la finalidad de conocer las características estructurales, se ha recurrido a sondeos de exploración directa, mediante los cuales se obtiene muestras que posteriormente son ensayadas en el laboratorio para conocer sus propiedades mecánicas, e incorporarlas en un modelo del pavimento. Esta metodología es costosa, lenta y de carácter destructivo. La alternativa que se

presenta son los ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos han adquirido gran popularidad en la evaluación de pavimentos; debido a su rapidez, economía y a que no afectan la estructura.

Existen varios tipos de equipos de mediciones de deflexiones en pavimentos, dos muy conocidos en nuestro medio son la Viga Benkelman y el FWD. En la evaluación realizada para el presente informe se ha utilizado la Viga Benkelman por ser de fácil acceso.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE BASE

Definiciones previas

a. Módulo resiliente

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

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.

σ_d : Es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en un ensayo no confinado.

ϵ_r : Deformación recuperable

b. Coeficiente de Poisson

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

c. Módulo de elasticidad

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

d. Peso unitario

Es el peso por unidad de volumen

e. CBR

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lb. /pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración

del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lb. /pulg²) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Podemos distinguir dos tipos de materiales a analizar con un enfoque elástico no lineal, las capas granulares que conforman bases y sub-bases, y el terreno de fundación (sub-rasante), sobre el cual se apoya la estructura. Para ambos tipos de suelos existen diferentes modelos de análisis no lineal para la determinación del módulo resiliente.

Entre los modelos existentes para materiales granulares no consolidados, típicos de bases y sub-bases se tienen 2 muy usados:

A. Modelo de Presión de Confinamiento.

Es un modelo simple que relaciona el módulo resiliente con su presión de confinamiento. Los resultados de laboratorio sobre arenas y gravas arrojan la siguiente relación:

$$M_R = K_1 (\sigma_3)^{K_2}$$

Donde:

σ_3 : Presión de confinamiento

K_1, K_2 : Constantes de análisis de regresión de la data experimental

B. Modelo K- θ

Es uno de los modelos más utilizados y fue desarrollado por Hicks y Monismith en 1971. Ha sido ampliamente utilizado para modelar el módulo resiliente como una función del estado de esfuerzos aplicados a materiales granulares.

$$M_R = K_1 (\theta)^{K_2}$$

Donde:

θ : Esfuerzo invariante

K_1, K_2 : Constantes del análisis de regresión de la data experimental

El esfuerzo invariante θ , puede ser la suma de los esfuerzos normales o de la suma de los esfuerzos principales.

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

Para considerar el peso de la propia capa de material, el esfuerzo invariante viene dado por la ecuación:

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z(1 + 2K_0)$$

Donde:

γ : Peso específico del material sobre la capa analizada

z : Distancia desde la superficie hasta la capa analizada

K_0 : Coeficiente de presión de suelo en reposo

En el siguiente Cuadro se muestran valores típicos de las constantes K_1 y K_2 para diferentes materiales.

Cuadro N° 3.1 Constantes no lineales K_1 y K_2 para materiales granulares

Tipo de material	Número de datos	K_1 (KPa)		K_2	
		Media	Desviación estandard	Media	Desviación estandard
Arena limosa	8	11178	538	0.62	0.13
Arena - grava	37	30912	29670	0.53	0.17
Mezcla de arena - agregado	78	30015	18147	0.59	0.13
Agregado grueso	115	49749	51681	0.45	0.23

Fuente: HUANG, Yang H. "Pavement Analysis and Design".

Cuadro N° 3.2 Rangos de constantes no lineales K_1 y K_2 para materiales granulares no tratados

Referencia	Material	K_1 (KPa)		K_2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Hick (1970)	Agregado grueso y roca chancada	11040	34500	0.57	0.73
Hick and Finn (1970)	Base no tratada en carretera de San Diego	14490	37260	0.61	
Allen (1973)	Grava, roca chancada	12420	55200	0.32	0.7
Kalcheff and Hicks (1973)	Roca chancada	27600	62100	0.46	0.64
Boyce et al. (1976)	Caliza chancada bien graduada	55200		0.67	
Monismath and Witczak (1980)	Material de bases y subbases en servicio	20010	53475	0.46	0.65

Fuente: Huang, Yang H. "Pavement Analysis and Design".

El módulo resiliente de suelos característicos de sub-rasantes, del tipo cohesivo, es calculado frecuentemente a partir de relaciones empíricas que utilizan en valor del CBR (California Bearing Ratio). Sin embargo, es evidente que la respuesta de un suelo de sub-rasante es comúnmente no lineal y es dependiente del nivel de esfuerzos. Esta característica ha sido comprobada con pruebas de laboratorio. Entre los modelos existentes para suelos cohesivos, se tienen principalmente dos:

A. Relaciones empíricas

Los primeros intentos de incorporar el módulo resiliente de suelos de fundación se basaron en relaciones entre el CBR y el módulo resiliente. Diversas correlaciones fueron propuestas en procedimientos de diseño, estas tienen la forma:

$$M_R = K_1 (CBR)^{K_2}$$

Donde K_1 y K_2 son constantes propuestas por diferentes investigadores.

Cuadro N° 3.3 Valores de K_1 y K_2 de relaciones empíricas M_R y CBR

Investigador	K_1	K_2
Heukelom & Foster (1960)	1.500	1.000
Lister & Powell (1987)	2.555	0.640
CSIR (Council of Scientific and Industrial Research)	30000	0.650
Green & Hall (1975)	5.409	0.711
NCHRP (National Cooperative Highway Research Program 2004)	2555	0.740

Fuente: MINKWAN KIM, University of Illinois at Urbana Champaign, 2007.

B. Modelo de respuesta bilineal

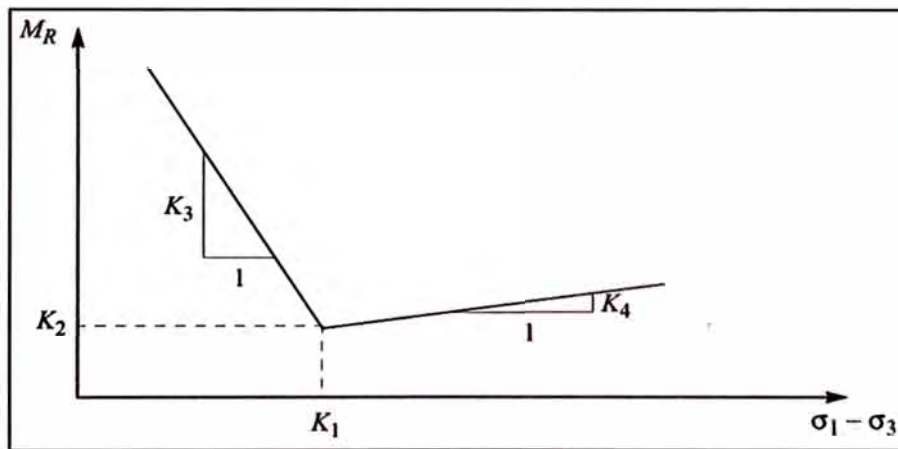
Para la mayoría de suelos de fundación de material fino, el módulo del suelo decrece en proporción al incremento de los niveles de esfuerzo, exhibiendo de esta manera, un comportamiento del tipo esfuerzo-ablandamiento. Para esta categoría de materiales de sub-rasante, el parámetro más importante que afecta al módulo resiliente es el esfuerzo desviador vertical sobre la parte superior de la sub-rasante, proveniente de la carga de ruedas aplicada sobre el pavimento. El modelo bilineal o aritmético propuesto por Thomson y Robnett (1979) ha sido

uno de los modelos más comúnmente utilizados. La relación módulo-esfuerzo desviador está dada por las ecuaciones:

$$M_R = \begin{cases} K_2 + K_3[K_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)], & \text{cuando } (\sigma_1 - \sigma_3) \leq K_1 \\ K_2 + K_4[(\sigma_1 - \sigma_3) - K_1], & \text{cuando } (\sigma_1 - \sigma_3) > K_1 \end{cases}$$

Gráficamente se tiene:

Figura N° 3.1 Modelo de módulo resiliente en suelos cohesivos



Fuente: MICHPAVE User's Manual

Donde:

K_1, K_2, K_3, K_4 : Constantes materiales obtenidas de ensayos tri-axiales o tablas.

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: Esfuerzo desviador.

Cabe señalar que el software MICHPAVE utiliza el modelo $K-\theta$ para caracterizar el módulo resiliente de materiales granulares como es el caso de una base o sub-base sin tratamiento, y el modelo de respuesta bilineal para la caracterización del módulo resiliente de materiales cohesivos como es el caso de una sub-rasante.

3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN PAVIMENTOS

3.4.1 Métodos Analíticos

La solución por métodos analíticos es relativamente sencilla de plantear cuando se realizan simplificaciones de los modelos elásticos lineales y no lineales. En estos casos se plantean ecuaciones diferenciales ordinarias sencillas en el dominio bidimensional para la determinación de esfuerzos y deformaciones. A continuación se presentan algunos modelos simplificados de solución para el caso elástico lineal. El caso elástico no lineal se tratará con métodos de Elementos Finitos.

A. Modelo de una capa (Boussinesq)

El medio elástico continuo semi-infinito de Boussinesq se supone lineal e isotrópico, con módulo de Young E y con coeficiente de Poisson ν . La distribución de esfuerzos depende de la profundidad y uniformidad de la masa de suelo, así como del tamaño y forma del área cargada. En este modelo de solución el esfuerzo es proporcional a la deformación.

La fórmula de Boussinesq para hallar el esfuerzo de un punto del suelo debido a una carga distribuida uniforme q_0 aplicada sobre un área circular de radio a es:

$$\sigma_z = q_0 \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{a}\right)^3}{\left(1 + \left(\frac{z^2}{a^2}\right)\right)^{\frac{3}{2}}}\right]$$

B. Modelos Bicapas (Hogg)

Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con apreciable rigidez a la flexión y horizontalmente infinita. El suelo representa la segunda capa. Este suelo se considera elástico, homogéneo e isotrópico, de espesor infinito o, alternativamente, colindante con una base horizontal y muy rígida, típicamente, un macizo rocoso. Con este modelo es posible caracterizar los materiales del sistema bicapa pavimento-sub-rasante en base al análisis e

interpretación de las curvas de deflexiones. Para hacer uso del modelo de Hogg no se necesita conocer el espesor de las capas del pavimento, dado que las curvas de deflexiones teóricas del modelo dependen de un término denominado longitud elástica o característica, el cual puede ser obtenido conociendo dos valores de deflexiones medidas. Adicionalmente, el módulo elástico de la subrasante y rigidez a la flexión de la primera capa pueden ser determinados de la misma manera. Con la longitud característica se puede ingresar a los ábacos de la solución de la ecuación de Hogg que proporcionan las curvas de deflexiones. Los momentos de flexión del pavimento y sus esfuerzos de tracción se deducen de los desplazamientos verticales de las formulas usuales de capas.

C. Modelos Multicapas (Burmister)

Los pavimentos tienen típicamente un sistema de varias capas con materiales de diferente capacidad estructural, esto difiere mucho del modelo de Bousinesq de masa homogénea en toda la estructura. Burmister (1943) desarrollo soluciones para calcular esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en sistemas de dos capas y luego, lo extendió a sistemas multicapas. Los supuestos de las soluciones de Burmister incluyen:

- El sistema está compuesto de varias capas, en el que cada capa es homogénea, isotrópica y linealmente elástica con un módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson constantes.
- Cada capa tiene espesor constante y extensión horizontal infinita.
- Toda la estructura descansa sobre un espacio lineal semi-infinito.
- Antes de la aplicación de las cargas externas, el sistema de capas no presenta esfuerzos ni deformaciones. No se considera el peso de la estructura.
- Los efectos dinámicos se asumen despreciables.

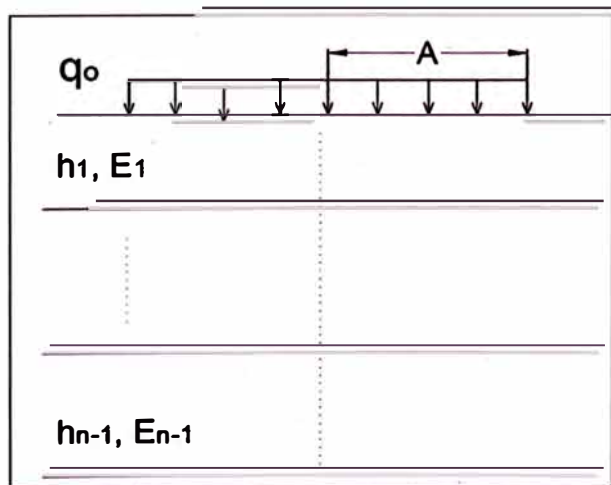
Para estos sistemas Burmister derivó expresiones analíticas para esfuerzos y deformaciones para tres capas que luego fueron generalizadas por Schiffman (1962) en una solución para el análisis de esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos en un sistema de n-capas. Esta solución toma en cuenta cargas normales no uniformes y fuerzas superficiales tangenciales. Las

soluciones están presentadas en un sistema axial simétrico. Con el desarrollo de la capacidad de cómputo, estas soluciones que parecían ser poco prácticas han cobrado mucha popularidad. Muchos programas de cómputo de pavimentos multi-capas han sido desarrollados en base a las soluciones planteadas por Schiffman. Algunos de los programas que usan estas soluciones y que son ampliamente usados son CHEVRON, BISAR, ELSYM5, KENLAYER, y WELSEA.

Una de las mayores dificultades en el análisis de los sistemas multi-capas es satisfacer las condiciones de borde entre capas para todo el sistema. Dentro de las contribuciones a los modelos multi-capa se encuentran los trabajos de Palmer y Baber y de Odemark, que permiten simplificar el análisis determinando un módulo elástico equivalente y espesor equivalente de todo el sistema multi-capas. Para una carga sobre el pavimento esquematizada por una presión unitaria q_o , aplicada sobre un área circular de radio A, y compuesta por $n-1$ capas horizontales de espesor h_i , de módulo E_i de Young y de coeficiente de Poisson ν en todas las capas, (Ver Figura N° 3.2) la fórmula de *Palmer y Barber* determina el modulo elástico equivalente del sistema como:

$$E = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3$$

Figura N° 3.2 Sistema multi-capa propuesto en la fórmula de Palmer y Barber generalizada



Fuente: Reyes Lizcano, "Diseño racional de pavimentos".

En el análisis de la estructura del pavimento de la carretera Cañete-Chupaca en el tramo 74+000 al 84+000 se utilizará la ecuación anterior para determinar el modulo elástico de toda la estructura en función de los módulos elásticos de las denominadas capa asfáltica equivalente y capa granular equivalente.

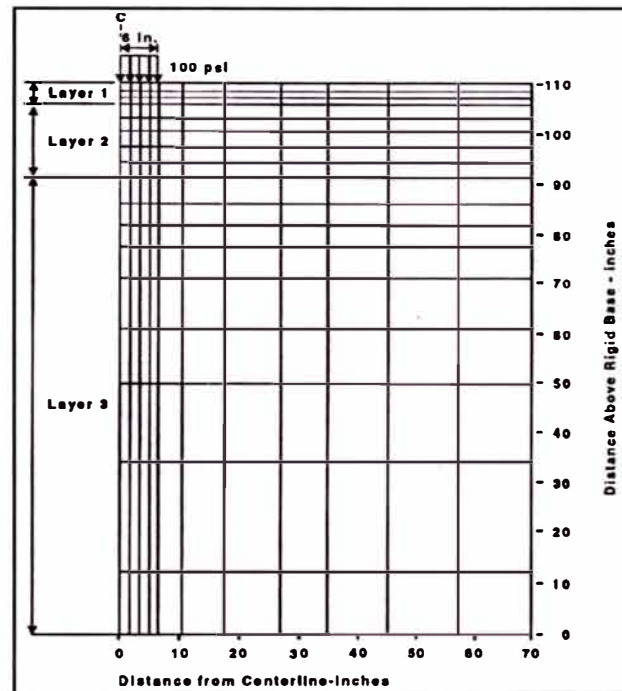
3.4.2 Métodos de Elementos Finitos

Estos métodos resuelven las ecuaciones constitutivas y de compatibilidad; tanto para el estado lineal elástico como para el estado no lineal elástico; mediante la división del medio continuo en un conjunto de subdominios denominados elementos finitos. Adicionalmente, resuelven las ecuaciones de condiciones de contorno.

Los valores de esfuerzo y deformación en puntos interiores a los elementos se aproximan por medio de funciones de interpolación que utilizan los valores conocidos en los nodos. En el caso de pavimentos existen programas como MICHPAVE y EverStressFE que aplican elementos finitos para resolver el problema de pavimentos flexibles.

El análisis por elementos finitos requiere que la estructura del pavimento sea dividida en pequeños elementos rectangulares conectados entre ellos por sus nodos. Tal como se muestran en la siguiente figura,

Figura N° 3.3 Configuración de elementos finitos usada para análisis de un sistema de capas homogénea



Fuente: G. Dehlen 1969.

En cada uno de los elementos finitos se resuelven las ecuaciones de esfuerzo-deformación sobre su dominio. La siguiente ecuación muestra la relación entre esfuerzos y desplazamientos nodales en cada elemento finito.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}\mathbf{U}$$

Donde $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el vector de deformación unitaria, \mathbf{S} un apropiado operador lineal y \mathbf{U} es el vector desplazamiento del nudo.

La matriz de rigidez de cada elemento se determina a partir de la ecuación:

$$K^e = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv$$

Donde \mathbf{B} es una matriz de operadores lineales (derivadas y funciones de aproximación) y \mathbf{D} es la matriz constitutiva. Las matrices de rigidez de los elementos son ensambladas para formar la matriz de rigidez del sistema. Luego, se resuelve el sistema de ecuaciones lineales en las cuales los desplazamientos

nodales son las incógnitas. Los esfuerzos y desplazamientos en cualquier punto del dominio pueden ser obtenidos a partir de estos desplazamientos nodales.

En el caso de análisis lineal elástico, donde el módulo de elasticidad E es constante, al obtener los desplazamientos en los nudos, se resuelve el problema.

Para llevar a cabo el análisis no lineal mediante elementos finitos, los esfuerzos y propiedades constitutivas son recalculadas en cada punto de integración dentro de cada elemento finito individual. En la implementación del modelo $K-\theta$ bajo este enfoque, en cada iteración, se recalcula la matriz de rigidez del elemento K^e . La matriz constitutiva D se calcula como:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

Se observa que la matriz D varía a través del elemento dado que el módulo resiliente E varía. El coeficiente de Poisson se considera contante.

Tal como se mencionó en el acápite 2.1.2, el procedimiento iterativo para llegar a la solución del problema no lineal, se puede expresar como:

Se calcula un estado inicial de esfuerzos asumiendo un juego de valores de modulo elástico (módulo resiliente en este caso) y utilizando la teoría elástica lineal de capas (por ejemplo el modelo de Donald M. Burmister). Una vez conocidos los esfuerzos, se recalculan los módulos resilientes en cada nodo mediante la ecuación del modelo $K-\theta$ (para materiales granulares, Ver acápite 3.3.) o la ecuación del modelo de respuesta bilineal (para materiales cohesivos, Ver acápite 3.3); seguidamente se obtiene la matriz de rigidez K^e de cada

elemento, las mismas que se ensamblan para obtener la matriz **K** del sistema y resolver el sistema de ecuaciones lineales:

$$\mathbf{KU} = \mathbf{P}$$

Donde **K** es la matriz de rigideces del todo el sistema y es dependiente del módulo resiliente. El vector **P** es el vector de cargas aplicadas y **U** es la matriz de desplazamientos de los nodos de toda en toda la malla de elementos finitos. La convergencia queda definida como el punto en el cual esfuerzos y desplazamientos no cambian significativamente en iteraciones sucesivas.

Cabe señalar que los esfuerzos horizontales serán considerados nulos cuando sean esfuerzos de tensión cuando se trate de materiales granulares, debido a que estos no soportan estos tipos de esfuerzos.

4. CAPÍTULO IV: APLICACIÓN TRAMO KM. 74+000 – KM. 84+000

4.1 DATOS DE CAMPO CON LA VIGA BENKELMAN

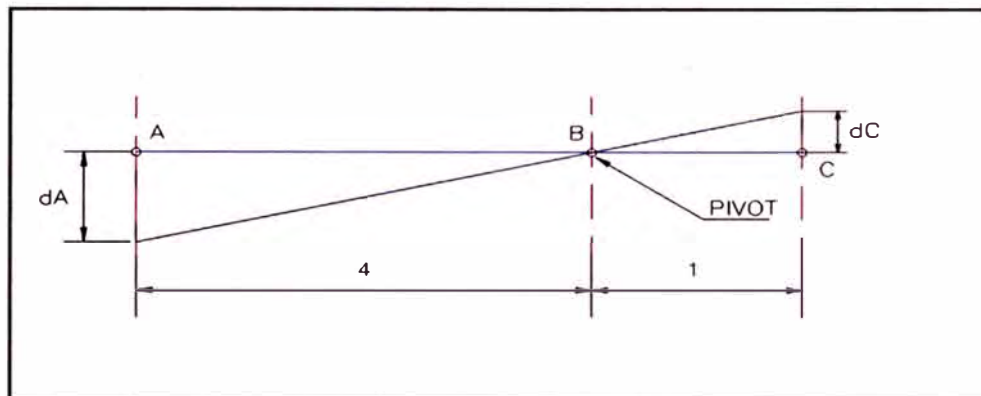
Los trabajos realizados durante la visita de campo en Diciembre del 2010, consistieron en el recojo de la información necesaria para determinar los bulbos de deflexiones producidos por la carga estándar en secciones previamente fijadas, y en donde ya se contaba con información del mismo tipo de trabajos de campo realizados principalmente en el año 2008.

Las medidas de deflexiones del 2010 se realizaron sobre el carril del lado izquierdo de la vía mirando hacia arriba. Las mediciones se iniciaron en la progresiva 84+000 y se tomaron cada 200 metros en forma descendente hasta llegar a la progresiva 74+000. En cada progresiva se tomaron dos juegos de deflexiones, una para cada par de llantas del eje posterior del camión estándar. Para ello se utilizaron dos Vigas Benkelman. Adicionalmente a las deflexiones se tomaron datos de temperatura a la mitad de la profundidad del mortero asfáltico y el espesor de la base estabilizada.

En la información del 2008 se cuenta con medidas de deflexiones en ambos carriles para el tramo estudiado cada 100 metros. Para el análisis efectuado en el presente informe, solamente se utilizaron los datos de los mismos sitios de la data del 2010.

Tal como se ha visto, en el procedimiento de medición se coloca un extremo del instrumento en el punto "A" coincidente con una progresiva, (Ver Figura N° 4.1), bajo el centro de gravedad de una de las llantas dobles del camión que aplica la carga, y que inicialmente se encuentra estacionado. En esa posición se gradúa el dial en cero.

Figura N° 4.1 Esquematización de mediciones con Viga Benkelman

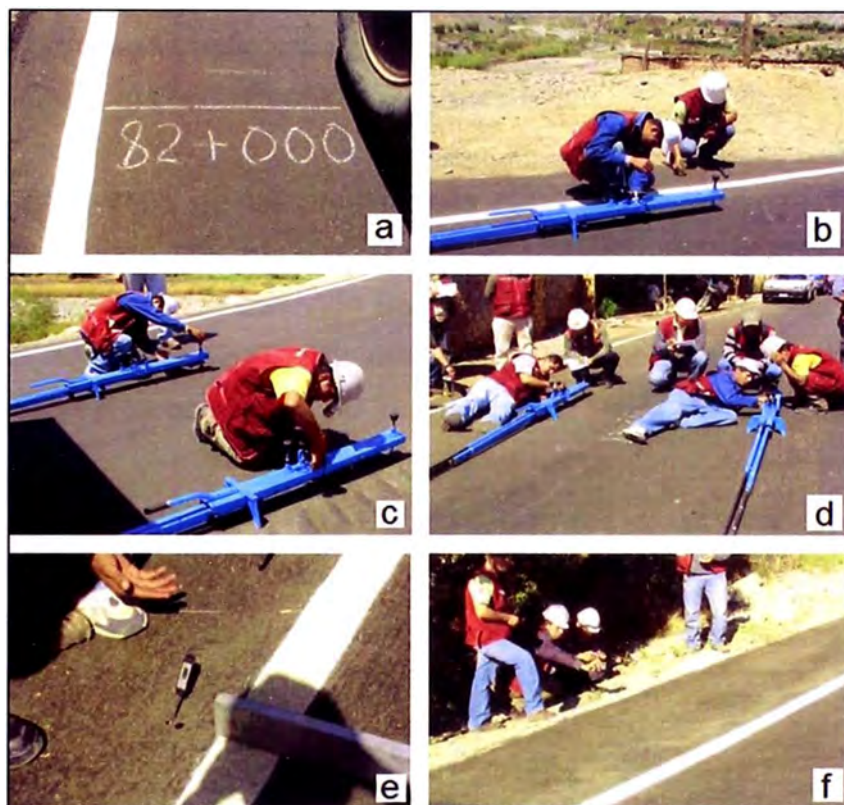


Fuente: Mario S. Hoffman (1977).

Luego de efectuada la primera lectura, correspondiente al inicio del ensayo, se procede a mover el camión a una velocidad constante de 1.0 kph; como consecuencia; el punto "A" 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 a recuperarse del estado de deformación inicial. Cuando el camión avanza 25 cm, el pavimento en el punto "A" seguirá todavía parcialmente deformado; en esa posición se tomará una segunda lectura. Del mismo modo se tomaron lecturas cuando el camión se encontraba a 50 cm y 75 cm. Finalmente, la llanta del camión se aleja completamente del punto "A" dejándolo completamente liberado de la influencia de su carga, y en consecuencia, el pavimento en dicho punto se recuperará completamente del estado inicial de deformación, condición en la cual se toma una última lectura en el dial, registrándose de esa manera la deflexión máxima.

Las lecturas en el dial corresponden a deformaciones en un proceso de descarga, estas lecturas deberán transformarse a deflexiones reales teniendo en cuenta la relación de brazos de la Viga Benkelman. A continuación se muestra el proceso de medición ver Figura N° 4-2.

Figura N° 4.2 Medición de deflexiones. a) ubicación b) instalación c) calibración d) medición e) temperatura f) espesor



Fuente: Elaboración propia.

Diferencias entre mediciones con Viga Benkelman y FWD

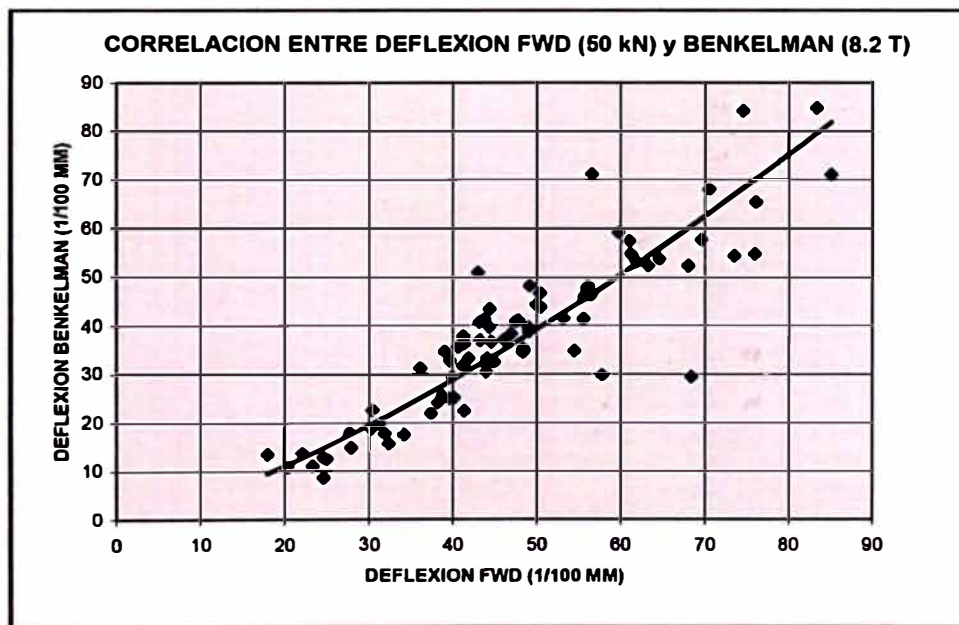
La mayoría de los programas de cómputo que realizan el procedimiento del Cálculo Inverso utilizan deflexiones medidas con el FWD, entre ellos, el que se utiliza en este informe, el MICHBACK. Por este motivo, se hace necesario convertir las deflexiones medidas en campo con Viga Benkelman a deflexiones equivalentes del FWD.

El FWD aplica un impulso a la superficie del pavimento por medio de un sistema de cargas especialmente diseñado para representar las cargas dinámicas aplicadas por las ruedas de los vehículos, cargas que son altas y de aplicación rápida. Por ejemplo, el Dynatest FWD produce una carga de impacto de entre 25-30 milisegundos y una fuerza pico de 120 kN. El bulbo de deflexiones de respuesta del pavimento es medido mediante 7-9 geófonos de precisión ubicados a distintas distancias del plato de carga. Por otro lado, la Viga Benkelman mide las deflexiones bajo la aplicación de la carga a bajas

velocidades. Debido a que el punto de aplicación de la carga de las ruedas está ubicado cerca del punto de máxima deflexión durante la configuración inicial, la duración efectiva de la aplicación de la carga es mayor en este caso que en la aplicación de la carga en los puntos más distantes.

Para la determinación de las propiedades elásticas de pavimentos existentes mediante un método mecánico usando el software MICHPAVE, se hace la conversión de deflexiones con Viga Benkelman utilizando la ecuación propuesta por José W. Gutiérrez (2007), la misma que fue obtenida por medio de un análisis de regresión con datos de las carreteras Piura-Paita y Piura-Sullana-Puente Macar.

Figura N° 4.3 Correlación entre mediciones de deflexiones con FWD y Viga Benkelman



Fuente: José W. Gutiérrez (2007).

$$D_{VB} = 0,176 (D_{FWD})^{1,382}$$

La ecuación utilizada para determinar las deflexiones FWD en función de las correspondientes con Viga Benkelman es:

$$D_{FWD} = 3,5151 (D_{VB})^{0,7236}$$

En la ecuación anterior los datos de deflexiones para FWD y Viga Benkelman están en centésimas de milímetro.

Los datos de campo obtenidos con la Viga Benkelman convertido a FWD y que se usarán en el programa MICHBACK se muestran en los siguientes cuadros.

Se presentan los datos de campo convertidos a deflexiones con FWD

Cuadro N° 4.1 Lectura de datos tomados en campo. Primera serie (2008)

Nº	Progresiva (km)	Carril	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				TEMP. °C
			Deflexiones no corregidas por T°(microns) (1*10 ⁻³ mm)				
			0	250	500	750	
1	74+000	Izquierdo	349.8	260.9	158.0	95.7	36.8
2	74+200	Izquierdo	678.9	542.4	391.1	306.6	34.2
3	74+400	Izquierdo	506.3	430.8	306.6	260.9	37.8
4	74+600	Izquierdo	469.1	391.1	260.9	158.0	37.7
5	74+800	Izquierdo	469.1	391.1	158.0	95.7	39.8
6	75+000	Izquierdo	743.3	645.8	391.1	306.6	45.5
7	75+200	Izquierdo	577.7	542.4	391.1	306.6	40.8
8	75+400	Izquierdo	542.4	391.1	306.6	211.9	42.8
9	75+600	Izquierdo	542.4	430.8	349.8	306.6	40.9
10	75+800	Izquierdo	430.8	349.8	211.9	158.0	41.8
11	76+000	Izquierdo	577.7	506.3	306.6	211.9	40.1
12	76+200	Izquierdo	430.8	391.1	306.6	211.9	38.0
13	76+400	Izquierdo	469.1	349.8	260.9	158.0	35.8
14	76+600	Izquierdo	577.7	430.8	349.8	211.9	36.8
15	76+800	Izquierdo	469.1	391.1	260.9	211.9	37.9
16	77+000	Izquierdo	391.1	349.8	211.9	158.0	35.2
17	77+200	Izquierdo	430.8	391.1	306.6	211.9	34.5
18	77+400	Izquierdo	506.3	430.8	306.6	211.9	36.3
19	77+600	Izquierdo	391.1	306.6	211.9	95.7	32.8
20	77+800	Izquierdo	577.7	506.3	349.8	211.9	33.9
21	78+000	Izquierdo	506.3	430.8	260.9	158.0	30.9
22	78+200	Izquierdo	678.9	577.7	469.1	260.9	32.2
23	78+400	Izquierdo	391.1	306.6	211.9	158.0	31.5
24	78+600	Izquierdo	542.4	469.1	306.6	158.0	31.9
25	78+770	Izquierdo	506.3	391.1	260.9	158.0	29.0
26	79+000	Izquierdo	506.3	391.1	306.6	211.9	27.2
27	79+200	Izquierdo	430.8	349.8	211.9	95.7	30.7
28	79+400	Izquierdo	542.4	469.1	260.9	158.0	40.1
29	79+600	Izquierdo	577.7	506.3	306.6	158.0	40.7
30	79+800	Izquierdo	577.7	506.3	391.1	260.9	38.6
31	80+000	Izquierdo	612.1	506.3	349.8	211.9	33.1
32	80+200	Izquierdo	542.4	469.1	349.8	260.9	36.2
33	80+400	Izquierdo	1010.8	953.9	743.3	645.8	38.5
34	80+600	Izquierdo	953.9	895.7	774.6	678.9	39.8
35	80+800	Izquierdo	982.5	925.0	743.3	645.8	40.5
36	81+000	Izquierdo	866.0	836.0	711.4	645.8	37.9
37	81+200	Izquierdo	577.7	542.4	430.8	349.8	29.2
38	81+400	Izquierdo	836.0	774.6	645.8	577.7	38.5
39	81+600	Izquierdo	895.7	866.0	743.3	678.9	35.8
40	81+800	Izquierdo	805.5	711.4	612.1	542.4	35.9
41	82+000	Izquierdo	836.0	774.6	678.9	577.7	35.5
42	82+200	Izquierdo	866.0	743.3	577.7	469.1	34.5
43	82+400	Izquierdo	774.6	711.4	577.7	469.1	33.1
44	82+600	Izquierdo	391.1	349.8	260.9	211.9	32.5
45	82+800	Izquierdo	430.8	391.1	306.6	211.9	29.5
46	83+000	Izquierdo	678.9	645.8	542.4	469.1	32.3
47	83+200	Izquierdo	506.3	430.8	260.9	211.9	30.8
48	83+400	Izquierdo	506.3	430.8	349.8	260.9	30.2
49	83+600	Izquierdo	506.3	430.8	306.6	211.9	40.4
50	83+800	Izquierdo	391.1	349.8	211.9	95.7	43.2
51	84+000	Izquierdo	391.1	306.6	158.0	95.7	42.2

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 4.2 Lectura de datos tomados en campo. Segunda serie (2010)

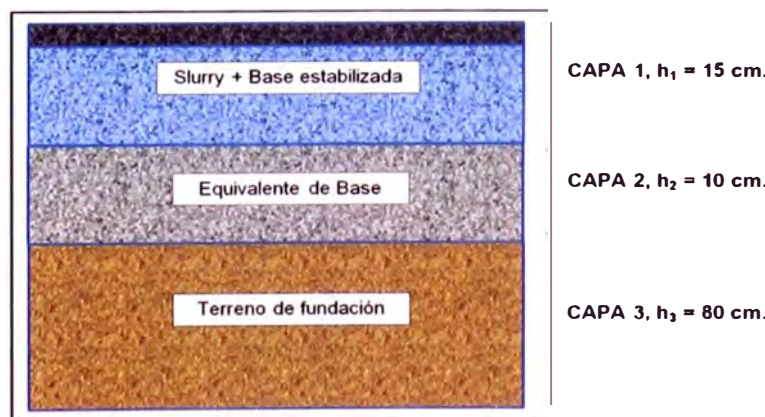
Nº	Progresiva (km)	Carril	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				TEMP. °C
			Deflexiones no corregidas por T*(microns) (1*10 ⁻³ mm)				
			0	250	500	750	
1	74+000	Izquierdo	261.4	212.2	158.3	95.8	31.9
2	74+200	Izquierdo	578.7	507.2	391.8	261.4	32.5
3	74+400	Izquierdo	431.6	391.8	307.2	261.4	33.0
4	74+600	Izquierdo	261.4	212.2	158.3	95.8	33.5
5	74+800	Izquierdo	647.0	507.2	350.5	212.2	30.0
6	75+000	Izquierdo	470.0	431.6	307.2	158.3	30.5
7	75+200	Izquierdo	350.5	307.2	212.2	95.8	30.9
8	75+400	Izquierdo	350.5	261.4	212.2	158.3	34.5
9	75+600	Izquierdo	350.5	307.2	261.4	212.2	32.5
10	75+800	Izquierdo	431.6	391.8	261.4	212.2	34.5
11	76+000	Izquierdo	431.6	350.5	261.4	212.2	35.2
12	76+200	Izquierdo	307.2	261.4	212.2	158.3	37.8
13	76+400	Izquierdo	307.2	261.4	158.3	95.8	38.2
14	76+600	Izquierdo	507.2	391.8	212.2	158.3	41.3
15	76+800	Izquierdo	391.8	307.2	212.2	95.8	40.3
16	77+000	Izquierdo	470.0	350.5	261.4	158.3	43.5
17	77+180	Izquierdo	307.2	261.4	158.3	95.8	42.2
18	77+400	Izquierdo	307.2	261.4	212.2	158.3	47.8
19	77+600	Izquierdo	391.8	307.2	212.2	95.8	42.5
20	77+800	Izquierdo	507.2	470.0	350.5	261.4	47.7
21	78+000	Izquierdo	578.7	507.2	307.2	212.2	49.0
22	78+200	Izquierdo	744.6	578.7	470.0	307.2	33.5
23	78+400	Izquierdo	613.2	431.6	261.4	158.3	44.8
24	78+600	Izquierdo	507.2	431.6	350.5	307.2	45.9
25	78+770	Izquierdo	647.0	613.2	543.4	470.0	47.9
26	79+000	Izquierdo	613.2	507.2	350.5	261.4	47.9
27	79+200	Izquierdo	647.0	543.4	391.8	307.2	44.3
28	79+400	Izquierdo	391.8	350.5	307.2	261.4	47.7
29	79+600	Izquierdo	578.7	507.2	431.6	307.2	47.9
30	79+800	Izquierdo	647.0	543.4	431.6	307.2	47.6
31	80+000	Izquierdo	984.3	897.3	712.6	543.4	43.9
32	80+200	Izquierdo	955.6	897.3	776.0	680.1	43.8
33	80+400	Izquierdo	578.7	507.2	391.8	261.4	43.1
34	80+600	Izquierdo	926.7	867.6	744.6	647.0	49.5
35	80+800	Izquierdo	578.7	507.2	391.8	307.2	42.0
36	81+000	Izquierdo	955.6	807.0	680.1	578.7	45.6
37	81+200	Izquierdo	680.1	647.0	543.4	470.0	47.9
38	81+400	Izquierdo	867.6	807.0	744.6	647.0	47.9
39	81+600	Izquierdo	543.4	470.0	350.5	261.4	47.9
40	81+800	Izquierdo	470.0	391.8	307.2	261.4	47.8
41	82+000	Izquierdo	955.6	897.3	776.0	647.0	47.8
42	82+200	Izquierdo	1068.4	1012.6	807.0	712.6	45.3
43	82+400	Izquierdo	926.7	897.3	807.0	776.0	41.5
44	82+600	Izquierdo	984.3	955.6	837.5	712.6	41.6
45	82+800	Izquierdo	807.0	776.0	613.2	543.4	41.5
46	83+000	Izquierdo	837.5	807.0	744.6	647.0	42.1
47	83+200	Izquierdo	647.0	507.2	391.8	307.2	40.8
48	83+400	Izquierdo	1150.1	1123.1	1012.6	926.7	37.2
49	83+600	Izquierdo	984.3	926.7	776.0	647.0	40.2
50	83+800	Izquierdo	470.0	391.8	261.4	158.3	40.6
51	84+000	Izquierdo	984.3	926.7	867.6	807.0	33.4

Fuente: Elaboración propia.

4.2 APLICACIÓN DE CÁLCULO INVERSO

Para realizar el cálculo inverso se consideró que todo el tramo en estudio tiene el mismo número de capas y espesores. Conceptualmente se dividió la estructura de la carretera Cañete-Chupaca en 3 capas. La primera capa está constituida por el tratamiento superficial o mortero asfáltico y la base mejorada con emulsión asfáltica en frío. Se consideró que esta primera capa tiene un espesor de 15 centímetros en promedio. La segunda y tercera capa corresponden a la sub-rasante y tienen características similares, con la tercera capa con un módulo resiliente un poco menor que la segunda capa. El espesor de la segunda capa se ha asumido de 10 centímetros, mientras que tercera capa tiene un espesor de 80 centímetros. La última capa tiene espesor infinito. Dado de que se trata de una carretera puesta en servicio hace más de 50 años, la segunda capa presenta cierto grado de compactación por uso, por lo que se le considera como una capa con mejores características estructurales que la sub-rasante. La configuración conceptual se muestra en la Figura N° 4.4.

Figura N° 4.4 Configuración de capas utilizadas para representar el pavimento



Fuente: Elaboración propia.

En el procedimiento de determinación de módulos elásticos con cálculo inverso, se requiere comenzar el proceso iterativo con un juego de módulos elásticos iniciales ingresados por el usuario. Así mismo, deberá de especificarse el rango en que deben de variar los módulos calculados para cada capa teniendo en cuenta el material del que están constituidos. Muchos programas de cómputo tienen incorporados en sus rutinas un juego de datos según el tipo de material especificado. El programa MICHBACK tiene por defecto un juego de estos

módulos y rangos para cada material. En el presente trabajo se tomaron estos valores haciendo un cambio en los valores de la primera capa, para que éstos correspondan a una capa granular estabilizada. En el siguiente Cuadro se muestran módulos iniciales y sus rangos utilizados en el presente informe.

Cuadro N° 4.3 Módulos iniciales y rangos para el Cálculo Inverso

N	Nombre de Capa	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		Inicial	Mínimo	Máximo
1	Estabilizada	158.6	15.9	27600
2	Granular	158.6	15.9	1380
3	Base	89.7	9.0	690
4	Subrasante	34.4	3.4	690

Fuente: Elaboración propia.

La presión de inflado de las llantas del camión de 8.2 toneladas fue de 80 psi, lo que da un radio de área de contacto de 107.7 milímetros. La presión sobre el pavimento se considera uniforme en toda el área de contacto.

El MICHBACK hace una corrección por temperatura utilizando la siguiente fórmula empírica.

$$CF = 10^{0.0224(T-T_r)}$$

Donde:

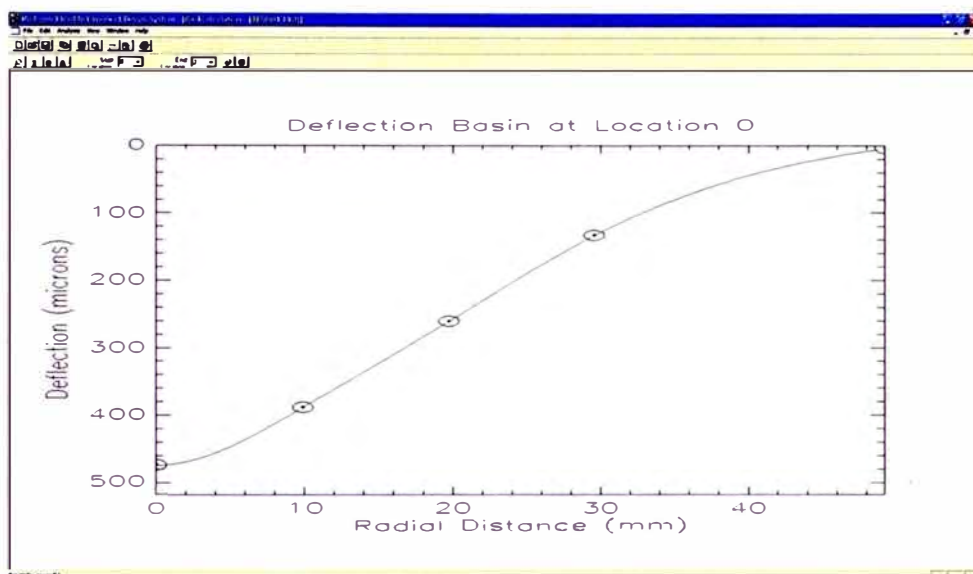
CF: Factor de corrección por temperatura.

T: Temperatura a la mitad de la capa superficial.

T_r: Temperatura de referencia (20 °C)

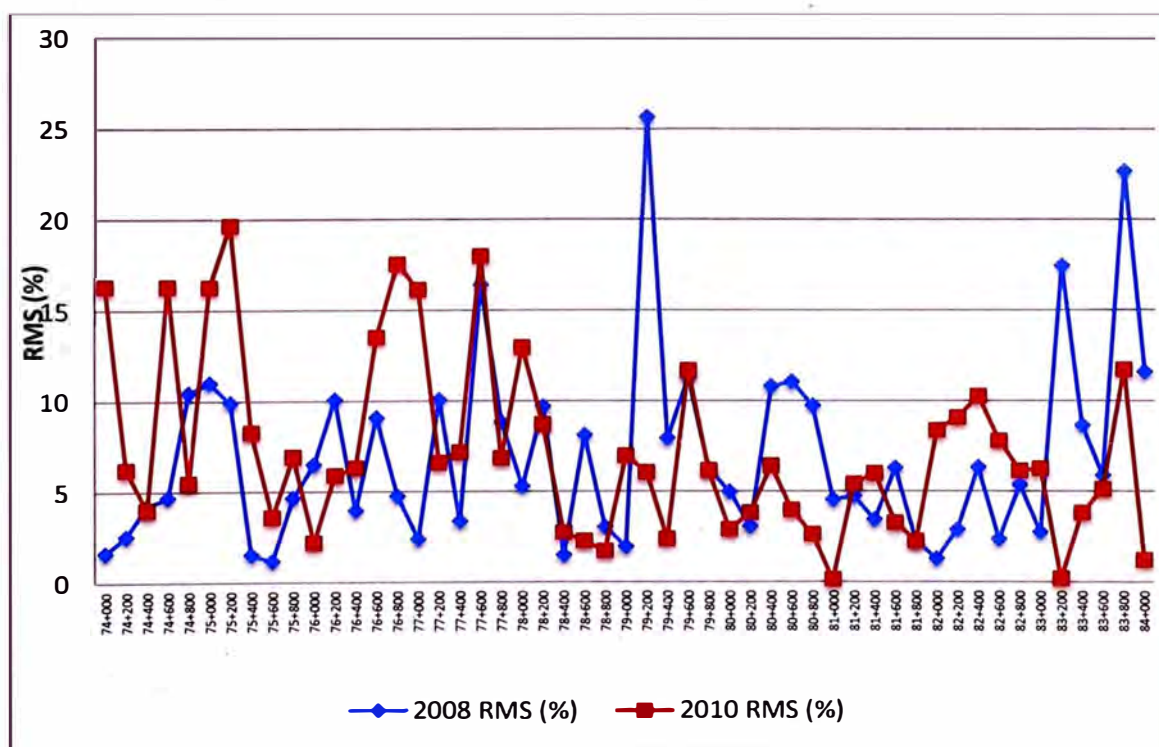
Adicionalmente, los criterios para controlar la convergencia, usados en el MICHBACK son: el cálculo de la matriz gradiente se hace en cada iteración, se permita hasta un máximo de 100 iteraciones, la tolerancia entre módulos calculados en el proceso iterativo es de 1%, y la raíz media cuadrática (RMS) de las deflexiones tolerable es de 1%.

Figura N° 4.5 Deflexiones de campo ingresadas en el programa de cómputo



Fuente: MICHBACK, User's manual.

Figura N° 4.6 RMS entre deflexiones medidas y calculadas con MICHBACK



Fuente: Elaboración propia.

El error en la determinación de los módulos de elasticidad expresado como raíz cuadrática media (RMS) es en promedio para la serie del 2008 de 7.0%, mientras que para la serie del 2010 es de 7.3%.

Los resultados de módulos elásticos encontrados con el MICHBACK han sido calculados considerando un comportamiento elástico lineal en todas las capas, esto debido a que el programa utiliza la rutina de cálculo directo CHEVRON, desarrollada para materiales lineales elásticos. Se considera que la capa conformada por el mortero asfáltico y la base estabilizada sí presenta un comportamiento de este tipo, por lo que los resultados en esta capa son correctos. Estos módulos elásticos de la primera capa serán utilizados como dato de entrada en MICHPAVE. Tales módulos se muestran en Cuadro N° 4.4.

Cuadro N° 4.4 Módulos de elasticidad de CAPA1 calculados por MICHBACK

PROGRESIVA	E (Mpa) DE CAPA 1	
	2008	2010
74+000	4000	3397
74+200	871	1218
74+400	1585	1582
74+600	1624	3397
74+800	1627	727
75+000	634	1685
75+200	1581	1917
75+400	735	2035
75+600	1017	1789
75+800	2253	1469
76+000	2393	1286
76+200	2037	2530
76+400	2176	2757
76+600	1622	1790
76+800	1685	2046
77+000	2537	1910
77+200	2037	2757
77+400	1867	2530
77+600	2537	2046
77+800	1710	1470
78+000	1420	1451
78+200	1012	719
78+400	2426	1137
78+600	1204	1161
78+770	1418	598
79+000	1966	1173
79+200	2537	803
79+400	1443	2083
79+600	1572	1034
79+800	1516	833
80+000	1235	231
80+200	2224	166
80+400	850	1218
80+600	925	1384
80+800	875	693
81+000	1000	181
81+200	1581	926
81+400	1000	211
81+600	1000	1101
81+800	1000	1582
82+000	1000	89
82+200	1200	111
82+400	1800	139
82+600	2500	141
82+800	2037	428
83+000	2000	254
83+200	2040	968
83+400	1585	98
83+600	1867	160
83+800	2537	1900
84+000	2537	211

Fuente: Elaboración propia.

4.3 APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS (MICHPAVE)

MICHPAVE es un programa de análisis no lineal de pavimentos flexibles que utiliza la técnica de elementos finitos para resolver las ecuaciones diferenciales del problema. El programa calcula desplazamientos, esfuerzos y deformaciones unitarias en el pavimento producidas por la carga circular de una rueda. Adicionalmente calcula parámetros de diseño como el número de Ejes Simples de Carga Equivalente (ESAL por sus siglas en inglés) que soportará la estructura antes de fallar por fatiga o por rotura, utilizando ecuaciones empíricas.

El modelamiento del pavimento se hace suponiendo que las capas son infinitamente extensas en dirección horizontal, de espesor constante y la última de espesor infinito. Se supone además que las capas están perfectamente compactadas, de tal modo que no producirán asentamientos debido a la aplicación de la carga. Debido a los supuestos adoptados el problema es del tipo axisimétrico.

El programa puede modelar hasta tres tipos de materiales. Un material de comportamiento lineal elástico, típico de las capas de asfalto y dos materiales de comportamiento no lineal, típicos de materiales de bases y sub-bases; granulares y cohesivos respectivamente. El modelo de materiales granulares utilizado en el MICHPAVE es el modelo $K - \theta$, mientras que el modelo de materiales cohesivos es el de respuesta bilineal. (Ver acápite 3.3).

El MICHPAVE incluye el efecto de la gravedad y esfuerzos laterales producidos por el peso de los materiales. En cada punto dentro del pavimento, el esfuerzo vertical producido por efectos de gravedad (σ_g) se calcula como la suma de espesores sobre el punto multiplicado por los correspondientes pesos específicos de cada material. Los esfuerzos laterales se calculan como:

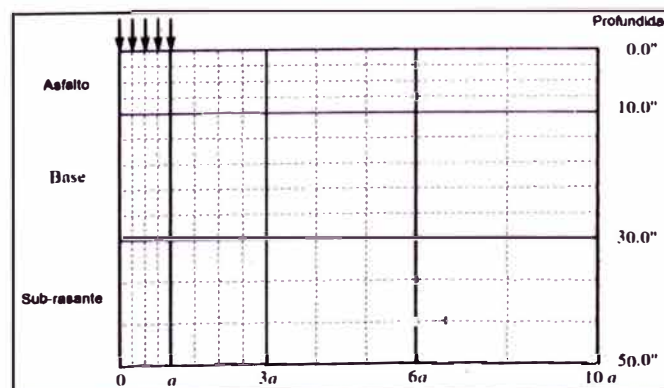
$$\sigma_h = K_0 \sigma_g$$

Donde K_0 = coeficiente de presión de tierra en reposo. Para suelos granulares $K_0 = 1 - \sin \phi$, mientras que para suelos cohesivos, $K_0 = 1 - 0.95 \sin \phi$, donde ϕ es el ángulo de fricción interna.

El programa utiliza elementos finitos rectangulares axisimétricos de cuatro nodos con funciones de interpolación lineal en todas las capas superiores y hasta un espesor especificado por el usuario para la última capa. El límite lateral se encuentra a una distancia de $10.a$ del centro de la aplicación de la carga, donde a = radio del área de la carga. El programa genera una malla automáticamente, la cual puede ser modificada por el usuario. La malla generada por defecto tiene las siguientes características:

- En la dirección radial, el ancho de 10 veces el radio es dividido en cuatro regiones. Dentro de cada región, todos los elementos tienen la misma dimensión horizontal. La primera región, en 0 y a , es dividida en cuatro elementos; la segunda región, entre a y $3.a$, se divide en cuatro elementos de igual ancho; la tercera región, entre $3.a$ y $6.a$, es igualmente dividida en tres elementos; y la cuarta región, entre $6.a$ y $10.a$, es dividida en dos elementos del mismo ancho.
- En cada capa, todos los elementos tienen la misma dimensión vertical. El número de elementos en cada capa en la dirección vertical depende del espesor de la capa. Cabe señalar que al menos cuatro elementos son usados en la capa superior y al menos dos elementos son utilizados en las demás capas. La malla por defecto típica generada por el MICHPAVE se muestra en la Figura N° 4.7.

Figura N° 4.7 Malla típica de elementos finitos generada por MICHPAVE



Fuente: Adaptado de MICHPAVE User's Manual.

Los esfuerzos, desplazamientos, y deformaciones unitarias se calculan solamente dentro de la región modelada con elementos finitos. El semi espacio infinito de la capa inferior se asume homogénea y elástica lineal. El módulo de este espacio semi infinito se calcula como el modulo promedio de los elementos finitos inmediatamente ubicados sobre la interface.

El análisis no lineal se realiza por medio de iteraciones. En cada iteración se lleva a cabo un análisis lineal, luego de lo cual, se revisa el modulo elástico de ser necesario. De ser violado el criterio de falla de Mohr-Coulomb, tanto para suelos granulares o cohesivos, los esfuerzos principales son modificados para representar la condición de falla, y los módulos resilientes a partir de los esfuerzos principales modificados. El proceso iterativo se lleva a cabo hasta que los módulos resilientes de todos los elementos se estabilicen.

Al final del análisis, MICHPAVE entrega un módulo resiliente equivalente para cada capa del pavimento. Este módulo equivalente se calcula como el promedio de los módulos de los elementos finitos.

Los resultados del análisis mecanístico elástico no lineal, junto con parámetros adicionales, son utilizados como datos de entrada en dos modelos de desempeño del pavimento incorporados en el MICHPAVE, con el fin de predecir el tiempo de fatiga y la falla por rotura. Estos modelos de desempeño están desarrollados para pavimentos de tres capas (como es el caso del modelo del pavimento estudiado en el presente informe) constituidas como capa asfáltica, granular y sub-rasante. Los modelos relacionan el tiempo de fatiga y de falla por rotura con el número de ejes equivalentes de carga de 18-kip (ESAL), deflexión superficial módulos y espesores de capas, porcentaje de vacíos en el asfalto, deformación por tensión en la parte inferior de la capa asfáltica (base estabilizada en el presente caso) viscosidad cinemática de la mezcla asfáltica y le temperatura anual promedio del aire en la zona.

En ingreso de datos en el MICHPAVE se realiza de una manera amigable por medio de ventanas. Los resultados obtenidos con el MICHBACK pueden ser importados por el MICHPAVE.

La primera ventana de ingreso de datos solicita información acerca del proyecto evaluado, se solicitan datos como nombre de carretera, ubicación, carril, descripción, etc. Esta información no es obligatoria. La siguiente ventana solicita información de la carga aplicada y presión de neumáticos, opcionalmente se puede realizar el análisis de desempeño de la estructura, para ellos deberá de ingresarse datos como temperatura promedio anual del aire, profundidad de falla permitida, porcentaje de daño por fatiga en la estructura y viscosidad cinemática de la mezcla asfáltica de la capa superior. Ver Figura N° 4.8.

Figura N° 4.8 Ingreso de datos de carga y desempeño del pavimento en MICHPAVE

Fuente: MICHPAVE User's Manual.

Los datos de entrada de capas consisten en seleccionar el tipo de material, elástico lineal o elástico no lineal, asfalto y granular o cohesivo respectivamente de cada capa, así como su configuración y espesores respectivos, y propiedades de los materiales y modelos utilizados que serán descritos más adelante. Los espesores y tipos de materiales de capas son los que se muestran en la Figura N° 4.4. La primera capa, conformada por el mortero asfáltico y la base estabilizada tiene un espesor de 15 centímetros y es del tipo lineal elástica. La segunda capa y tercera capa, de material granular con 10 y 80 centímetros de espesor respectivamente y comportamiento no lineal. La capa semi-infinita representa el terreno de fundación.

Para el tipo de material lineal elástico, es necesario ingresar el modulo elástico, el coeficiente de Poisson, densidad, y el coeficiente de presión lateral de tierra.

Ver Figura N° 4.9. En el análisis de la Carretera Cañete-Chupaca, el modulo elástico es el hallado en el cálculo inverso con el MICHBACK. El coeficiente de Poisson se tomó como 0.35, la densidad de la capa superior se asumió como 2400 kg/m³. Teniendo en cuenta que el coeficiente de presión lateral de tierra en reposo varía entre 0 para material no compactado y 3 para materiales muy compactados, se asumió como valor medio 1.5; teniendo en cuenta que se trata de una vía en uso.

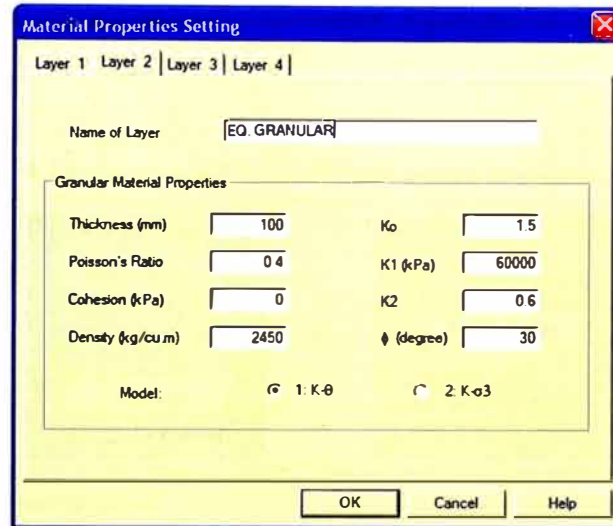
Figura N° 4.9 Ingreso de propiedades de capas elásticas en MICHPAVE

Course	Thickness (mm)	Modulus (kPa)	Density (kg/cu m)	Poisson's Ratio	Ko
Surface	150	1.42003e+006	2400	0.35	1.5
Leveling	0	2.68896e+006	4.1548e+006	0.3	1.5
Base	0	1.86158e+006	0	0.3	1.5
Combined	150	1.42003e+006	2400	0.35	1.5

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de entrada de propiedades de los materiales elásticos no lineales granulares incluyen, el coeficiente de Poisson, cohesión, densidad, coeficientes de presión lateral de tierra en reposo, parámetros materiales K_1 y K_2 del modelo $K - \theta$ y ángulo de fricción. Ver Figura N° 4.10. El valor del coeficiente de Poisson asumido para todo el tramo en estudio es de 0.4 para materiales granulares, la densidad se asumió en 2450 kg/m³. Para las constantes materiales K_1 y K_2 , se tomó como referencia el Cuadro N° 3.1 y Cuadro N° 3.2. El ángulo de fricción se tomó como 30° y se despreció la cohesión en estas capas.

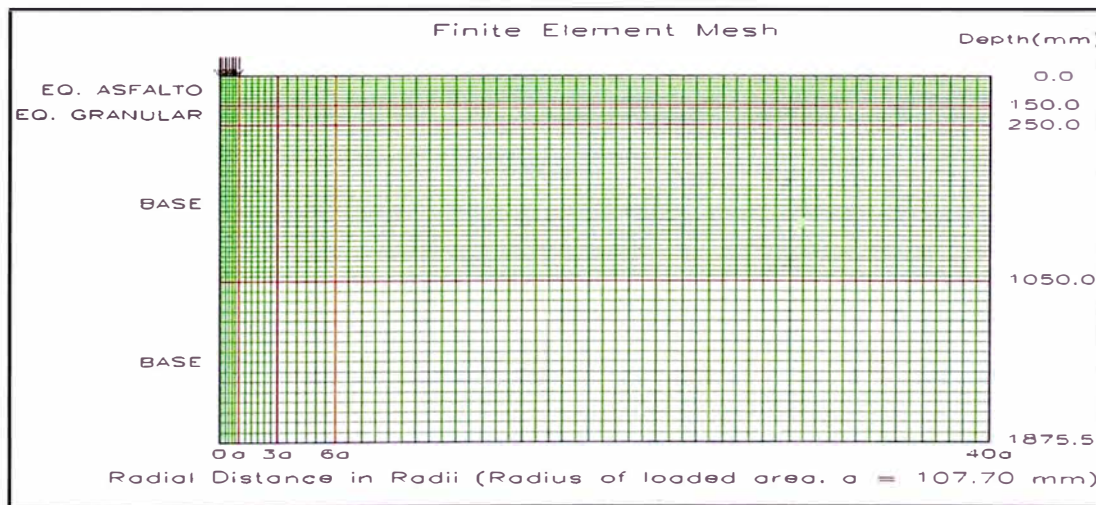
Figura N° 4.10 Ingreso de propiedades de capas granulares en MICHPAVE



Fuente: Elaboración propia.

La malla utilizada para discretizar el pavimento en el presente informe se muestra en la Figura N° 4.11.

Figura N° 4.11 Malla de elementos finitos para el análisis de la carretera Cañete-Chupaca



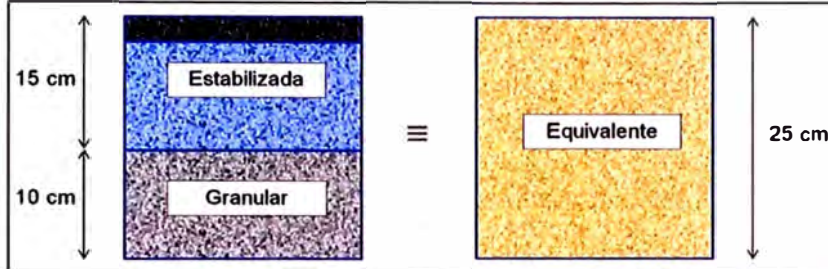
Fuente: Elaboración propia.

Resultados del Programa MICHPAVE

Con las consideraciones antes detalladas el MICHPAVE determinó módulos resilientes de las capas inferiores del esquema presentado en la Figura N° 4.4. Con el fin de representar las dos primeras capas por una equivalente, que represente lo encontrado en el campo, se utilizó la ecuación de *Palmer y Barber*

(Ver acápite 3.4.1). El esquema monocapa equivalente se muestra en la Figura N° 4.12.

Figura N° 4.12 Equivalencia entre sistema bicapa analizado y monocapa



Fuente: Elaboración propia.

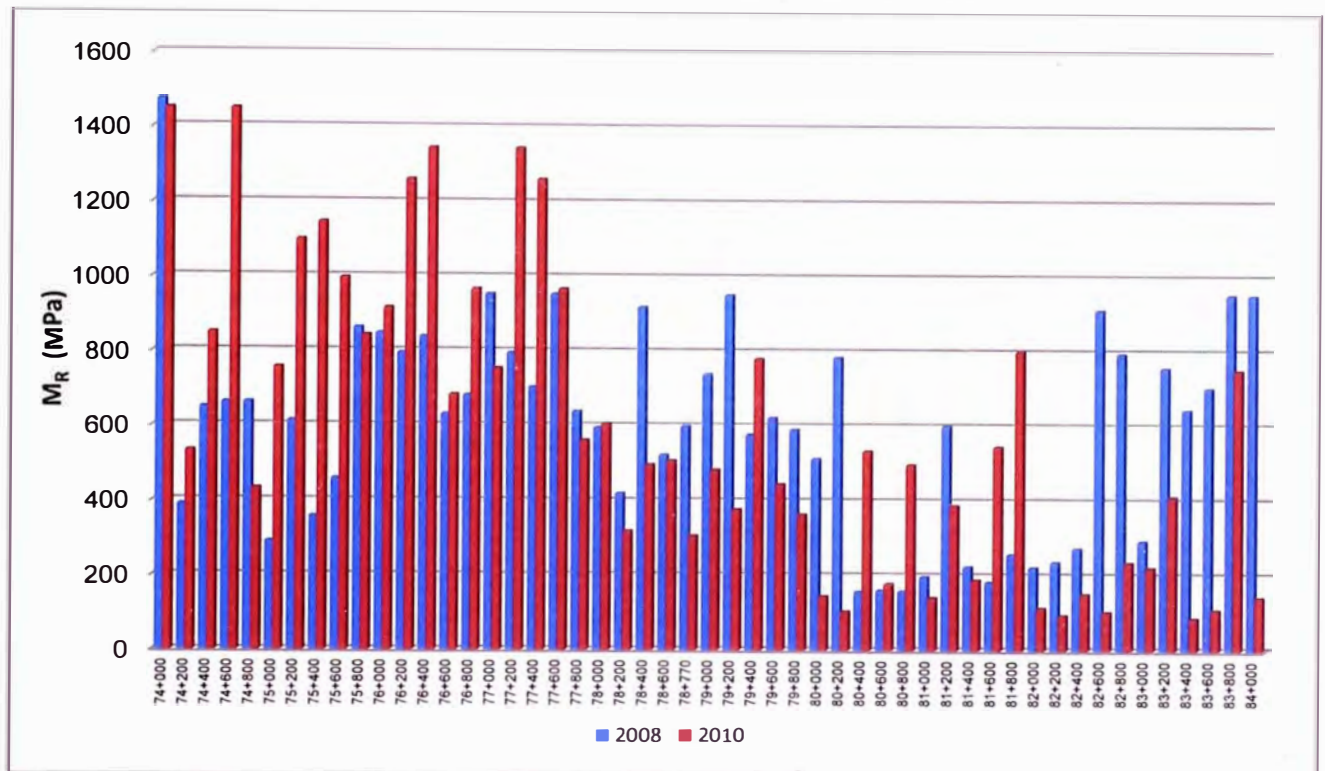
A continuación se muestran los resultados para el módulo resiliente de la estructura de un pavimento de 25 centímetros de espesor equivalente, para el tramo considerado en progresivas de cada 200 metros empezando en la progresiva 74+000 y terminando en la progresiva 84+000, para dos series en el tiempo, la primera con datos del 2008 y la segunda con información recogida en campo en el 2010.

Cuadro N° 4.5 Módulos resilientes del pavimento de la carretera Cañete – Chupaca, para los años 2008 y 2010

N°	PROGRESIVA	2008	2010
1	74+000	1473	1450
2	74+200	391	535
3	74+400	650	851
4	74+600	663	1450
5	74+800	663	432
6	75+000	290	757
7	75+200	613	1099
8	75+400	358	1147
9	75+600	458	997
10	75+800	864	844
11	76+000	848	916
12	76+200	796	1261
13	76+400	839	1346
14	76+600	631	685
15	76+800	683	968
16	77+000	953	754
17	77+200	796	1346
18	77+400	704	1261
19	77+600	953	968
20	77+800	639	563
21	78+000	595	606
22	78+200	419	319
23	78+400	919	497
24	78+600	523	508
25	78+770	599	306
26	79+000	739	484
27	79+200	952	378
28	79+400	578	781
29	79+600	623	444
30	79+800	591	364
31	80+000	513	145
32	80+200	785	103
33	80+400	157	535
34	80+600	161	179
35	80+800	158	498
36	81+000	198	141
37	81+200	601	389
38	81+400	225	189
39	81+600	183	547
40	81+800	257	802
41	82+000	223	113
42	82+200	237	93
43	82+400	273	151
44	82+600	912	102
45	82+800	796	236
46	83+000	293	222
47	83+200	758	412
48	83+400	645	86
49	83+600	704	108
50	83+800	954	751
51	84+000	953	143

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4.13 Módulo resiliente (MPa) carretera Cañete – Chupaca. Tramo: km 74+000-84+00



Fuente: Elaboración propia.

4.4 PROPUESTA DE MODELO DE CURVA DE FALLA

Se ha considerado utilizar el modelo de falla por fatiga que utiliza el MICHPAVE para determinar el número de ejes equivalentes ESAL. El modelo empírico se basa en la ecuación propuesta por G. Y. Baladi (1989):

$$\begin{aligned} \ln(ESAL) = & -3.454\ln(SD) + 0.018FT - 0.223\ln(\varepsilon_t) + 3.477\ln(H_{AC}) - 3.521\ln(KV) \\ & + 0.053\ln(E_{AC}) - 1.027\ln(E_{BS}) - 1.551\ln(E_{SG}) + 32.156 \end{aligned}$$

Donde:

- SD : Deflexión superficial bajo la rueda doble, en pulgadas.
- FT : Porcentaje de longitud de falla por fatiga permitido sobre la longitud total.
- ε_t : Esfuerzo de tensión en el fondo de la capa superficial en psi.
- H_{AC} : Espesor de la capa superficial en pulgadas.
- KV : Viscosidad cinemática en centistokes.
- E_{AC} : Módulo resiliente de la capa superior en psi.
- E_{BS} : Módulo resiliente de la segunda capa.

E_{SG} : Módulo resiliente de la tercera capa.

Para el presente análisis se ha considerado un Índice Medio Diario (IMD) equivalente de 50 camiones estándar de doble eje para todo el tramo estudiado. Adicionalmente, se ha estimado de la información recolectada, una tasa de crecimiento de 12% anual en este tipo de tráfico. Con ello, y con los resultados de ESAL proporcionados por el MICHPAVE, se ha hecho una estimación de los años de vida aproximados que le queda a la estructura antes de producirse su falla estructural por fatiga.

5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se ha encontrado que en promedio, el módulo resiliente de la estructura del pavimento de la carretera Cañete-Chupaca en el tramo comprendido entre las progresivas 74+000 al 84+000 en el año 2008, se encontraba en aproximadamente 604 MPa, con valores máximos de 1473 MPa y mínimos de 157 MPa. La desviación estándar estuvo en el orden de los 280 MPa.

Haciendo un análisis espacial de los módulos resilientes por kilómetro, se encuentra que el kilómetro 77 presenta mejor capacidad estructural, con 809 MPa, mientras que el kilómetro 81 presenta en promedio, menor capacidad con 293 MPa. Ver Cuadro N° 5.1.

Cuadro N° 5.1 Módulo resiliente por kilómetro en el año 2008

Kilómetro	M_R (MPa)
74	768
75	517
76	759
77	809
78	611
79	696
80	355
81	293
82	488
83	718

Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2010, luego de que el tramo estudiado recibió diferentes tratamientos tanto de mantenimiento como de rehabilitación, se tiene que el módulo resiliente promedio de todo el tramo disminuyó ligeramente, siendo de 594 MPa. Los valores máximos y mínimos en las progresivas analizadas fueron de 1450 MPa y 86 MPa respectivamente. La desviación estándar encontrada estuvo en el orden de 405 MPa.

En el análisis espacial se tiene que el kilómetro con mejor capacidad estructural es el 76, con un módulo resiliente promedio del orden de los 1035 MPa; por otro

lado; el kilómetro con menor capacidad es el 82, con 139 MPa en promedio. Ver Cuadro N° 5.2.

Cuadro N° 5.2 Módulo resiliente por kilómetro en el año 2010

Kilómetro	M _R (MPa)
74	944
75	969
76	1035
77	979
78	447
79	490
80	292
81	414
82	139
83	287

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en el Cuadro N° 4.5 y en la Figura N° 4.13, en promedio, la capacidad estructural de la carretera Cañete-Chupaca en el tramo 74+000 al 84+000 no se ha visto reducida entre los años 2008 y 2010. Esto probablemente se debe a las labores de mantenimiento y de rehabilitación que se han efectuado en ese periodo. Estas labores no solamente han permitido conservar la capacidad de la estructura, sino, soportar adecuadamente el crecimiento considerable del tránsito vehicular.

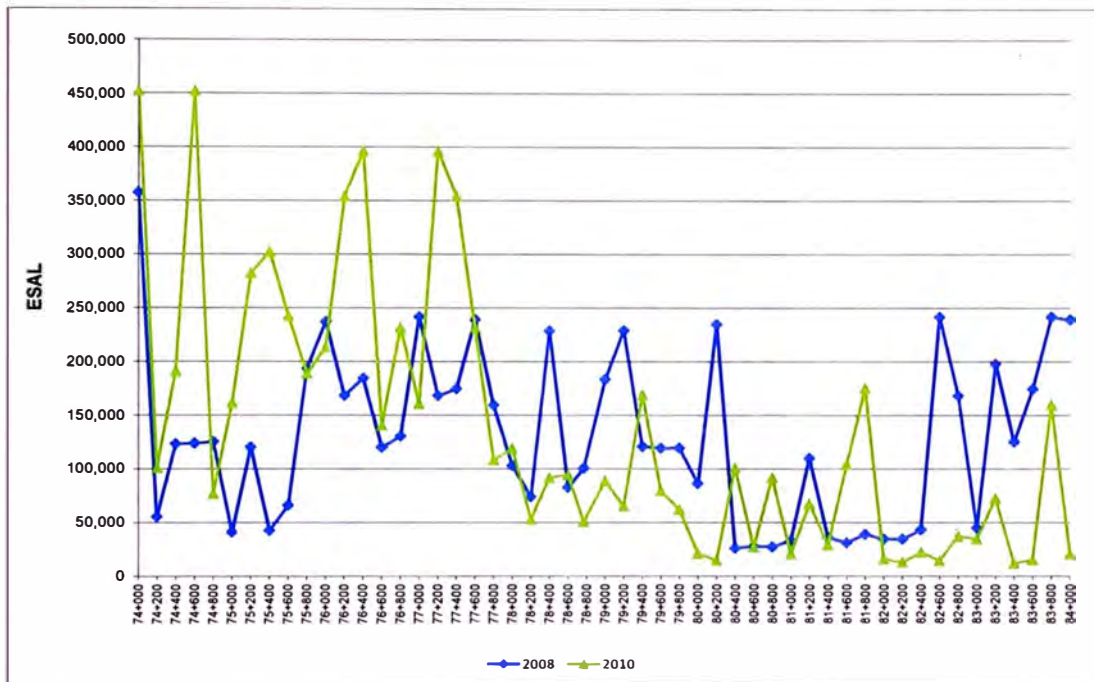
El número de ejes equivalentes (ESAL) de 18 kip para cada progresiva analizada se calculó por medio de la ecuación de G. Y. Baladi (1989) A continuación se muestran los resultados para las series del 2008 y 2010.

Cuadro N° 5.3 Numero de ejes equivalentes de 18 kip (ESAL)

PROGRESIVA	2008	2010
74+000	357300	451930
74+200	55220	100924
74+400	123200	191150
74+600	123800	451930
74+800	125400	76972
75+000	41030	161442
75+200	120000	282499
75+400	42630	302451
75+600	65890	242560
75+800	193400	188855
76+000	236900	213216
76+200	168200	354189
76+400	184200	396166
76+600	120000	140473
76+800	130300	231664
77+000	241500	160667
77+200	168200	396166
77+400	174500	354189
77+600	239000	231664
77+800	159200	108102
78+000	103000	119051
78+200	73880	52961
78+400	228500	91830
78+600	82520	94453
78+770	100600	50492
79+000	183200	88764
79+200	228900	65128
79+400	120800	168991
79+600	119200	79616
79+800	119400	62247
80+000	86180	21195
80+200	234600	14472
80+400	26000	100924
80+600	28000	26935
80+800	27130	92067
81+000	33000	20536
81+200	110000	67470
81+400	36000	28752
81+600	31000	104045
81+800	39000	175347
82+000	34500	16069
82+200	34500	12926
82+400	43200	22226
82+600	241500	14350
82+800	168200	37098
83+000	45000	34611
83+200	197700	72527
83+400	125200	11834
83+600	174500	15279
83+800	241500	159902
84+000	239000	20865

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5.1 Número de Ejes Equivalentes (18 kip ESAL) Series 2008 y 2010



Fuente: Elaboración propia.

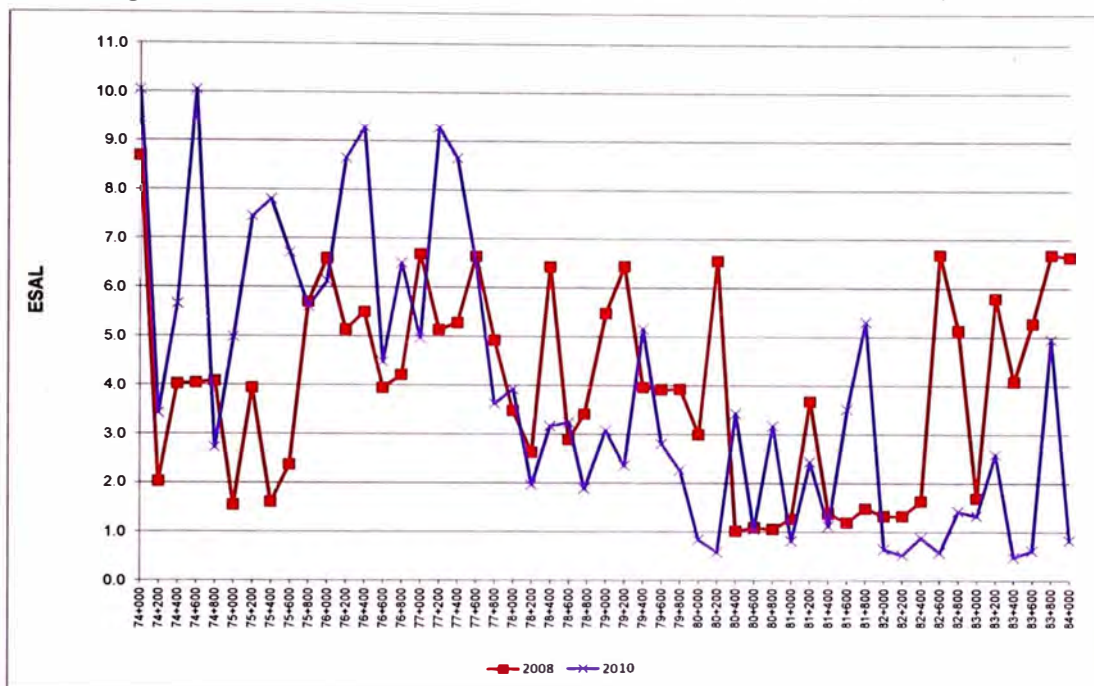
Con los ESAL calculados y considerando un IMDA de 50 vehículos por día del camión equivalente y una tasa de crecimiento del tránsito de 12% anual, se determinó la vida útil que le queda al pavimento en cada progresiva analizada antes de producirse su falla por fatiga. Los resultados para años de vida útil remanente para las series 2008 y 2010 se presentan en el Cuadro N° 5.4 y

Cuadro N° 5.4 Número de años de vida útil remanente. Series 2008 y 2010

PROGRESIVA	2008	2010
74+000	8.7	10.0
74+200	2.0	3.4
74+400	4.0	5.7
74+600	4.0	10.0
74+800	4.1	2.7
75+000	1.6	5.0
75+200	3.9	7.5
75+400	1.6	7.8
75+600	2.4	6.7
75+800	5.7	5.6
76+000	6.6	6.1
76+200	5.1	8.6
76+400	5.5	9.3
76+600	3.9	4.5
76+800	4.2	6.5
77+000	6.7	5.0
77+200	5.1	9.3
77+400	5.3	8.6
77+600	6.6	6.5
77+800	4.9	3.6
78+000	3.5	3.9
78+200	2.6	2.0
78+400	6.4	3.2
78+600	2.9	3.2
78+770	3.4	1.9
79+000	5.5	3.1
79+200	6.4	2.4
79+400	4.0	5.2
79+600	3.9	2.8
79+800	3.9	2.3
80+000	3.0	0.8
80+200	6.6	0.6
80+400	1.0	3.4
80+600	1.1	1.1
80+800	1.1	3.2
81+000	1.3	0.8
81+200	3.7	2.4
81+400	1.4	1.1
81+600	1.2	3.5
81+800	1.5	5.3
82+000	1.3	0.6
82+200	1.3	0.5
82+400	1.6	0.9
82+600	6.7	0.6
82+800	5.1	1.4
83+000	1.7	1.3
83+200	5.8	2.6
83+400	4.1	0.5
83+600	5.3	0.6
83+800	6.7	4.9
84+000	6.6	0.8
PROMEDIO	4.0	3.9

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5.2 Número de años de vida útil remanente para series 2008 y 2010



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que actualmente la vida útil remanente promedio de todo el tramo estudiado es de aproximadamente 3.9 años para las condiciones de trafico antes descritas.

La vida útil remanente por kilómetro en las condiciones actuales se muestra en el Cuadro N° 5.5.

Cuadro N° 5.5 Vida útil para condiciones actuales del pavimento por kilómetro

Vida útil	
Kilómetro	Años
74	6.4
75	6.5
76	7.0
77	6.6
78	2.8
79	3.1
80	1.8
81	2.6
82	0.8
83	1.8

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los tramos que requerirían labores de mejoramiento y rehabilitación con mayor urgencia son los kilómetros 80, 82 y 83; mientras que los kilómetros 74, 75, 76 y, 77 no necesitarían tales tareas de manera urgente.

CONCLUSIONES

- Los ensayos no destructivos son útiles para estudiar el comportamiento estructural de una carretera de bajo volumen de tránsito, como la carretera Cañete-Chupaca, utilizando un procedimiento de cálculo inverso para conocer las propiedades de los materiales de la estructura.
- La medición de deflexiones en la carretera analizada debe realizarse con el mismo tipo de equipo en toda su longitud. La transformación de mediciones entre equipos de diferente tipo se basa en relaciones empíricas que pueden conducir a errores en las deflexiones.
- En el tramo estudiado de la carretera Cañete-Chupaca, la capa de material estabilizado tiene un comportamiento cercano al del tipo elástico lineal.
- El cálculo inverso se realizó con un modelo de análisis elástico lineal en todas las capas, esto no permite obtener directamente los valores correctos de los módulos resilientes de los materiales granulares de las capas inferiores.
- El error en la determinación de los módulos de elasticidad expresado como raíz cuadrática media (RMS) es en promedio para la serie del 2008 de 7.0%, mientras que para la serie del 2010 es de 7.3%.
- Conociendo el módulo de elasticidad de la capa estabilizada, y mediante el uso de un modelo de análisis elástico no lineal, puede predecirse satisfactoriamente el comportamiento de toda la estructura mediante la compatibilización de deflexiones medidas y calculadas con este modelo.
- El módulo resiliente de la carretera Cañete-Chupaca en el tramo estudiado es en promedio 604 MPa para la serie de datos del 2008 y de 594 MPa para la serie del 2010.
- Para un IMDA de 50 vehículos de carga estándar con un crecimiento de tránsito de 12% anual, se ha estimado una vida útil del pavimento de 3.9 años.

- La escasa variación en la capacidad estructural del pavimento estudiado se debe probablemente a que el tramo ha recibido tratamiento de conservación superficial y algunas mejoras en la estructura en diversos sectores.
- No puede proponerse una Curva de Deterioro en base a la capacidad estructural del pavimento en una carretera que ha recibido tratamiento de mantenimiento y rehabilitación, debido a que se modifican las propiedades de la estructura analizada.

RECOMENDACIONES

- Utilizar ensayos no destructivos como la Viga Benkelman, para la evaluación estructural del pavimento en carreteras existentes, porque no alteran la integridad y funcionalidad de la vía.
- Tomar mediciones de deflexiones a menores espaciamientos de los que se han venido efectuando, a fin de obtener resultados más acordes con la realidad.
- En cada sección de medición de deflexiones se debe de obtener un mínimo de cinco (05) deflexiones a fin de representar adecuadamente el bulbo de deflexiones.
- Tener un ensayo de medición de deflexiones estándar para toda la carretera, esto evita la transformación de mediciones entre tipos de ensayos, lo cual agrega error a las deflexiones.
- Realizar la metodología del cálculo inverso con un algoritmo que considere materiales de comportamiento elástico no lineal.
- Utilizar el método de elementos finitos para la solución de las ecuaciones de comportamientos elásticos lineales y no lineales de los materiales del pavimento.
- Modelar la estructura del pavimento, discretizandola en elementos finitos más pequeños cerca de la aplicación de la carga.

BIBLIOGRAFÍA

- BALADI, GILBERT Y., *"Fatigue Life and Permanent Deformation Characteristics of asphalt concrete mixes"*, Transportation Research Board, Washington DC, USA, 1989.
- DEHLEN GEORGE L., *"The effect of non-linear material response on the behavior of pavements subjected to traffic loads"*. Institute of Transportation and Traffic Engineering. University of California Berkeley, 1969.
- HARICHANDRAN RONALD S., BADALI GILBERT Y., MICHPAVE *User's Manual, Version 1.2 for DOS*. Department of Civil and Environmental Engineering. Michigan State University, Enero 2000
- HARICHANDRAN RONALD S., MAHMOOD TARIQ, BALADI GILBERT Y., *"Backcalculation of Pavement Layer Moduli, Thickness and Stiff Layer Depth Using a Modified Newton Method"* In *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, Second Volume, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1994.
- HARICHANDRAN RONALD S., RAMON CYNTHIA M., BADALI GILBERT Y., MICHBACK *User's Manual, Version 1.0 for DOS*. Department of Civil and Environmental Engineering. Michigan State University, Marzo 2000.
- HAZZARD JAMES F, YACOB TRAMER E. *"Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study"*, University of Toronto, Canada, 2007.
- HOFFMAN MARIO S. - Louis Berger Internacional Inc., PABLO M. DEL ÁGUILA, B.Sc. Lagesa Ingenieros Consultores. *"Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en La Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos)"* Octubre, 1985.
- HOFFMAN MARIO S, *"Application of Elasticity Models for the evaluation of flexible Pavements"*, Research Report N° 015-664, Transportation Research Institute, Technion, Israel, 1977.
- HUANG, Yang H. *"Pavement Analysis and Design"*, Prentice Hall. United States of America, 1993.
- GUTIÉRREZ LÁZARES, JOSÉ WILFREDO, *"Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú"*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 2007.

- MINKWAN KIM, *“Three Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior”*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, 2007.
- REYES LIZCANO FREDY, *“Diseño Racional de Pavimentos”*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá – Colombia, 2003.
- SAMANIEGO QUICHICA JOSÉ LUIS, *“Evaluación Estructural de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca con Viga Benkelman. Modelo Matemático Tramo Km 74+000 – Km 79+000”*, Informe de Suficiencia para optar el título de Ingeniero Civil; Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, 2009.
- TENORIO MANAYAY ARMANDO, *“Modelos de Predicción de Deterioro de Pavimentos”*. Tesis Profesional para optar el título de Ingeniero Civil; Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, 2005.
- TIMOSHENKO S., WOINOWOSKY-KRIEGER S. *“Teoría de Placas y Láminas”*, URMO SA, España, 1975.
- TUTUMLER EROL, *“Nondestructive Pavement Evaluation Using Finite Element Analysis Based Soft Computing Models”*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana Champaign. 2009.

ANEXOS

ANEXO 01

CUADRO DE ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EN ESTUDIO.

ANEXO 02

CURVAS DE DEFORMACIONES OBTENIDAS DEL PROGRAMA MICHPAVE

ANEXO 01

CUADRO DE ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EN ESTUDIO.

SECTOR		CBR (%)	ESPESOR AFIRMADO	
			Pulgadas	Centímetros
Sector I: Zúñiga - Dv.	57+450 - 130+000	20	5,5	13,7
Yauyos - Alis	130+000 - 163+100	18	6,4	16,0
Sector II: Alis - San	163+100 - 220+000	18	6,4	16,0
José de Quero	220+000 - 229+300	5	14,0	35,0
Sector III: San José	229+300 - 240+000	5	12,5	31,3
de Quero - Ronchas	240+000 - 248+000	15	6,8	17,0
	248+000 - 255+185	4	19,0	47,5

ANEXO 02

CURVAS DE DEFORMACIONES OBTENIDAS DEL PROGRAMA MICHPAVE

