

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA
CAÑETE - YAUYOS – CHUPACA CON VIGA BENKELMAN
MÉTODO MATEMÁTICO TRAMO Km 74+000 - Km 79+000**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

JOSÉ LUÍS SAMANIEGO QUICHICA

Lima – Perú

AÑO 2009

ÍNDICE	
ÍNDICE.....	2
RESUMEN.....	4
LISTA DE CUADROS.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I.- GENERALIDADES.....	12
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Tramo Evaluado Km 74+000 – Km 79+000.....	16
CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1. SISTEMA DE ANÁLISIS.....	18
2.1.1 Sistemas elásticos de capas.....	18
2.1.2 Sistemas no lineales de capas.....	18
2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos.....	19
2.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	19
2.2.1 Viga Benkelman.....	19
2.2.2 Dynaflec.....	20
2.2.3 Road Rater.....	20
2.2.4 Deflectómetro dinámico de balanceo (RDD).....	21
2.2.5 Deflectómetro de Impacto – Falling Weight Deflectometer (FWD).....	21
2.2.6 Deflectómetro de impacto (KUAB – FWD).....	22
CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO.....	23
3.1. VIGA BENKELMAN.....	23
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	28
3.2.1 Definiciones previas.....	29
3.2.2 Modelo Básico.....	30
3.2.3 Modelo de Maxwell.....	30
3.2.4 Modelo de Kelvin.....	30
3.2.5 Modelo de Burgers.....	31
3.2.6 Modelo Generalizado.....	31

3.3. MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	
3.3.1 Modelo de Boussinesq.....	31
3.3.2 Modelo de Hogg.....	32
3.3.3 Modelo de Westergaard.....	34
3.3.4 Modelos bicapas.....	34
3.3.5 Modelos multicapas.....	34
3.4. MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS	35
3.4.1 Fórmula de Boussinesq.....	35
3.4.2 Fórmula de Westergaard.....	36
3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber.....	36
3.4.4 Fórmula de Odemark.....	37
3.4.5 Método de Elementos Finitos.....	38
CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO KM 74+000 – KM 79+000	42
4.1. Aplicación de la Viga Benkelman.....	42
4.2. Aplicación con el Método de Elementos Finitos empleando Elementos Bidimensionales.....	47
CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	53
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	64

RESUMEN

En el presente Informe se evalúan las condiciones estructurales del pavimento, mediante la medición de deflexiones con el deflectógrafo conocido como “Viga Benkelman”, y la aplicación de un método matemático para estimar esfuerzos y deformaciones del mismo.

La alternativa presentada en este estudio es "no destructiva" y se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento, Las que reflejan una respuesta global del sistema pavimento-subrasante bajo una carga dada. La metodología no destructiva se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y la subrasante.

Para interpretar esta información en forma cuantitativa, se compara las deflexiones reales del pavimento con las deflexiones obtenidas con un modelo matemático que emplea elementos de los elementos finitos.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.1	
Tramos y longitudes de la carretera en estudio.....	15
Cuadro N° 1.2	
Descripcion del tramo en estudio	16
Cuadro N° 4.1	
Lectura de datos tomadas en campo	44
Cuadro N° 4.2	
Cuadro de valores empíricos del modelo de Hogg.....	45
Cuadro N° 4.3	
Cuadro de valores empíricos en psi.....	46
Cuadro N° 4.4	
Valores K1 y K2 experimentales	49
Cuadro N° 5.1	
Cuadro de resultados con programa MICHPAVE	53
Cuadro N° 5.2	
Cuadro comparativo de módulos	53
Cuadro N° 5.3	
Cuadro de CBR y módulos de resiliencia.....	57
Cuadro N° 5.4	
Cuadro de valores de CBR	58
Cuadro N° 5.5	
Cuadro de intervalos de valores de CBR	58
Cuadro N° 5.6	
Cuadro de número de repeticiones de carga	60

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	
Plano corredor vial N° 13	14
Figura N° 1.2	
Ubicación del tramo en estudio	16
Figura N° 2.1	
Instrumento de medición viga benkelman.....	19
Figura N° 2.2	
Equipo Dynaflec.....	20
Figura N° 2.3	
Equipo Roat Rater.	20
Figura N° 2.4	
Deflectómetro dinámico de balanceo (RDD).....	21
Figura N° 2.5	
Deflectómetro de Impacto – Falling Weight Deflectometer (FWD)	21
Figura N° 2.6	
Deflectómetro de impacto (KUAB – FWD)	22
Figura N° 3.1	
Esquema y principio de operación de la viga benkelman.....	24
Figura N° 3.2	
Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con viga benkelman.....	25
Figura N° 3.3	
Esquematzación del Proceso de Medición con la Viga Benkelman	27
Figura N° 3.4	
Modelos mecánicos para materiales viscoelásticos	29

Figura N° 3.5	
Modelo de Boussinesq.....	31
Figura N° 3.6	
Modelo de Hogg	33
Figura N° 3.7	
Modelo de Westergaard.....	34
Figura N° 3.8	
Modelo Multicapas.....	35
Figura N° 3.9	
Representación de un masivo semi-infinito.....	35
Figura N° 3.10	
Multicapa propuesto con la fórmula de Palmer y Baber generalizada.....	37
Figura N° 3.11	
Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark.....	38
Figura N° 3.12	
Modelo de elementos finitos	39
Figura N° 3.13	
Elementos Unidimensionales con Nodos Rígidos.....	39
Figura N° 3.14	
Estructura Discretizada con elementos (2-D).	40
Figura N° 3.15	
Elementos Bidimensionales (2-D).....	40
Figura N° 3.16	
Modelo de elementos finitos usando elementos (3-D).....	41
Figura N° 3.17	
Tipos de elementos (3-D).....	41

Figura N° 4.1	
Representación geométrica de medición.....	42
Figura N° 4.2	
Proceso de medición y toma de datos de campo.....	44
Figura N° 4.3	
Diagrama de deflexiones de campo.....	47
Figura N° 4.4	
Modelo de pavimento de base finita y subrasante infinita	47
Figura N° 4.5	
Módulo resiliente y esfuerzo invariante.	48
Figura N° 4.6	
Descritización del elemento a estudiar.....	50
Figura N° 4.7	
Esquematación del elemento para el programa	51
Figura N° 5.1	
Deformaciones con datos de campo y programa MICHPAVE.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AYESA	Asociación Aguas y estructuras
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
D_v	Desviación
FWD	Falling Weight Deflectometer
MEF	Método de Elementos Finitos
LVDT	Transformador Diferencial Variable Lineal
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
MCCP	Mezclas de Concreto con Cemento Portland
M_r	Módulo Resiliente
MDS	Máxima Densidad Seca
NTP	Norma Técnica Peruana
OCH	Óptimo Contenido de Humedad
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
PROMCEPRI	Promoción de Concesiones Privadas
RDD	El Deflectómetro dinámico del balanceo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SN	Número Estructural
TSB	Tratamiento Superficial Bicapa
WASHO	Western Association of State Highway Organizations
A	Radio de la huella de la llanta.
D₀	Deflexión máxima.
D_R	Deflexión a una distancia R
D_t	Deflexión teórica
D_c	Deflexión de Campo
E	Módulo de Young
E_s	Módulo de elasticidad del masivo semi-infinito
E*	Módulo de elasticidad del Pavimento

E_0	Módulo de elasticidad de la Subrasante
E_1	Módulo de elasticidad de Kelvin
E_i	Módulo de elasticidad de Kelvin
H	Espesor del estrato masivo
h	Espesor del pavimento
h_2	Espesor de capa subrasante
h_1	Espesor de Pavimento
J_i	Función de Bessel de primera especie y orden i
K	Distancia donde se aplica la carga hacia el punto donde se mide el esfuerzo
$K1$	Coeficiente no lineal del material granular
$K2$	Exponente no lineal del material granular
k	Módulo de reacción
L_0	Longitud Característica
I	Rigidez del Pavimento
m	Número de cargas axiales
μ	Relación de Poisson
t	Tiempo
P	Carga
q_0	Presión de Inflado
R	Distancia a la que se mide la deflexión D_R
T_1	Tiempo de retardo para el modelo de Kelvin
W_{18}	Número estimado de ejes simples equivalentes a 8.2t
σ	Esfuerzo
σ_0	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell
σ_i	Esfuerzo del modelo de Kelvin
ϵ	Deformación unitaria
δ	Desplazamiento vertical
λ	Viscosidad
λ_0	Viscosidad del modelo de Maxwell
λ_1	Viscosidad del modelo de Kelvin
θ	Primer esfuerzo Invariante
∇	Operador nabra
$\Delta(0,r)$	Desplazamiento a una distancia R y nivel $z=0$

INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene aportes técnicos, impartidos en temas desarrollados en el curso de Actualización de Conocimientos del Programa de Vialidad, aplicados para la Evaluación Estructural de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, sector km. 74+000 - km. 79+000.

El primer capítulo comprende los antecedentes de la carretera, año y gobierno en la cual fue trazada y ejecutada desde Cañete (km 1+805) – Yauyos – Chupaca (km.273+531), describiendo hasta la actualidad su mantenimiento y conservación. También describe su ubicación, topografía, geología y clima del tramo evaluado.

En el segundo capítulo se describe el estado del arte de los sistemas de análisis a desarrollar, definiciones de elasticidad, no linealidad y linealidad visco elástico; Ensayos no destructivos como la Viga Benkelman, Dynaflec, Road Rater, Rdd, Fwd, así como su uso, aplicación y evolución para evaluar el pavimento.

En el tercer capítulo se enfoca el marco teórico de la Viga Benkelman, procedimiento de campo, definiciones previas, modelos y fórmulas para caracterizar el material del pavimento.

El cuarto capítulo trata de la aplicación de la Viga Benkelman, aplicación de método de elementos finitos, empleando, modelos y fórmulas definidas en el capítulo anterior.

Finalmente, en el quinto capítulo, se interpreta de resultados obtenidos en el capítulo anterior, para dar conclusiones y recomendaciones en la evaluación estructural de pavimentos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

La carretera de penetración y enlace entre Cañete – Yauyos – Chupaca, ubicada en los departamentos de Lima y Junín con una altitud comprendida entre 71 y 3270 msnm, fue proyectada y ejecutada por etapas durante el Gobierno del Sr. Augusto B. Leguía entre los años 1920 a 1930, mediante la ley de la Conscripción Vial Territorial del Perú.

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

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

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

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

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

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

En el año 2003, el Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) encargó al consultor Ing. Floriano Palacios León, (Contrato de Estudios N° 0412-2003-MTC/20 del 28.11.2003) la elaboración del Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Carretera Corredor Vial N° 13, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca de 245.15 Km. de longitud.

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

Posteriormente el 2007 por Resolución Ministerial N° 408 -2007-MTC/02 se creó el Programa “Proyecto Perú” bajo responsabilidad de PROVIAS NACIONAL. Proyecto Perú es un programa de Infraestructura vial diseñado para mejorar las vías de integración de corredores económicos, conformado por ejes de desarrollo sostenido con el fin de mejorar el nivel de competitividad de las zonas rurales, en la red Vial Nacional, Departamental y Vecinal. Dicho programa se caracteriza por contratos que se controlan por niveles de servicio y plazos mayores o iguales a los 3 años.

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

Con fecha 17 de Diciembre 2007 se firma el contrato con el CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS, por un monto que asciende en S/. 131'589,139.71, por la conservación vial de 271.73 Km. En los Términos de Referencia señalan que se debe dar una Solución Básica a aplicar sobre la superficie actual de la vía, previamente conformada, no se deben realizar cambios en la geometría ni trazo de la vía existente.

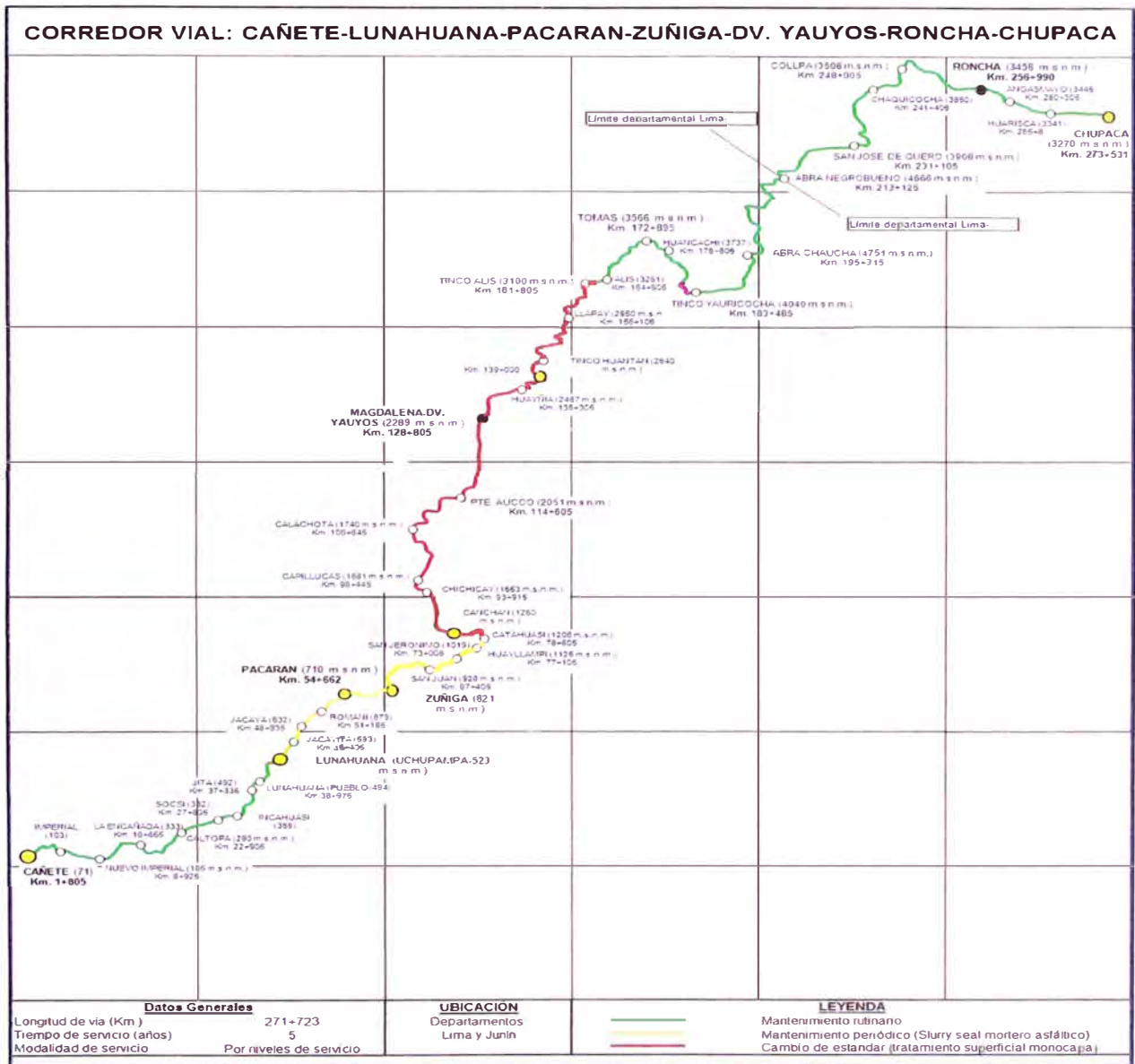


Figura N°1.1: Corredor Vial N° 13 (Carretera Cañete – Yauyos - Chupaca)

(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

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

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

Diseño y elaboración del programa de Conservación Vial.

- Elaboración del Plan de Manejo Socio Ambiental.
- Elaboración del informe técnico de la situación inicial de las rutas materia

del contrato de Conservación Vial por Niveles de Servicio.

- Elaboración del Plan de Calidad para la ejecución de los servicios.

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

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

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

CUADRO N° 1.1 Tramos y longitudes de la carretera en estudio

Tramo	Longitud (km)	Tipo de superficie de rodadura (antes)	Tipo de superficie de rodadura (actual)
Cañete - Lunahuaná	40.950	Carpeta Asfáltica	Carpeta Asfáltica
Lunahuaná - Pacarán	11.907	Tratamiento Superficial	Tratamiento Superficial
Pacarán - Zúñiga	3.743	Afirmado	Slurry Seal
Zúñiga - Dv. Yauyos	70.400	Afirmado	Monocapa
Dv. Yauyos - Roncha	128.185	Afirmado	Monocapa (33 Km.) - Afirmado (91.185 Km.)
Roncha - Chupaca	16.541	Afirmado	Afirmado

(Fuente: Elaboración propia)

1.2. Tramo Evaluado Km. 74+000 – Km. 79+000

Ubicación

El tramo evaluado abarca del km 74+000 - km 79+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 79+000 pasando el poblado de Catahuasi a 1206 msnm.

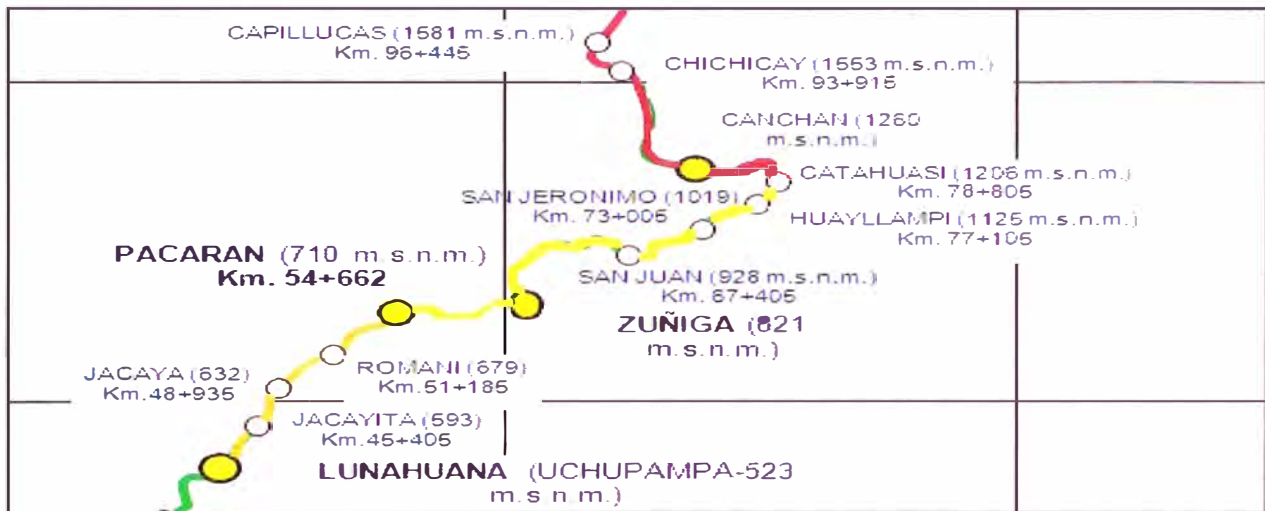


Figura N°1.2 Ubicación del Tramo en estudio

(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 aluvional, 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 subrasante.

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.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas de Análisis

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

2.1.1 Sistemas elásticos de capas

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

2.1.2 Sistemas no lineales de capas

Es bien conocido que los materiales granulares y la subrasante de los suelos son no lineales y tienen módulo de elasticidad que varía con los niveles de presión. El módulo que representa al módulo de elasticidad es el de resiliencia obtenido a partir de un ensayo triaxial. Se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad (2.1.2)$$

Donde: K_1 y K_2 son constantes experimentales y θ es el primer esfuerzo invariante. El cual puede ser la sumatoria de los esfuerzos normales σ_x , σ_y y σ_z ó la suma de las tres principales esfuerzos, σ_1 , σ_2 y σ_3 .

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

2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos

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

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

2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Son aquellos ensayos que se realizan sin la necesidad de realizar excavaciones en la vía (calicatas), 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 (2) brazos, uno que va en contacto con el terreno y el otro que sirve de pivote donde se realizan las mediciones producidas por la carga estática normalizada (8200 kg). Este equipo se verá con más detalle en el capítulo 3.1.



Figura 2.1 Viga Benkelman

(Fuente: Internet, <http://strongfamilytree.org>, Nov 2009)

2.2.2 Dynaflec

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



Figura 2.2 Equipo Dynaflec

(Fuente: www.equiposdeflectómetros.com)

2.2.3 Road Rater

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

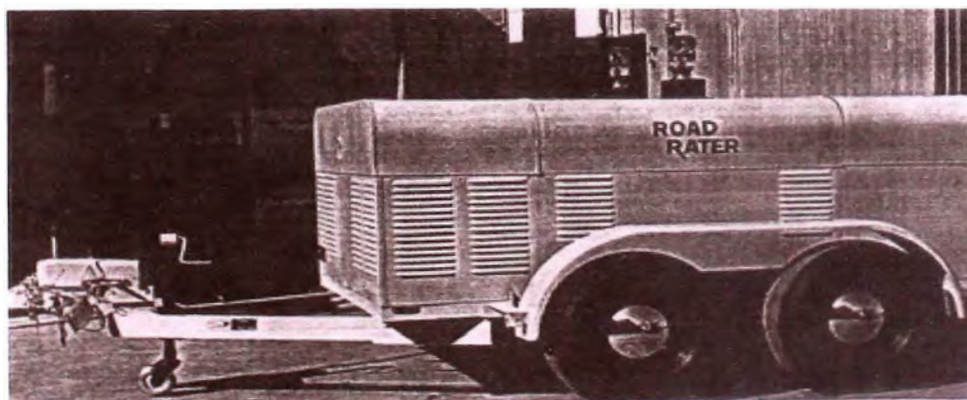


Figura 2.3 Equipo Road Rater

(Fuente: www.equiposdeflectómetros.com)

2.2.4 Deflectómetro dinámico de balanceo (RDD)

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



Figura 2.4 Equipo Deflectómetro Dinámico de Balanceo.

(Fuente: www.equiposdeflectómetros.com)

2.2.5 Deflectómetro de Impacto – Falling Weight Deflectometer (FWD)

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

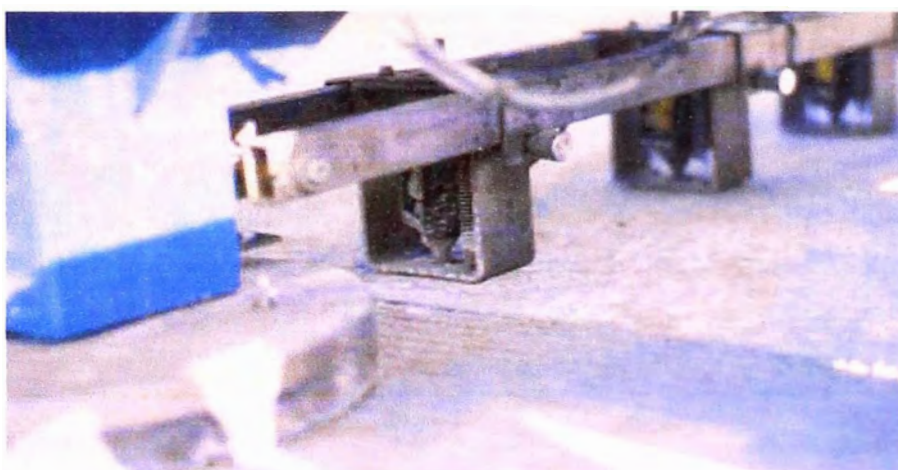


Figura 2.5 Equipo FWD

(Fuente: www.equiposdeflectómetros.com)

2.2.6 Deflectómetro de impacto (KUAB – FWD)

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



Figura 2.6 Equipo KUAB FWD

(Fuente: www.equiposdeflectómetros.com)

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

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

3.1 VIGA BENKELMAN

El deflectógrafo Benkelman funciona mediante el principio de palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura 3.1 A su vez la viga consta principalmente de dos partes. Un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

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

EQUIPO REQUERIDO

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

- a) Deflectógrafo Viga Benkelman, con relación de brazos 1:4
- b) Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm
- c) Camión cargado, cuyo eje tenga un peso de 18000 libras 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 10 toneladas.
- f) Accesorios de medición como: Cinta métrica de 3 m, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales

de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre de amarre.

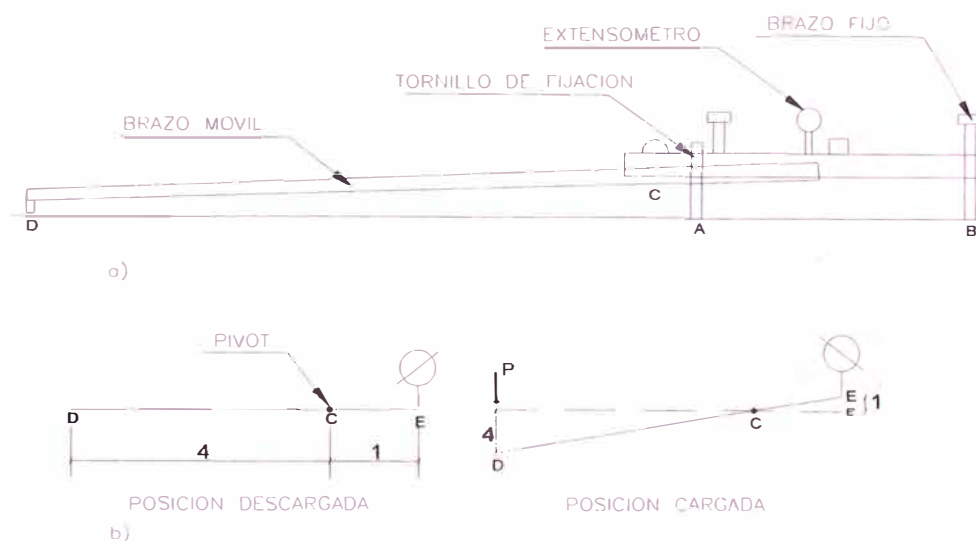
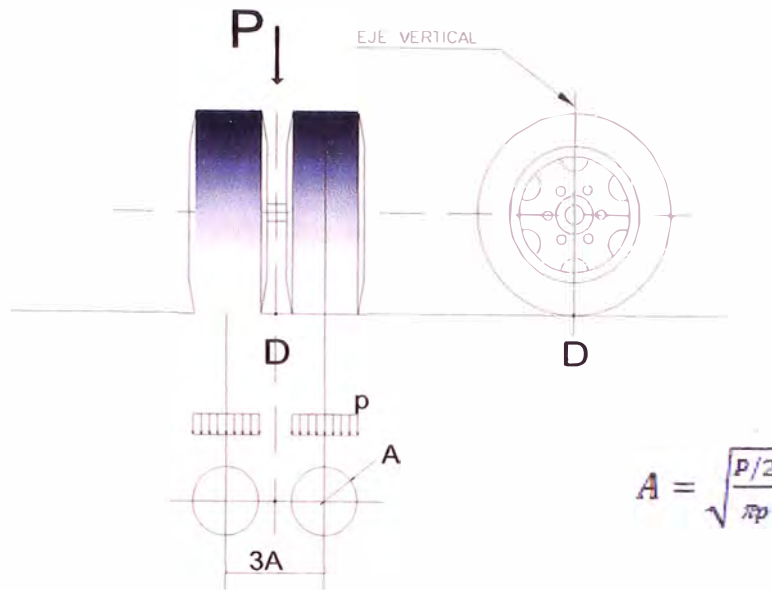


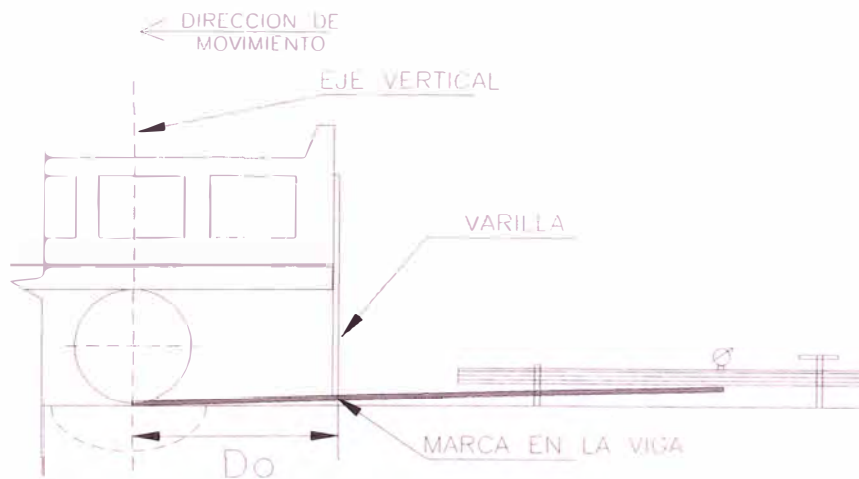
Figura N° 3.1 Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 3.1(a), punto "D"). Estacionados los neumáticos se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga colocándolo nuevamente sobre el punto de ensayo seleccionado. Tomando como punto de referencia una varilla vertical adosada a la parte trasera del camión (ver figura 3.1 (b)), se hace coincidir las marcas de la viga con la varilla. Para medir las deflexiones del pavimento.



a) Carga P en el centro de las llantas.



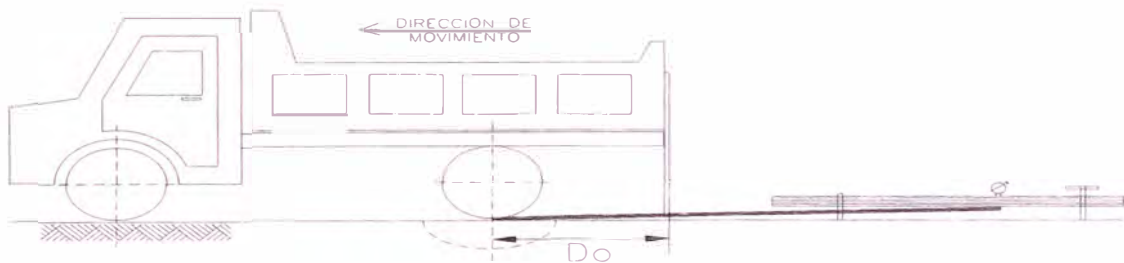
b) Posición inicial de medición

Figura N° 3.2 Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.

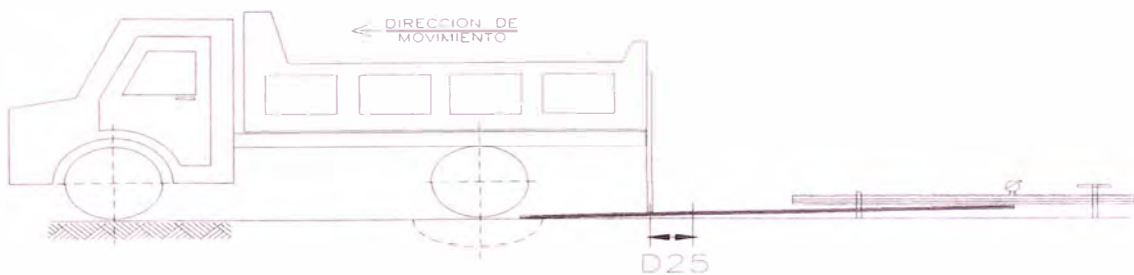
Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable si se desea tener una idea gráfica del tipo de curva de deflexión que se produce.

Como norma se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima. La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional.

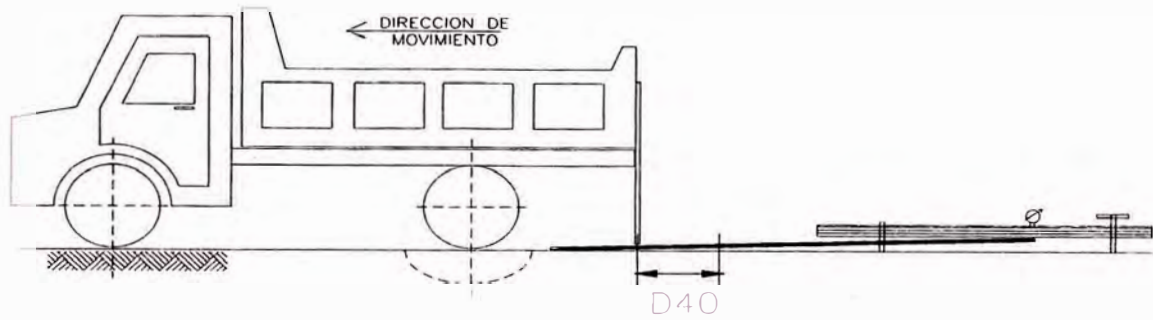
Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial (ver figura 3.3(a)), se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión.



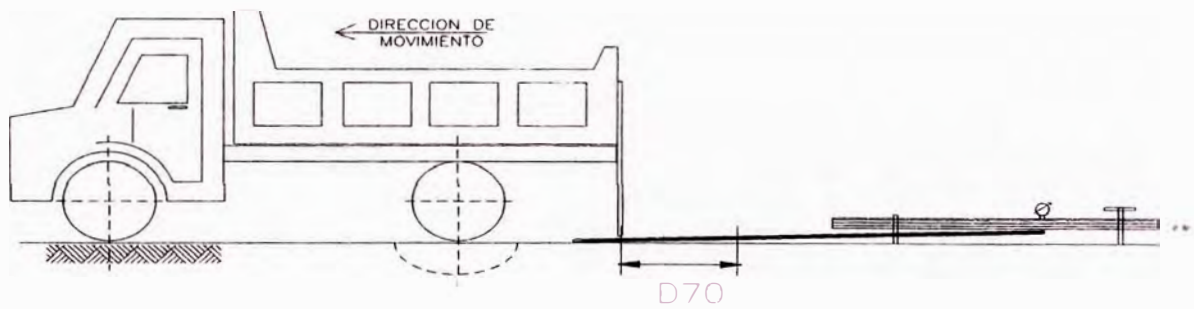
(a): Posición inicial ($D_0 =$ Deflexión máxima)



(b): Posición a 25cm



(c): Posición a 40cm



(d): Posición a 70cm

Figura N° 3.3 Esquematización del Proceso de Medición con la Viga Benkelman

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

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

3.2.1 Definiciones previas

a) Módulo Resiliente

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

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3.2.1)$$

Donde:

Mr: Módulo de resiliencia.

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

ϵ_r : Deformada Recuperable (pulg.)

b) Ratio 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

c) CBR

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/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 (lbs/pulg²) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

e) Coeficiente de expansión térmica

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

3.2.2 Modelos Matemáticos

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

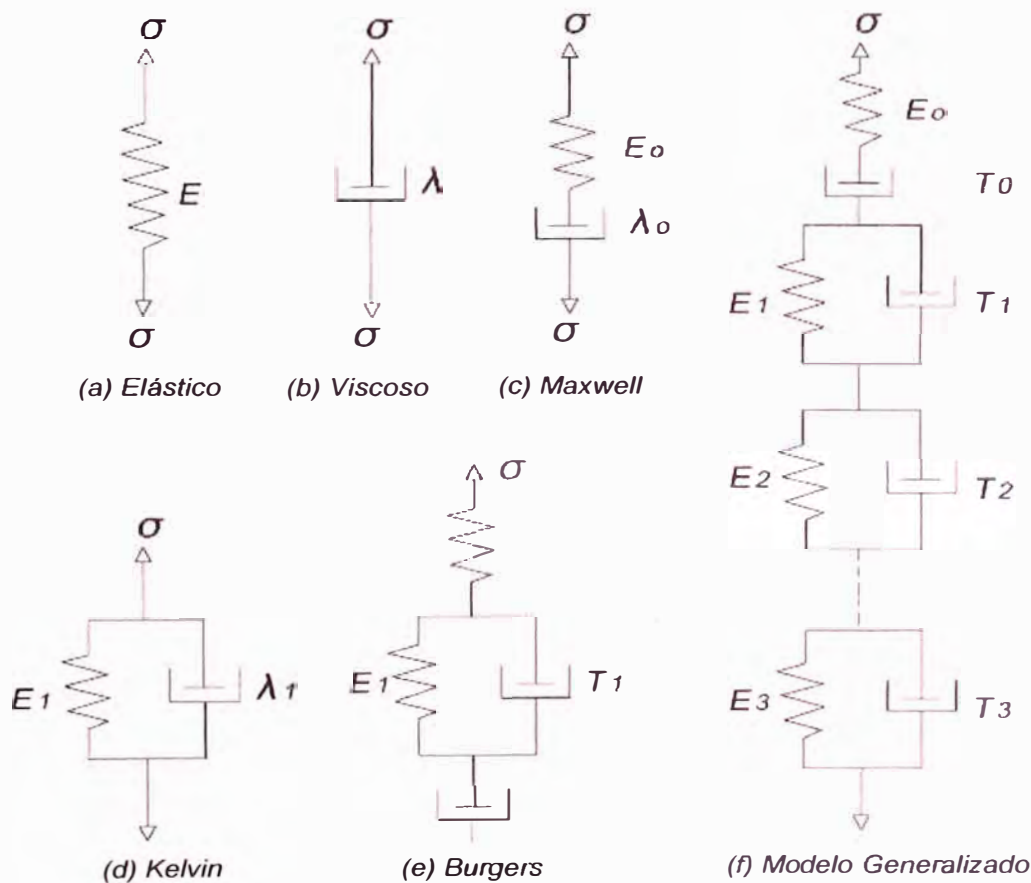


Figura N° 3.4 Modelos Mecánicos para materiales viscoelásticos

3.2.3 Modelo Básico

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en Figura 3.2.2(a), y obedece la ley de Hooke, y la tensión es proporcional a la deformación:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.2.3)$$

E: Módulo de elasticidad

ε : Deformación unitaria

Un material viscoso es representado por un amortiguador hidráulico, según lo indicado en Figura 3.2.2(b), y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo:

$$\sigma = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

3.2.4 Modelo de Maxwell

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la Figura 3.2.2(c)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (3.2.4)$$

3.2.5 Modelo de Kelvin

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la figura 3.2.2(d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usa el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin,

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.2.5)$$

3.2.6 Modelo de Burgers

Un modelo de Burgers es una combinación del modelo del Maxwell y de Kelvin, según lo indicado en la Figura 3.2.2(e).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1} \right) \right] \quad (3.2.6)$$

3.2.7 Modelo Generalizado

La Figura 3.2.2(f) muestra un modelo generalizado que se pueda utilizar para caracterizar cualquier material viscoelástico.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i} \right) \right] \quad (3.2.7)$$

3.3 MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

3.3.1 Modelo de Boussinesq

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

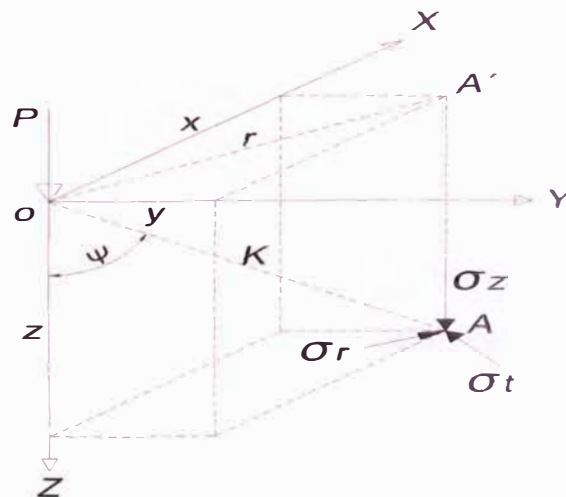


Figura N° 3.5 Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada

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

De la Figura los esfuerzos en el punto "A" pueden escribirse:

$$\sigma_z = \frac{3P \cos^5 \Psi}{2\pi z^2} \quad (3.3.1.a)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi z^2} \left[3 + \cos^2 \Psi \sin^2 \Psi - (1 - 2\mu) \frac{\cos^2 \Psi}{1 + \cos \Psi} \right] \quad (3.3.1.b)$$

$$\sigma_t = -\frac{(1 - 2\mu)P}{2\pi z^2} \left[\cos^3 \Psi - \frac{\cos^2 \Psi}{1 + \cos \Psi} \right] \quad (3.2.1.c)$$

3.3.2 Modelo de Hogg

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

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

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

La ecuación que resuelve Hogg es:

$$D * \Delta^2 w = p \quad (3.3.2.a)$$

Donde

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

D = rigidez de la placa.

w = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

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

$\nabla^2 = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right)$ con la transformada de Hankel resulta para nuestro problema.

$$\Delta(0,r) = \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)p \cdot a}{2(1 - \mu_0)E_0} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \times J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (3.3.2.b)$$

Donde:

$$\phi_{(m)} = \frac{\text{Senhm} \times \text{Coshm} + \frac{m}{3 - 4\mu_0}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_0)^2}} \quad (3.3.2.c)$$

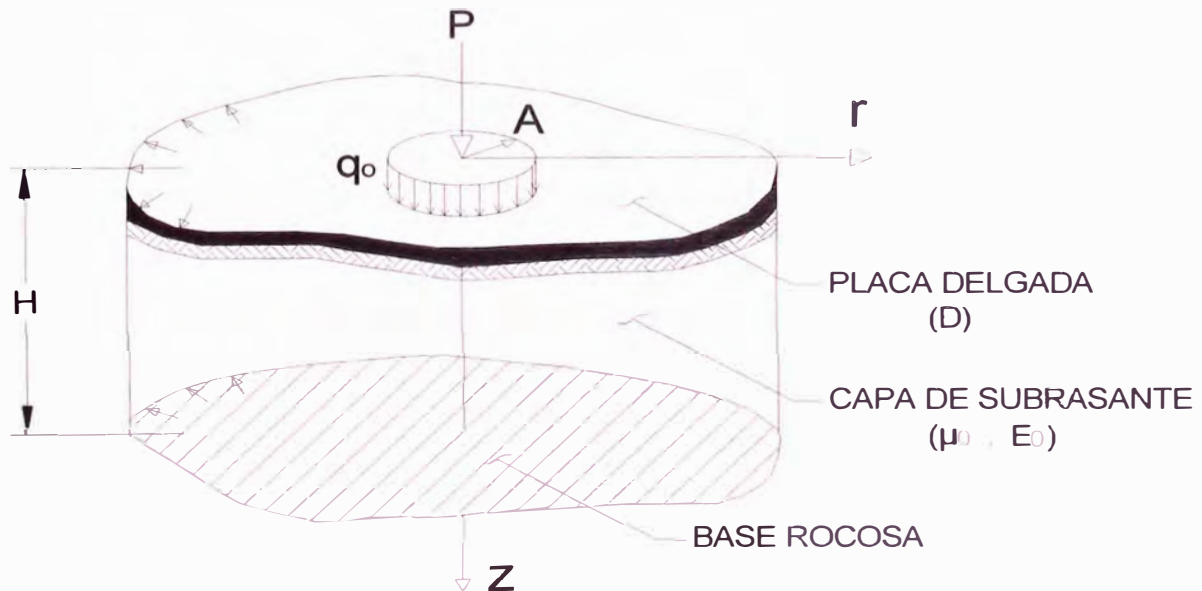


Figura N° 3.6 Modelo de hogg

3.3.3 Modelo de Westergaard

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

$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (3.3.3)$$

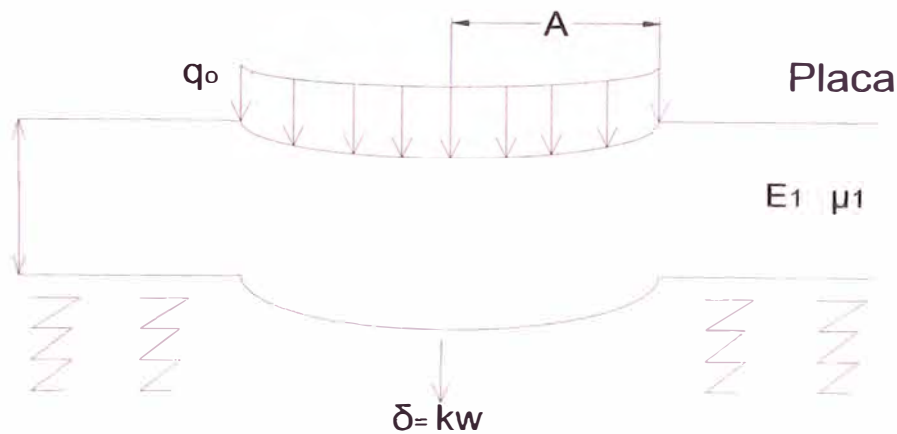


Figura 3.7 Modelo de Westergaard

3.3.4 Modelos bicapas

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

3.3.5 Modelos multicapas (Burmister, 1943)

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

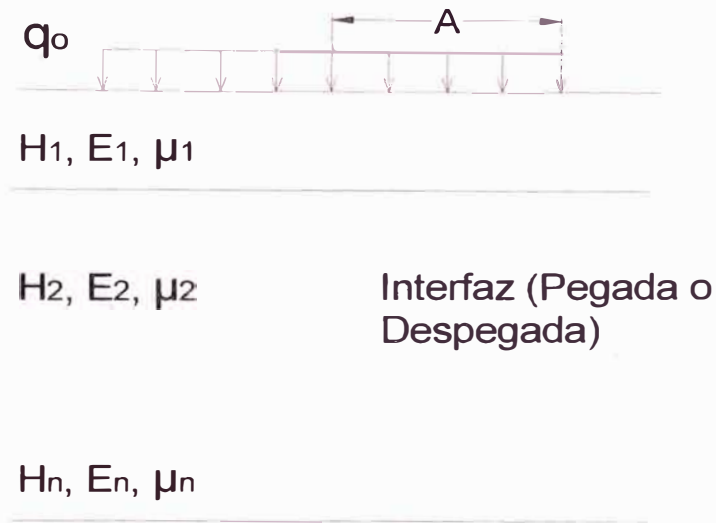


Figura N° 3.8 Modelo multicapas.

3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS

3.4.1 Fórmulas de Boussinesq

El masivo semi-infinito de Boussinesq se supone lineal, isotrópico, elástico, con módulo de Young E_s y de coeficiente de poisson μ .

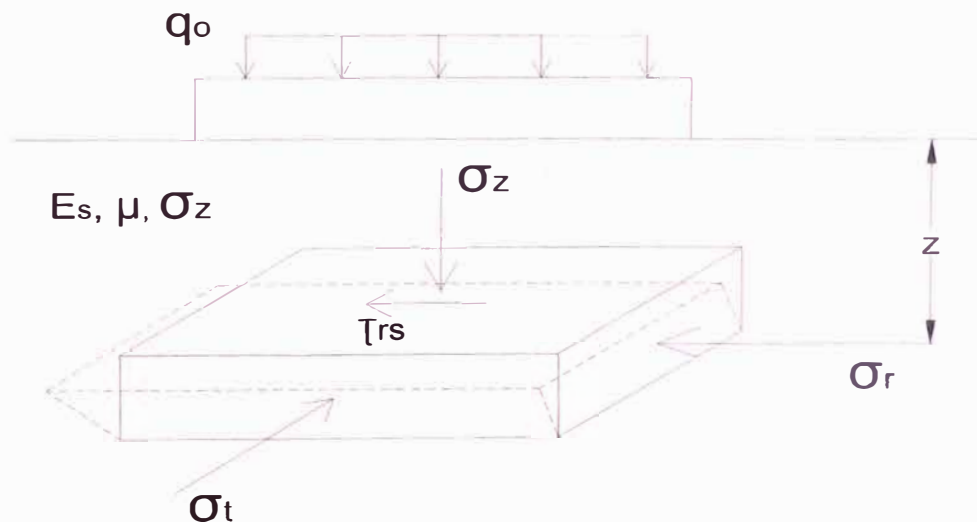


Figura N° 3.9 Representación de un masivo semi-infinito.

La fórmula de Boussinesq para hallar el desplazamiento de un punto en el suelo debido a una carga puntual es.

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[2(1 - \mu) + \left(\frac{z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (3.4.1)$$

3.4.2 Fórmula de Westergaard

La carga P se aplica sobre un área elíptica. La calzada es una placa homogénea, isotrópica y elástica con módulo de young E y coeficiente de Poisson μ , y su espesor h es constante.

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

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

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (3.4.2)$$

k Módulo de reacción.

E Módulo de Young

μ Radio de Poisson

h Espesor

3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber generalizada

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

La calzada está compuesta por $n-1$ capas horizontales de espesor h_i de módulo de Young E_i y de coeficiente de Poisson μ_i igual a:

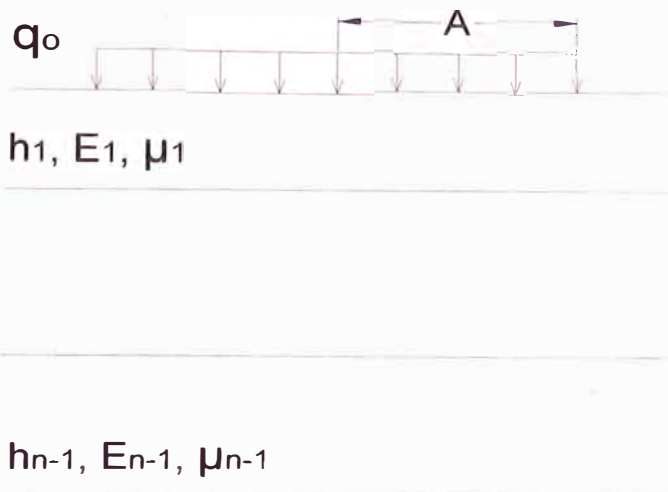


Figura N° 3.10 Multicapa propuesto con la fórmula de palmer y barber generalizada.

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2^3 \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} + h_3^3 \sqrt{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1}^3 \sqrt{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (3.4.3)$$

La ecuación 3.13 será necesaria para relacionar los módulos de elasticidad en la aplicación del módulo de Boussinesq.

3.4.4 Fórmula de Odemark

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

La calzada está compuesta por $n-1$ capas horizontales, de espesor h_i , módulo de Young E_i y de coeficiente de Poisson μ_i , la caracterización es la base en un masivo semi-infinito de características mecánicas E_n y μ_n .

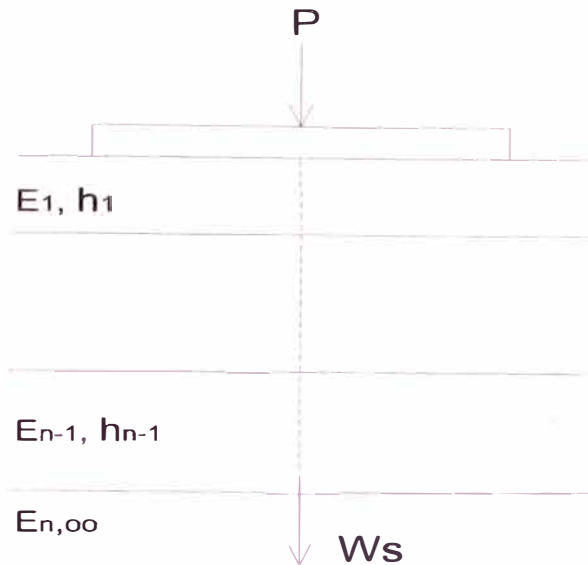


Figura N° 3.11 Multicapa propuesto con la fórmula de odemark

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.4.4)$$

3.4.5 Método de elementos finitos

Concepto general

Este modelo resuelve las ecuaciones constitutivas y de compatibilidad mediante la división del medio continuo en un conjunto de subdominios denominados elementos finitos. En este método se cumple principalmente las condiciones de frontera en los nodos del sistema que se resuelve.

Los puntos interiores a los elementos se aproximan con funciones de interpolación. En el caso de pavimentos existen programas como MICHIPAVE y EVERSTRESS FE que ayudan a resolver este problema.

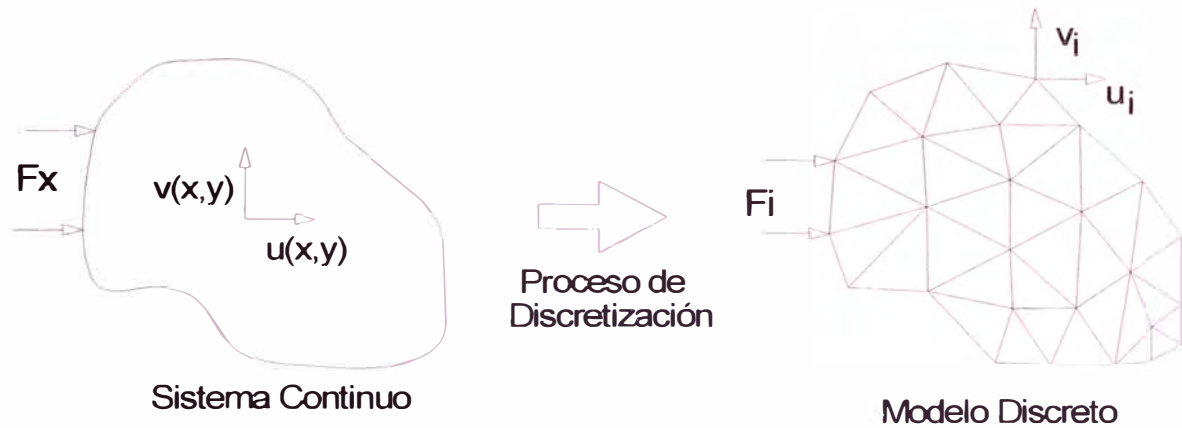


Figura N° 3.12 Modelo de elementos finitos

ELEMENTOS UNIDIMENSIONALES (1-D).

Se usan para enmallar elementos longitudinales, vigas, columnas, barras, rigidizadores, cables, torres de transmisión de energía, puentes, línea de tuberías, etc. tal como muestra la siguiente Figura.



Figura N° 3.13 Elementos Unidimensionales con Nodos Rígidos.

ELEMENTOS BIDIMENSIONALES (2-D).

Se usan para enmallar estructuras continuas (tanto planas como curvadas). Los elementos bidimensionales se consideran de espesor pequeño, por tanto no precisan de un tratamiento tridimensional general.

Los análisis con elementos 2D se utilizan ampliamente en la ingeniería. A menudo, los análisis con MEF tridimensionales se preceden de un estudio equivalente 2D.

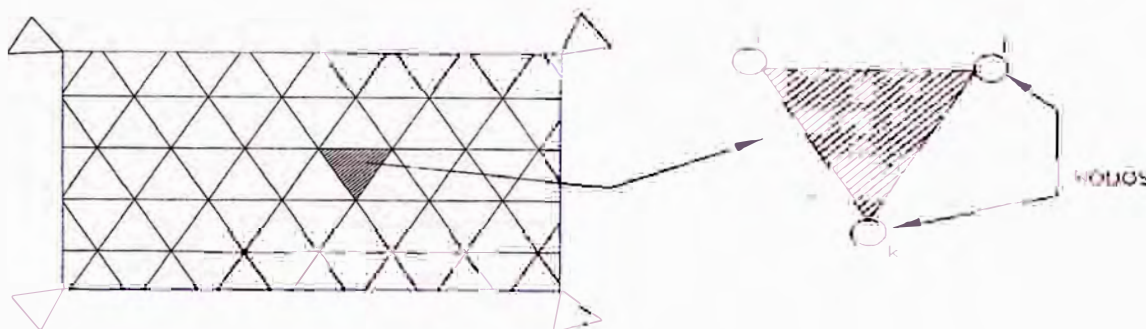


Figura N° 3.14 Estructura Discretizada con elementos (2-D).

Los tipos de elementos bidimensionales más comunes son las láminas y cáscaras con geometría triangular de 3-6-10 nodos y cuadriláteros de 4-8-9 nodos, que además pueden ser lineales, cuadráticos y cúbicos.

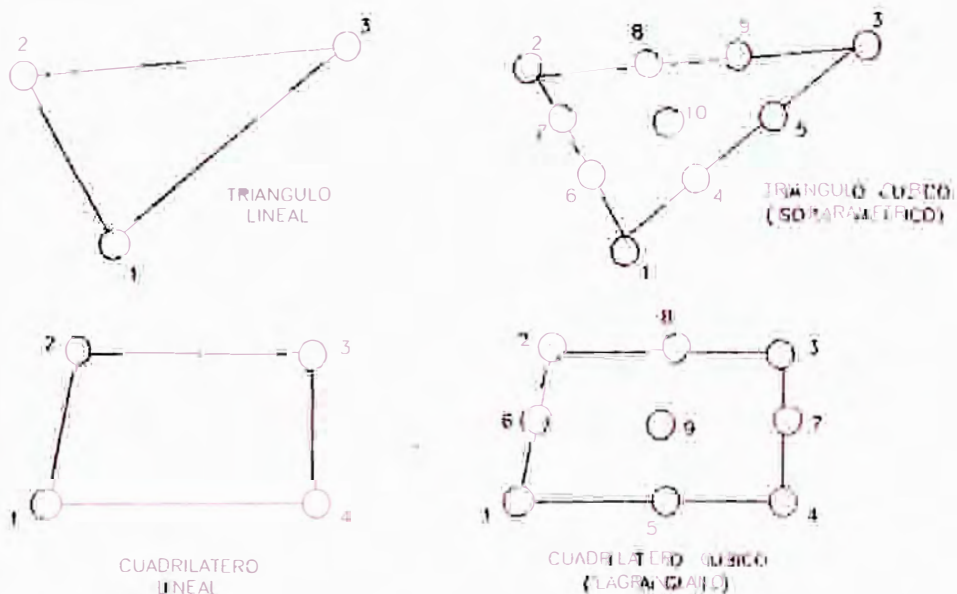


Figura N° 3.15 Elementos Bidimensionales (2-D).

ELEMENTOS TRIDIMENSIONALES (3-D).

En la práctica muchas estructuras requieren el uso de elementos que consideren los efectos tridimensionales. Por ejemplo, para modelar con precisión una presa de hormigón, es necesario utilizar elementos sólidos.

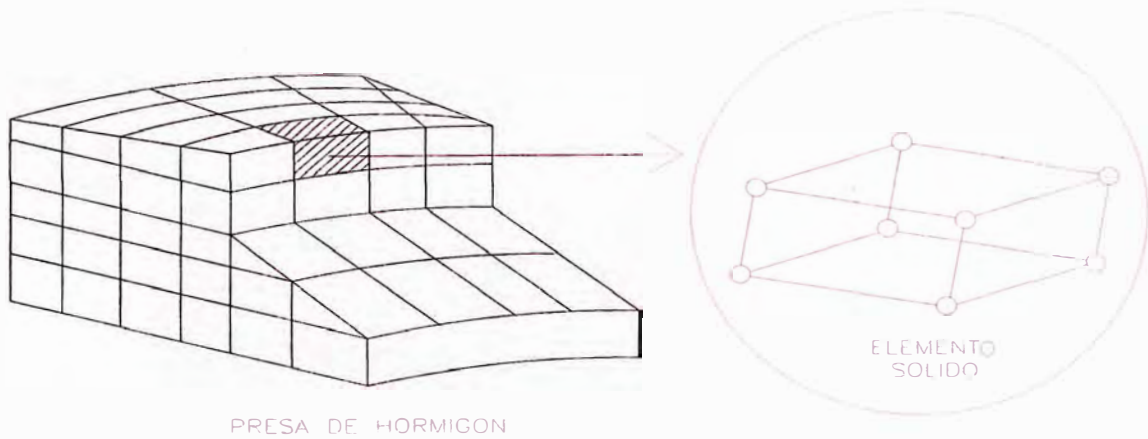


Figura N° 3.16 Modelo de Elementos Finitos usando elementos 3-D

Los elementos tridimensionales 3-D están disponibles en una amplia variedad de formas, los más comunes son los siguientes.

Tetraedros, de 4-10 nodos y cuatro caras triangulares.

Pentaedros, de 6-nodos con dos caras triangulares y cuatro caras tipo cuadrilátero.

Hexaedros, de 8-20 nodos y seis caras tipo cuadrilátero.

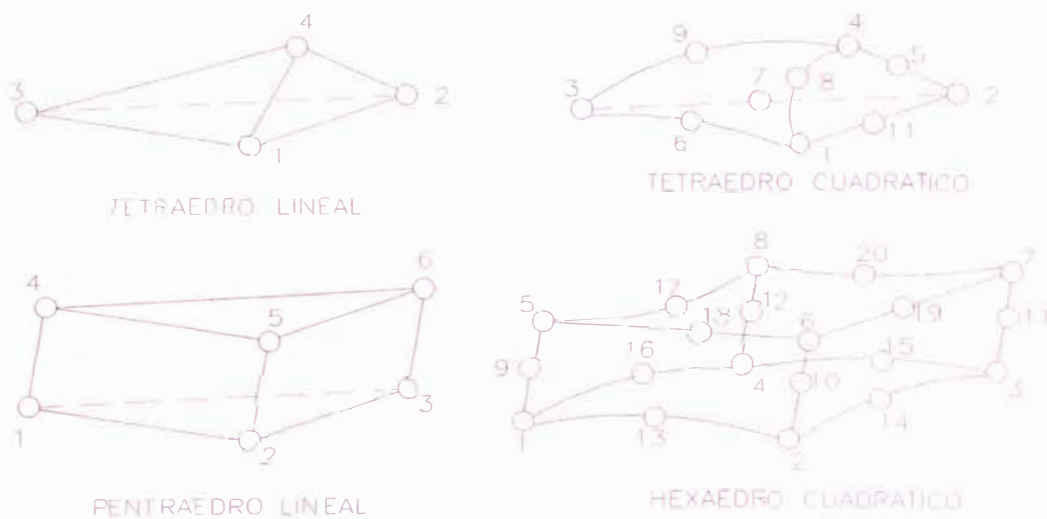


Figura N° 3.17 Tipos de elementos 3-D

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN TRAMO KM 74+000 – KM 79+000

4.1 Aplicación de la Viga Benkelman.

Los trabajos de campo consisten en efectuar sistemáticamente mediciones de deflexiones empleando el deflectógrafo conocido como Viga benkelman, en los puntos establecidos del tramo evaluado.

Procedimiento de medición en campo.

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

Para ello se coloca la punta del instrumento, en un punto "A" seleccionado, 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".

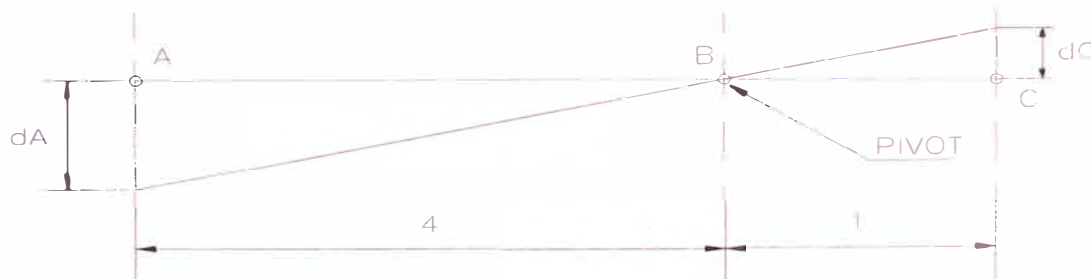


Figura N° 4.1 Representación geométrica de medición.

Nótese que en realidad se ha medido la recuperación del punto "A" al mover la carga y no la deformación al colocar ésta.

Una vez anotada la primera lectura que corresponde al inicio del ensayo, se procede a mover el camión a una velocidad constante de 1.0 Km/h, 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 igualmente a recuperarse del estado de deformación en que se encontraba. Cuando el camión avanza 25cm, el pavimento en el punto "A" seguirá todavía parcialmente deformado; en esa posición se tomará una segunda lectura, tomando lecturas a 40cm, 70cm y 100cm. 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 del deflectógrafo.

Las lecturas que se toman en el dial corresponden a componentes de deformación en un proceso de "descarga", el valor final será menor que el inicial. A continuación mostramos el proceso de medición ver Fig. N° 4.2



UBICACIÓN



PREPARACIÓN



AJUSTE



MEDICIÓN



TEMPERATURA



ESPESOR

Figura N° 4.2 Proceso de Medición y toma de datos de campo.

Datos de Campo.

Los datos de campo obtenidos con la Viga Benkelman se muestra en el siguiente cuadro.

TRAMO: Km 74+000-Km 79+000

OPERADOR: José Luís

CARRIL: Derecho

RELACIÓN VP: 1:4

CAPA : Tratamiento Superficial

FECHA: 03/10/2009

Cuadro N° 4.1 Lectura de datos tomadas en campo

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				Espesor (cm)	Temperatura (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}			Deflexiones(x10 ⁻² mm)			
							D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀
76+600	8	16	22	24	1.50	49.0	96	64	32	8
76+700	8	18	20	22	1.00	48.0	88	56	16	8
76+800	6	10	18	20	0.80	50.0	80	56	40	8
76+900	8	16	20	22	2.00	50.0	88	56	24	8
77+000	8	12	16	18	1.60	52.0	72	40	24	8

(Fuente: Elaboración propia)

Mediante el modelo de Hogg se determina los siguientes valores empíricos:

R5: Distancia R del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal.

R: Distancia a la que se mide la deflexión DR.

Lo: Longitud elástica del pavimento.

Eo: Módulo de elasticidad de la subrasante.

E*: Módulo de elasticidad equivalente del pavimento.

El módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E*) representa a todas las capas del pavimento por encima de la subrasante.

Datos para el cálculo de parámetros empíricos en el modelo de Hogg.

A (radio) = 10.77cm (Radio de la huella circular de contacto)

HC (cm) = Base granular + carpeta asfáltica

Base granular = 13.7cm. (Ver anexo 01)

Carga de Ensayo (Kg) = 2050kg. (8200 kg/4)

Presión de Inflado = 80 lbs/pulg².

1Kg/cm² = 14.23 Psi.

Radio de Poisson u = 0.40

Cuadro Nº 4.2 Cuadro de valores empíricos del modelo de Hogg.

Estaca (km)	Hc (cm)	R5,cm	L0,cm	S0/S	E0, kg/cm ²	E* inicial kg/cm ²	HE,cm
76+600	15.2	36.60	17.70	0.76	502.30	2349.37	22.87
76+700	14.7	36.60	17.70	0.76	547.96	2781.22	22.74
76+800	14.5	36.60	17.70	0.76	602.76	3166.20	22.69
76+900	15.7	35.60	17.10	0.75	560.24	2031.58	23.04
77+000	15.3	28.90	12.70	0.64	793.20	642.55	12.84

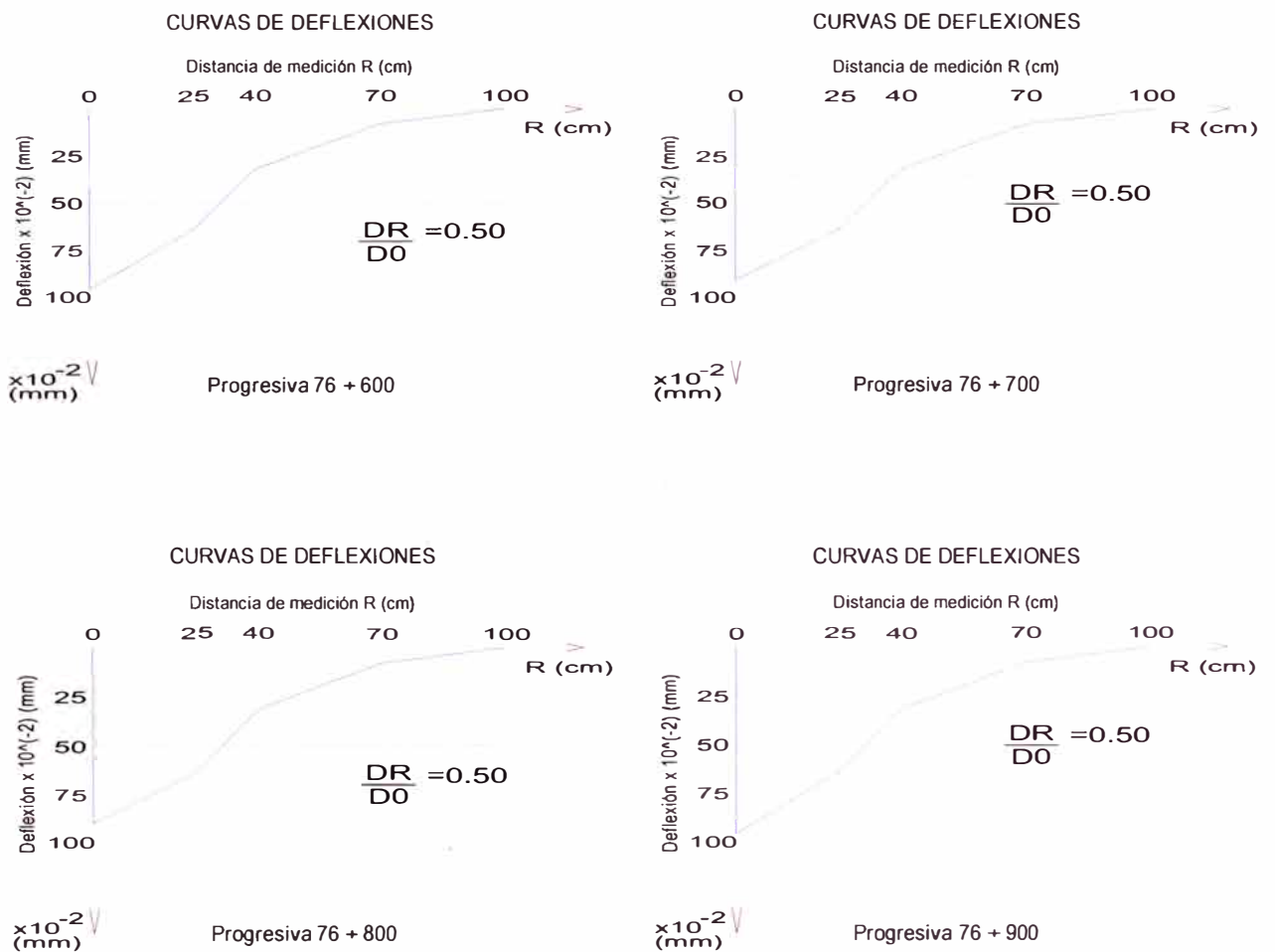
(Fuente: Elaboración propia)

Cuadro N° 4.3 Cuadro de valores empíricos en PSI

Estaca (km)	Hc (cm)	HE,cm	SUBRASANTE E0(psi)	BASE EQ. E* (psi)
76+600	15.2	22.87	7147.73	33431.54
76+700	14.7	22.74	7787.47	39576.76
76+800	14.5	22.69	8577.27	45055.03
76+900	15.7	23.04	7972.22	28909.38
77+000	15.3	12.84	11287.24	9143.49

(Fuente: Elaboración propia)

Con valores obtenidos en campo (cuadro N° 4.1), se procede a graficar las deflexiones en cada progresiva del tramo evaluado.



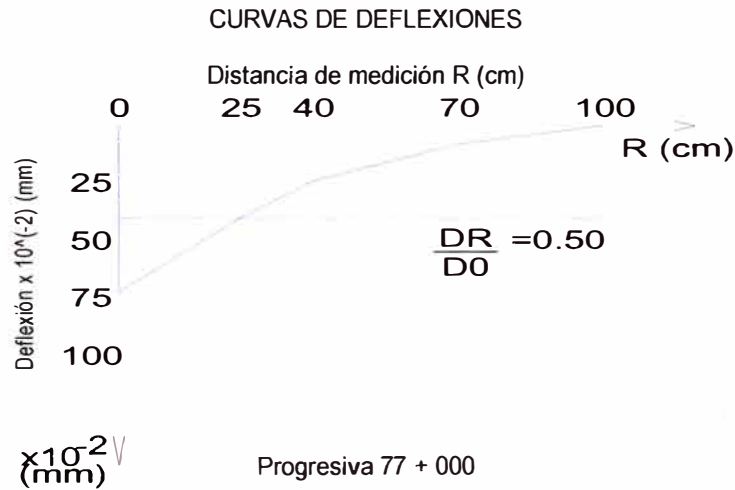


Figura N° 4.3 Diagramas de deflexiones de campo

4.2. Aplicación con el Método de Elementos Finitos empleando Elementos Bidimensionales

El modelo matemático es una representación teórica y esquemática de una estructura, con ayuda del mismo se calculan esfuerzos y deformaciones en función de las cargas que se aplican al pavimento.

Se presenta el problema como un elemento bidimensional no lineal que reposa sobre un masivo estratificado. Las primeras capas son de dimensiones finitas en profundidad e infinitas horizontalmente y el espesor de la última capa es infinito.

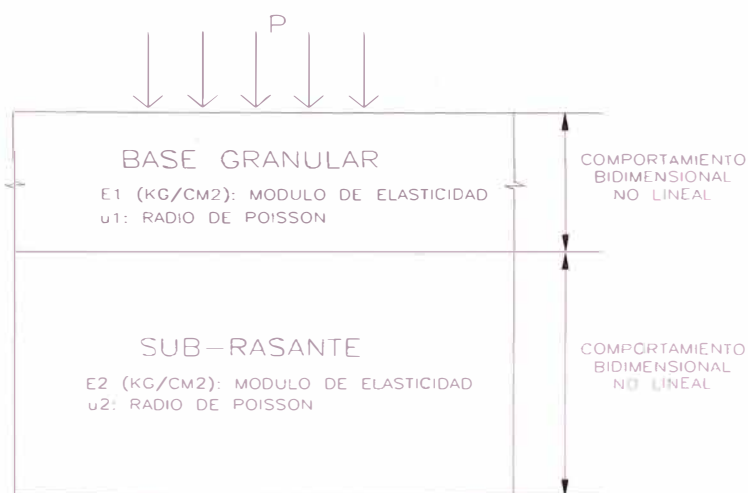


Figura N° 4.4 Modelo de pavimento de base finita y subrasante infinita.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO EMPLEANDO EL PROGRAMA MICHPAVE

MICHPAVE, es un programa de análisis no lineal que emplea elementos finitos para el análisis de Pavimentos Flexibles.

El programa calcula los desplazamientos, las tensiones y deformaciones en el pavimento debido a la carga de la rueda circular. La información de las ecuaciones constitutivas del material, se obtienen de ensayos de campo o laboratorio.

El programa determina el módulo de resiliencia de la base y la subrasante en relación a la suma de los esfuerzos principales, mediante la siguiente expresión:

$$E = K_1 \theta^{K_2}$$

Donde K1 y K2 son constantes experimentales y θ es el primer esfuerzo invariante. La cual puede ser la sumatoria de los esfuerzos normales σ_x , σ_y y σ_z ó la suma de las tres principales esfuerzos, σ_1 , σ_2 y σ_3 .

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

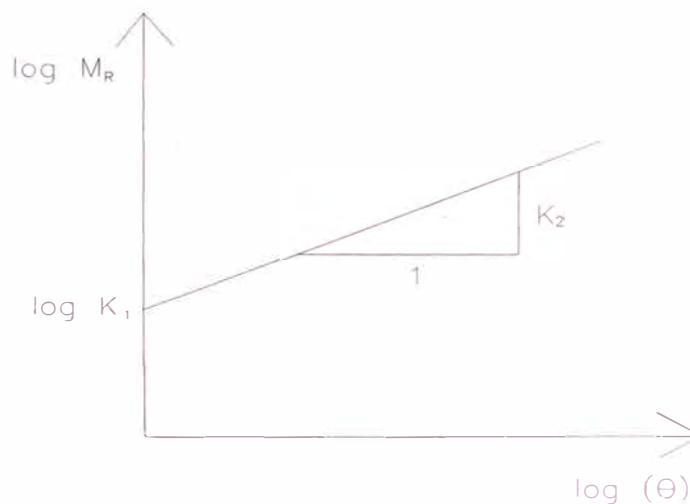


Figura Nº 4.5 Módulo resiliente y esfuerzo invariante.

(Fuente: Manual MICHPAVE pag. 2)

Módulo de resiliencia.

El módulo resiliente hallado en forma experimental mediante un ensayo triaxial cíclico, como la relación entre el máximo esfuerzo desviador (σ_d) y la deformación axial recuperable (ϵ_r).

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

M_r = Módulo de resiliencia del suelo compactado

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_r = Deformación axial recuperable.

Este módulo de resiliencia disminuye con el aumento del agua. Las variables que más influyen en el módulo de resiliencia para suelos granulares son: estado del esfuerzo, grado de saturación y el grado de compactación.

En el cuadro se muestra valores experimentales K1 y K2 para suelos granulares.

Cuadro Nº 4.4 Valores K1 y K2 experimentales

TIPO DE MATERIAL	K1 (Mpa)		K2 (Mpa)	
	Media	Desviacion Estándar	Media	Desviacion Estándar
Arena Limosa	1620	78	0.62	0.13
Grava Arenosa	4480	4300	0.53	0.17
Arena Grava	4350	2360	0.59	0.13
Roca Triturada	7210	7490	0.45	0.23

(Fuente: Libro HUANG, YANG H. "Pavement Analysis and Design")

MÓDELO DEL PAVIMENTO

Cada capa en una sección transversal del pavimento, se supone que se extiende hasta el infinito en la dirección horizontal, y la última capa se supone que es infinitamente profunda.

Todas las capas del pavimento se supone que están plenamente ligados para que no se produzca deslizamiento, debido a la carga aplicada. Se calculan los desplazamientos, presiones y deformaciones, debido a una sola carga de la

rueda circular. Debido a las suposiciones utilizadas, el problema se reduce a uno de simetría axial.

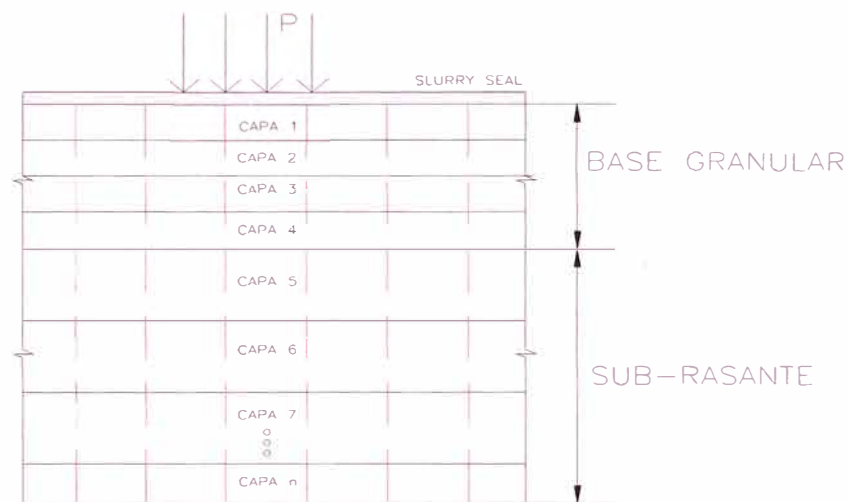


Figura N° 4.6 Discretización del elemento a estudiar.

Modelamiento y enmallado del elemento

En la dirección radial, de ancho total de 10 radios se divide en cuatro regiones. La primera región, entre $[0,A]$, está dividido en siete elementos, la segunda región entre $[A,3A]$, está dividido en cuatro elementos, la tercera región, entre $[3A,6A]$ es dividido en tres elementos, y la cuarta región, entre los 6 radios y 10 radios, es dividido en dos elementos.

El mortero asfáltico (slurry seal) no aporta estructuralmente al pavimento, considerando para el modelo una capa de base granular de espesor equivalente HE (ver cuadro N° 4.2).

El número de elementos de cada capa en la dirección vertical depende del espesor de la capa.

La base granular equivalente (HE), entre 0 a 10", es subdividido en 10 capas y la subrasante entre 10" a 50" en 7 capas. Estos rangos de intervalos son introducidos al programa.

Dentro de cualquier capa horizontal, todos los elementos tienen la misma dimensión vertical. Desplazamientos, deformaciones y tensiones se calculan únicamente en la región modelada.

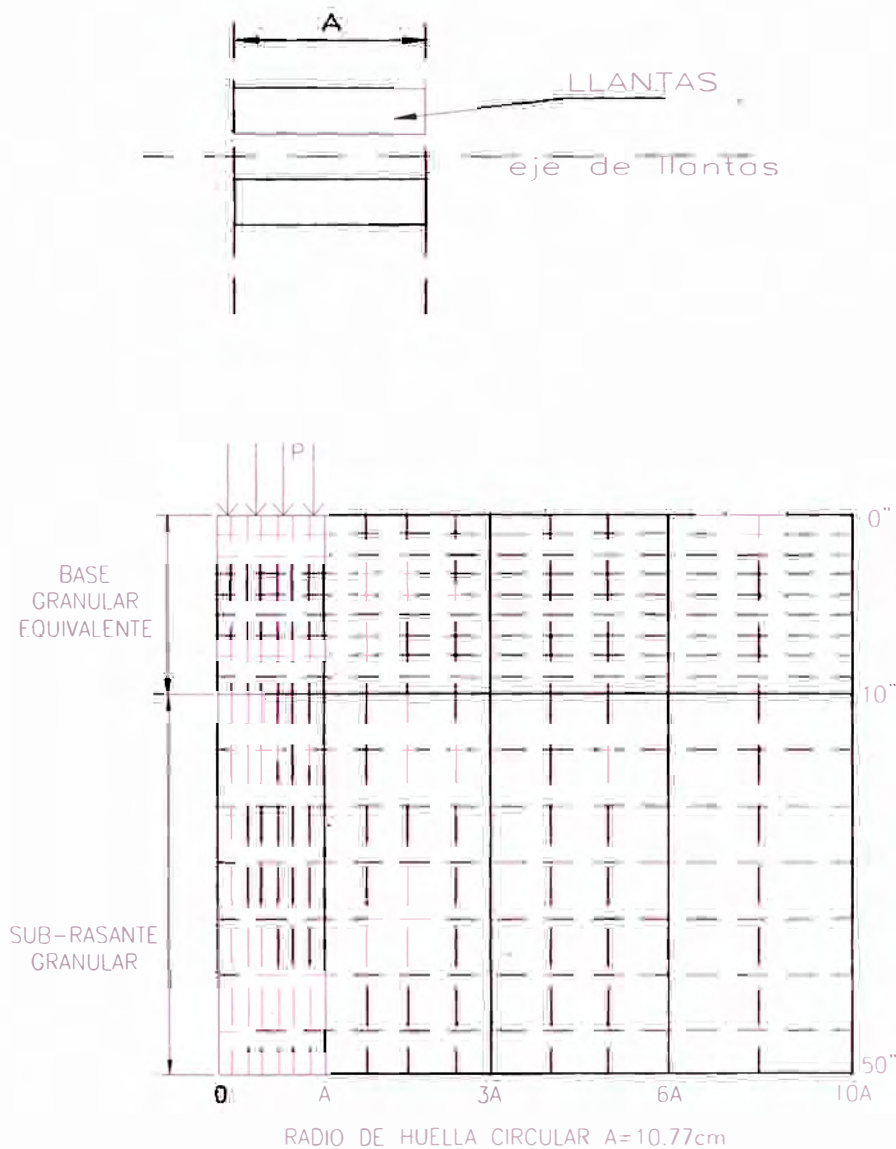


Figura N° 4.7 Esquematización del elemento para el programa

DATOS PARA EL PROGRAMA.

Numero de capas: 2.0

Capa 1 (Base granular): 19.07cm

Capa 2 (Sub-rasante): 80cm

Radio de la huella circular de contacto (A): 10.77cm.

Densidad Arena limosa: 2080 Kg/m³ (135.0pcf)

Carga (Lbs.): 8.20Ton=18040 /2 = 9020 lb.

Presión de inflado: 80 psi.

Ko=Coficiente de presión en estado de reposo: $Ko=1-\text{sen}(\phi) = 0.50$

ϕ =Angulo de fricción interna =30°

Radio de Poisson (u): 0.30 a 0.50

Cohesión: 0

CAPITULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Resultados del Programa MICHPAVE

Con ayuda del programa se obtiene el Módulo de Elasticidad de la subrasante (Eo) y los módulos resilientes de la base granular equivalente y la subrasante.

Las deformaciones y los esfuerzos con respecto a los radios están representadas mediante graficas en el anexo 02.

Cuadro N° 5.1 Cuadro de resultados con programa MICHPAVE.

Estaca (km)	Hc (cm)	HE (cm)	E0(psi)	MODULOS RESILIENTES	
				E (psi) SUBRANSANTE	E (psi) BASE
76+600	15.2	22.87	7124.10	9032.00	17294.00
76+700	14.7	22.74	7114.70	9084.00	17395.00
76+800	14.5	22.69	7110.10	9148.00	17446.00
76+900	15.7	23.04	7133.60	8959.00	17192.00
77+000	15.3	12.84	7124.10	9032.00	17294.00

(Fuente: Elaboración propia)

En el cuadro N° 5.2 indican diferencias entre los módulos de elasticidad calculado con MICHPAVE y los mismos calculados con el modelo de Hogg. A continuación se presenta el cuadro comparativo de módulos de elasticidad.

Cuadro N° 5.2 Cuadro comparativo de módulos

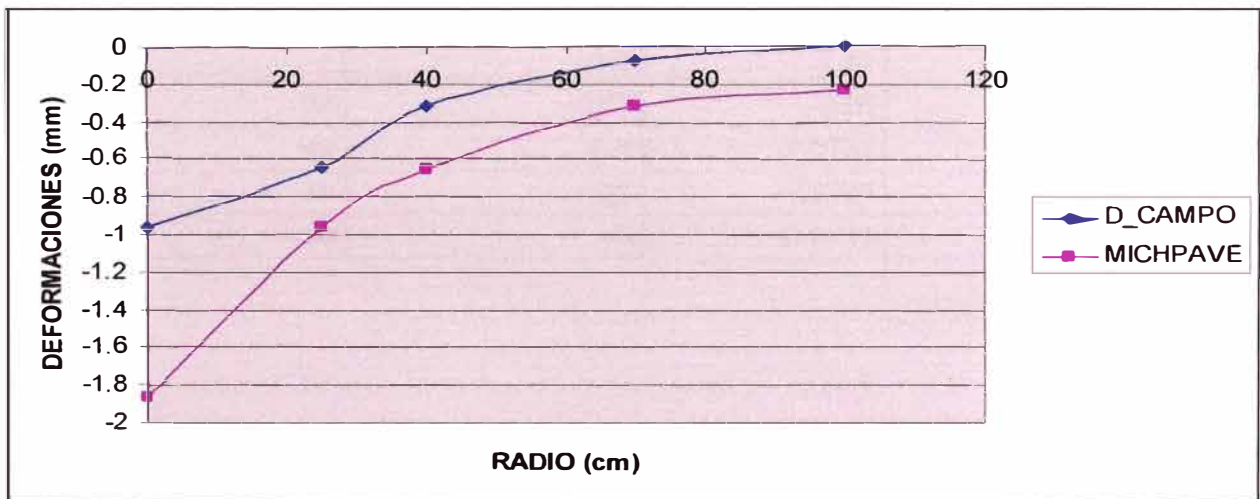
Estaca (km)	MODELO HOGG		PROG. MICHPAVE			Diferencia (psi)	Diferencia (Kg/cm2)
	E0(psi)	E* (psi)	Eo (psi)	E (psi)	E (psi)		
76+600	7147.73	33431.5	7124.1	9032	17294	26.63	1.87
76+700	7787.47	39576.8	7114.7	9084	17395	672.77	47.28
76+800	8577.27	45055	7110.1	9148	17446	1467.17	103.10
76+900	7972.22	28909.4	7133.6	8959	17192	838.62	58.93
77+000	11287.24	9143.49	7124.1	9032	17294	4163.14	292.56

(Fuente: Elaboración propia)

A continuación se presenta las gráficas para cada estaca con los datos de campo y los datos obtenidos con el programa MICHPAVE.

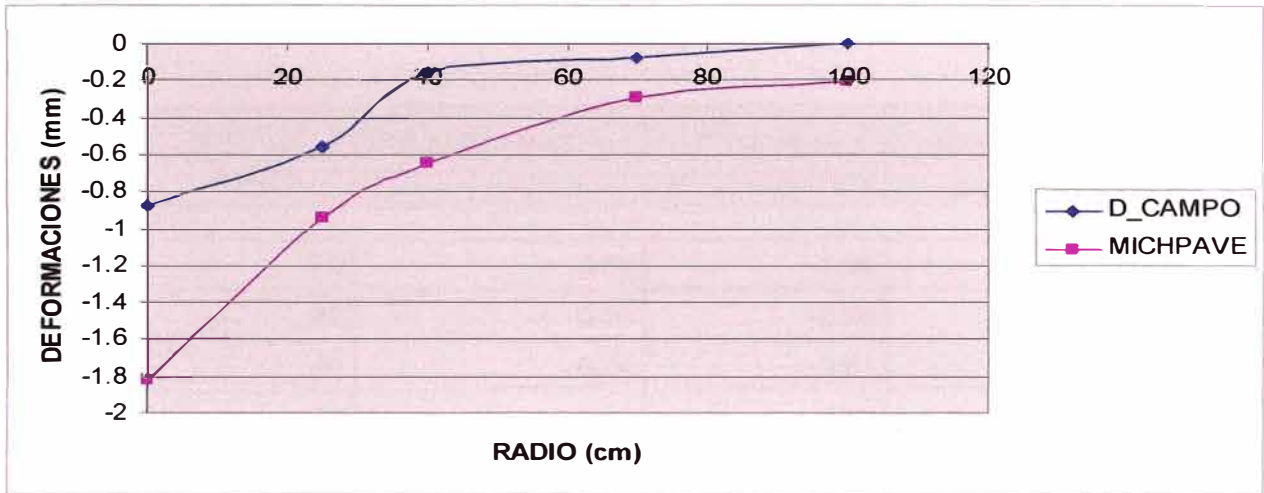
a) ESTACA KM 76+600

RADIO (cm)	Datos de campo (mm)	Programa MICHPAVE(mm)	Desviación Estándar
0	-0.96	-1.870	0.8281
25	-0.64	-0.960	0.1024
40	-0.32	-0.653	0.1110
70	-0.08	-0.315	0.0551
100	0	-0.233	0.0543
			0.4798



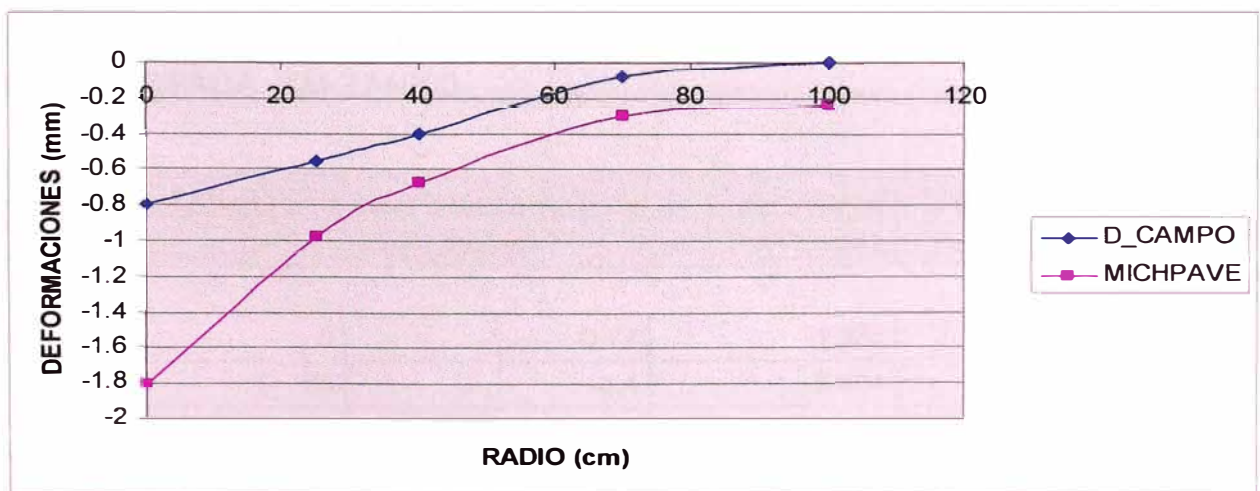
b) ESTACA KM 76+700

RADIO (cm)	Datos de campo (mm)	Programa MICHPAVE(mm)	Desviación Estándar
0	-0.88	-1.820	0.8836
25	-0.56	-0.950	0.1521
40	-0.16	-0.653	0.2431
70	-0.08	-0.295	0.0461
100	0	-0.211	0.0446
			0.5234



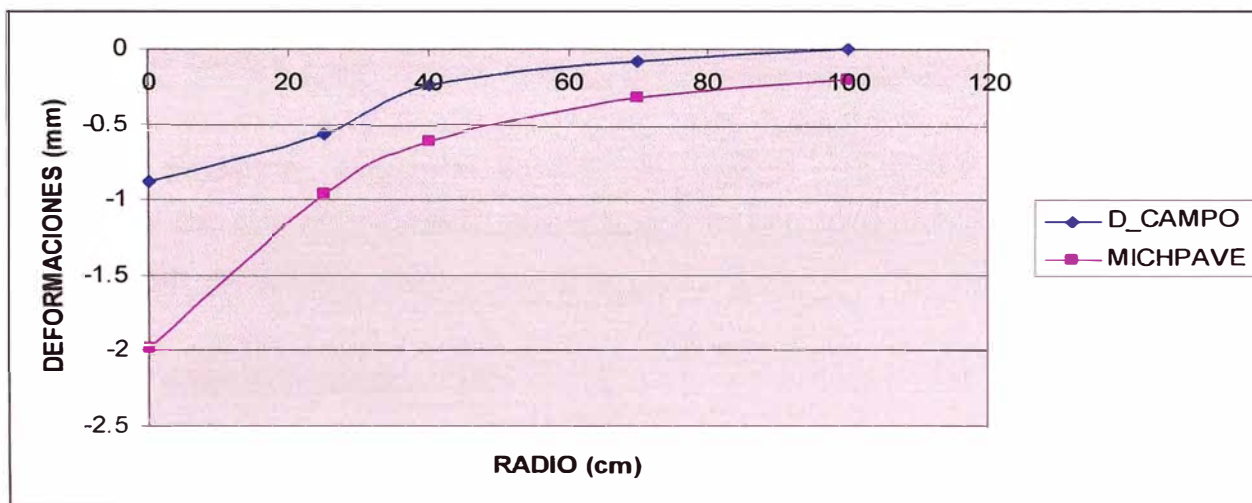
c) ESTACA KM 76+800

RADIO (cm)	Datos de campo (mm)	Programa MICHPAVE(mm)	Desviación Estándar
0	-0.8	-1.81	1.0201
25	-0.56	-0.98	0.1764
40	-0.4	-0.6731	0.0746
70	-0.08	-0.3048	0.0505
100	0	-0.2413	0.0582
			0.5253



d) ESTACA KM 76+900

RADIO (cm)	Datos de campo (mm)	Programa MICHPAVE(mm)	Desviación Estándar
0	-0.88	-1.98	1.2100
25	-0.56	-0.96	0.1600
40	-0.24	-0.61	0.1369
70	-0.08	-0.32	0.0576
100	0	-0.2	0.0400
			0.5665



e) ESTACA KM 77+000

RADIO (cm)	Datos de campo (mm)	Programa MICHPAVE(mm)	Desviación Estándar
0	-0.72	-1.983	1.5952
25	-0.4	-0.964	0.3181
40	-0.24	-0.602	0.1310
70	-0.08	-0.312	0.0538
100	0	-0.18	0.0324
			0.6528

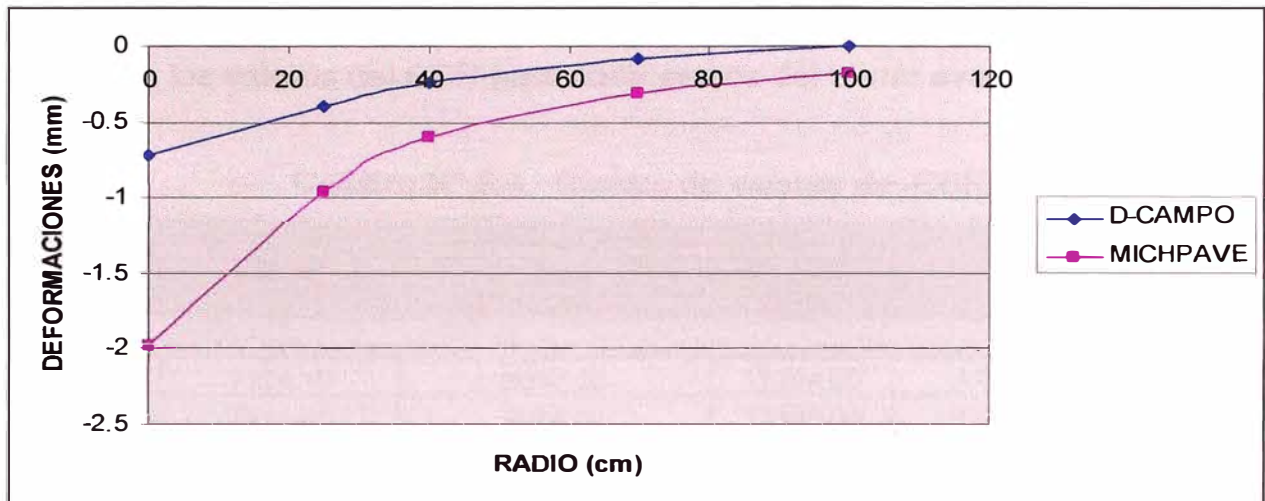


Figura N° 5.1 Deformaciones con datos de campo y programa MICHPAVE

En los gráficos anteriores se observa una desviación estándar del 50% entre los valores de campo y los valores obtenidos con el programa MICHPAVE.

El tramo evaluado, según el estudio de suelos realizado por CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS esta compuesto por arena limosa y arcillosa (SM-SC). Según AASTHO -1993 la correlación de CBR y el módulo resiliente esta dada por:

$$Mr \text{ (psi)} = 4326 \times \text{LN} (\text{CBR}) + 241$$

En este cuadro se presenta los valores de CBR obtenidos por CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS.

Cuadro N° 5.3 Cuadro de CBR y módulos de resiliencia.

SECTOR	CBR (%)	MR (psi)	
sector I: Zúñiga - Dv. Yauyos - Alis	57+450 - 130+000	20	13 201
	130+000 - 163+100	18	12 745
Sector II: Alis - San José de Quero	163+100 - 220+000	18	12 745
	220+000 - 229+300	5	7 500
Sector III: San José de Quero - Ronchas	229+300 - 248+000	5	7 500
	240+000 - 248+000	15	11 956
	248+000 - 255+185	4	6 000

(Fuente: Consorcio Gestión de carreteras)

Con los valores de módulos de resiliencia obtenidas del programa MICHPAVE se determina los valores del CBR para cada estaca del tramo evaluado.

Cuadro N° 5.4 Cuadro de valores de CBR

Estaca (km)	E0(psi)	MODULOS RESILIENTES		LN(CBR)	CBR %
		E (psi) - SUBRASANTE	E (psi)- BASE		
76+600	7124.10	9032.00	17294.00	2.032	7.629
76+700	7114.70	9084.00	17395.00	2.044	7.721
76+800	7110.10	9148.00	17446.00	2.059	7.836
76+900	7133.60	8959.00	17192.00	2.015	7.501
77+000	7124.10	9032.00	17294.00	2.032	7.629

(Fuente: Elaboración propia)

Cuadro N° 5.5 Cuadro de intervalos de valores de CBR

RANGO DE VALORES DE CBR ESTABLECIDOS POR EL MTC		
So	SUB RASANTE MUY POBRE	CBR <3%
S1	SUB RASANTE POBRE	CBR= 3% - 5%
S2	SUB RASANTE REGULAR	CBR= 6% - 10%
S3	SUB RASANTE BUENA	CBR= 11% - 19%
S4	SUB RASANTE MUY BUENA	CBR >20%

(Fuente: Manual de diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de transito del MTC)

En el cuadro N° 5.4 se presenta los valores del CBR obtenidos con el programa MICHPAVE y comparando con el cuadro N° 5.5 se determina que la subrasante es regular para el tramo evaluado.

CRITERIO DE FALLA DEL PAVIMENTO

Durante la vida útil de la estructura del pavimento se pueden producir dos tipos de fallas, la funcional y la estructural. La falla funcional se deja ver cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, de tal forma que no transporta cómoda y seguramente a los vehículos. La falla estructural esta asociada con la pérdida de cohesión de algunas o todas las capas del pavimento de tal forma que éste no puede soportar las cargas a la que esta sometido.

La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del transito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación.

Para la subrasante se presenta la siguiente expresión.

$$\varepsilon_z = K \times N^{-b} \quad (5.1)$$

Donde:

ε_z : Deformación admisible vertical en la capa superior de la subrasante.

N = Numero admisible de repeticiones de carga.

b, K= Parámetros que dependen del tipo de material de la capa, determinados experimentalmente.

Según el estudio técnico realizado por Consorcio Gestión de Carreteras, el tramo evaluado pertenece a una carretera de 3º orden. Cuyo índice medio diario en horas punta es de 27 vehículos por día.

A continuación se presenta la ecuación (5.2) para carreteras de bajo volumen de transito. (Fuente: Libro Diseño Racional de Pavimentos pag. 355)

$$\varepsilon_z = 0.016 \times N^{-0.222} \quad (5.2)$$

En el cuadro siguiente se presenta el número admisible de repeticiones de carga(N) para el tramo evaluado.

Cuadro N° 5.6 Cuadro de número de repeticiones de carga.

Estaca (km)	Deflexión Admisible (m)	Nº de repeticiones	IMD	Periodo años
		N		
76+600	0.00187	15828.95	27.00	1.6
76+700	0.00182	17884.27	27.00	1.8
76+800	0.00181	18333.68	27.00	1.9
76+900	0.00198	12235.85	27.00	1.3
77+000	0.00198	12152.69	27.00	1.3

(Fuente: Elaboración propia)

En el cuadro N° 5.6 para cada estaca del tramo evaluado se presenta el periodo en años para el cual el pavimento presentará ahuellamiento o agrietamientos.

CONCLUSIONES

1. Los valores de CBR de la subrasante obtenidos empleando el método AASHTO – 1993, son inferiores a los valores obtenidos por el CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS resultando un rango de CBR a nivel de subrasante regular para el tramo evaluado.
2. En el cuadro N° 5.2, estacas Km 76+800 y Km 77+000 presenta una diferencia representativa entre módulos de elasticidad a nivel de subrasante obtenidas con MEF y los datos obtenidos con el modelo de Hogg, debido a la ineficiencia en la toma de datos de campo.
3. En el cuadro N° 5.6, se concluye que el tramo evaluado de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca se empezará a realizar un mantenimiento rutinario dentro de un periodo promedio de un año y medio, para que el pavimento se conserve estructuralmente.
4. El tramo evaluado de la carretera en estudio, presenta tratamiento superficial Slurry Seal, este no aporta estructuralmente al pavimento, pero ayuda a mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Motivo por el cual no se considera para el modelamiento del pavimento.
5. El método de los elementos finitos se presenta como alternativa de solución para el modelamiento de pavimentos.
6. Cada elemento discretizado en elementos bidimensionales a la cual a sido modelado el pavimento, tiene su propio módulo de elasticidad.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable utilizar ensayos no destructivos como la Viga Benkelman, FWD, para la evaluación estructural del pavimento en carreteras existentes, por que no alteran el equilibrio, la integridad y funcionalidad del sistema.
2. Se recomienda modelar la estructura del pavimento, discretizando al elemento en mallas mas finas cerca de la carga.
3. Se recomienda utilizar programas de elementos finitos para determinar los módulos resilientes de cada elemento discretizado. Este tipo de programas consideran análisis lineal y no lineal del pavimento.
4. Se debe programar tareas de evaluación de niveles de servicio, mantenimiento rutinario y periódico para garantizar que el pavimento se conserve estructuralmente y funcionalmente eficiente durante su período de vida.

BIBLIOGRAFÍA

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

ANEXOS

ANEXO 01

CUADRO DE ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EN ESTUDIO.

ANEXO 02

CURVAS DE DEFORMACIONES OBTENIDAS DEL PROGRAMA MICHPAVE

ANEXO 03

RESULTADOS DEL PROGRAMA MICHPAVE.

ANEXO 04

TABLA FINAL DE MÓDULOS RESILIENTES PARA CADA CAPA DEL PAVIMENTO

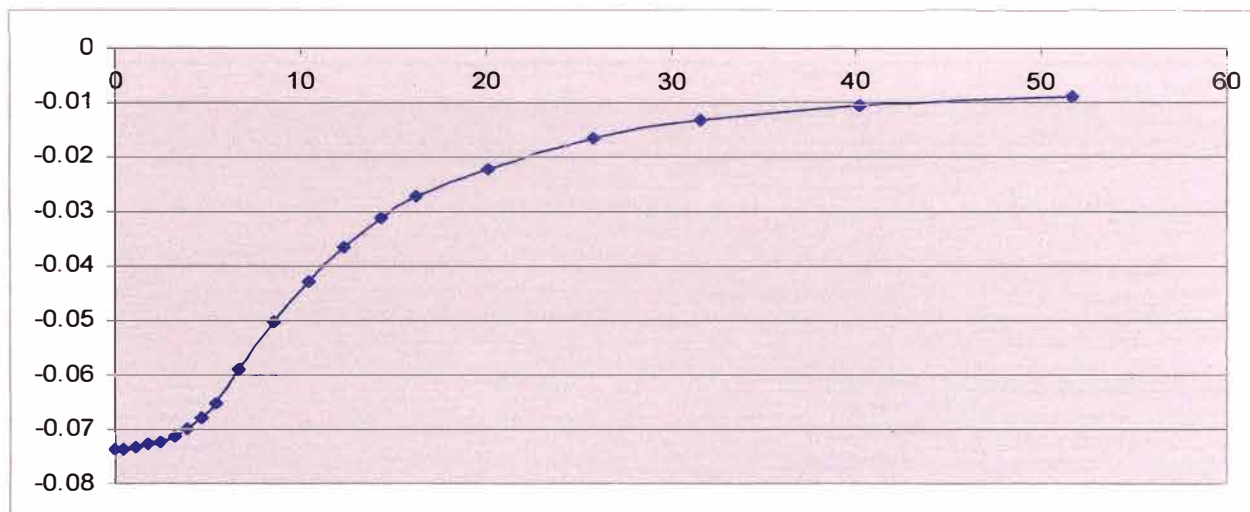
ANEXO 01**CUADRO DE ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EN ESTUDIO.**

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

Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras

ANEXO 02**CURVAS DE DEFORMACIONES OBTENIDAS DEL PROGRAMA MICHPAVE
KM 76+600****Sección horizontal 1 a una distancia de 0 pulgadas.**

Radio Distancia (pulgadas)	Vert. Desplaz. (pulgadas)
0	-0.0736
0.4	-0.07352
1.1	-0.07327
1.8	-0.07283
2.5	-0.07218
3.2	-0.07128
3.9	-0.07
4.7	-0.06813
5.4	-0.06532
6.7	-0.05896
8.6	-0.05031
10.5	-0.04298
12.4	-0.03668
14.4	-0.03136
16.3	-0.02726
20.1	-0.02227
25.8	-0.01679
31.6	-0.01328
40.2	-0.0106
51.7	-0.008848

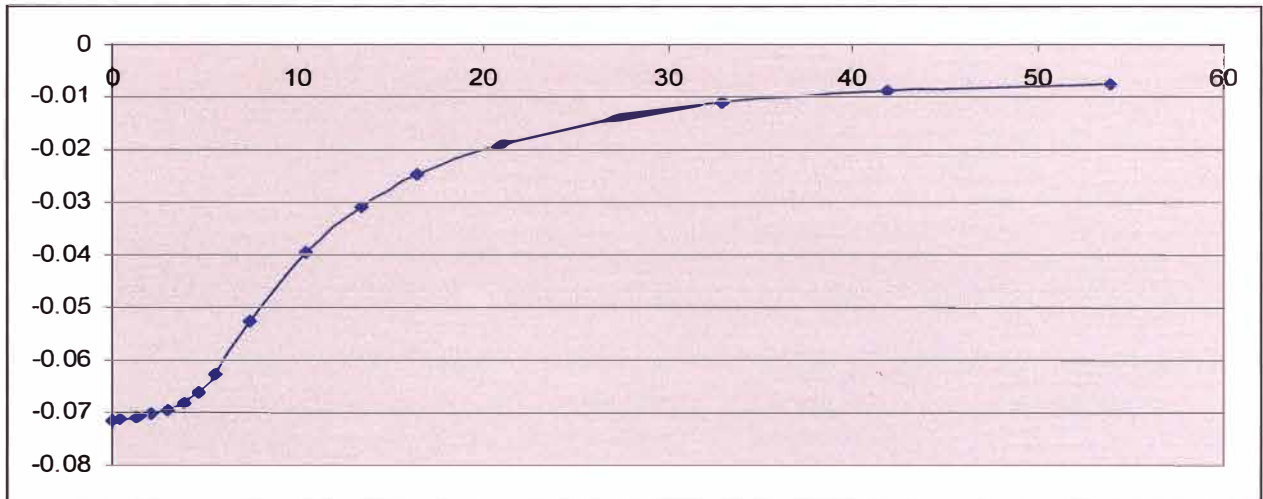


Grafica: Deformaciones Vs radios.

KM 76+700

Sección horizontal 1 a una distancia de 0 pulgadas.

Radio Distancia (pulgadas)	Vert. Desplaz. (pulgadas)
0	-0.0716
0.4	-0.0715
1.3	-0.0712
2.1	-0.0705
3	-0.0696
3.9	-0.0682
4.7	-0.0663
5.6	-0.0629
7.5	-0.0526
10.5	-0.0395
13.5	-0.03095
16.5	-0.02484
21	-0.01911
27	-0.01411
32.9	-0.0112
41.9	-0.00894
53.9	-0.00749

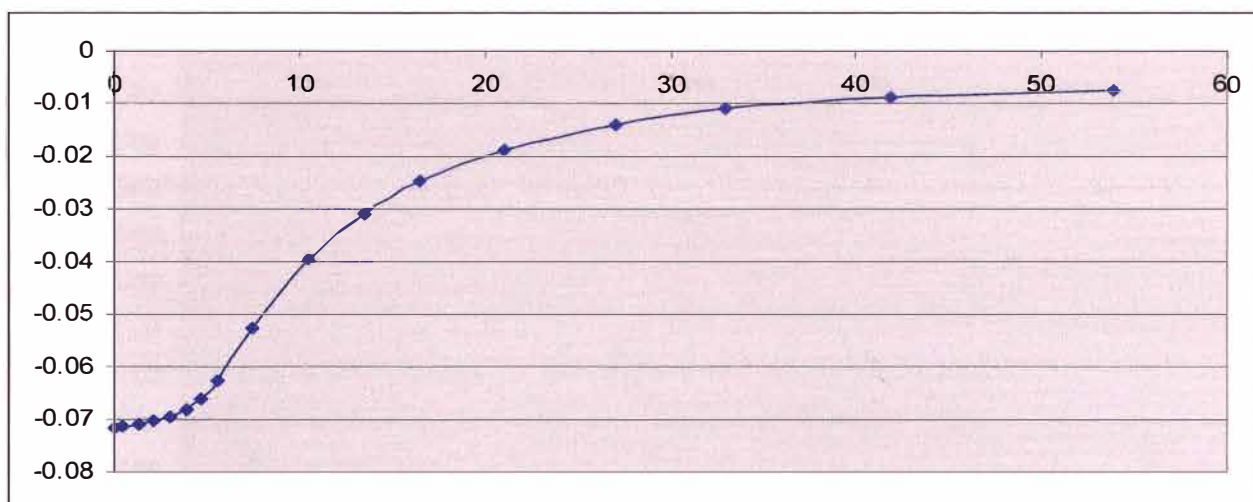


Grafica: Deformaciones Vs radios.

KM 76+800

Sección horizontal 1 a una distancia de 0 pulgadas.

Radio Distancia (pulgadas)	Vert. Desplaz. (pulgadas)
0	-0.0716
0.4	-0.0715
1.3	-0.0712
2.1	-0.0705
3	-0.0696
3.9	-0.0682
4.7	-0.0663
5.6	-0.0629
7.5	-0.0526
10.5	-0.0395
13.5	-0.03095
16.5	-0.02484
21	-0.01911
27	-0.01411
32.9	-0.0112
41.9	-0.00894
53.9	-0.00749

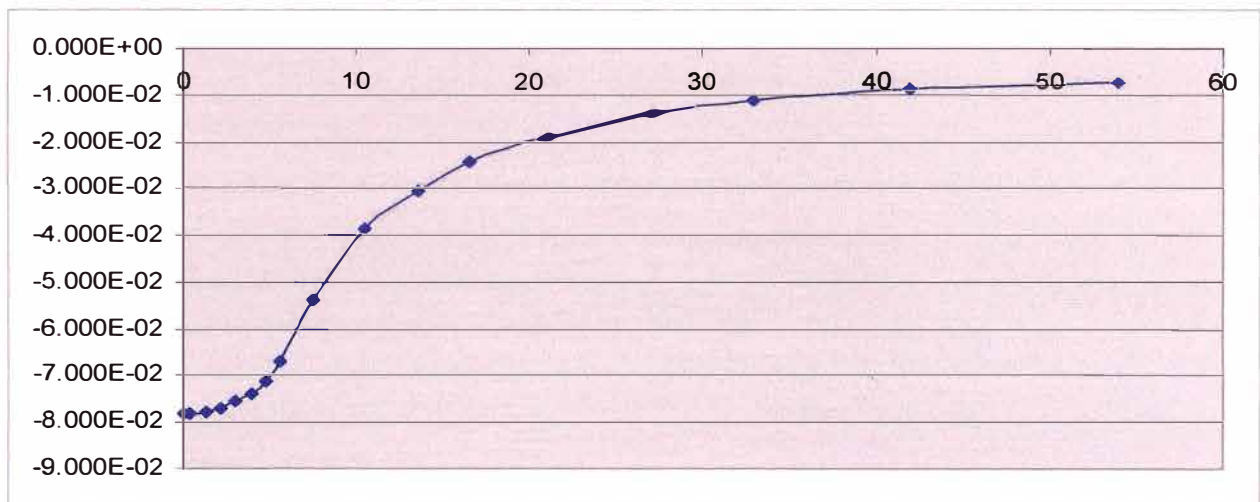


Grafica: Deformaciones Vs radios.

KM 76+900

Sección horizontal 1 a una distancia de 0 pulgadas.

Radio Distancia (pulgadas)	Vert. Desplaz. (pulgadas)
0	-7.832E-02
0.4	-7.820E-02
1.3	-7.780E-02
2.1	-7.704E-02
3	-7.584E-02
3.9	-7.405E-02
4.7	-7.150E-02
5.6	-6.692E-02
7.5	-5.380E-02
10.5	-3.886E-02
13.5	-3.046E-02
16.5	-2.453E-02
21	-1.893E-02
27	-1.400E-02
32.9	-1.114E-02
41.9	-8.910E-03
53.9	-7.474E-03

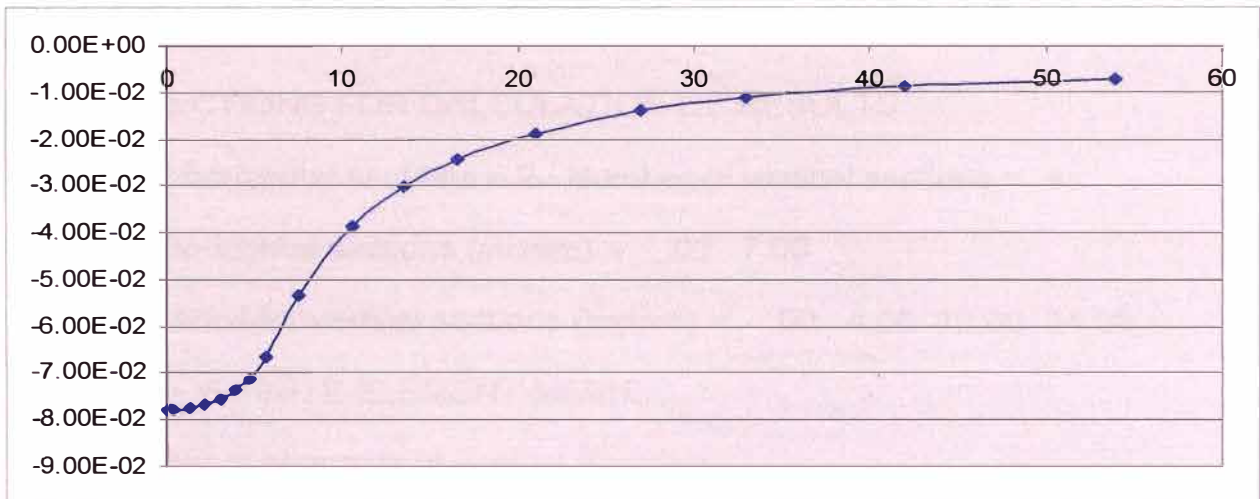


Grafica: Deformaciones Vs radios.

KM 77+000

Sección horizontal 1 a una distancia de 0 pulgadas.

Radio Distancia (pulgadas)	Vert. Desplaz. (pulgadas)
0	-7.81E-02
0.4	-7.79E-02
1.3	-7.75E-02
2.1	-7.68E-02
3	-7.56E-02
3.9	-7.38E-02
4.7	-7.13E-02
5.6	-6.68E-02
7.5	-5.37E-02
10.5	-3.88E-02
13.5	-3.05E-02
16.5	-2.45E-02
21	-1.89E-02
27	-1.40E-02
32.9	-1.11E-02
41.9	-8.92E-03
53.9	-7.48E-03



ANEXO 03

RESULTADOS DEL PROGRAMA MICHPAVE.

FILENAMES

Data file used for this run: PUNTO1.DAT
 Name of this output file : SALIDA1.OUT

INITIAL DATA

Number of layers = 2
 Wheel load = 9020.0 lb.
 Tire pressure = 80.00 psi.
 Radius of loaded area (a) = 5.991 inches

LAYER TYPE

1 asphalt; 2 granular; 3 cohesive
 Layer number (from top) Type (1,2,or3)
 1 2
 2 2

MATERIAL PROPERTIES GRANULAR MATERIAL PROPERTIES

Layer	Name of Layer	Thick. inches	Ko	K1 (psi)	K2 (psf)	PR.	Cohesion	Phi (degree)	Density (pcf)
1	BASE G. EQ	7.6	.50	1650.0	.60	.30	0.	30.0	152.0
2	SUBRASANTE	43.0	.50	1620.0	.62	.40	0.	30.0	150.0

Layer 2 actually semi-infinite, but thickness controls depth to which displacements/stresses are computed.

CROSS SECTIONS FOR CALCULATION OF RESULTS

Number of horizontal sections = 2 Number of vertical sections = 4

Depth for horizontal sections (inches) = .00 7.00

Radial distance for vertical sections (inches) = .00 4.00 12.00 24.00

DIVISION OF FINITE ELEMENT MESH

Number of elements in vertical direction

Layer	Thickness	Number of elements
1. BASE G. EQ	7.6	10
2. SUBRASANTE	43.0	7

Number of elements in horizontal direction

Range (a: contact radius)	Number of elements
1. R = 0 - a	7
2. R = a - 3a	4
3. R = 3a - 6a	3
4. R = 6a - 10a	2

FINAL DISPLACEMENTS, STRESSES AND STRAINS

Horizontal section 1 at depth of .00 inches

Displacements		Stresses		Strains				
R. dist.	R. disp.	Vert. disp.	R. str.	Tang. str.	Vert. str.	Shear str.	R. stns.	Tang.
.0	.0000E+00	-.7159E-01						
.4	-.2510E-03	-.7149E-01		-71.07		-71.070	-80.000	
1.3	-.7492E-03	-.7117E-01		-70.45		-70.627	-80.000	
2.1	-.1249E-02	-.7054E-01		-71.07		-70.875	-80.000	
3.0	-.1761E-02	-.6958E-01		-72.34		-71.765	-80.000	
3.9	-.2307E-02	-.6819E-01		-75.05		-72.979	-80.000	
4.7	-.2883E-02	-.6626E-01		-78.62		-76.735	-80.000	
5.6	-.3488E-02	-.6298E-01		-61.68		-58.994	-69.352	
7.5	-.5026E-02	-.5266E-01		-13.92		-15.031	-7.194	
10.5	-.6797E-02	-.3954E-01		-.76		-.033	-.023	
13.5	-.7401E-02	-.3097E-01		-.20		-.043	-.031	
16.5	-.7029E-02	-.2485E-01		-.01		-.033	-.001	
21.0	-.5837E-02	-.1912E-01		-.01		-.034	.000	
27.0	-.4349E-02	-.1410E-01		-.01		-.033	.000	
32.9	-.3060E-02	-.1119E-01		-.01		-.033	.000	
41.9	-.1815E-02	-.8936E-02		-.01		-.034	.000	
53.9	-.5678E-03	-.7484E-02		-.01		-.011	-.034	

ANEXO 04

TABLA FINAL DE MODULOS RESILIENTES PARA CADA CAPA.

PAVIMET.	CAPAS	INTERVALO (0 - A)						
		1	2	3	4	5	6	7
BASE	1	2.44E+04	2.43E+04	2.44E+04	2.45E+04	2.44E+04	2.47E+04	2.07E+04
	2	2.29E+04	2.29E+04	2.28E+04	2.25E+04	2.22E+04	2.09E+04	1.72E+04
	3	2.16E+04	2.15E+04	2.13E+04	2.09E+04	2.04E+04	1.91E+04	1.61E+04
	4	2.06E+04	2.05E+04	2.03E+04	2.00E+04	1.93E+04	1.78E+04	1.52E+04
SUB RASANTE	5	1.75E+07	1.73E+04	1.69E+04	1.64E+04	1.55E+04	1.43E+04	1.29E+04
	6	1.69E+04	1.67E+04	1.64E+04	1.58E+04	1.50E+04	1.39E+04	1.27E+04
	7	2.04E+04	2.01E+04	1.95E+04	1.87E+04	1.77E+04	1.65E+04	1.50E+04
	8	1.54E+04	1.54E+04	1.41E+04	1.21E+04	1.18E+04	1.15E+04	1.11E+04

PAVIMENTO	CAPAS	INTERVALO (A - 3A)			
		8	9	10	11
BASE	1	9.41E+03	1.28E+03	1.16E+03	4.59E+02
	2	7.56E+03	1.97E+03	1.37E+03	8.80E+03
	3	7.98E+03	2.12E+03	1.76E+03	1.30E+03
	4	8.38E+03	2.63E+03	1.68E+03	1.64E+03
SUB RASANTE	5	9.38E+03	4.84E+03	2.76E+03	2.27E+03
	6	9.49E+03	5.13E+03	2.96E+03	2.49E+03
	7	1.23E+04	7.95E+03	5.14E+03	3.76E+03
	8	1.03E+04	8.40E+03	6.57E+03	5.18E+03

PAVIMENTO	CAPAS	INTERVALO (3A - 6A)		
		12	13	14
BASE	1	4.75E+02	4.59E+02	4.58E+02
	2	7.96E+02	7.94E+02	7.62E+02
	3	1.04E+03	1.02E+03	9.65E+02
	4	1.26E+03	1.20E+03	1.13E+03
SUB RASANTE	5	2.30E+03	1.92E+03	1.78E+03
	6	2.46E+03	2.06E+03	1.90E+03
	7	3.35E+03	2.77E+03	2.46E+03
	8	4.56E+03	4.04E+03	3.60E+03

PAVIMENTO	CAPAS	INTERVALO (6A - 10A)	
		15	16
BASE	1	4.27E+02	3.79E+02
	2	7.23E+02	6.78E+02
	3	9.26E+02	8.84E+02
	4	1.09E+03	1.05E+03
SUB RASANTE	5	1.71E+03	1.66E+03
	6	1.82E+03	1.77E+03
	7	2.28E+03	2.19E+03
	8	3.31E+03	3.16E+03