

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA
CAÑETE - YAUYOS – CHUPACA
CON VIGA BENKELMAN MÉTODO MATEMÁTICO
TRAMO km 94+000 - km 99+000

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

CARLOS ENRIQUE ARROYO DIAZ

Lima – Perú

2009

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
LISTA DE CUADROS.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I.- GENERALIDADES.....	13
1.1. ANTECEDENTES.....	13
1.2. UBICACIÓN DE LA CARRETERA.....	14
1.3. TRAMO EVALUADO KM. 94+000 – KM. 99+000.....	16
1.4. ESTUDIOS REALIZADOS EN EL TRAMO EVALUADO.....	16
1.5. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y ESTRATIGRAFÍA.....	16
1.6. CAPACIDAD RELATIVA DE SOPORTE DE LOS SUELOS.....	18
1.7. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.....	19
CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS.....	20
2.1.1 <i>Sistemas elásticos de capas</i>	20
2.1.2 <i>Sistemas no lineales de capas</i>	20
2.1.3 <i>Sistemas lineales viscoelásticos</i>	20
2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	21
2.2.1 <i>Viga Benkelman</i>	21
2.2.2 <i>Dynaflec</i>	21
2.2.3 <i>Road Rater</i>	22
2.2.4 <i>RDD</i>	23
2.2.5 <i>FWD</i>	23
2.2.6 <i>KUAB – FWD</i>	24
CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO.....	25
3.1 VIGA BENKELMAN.....	25
3.1.1 <i>Metodología de medición de deflexión con Viga Benkelman</i>	26
3.1.2 <i>Equipo requerido</i>	28
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	29
3.2.1 <i>Definiciones previas</i>	29

a) Modulo Resilente.....	29
b) Ratio de Poisson.....	29
c) Modulo de Elasticidad.....	29
d) Peso unitario.....	29
e) Relación de soporte de California.....	29
f) Coeficiente de expansión térmica.....	30
3.2.2 Modelos Matemáticos.....	30
a) Modelo Básico.....	30
b) Modelo de Maxwell.....	31
c) Modelo de Kelvin.....	31
d) Modelo de Burgers.....	31
e) Modelo Generalizado.....	31
3.3 MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....	32
3.3.1 Modelo de Boussinesq.....	32
3.3.2 Modelo de Hogg.....	33
3.3.3 Modelo de Westergaard.....	35
3.3.4 Modelos Bicapas.....	35
3.3.5 Modelos Multicapas.....	36
3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS.....	36
3.4.1 Fórmula de Boussinesq.....	36
3.4.2 Fórmula de Westergaard.....	37
3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber generalizada.....	37
3.4.4 Fórmula de Odemark.....	38
3.4.5 Método de Elementos Finitos.....	39
a) Descripción general de un modelo de Elementos Finitos.....	39
b) Procedimiento de Generación de Sistema de Capas.....	42
c) Criterio del Backcalculation.....	42
CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO KM. 94+000 – KM. 99+000.....	43
4.1 APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.....	43
4.1.1 Procedimiento de medición.....	43
4.2 APLICACIÓN CON MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	46
CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48

5.1. PUNTOS ANALIZADOS.....	51
5.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	62
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXOS.....	66

RESUMEN

El Presente Informe está orientado a evaluar estructuralmente el pavimento de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca del tramo Km 94+000 – Km 99+000, mediante la medición de deflexiones elásticas empleando el deflectógrafo conocido como “Viga Benkelman”.

Durante la salida de campo a la carretera en estudio, se tomaron medidas de deflexiones en la carretera, la cuales al ser ingresadas al modelo de Hogg, ayudan a calcular el módulo de elasticidad de la subrasante (E_o), el módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica (E^*), así como la longitud característica (L_o); a partir de estos datos se realiza la evaluación de la carretera, por lo que se hace uso de un programa de elementos finitos, para hallar las deflexiones teóricas.

Al realizar el análisis de las deflexiones, se tomaran diferentes valores de módulos de elasticidad, hasta encontrar un módulo de elasticidad que aproxime las deflexiones teóricas, con las deflexiones de campo, para lo cual se considera como criterio el tener una desviación estándar menor al 30%, entre las curvas teóricas con las de campo.

Al encontrar un módulo de elasticidad aproximado, se obtendrá el valor de CBR, del punto analizado y comparando este valor con los intervalos de CBR proporcionados por el MTC, se podrá definir el estado estructural de la carretera.

LISTA DE CUADROS

1.	Cuadro N° 1.1.	Altitud de las localidades que atraviesa la carretera ..	15
2.	Cuadro N° 1.2.	Características del suelo tramo: km 94+000 – km 99+000.....	17
3.	Cuadro N° 1.3.	Ensayos realizados en el tramo: km 94+000 - km 99+000.....	17
4.	Cuadro N° 1.4.	Valores de CBR obtenidos de acuerdo al tipo de suelo.....	18
5.	Cuadro N° 1.5.	Estructura del pavimento.....	19
6.	Cuadro N° 4.1.	Datos registrados en campo.....	46
7.	Cuadro N° 5.1.	Valores de E^* y E_o	48
8.	Cuadro N° 5.2.	Módulos de elasticidad E y E_o obtenidos con el modelo de Hogg.....	51
9.	Cuadro N° 5.3.	Módulos de elasticidad E y E_o según kilometraje....	51
10.	Cuadro N° 5.4.	Desplazamientos en km 97+800 (método I).....	52
11.	Cuadro N° 5.5.	Módulos de elasticidad en km 97+800 (método I)...	52
12.	Cuadro N° 5.6.	Desplazamientos en km 97+900 (método I).....	53
13.	Cuadro N° 5.7.	Módulos de elasticidad en km 97+900 (método I)...	53
14.	Cuadro N° 5.8.	Desplazamientos en km 98+000 (método I).....	54
15.	Cuadro N° 5.9.	Módulos de elasticidad en km 98+000 (método I)...	54
16.	Cuadro N° 5.10.	Desplazamientos en km 98+100 (método I).....	55
17.	Cuadro N° 5.11.	Módulos de elasticidad en km 98+100 (método I)...	55
10.	Cuadro N° 5.12.	Desplazamientos en km 98+200 (método I).....	56
11.	Cuadro N° 5.13.	Módulos de elasticidad en km 98+200 (método I)...	56
10.	Cuadro N° 5.14.	Desplazamientos en km 97+800 (método II).....	57
11.	Cuadro N° 5.15.	Módulos de elasticidad en km 97+800 (método II)...	57
12.	Cuadro N° 5.16.	Desplazamientos en km 97+900 (método II).....	58
13.	Cuadro N° 5.17.	Módulos de elasticidad en km 97+900 (método II)...	58
14.	Cuadro N° 5.18.	Desplazamientos en km 98+000 (método II).....	59
15.	Cuadro N° 5.19.	Módulos de elasticidad en km 98+000 (método II)...	59
16.	Cuadro N° 5.20.	Desplazamientos en km 98+100 (método II).....	60
17.	Cuadro N° 5.21.	Módulos de elasticidad en km 98+100 (método II)...	60
10.	Cuadro N° 5.22.	Desplazamientos en km 98+200 (método II).....	61
11.	Cuadro N° 5.23.	Módulos de elasticidad en km 98+200 (método II)...	61
12.	Cuadro N° 5.24.	Rango de valores de CBR.....	62

LISTA DE FIGURAS

1.	Figura N° 1.1.	RUTA 22 “Cañete-Yauyos-Chupaca”.	14
2.	Figura N° 1.2.	Desarrollo altitudinal de la carretera.	15
3.	Figura N° 2.1.	Viga Benkelman en uso.	21
4.	Figura N° 2.2.	Equipo Dynaflect.	22
5.	Figura N° 2.3.	Equipo Road Rater.	22
6.	Figura N° 2.4.	Deflectometro dinamico de balanceo.	23
7.	Figura N° 2.5.	Equipo FWD.	23
8.	Figura N° 2.6.	Equipo KUAB-FWD.	24
9.	Figura N° 3.1.	Viga Benkelman.	25
10.	Figura N° 3.2.	Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman.	25
11.	Figura N° 3.3.	Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos de Viga Benkelman.	26
12.	Figura N° 3.4.	Esquema del proceso de medición de la Viga Benkelman.	27
13.	Figura N° 3.5.	Viga Benkelman y camión para la toma de datos.	28
14.	Figura N° 3.6.	Modelos matemáticos	30
15.	Figura N° 3.7.	Esfuerzos provocados en un punto.	32
16.	Figura N° 3.8.	Modelo de Hogg.	34
17.	Figura N° 3.9.	Modelo de Westergaard.	35
18.	Figura N° 3.10.	Modelo multicapas.	36
19.	Figura N° 3.11.	Representación de un masivo semi infinito.	36
20.	Figura N° 3.12.	Multicapa propuesto con la formula de Palmer y Baber.	38
21.	Figura N° 3.13.	Multicapa propuesto en la formula de Odemark.	38
22.	Figura N° 3.14.	Modelo de elementos finitos.	39
23.	Figura N° 3.15.	Vista en planta del enmallado de un pavimento.	40
24.	Figura N° 3.16.	Vista en elevación del enmallado de un pavimento.	40
25.	Figura N° 3.17.	Vista en 3D de elementos de 20 nodos.	41
26.	Figura N° 4.1.	Varilla de ubicación de puntos para toma de datos.	44
27.	Figura N° 4.2.	Lectura de deflexiones.	45
28.	Figura N° 4.3.	Medida de temperatura del asfalto.	45

29. Figura N° 4.4.	Idealización de las capas del pavimento.....	47
30. Figura N° 4.5.	Refinamiento de la malla para el analisis del pavimento.....	47
31. Figura N° 5.1.	Ingreso de datos de la geometria del pavimento.....	48
32. Figura N° 5.2.	Ingreso de cargas aplicadas al pavimento.....	49
33. Figura N° 5.3.	Ingreso de datos para el enmallado del pavimento....	49
34. Figura N° 5.4.	Desplazamiento en el punto de mayor deflexion.....	50
35. Figura N° 5.5.	Deformacion de la malla debido a las cargas aplicadas.....	50
36. Figura N° 5.6.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+800 (método I).....	52
37. Figura N° 5.7.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+900 (método I).....	53
38. Figura N° 5.8.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+000 (método I).....	54
39. Figura N° 5.9.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+100 (método I).....	55
40. Figura N° 5.10.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+200 (método I).....	56
41. Figura N° 5.11.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+800 (método II).....	57
42. Figura N° 5.12.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+900 (método II).....	58
43. Figura N° 5.13.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+000 (método II).....	59
44. Figura N° 5.14.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+100 (método II).....	60
45. Figura N° 5.15.	Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+200 (método II).....	61

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE 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.
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
MCCP	Mezclas de Concreto con Cemento Portland
M_r	Módulo Resiliente
NTP	Norma Técnica Peruana
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
PROMCEPRI	Promoción de Concesiones Privadas
RDD	Deflectómetro dinámico del balanceo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
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
D_{rig}	Rigidez del Pavimento
E_s	Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq.
E*	Módulo de elasticidad del Pavimento
E_o	Módulo de elasticidad de la Subrasante o Módulo de elasticidad del modelo de Maxwell
E_i	Módulo de elasticidad del modelo de Kelvin
E₁	Módulo de elasticidad de la capa 1
E₂	Módulo de elasticidad de la capa 2

H	Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.
h₂	Espesor de capa subrasante.
h₁	Espesor de Pavimento.
i	Número entero mayor igual que cero.
J₀	Función de Bessel de primera especie y orden 0.
J₁	Función de Bessel de primera especie y orden 1.
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.
L₀	Longitud Característica.
m	Variable de integración.
P	Carga.
q₀	Carga distribuida por efecto de llanta en un radio A.
R	Distancia a la que se mide la deflexión D _R .
μ₀	Ratio de Poisson de la capa subarasante.
μ₁	Ratio de Poisson del Pavimento.
T_i	Tiempo de retardo del iesimo modelo de Maxwell.
T₀	Tiempo de retardo del modelo de Maxwell.
T₁	Tiempo de retardo del modelo de Kelvin.
t	Tiempo.
σ	Esfuerzo.
σ₀	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell.
σ_i	Esfuerzo del modelo de Kelvin.
ε	Deformación unitaria.
δ	Desplazamiento vertical unitario.
λ	Viscosidad.
λ₀	Viscosidad del modelo de Maxwell.
λ₁	Viscosidad del modelo de Kelvin.
θ	Primer esfuerzo Invariante.
ρ	Presión vertical.
∇	Operador nabra.
Δ(0, r)	Desplazamiento a una distancia r y profundidad z=0.

INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, como parte del Curso de Titulación del año 2009, programo el desarrollo del curso en función del estudio de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, dado que el Ministerio de Transportes y Comunicaciones viene desarrollando su política de mantenimiento y conservación de la Red Vial Nacional; es así que a través del Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional - PROVIAS NACIONAL está tercerizando estos trabajos por Niveles de Servicio.

De esta forma se busca mantener las vías nacionales con una adecuada serviciabilidad, interviniendo en forma oportuna y metódica mediante actividades de conservación rutinaria, conservación periódica, reparaciones menores y atención de emergencias viales.

Este Informe de Suficiencia enmarcado en el Convenio UNI-MTC para los trabajos de Monitoreo de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, tramo km 94+00 al km 99+000, tiene por objetivo evaluar 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 deformaciones del mismo, contribuyendo así a la elaboración de un manual para medición de rugosidad en vías de bajo volumen de tránsito.

El presente informe se divide en cuatro capítulos, los cuales se detallan a continuación:

Capítulo 1: *Generalidades.*- Este capítulo nos sirve como antecedente para tener conocimiento sobre las características y la situación actual de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca en el tramo km 94+00 al km 99+000.

Capítulo 2: *Estado del Arte.*- En este capítulo se desarrollaran los fundamentos teóricos y/o conceptuales, como tipos de análisis (elásticos, de capas, viscoelásticos), ensayos no destructivos para la toma de deflexiones de la carpeta asfáltica debido al paso de una carga.

Capítulo 3: *Marco Teórico*.- En este capítulo se describe el procedimiento de uso de la viga benkelman, así como el desarrollo de métodos matemáticos para el análisis de deflexiones de pavimentos.

Capítulo 4: *Aplicación al Tramo km 94+000 al km 99+000*.- En este capítulo se presenta la aplicación de la Viga Benkelman y el método de elementos finitos para calcular los módulos de Elasticidad del pavimento y la subrasante.

Capítulo 5: *Análisis e interpretación de Resultados*.- En este capítulo se analizarán todos los resultados obtenidos producto de la evaluación realizada, los cuales permitirán dar conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I.- GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.

La carretera Cañete – Yauyos – Chupaca perteneciente a la Ruta N°22 de la Red Vial Nacional (hoy corredor vial N° 13), con una extensión de 281.73 km, forma parte del programa de desarrollo vial “Proyecto Perú”, se encuentra entre los departamentos de Lima y Junín, abarcando las provincias de Cañete, Yauyos y Chupaca.

La ejecución de la carretera se desarrolla cronológicamente de la siguiente manera:

- 1920-1930, se inicio de la construcción de durante el gobierno de Sr. Augusto B. Leguía.
- 1940, durante el gobierno de Manuel Prado Ugarteche, se desarrolla el tramo Cañete-Yauyos.
- 1954, El Ministerio de Fomento inicia la construcción del tramo Yauyos-Tomas, culminándose esos trabajos en el año 1957.
- 2003, debido al escaso mantenimiento y rehabilitación de la vía, el Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) bajo la dirección de PROVIAS NACIONAL encargó la elaboración del Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Carretera Ruta 22, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca
- 2005, se elabora el Estudio de Factibilidad del Proyecto Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera a cargo del Consultor AYESA – ALPHA CONSULT.
- 2007, la Carretera Cañete - Dv. Yauyos - Chupaca se inserta en el “Proyecto Perú” que es un programa bajo responsabilidad de PROVIAS NACIONAL

El programa “Proyecto Perú” está diseñado para mejorar las vías de integración de corredores económicos, con el fin de elevar el nivel de competitividad de las zonas rurales en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal. Establece un sistema de contratación de las actividades de conservación de la infraestructura vial por niveles de servicio y por plazos iguales o superiores a tres años, que implican el concepto de “transferencia de riesgo” al Contratista.

1.2 UBICACIÓN DE LA CARRETERA.

La carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, se encuentra ubicado en la región central del país, abarcando los departamentos de Lima y Junín, pasando la vía por los poblados de: Imperial, Nuevo Imperial, La Encañada, Caltopa, Socsi, Incahuasi, Jita, Lunahuana, Jacayita, Jacaya, Romaní, Pacaran, Zuñiga, San Juan, San Jerónimo, Huayampi, Catahuasi, Canchan, Chichicay, Capillucas, Calachota, Pte. Auco, Dv. A Yauyos (Magdalena), Huayña, Tinco Huantan, LLapay, Tinco Alis, Alis, Tomas Huancachi, Tinco Yauricocha, Abra Chaucha, Abra Negro Bueno (Lima); así como San Jose de Quero, Chaquicocha, Collpa, Roncha, Angasmayo, Huarisca y Chupaca (Junín); pertenecientes a la ruta 22, la cual es una carretera transversal que va de la costa a la sierra y viceversa. Contando con una altitud que varía entre los 71 m.s.n.m. (Cañete) hasta los 4751 m.s.n.m. en el punto más alto (Abra Chaucha) y terminando en los 3270 m.s.n.m. (Chupaca). El proyecto abarca las Provincias de Cañete y Yauyos en Lima, Concepción y Chupaca en Junín, y tiene su ámbito de influencia en un entorno de 2.5 km a ambos lados de la vía existente abarcando diversos Distritos y poblados.

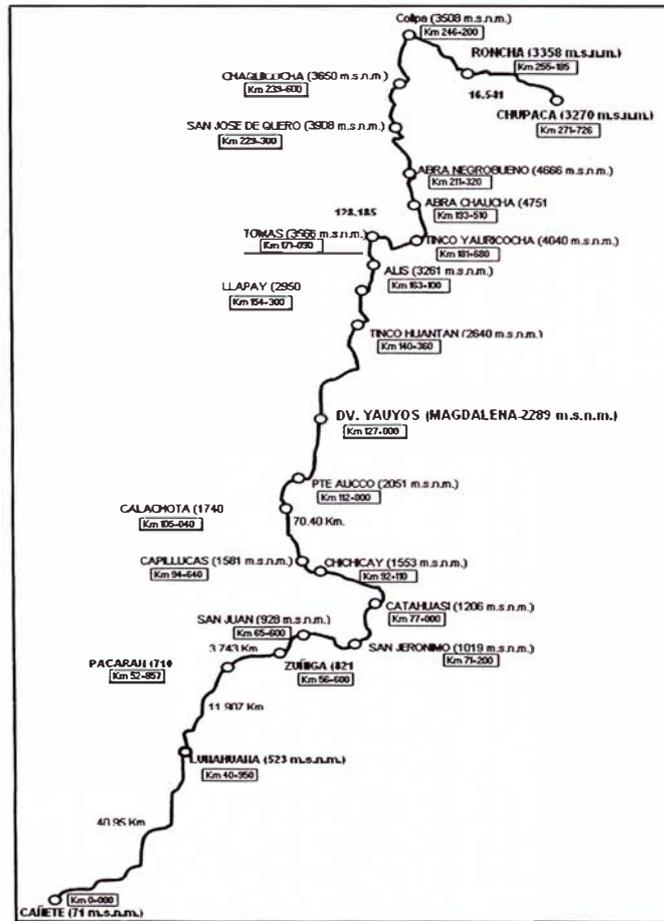


Fuente: www.proviasnac.gob.pe

Figura 1.1: RUTA 22 "Cañete-Yauyos-Chupaca"

Cuadro 1.1: Altitud de las localidades que atraviesa la carretera.

Región	Localidad	km	msnm
Yunga 500 msnm - 2300 msnm	Zúñiga	56+600	821
	Catahuasi	77+000	1206
	Capillucas	94+640	1581
	Calachota	105+040	1740
	Magdalena	127+000	2289
Quechua 2300 msnm - 3500 msnm	Tinco Huantan	140+360	2640
	Llapay	154+300	2950
	Alis	163+100	3261
	Ronchas	255+185	3358
Suni o Jalca 3500 msnm - 4000 msnm	Tomas	171+090	3566
	San José de Quero	229+300	3908
	Chaquicocha	239+600	3650
	Collpa	246+200	3508
Puna 4000 msnm - 4800 msnm	Tinco Yauricocha	181+680	4040
	Abra Chaucha	193+510	4751
	Abra Negro Bueno	211+320	4666



Fuente: PROVIAS

Figura 1.2: Desarrollo altitudinal de la carretera

1.3 TRAMO EVALUADO km 94+000 – km 99+000.

Inicio: Capillucas km 94+000 Término: Calachota km 99+000

Altitud prom: 1600 msnm

Temperatura Mínima: 12°C Temperatura Máxima: 29°C

Época de Lluvias: Diciembre – Marzo.

Años de Servicios: 52 años.

Valor de CBR (95%): 20

Coordenadas UTM del punto de inicio: 395041 E, 8595955 S.

Coordenadas UTM del punto de final: 395259 E, 8601794 S.

Contratista: Consorcio Gestión de Carreteras.

Supervisor: Provias Nacional.

1.4 ESTUDIOS REALIZADOS EN EL TRAMO EVALUADO.

Los trabajos de campo consistieron en la ejecución de prospecciones (calicatas) en la plataforma vial, ubicadas cada 1 km en el sector km 57+390 – km 130+000; de donde se obtuvieron muestras representativas de todos los estratos, las que fueron ensayadas en el laboratorio de campo del Consorcio Gestión de Carreteras. Los resultados obtenidos han sido analizados en gabinete, de donde finalmente se ha establecido las acciones técnicas que se describen más adelante.

A las muestras tomadas se les han efectuado los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM C-136)
- Límites de consistencia (ASTM D-4318)
Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad
- Clasificación SUCS (ASTM D-2487)
- Clasificación para vías de transportes (AASHTO) (ASTM D-3282)
- Contenido de humedad (ASTM D-2216)
- Proctor modificado (ASTM D-1557)
- California Bearing Ratio (CBR) (ASTM D-1883)

1.5 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y ESTRATIGRAFÍA

km 94+000 – km 96+600.

En este sector mayoritariamente se tiene mayoritariamente suelos gravosos que en el sistema SUCS clasifican como GC-GM, mientras que en el sistema

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA CANETE – YAUYOS - CHUPACA CON VIGA BENKELMAN

MÉTODO MATEMÁTICO TRAMO km 94+000 - km 99+000

CARLOS ENRIQUE ARROYO DÍAZ

AASHTO es A-1-a(0) a A-1-b(0). Su Índice de Plasticidad varía entre 4,9% y 6,1%. En estos suelos también se aprecia la presencia de bolonería, la cual se incrementa a partir de 0,40m a valores comprendidos entre 40% y 60%.

km 96+600 – km 99+000.

Presencia mayoritaria de arenas limo-arcillosas, con clasificación de suelos SUCS igual a SC-SM, mientras que en AASHTO es igual a A-1-b(0). Su plasticidad es baja y variable entre 4,9% y 6,0%. Se tiene presencia de bolonerías, en poca proporción en la capa superior, mientras que a partir de 0,50 aumenta su presencia a 50%.

Cuadro 1.2: Características del suelo tramo: km 94+000 - km 99+000

IDENTIFICACIÓN	PROFUND. (m)	TIPO DE SUELO		CBR (%) a 2,5 mm 95% MDS
		SUCS	AASHTO	
km 94+600	0,0 – 1,5	GC-GM	A-1-a(0)	19.3
km 96+600	0,0 – 1,5	GC-GM	A-1-b(0)	
km 98+600	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	19.2

Cuadro 1.3: Ensayos realizados en el tramo km 94+000 - km 99+000

PROFUNDIDAD	CV-105	CV-106	CV-107	CV-108	CV-109	CV-110	CV-111	CV-112	CV-113	CV-114	CV-115	CV-118
PROFUNDIDAD	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50
HEUMEDAD NATURAL												
L.L.	NT			NT								
L.P.	NP			NP								
I.P.	NP			NP								
ESPESA MALLA NRO 200	16.7	26.5	5.5	9.8	10.5	9.0	11.5	11.8	24.5			25.5
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-1-b(0)	A-2-4(0)	A-1-a(0)	A-1-a(0)	A-1-a(0)	A-1-a(0)	A-1-a(0)	A-1-a(0)	A-2-4(0)			A-2-4(0)
CLASIFICACIÓN SUCS	GM	SM	GP-GM	GW-GM	GW-GM	GW-GM	GW-GM	GW-GM	SM	ROCA		SM
PROCTOR (MDS)							2.219					
CBR (100%)							95.0					

CUADRO DE REFERENCIAS	GRAVA REDONDEADA	GRAVA ANGULAR	ARENA	LILO	ARCILLA DE BAJA A MEDIANA PLASTICIDAD	BOLNERIA	FRAGMENTO DE ROCA

1.6 CAPACIDAD RELATIVA DE SOPORTE DE LOS SUELOS.

En los estudios realizados por el Consorcio Gestión de Carreteras (CGC), tomado muestras suficientes para efectuar los ensayos de laboratorio correspondientes a CBR (ASTM D 1883), de acuerdo a las características de los suelos descritos anteriormente.

Cuadro 1.4: Valores de CBR obtenidos de acuerdo al tipo de suelo.

IDENTIFICACIÓN	PROFUND. (m)	TIPO DE SUELO		CBR (%) a 2,5 mm 95% MDS
		SUCS	AASHTO	
km 57+450 / M-1	0,0 – 0,3	GC-GM	A-1-b(0)	24
km 61+650 / M-1	0,0 – 1,0	SC-SM	A-1-b(0)	20
km 65+700 / M-2	0,0 – 1,5	SC-SM	A-2-4(0)	19
km 69+700 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-2-4(0)	20
km 71+700 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 75+700 / M-1	0,0 - 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	21
km 77+800 / M-1	0,0 - 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 81+600 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 85+600 / M-1	0,0 - 1,0	SC-SM	A-1-b(0)	23
km 89+600 / M-1	0,0 – 1,0	SC	A-6(2)	7
km 90+700 / M-1	0,0 – 1,0	SC	A-6(2)	6,9
km 94+600 / M-1	0,0 - 1,0	GC-GM	A-1-a(0)	19
km 98+600 / M-1	0,0 - 1,0	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 100+600 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	21
km 104+600 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	20
km 107+600 / M-1	0,0 – 1,5	GC-GM	A-1-b(0)	23
km 111+600 / M-1	0,0 – 1,5	GC-GM	A-1-b(0)	21
km 115+600 / M-1	0,0 - 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 119+600 / M-1	0,0 – 1,5	GC-GM	A-1-a(0)	20
km 121+600 / M-1	0,0 – 1,0	SC-SM	A-1-b(0)	19
km 125+600 / M-1	0,0 – 1,0	SC-SM	A-1-b(0)	22
km 129+600 / M-1	0,0 – 1,5	SC-SM	A-1-b(0)	18

1.7 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.

Para la implementación de una adecuada solución a nivel básico para el cambio de estándar de serviciabilidad de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca, en el tramo comprendido entre Zúñiga – Dv. Yauyos, el Consorcio Gestión de Carreteras (CGC), procedió a efectuar los estudios correspondientes que han llevado a estructurar al pavimento.

El tipo de pavimento y su estructura, que se ha definido en dicho estudio es el siguiente:

Cuadro 1.5: Estructura del pavimento.

SECTOR		ESTRUCTURA DE PAVIMENTO		
		Superficie de rodadura (cm)	Afirmado estabilizado (cm)	Afirmado (cm)
Sector I: Zúñiga - Dv. Yauyos – Alis	57+450 – 130+000	0,9	5	8
	130+000 – 163+100	0,9	5	11
Sector II: Alis - San José de Quero	163+100 – 200+000	0,9	5	11
	200+000 – 220+000	0,9	5	17
	220+000 – 229+300	0,9	5	45
Sector III: San José de Quero - Ronchas	229+300 – 240+000	0,9	5	40
	240+000 – 248+000	0,9	5	20
	248+000 – 255+185	0,9	5	42

CAPITULO II.- ESTADO DEL ARTE

2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS.

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

2.1.1 *Sistemas elásticos de capas.*

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

2.1.2 *Sistemas no lineales de capas.*

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

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

Donde: K_1 y K_2 son constantes experimentales y θ es el esfuerzo invariante.

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

2.1.3 *Sistemas lineales Viscoelásticos.*

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

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

2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

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

2.2.1 Viga Benkelman.

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



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

Figura 2.1: Viga de Benkelman en uso

2.2.2 Dynaflec.

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



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

Figura 2.2: Equipo Dynaflect

2.2.3 Road Rater.

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



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

Figura 2.3: Equipo Road Rater

2.2.4 RDD.

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



Fuente: internet

Figura 2.4: Deflectómetro dinámico de Balanceo

2.2.5 FWD.

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



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

Figura 2.5: Equipo FWD

2.2.6 KUAB – FWD.

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



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

Figura 2.6: Equipo KUAB-FWD

CAPITULO III.- MARCO TEÓRICO

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

3.1 VIGA BENKELMAN

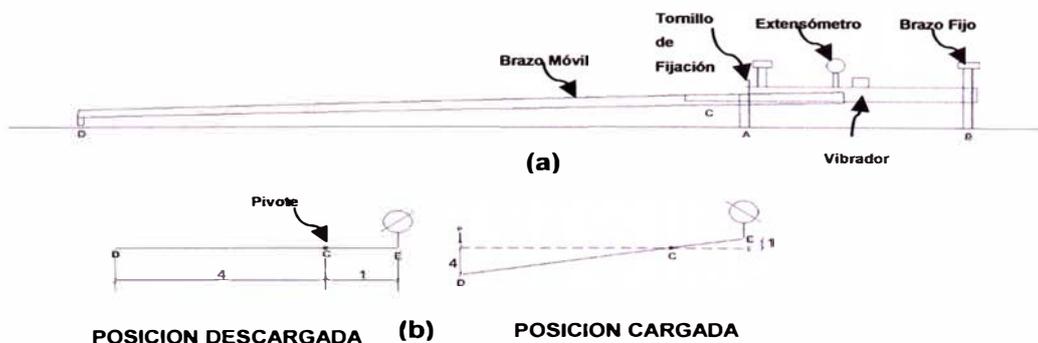
El deflectómetro Benkelman funciona mediante el principio de palanca, es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura 3.2 (a). A su vez la viga consta principalmente de dos partes: un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

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.



Fuente: <http://www.solocap.com.br>

Figura 3.1: Viga Benkelman.

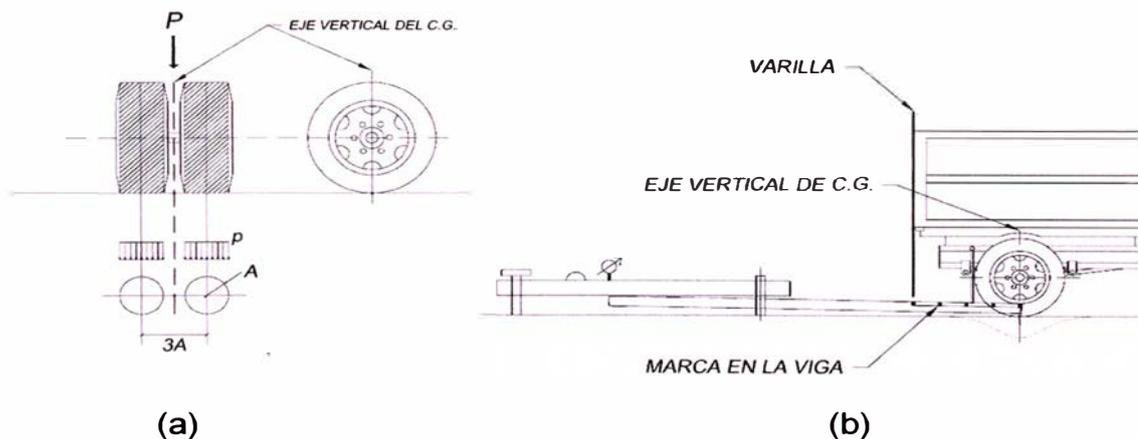


Fuente: Propia elaboración

Figura 3.2: Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman.

3.1.1 Metodología de medición de deflexiones con viga benkelman.

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 3.3 (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 3.3 (b)), se hace coincidir (las marcas de la viga con la varilla). Para medir las deflexiones del pavimento.



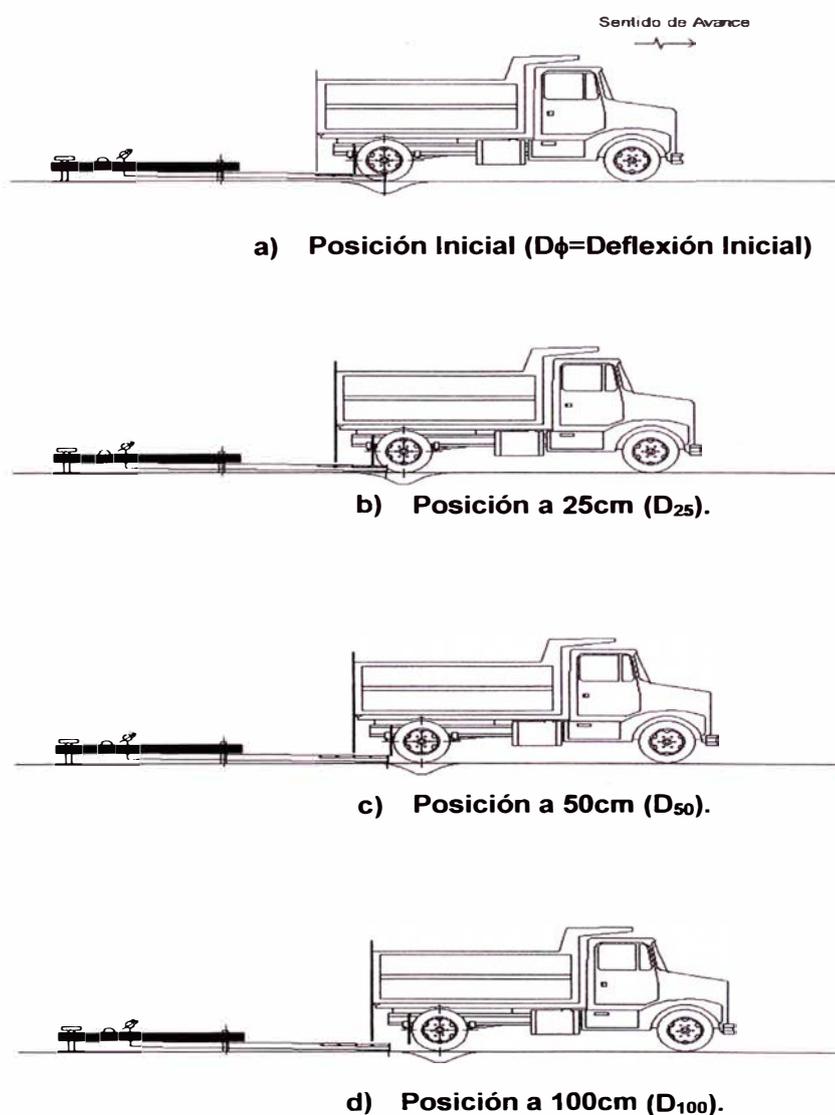
Fuente: Pablo del Águila

Figura 3.3: 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 3.4 (a)), se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas (figuras 3.4 (b), (c)), cuando el camión se haya alejado lo suficiente del punto de ensayo de manera que el indicador del dial ya no tenga movimiento (aproximadamente 5.00 m.), se efectuará una lectura más (ver figura 3.4 (d)).



Fuente: Pablo del Águila

Figura 3.4: Esquematzación del proceso de medición de la Viga Benkelman

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

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

3.1.2. Equipo requerido.

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

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



Fuente: Curso titulación

Figura 3.5: Viga Benkelman y camión para toma de deflexiones

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

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

3.2.1 Definiciones previas.

a) Módulo resiliente (M_r)

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

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

Donde:

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

ϵ_r : Deformada Recuperable

b) Ratio de Poisson (μ)

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

c) Módulo de elasticidad (E)

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

d) Peso unitario (γ)

Es el peso por unidad de volumen

e) Relación de soporte de California (CBR)

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

f) *Coefficiente 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:

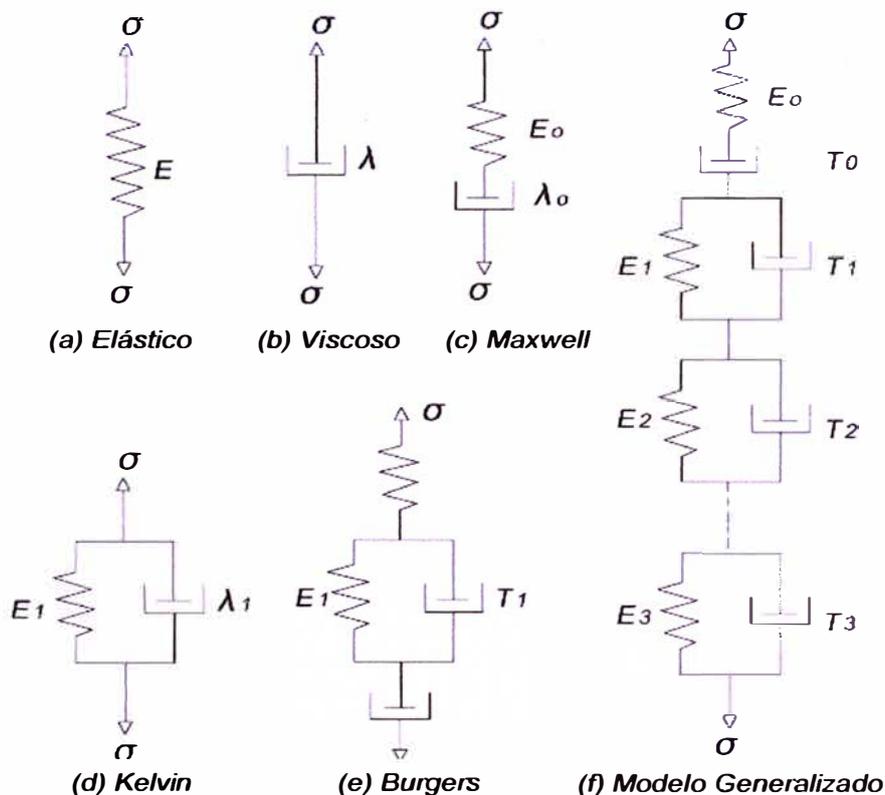


Figura 3.6: Modelos matemáticos.

a) *Modelo Básico.*

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en la figura 3.6 (a), y obedece la ley de Hooke, y la tensión es proporcional a la deformación:

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

Un material viscoso es representado por un amortiguador hidráulico, según lo indicado en la figura 3.6 (b), y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo:

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

b) Modelo de Maxwell.

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la Figura 3.6 (c)

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

c) Modelo de Kelvin.

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la figura 3.6 (d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usa el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin,

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

d) Modelo de Burgers.

Un modelo de Burgers es una combinación del modelo del Maxwell y de Kelvin, según lo indicado en la figura 3.6 (e).

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

e) Modelo Generalizado.

La figura 3.6 (f) muestra un modelo generalizado que se pueda utilizar para caracterizar cualquier material viscoelástico.

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

3.3 MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.

3.3.1 Modelo de Boussinesq.

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

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

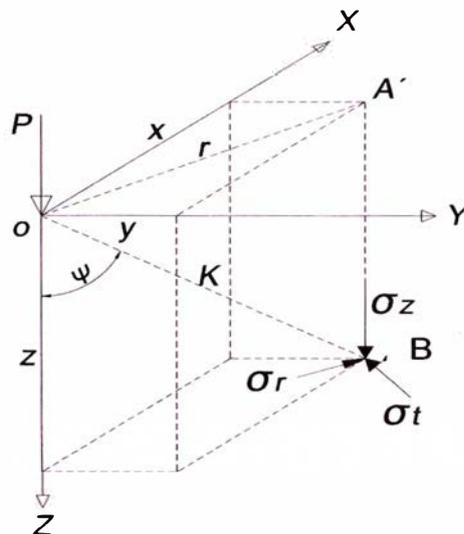


Figura 3.7: Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada.

Los esfuerzos en el punto "B" pueden escribirse:

Esfuerzo vertical:

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

Esfuerzo radial:

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

Esfuerzo tangencial:

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

3.3.2 Modelo de Hogg.

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

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

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

La ecuación que resuelve Hoog es:

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

Donde

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

D = Rigidez de la placa.

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.

E_1 = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

μ = Ratio de Poisson.

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

Reemplazando (3.13) en (3.11), resulta:

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

Donde:

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

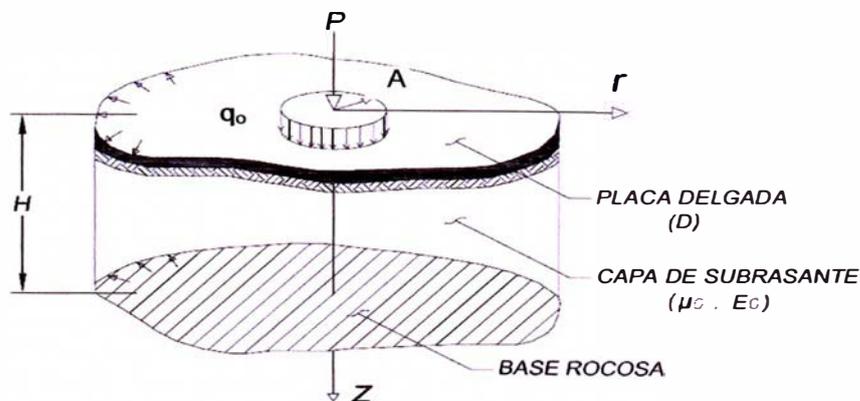


Figura 3.8: Modelo de Hogg.

3.3.3 Modelo de Westergaard.

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

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

D = Rigidez de la placa.

ϖ = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

E_1 = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

μ = Ratio de Poisson.

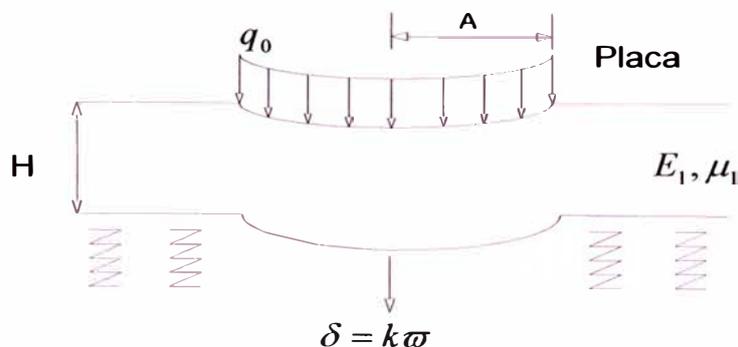


Figura 3.9: Modelo de Westergaard.

3.3.4 Modelos bicapas.

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

3.3.5 Modelos multicapas (Burmister, 1943).

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

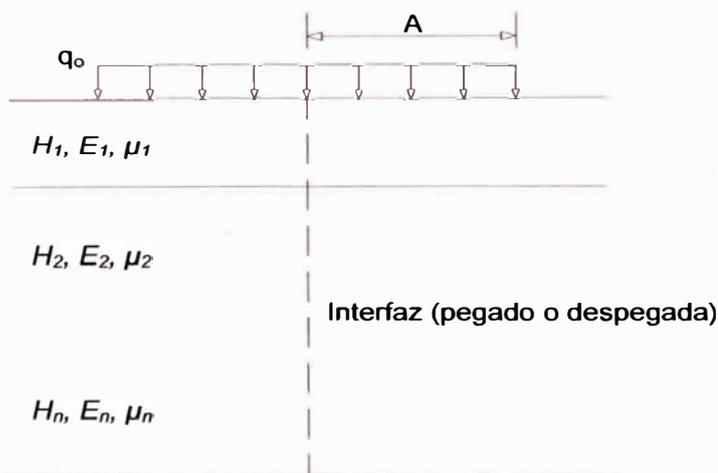


Figura 3.10: Modelo multicapas.

3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS.

3.4.1 Fórmulas de Boussinesq.

El masivo semi infinito de Boussinesq se supone lineal, isotrópico, elástico, con modulo de Young E_S y coeficiente de poisson μ .

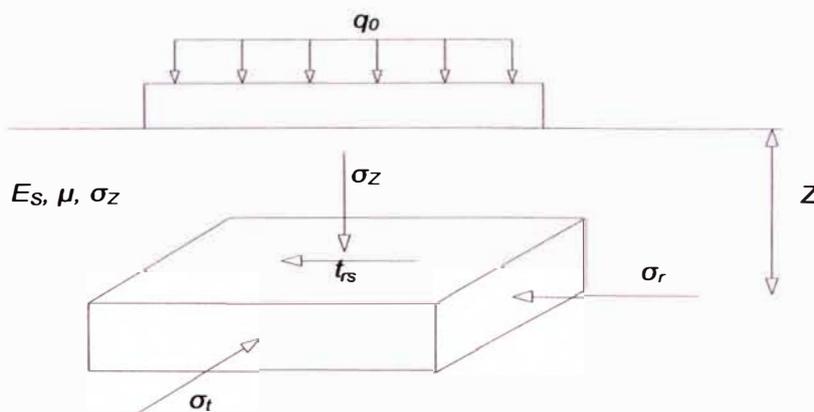


Figura N° 3.11 Representación de un masivo semi infinito.

Para ejes gemelos

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

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

3.4.2 Fórmula de Westergaard.

La carga P se aplica sobre un área elíptica.

La calzada es una placa homogénea, isotrópica y elástica con módulo de Young E y coeficiente de Poisson μ , su espesor H es constante.

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

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

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

Donde:

k : Módulo de reacción

p : Peso total de la carga.

3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber generalizada.

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

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

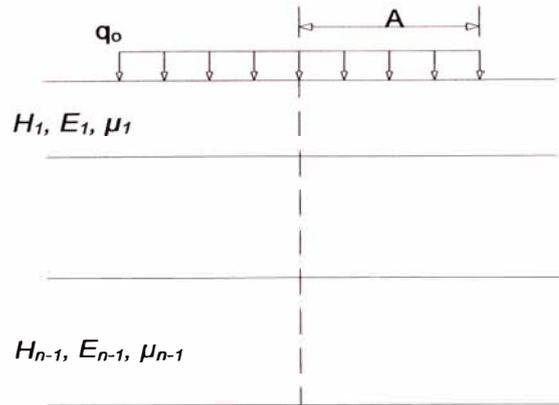


Figura 3.12 Multicapa propuesto con la formula de palmer y baber generalizada.

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

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

3.4.4 Fórmula de Odemark.

La carga sobre la calzada se esquematiza por una presión uniforme q_0 aplicada sobre un área circular de radio A . La calzada está compuesta por $n-1$ capas horizontales, de espesor H_i , módulo de Young E_i y de coeficiente de Poisson μ_i , la caracterización es la base en un masivo semi infinito de características mecánicas E_n y μ_i .

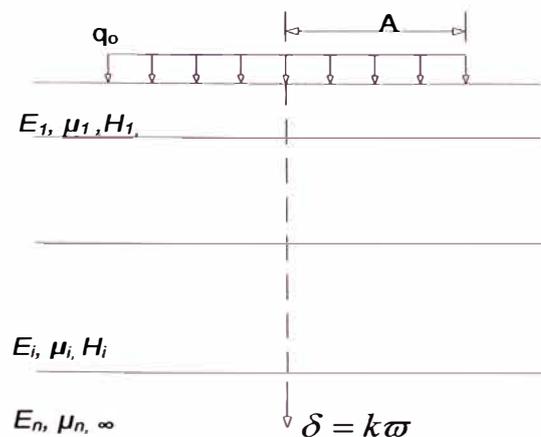


Figura 3.13: Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark

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

3.4.5 Modelo de elementos finitos.

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

Los modelos en 3D representan mejores resultados que los modelos en 2D puesto que identifican mejor los efectos de las cargas sobre el pavimento, pero lo desfavorable es que ocupan más memoria en un ordenador personal.

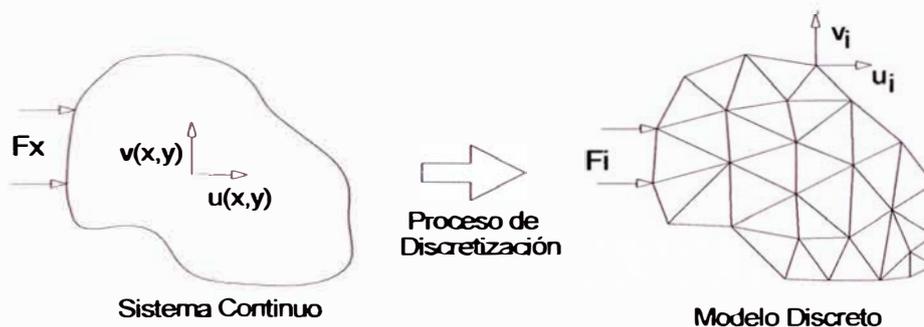


Figura 3.14: Modelo de Elementos Finitos

a) Descripción general de un modelo de elementos finitos

Diseño general del sistema de pavimentos flexibles

En las figuras se muestran las representaciones de la malla del elemento finito en 3D de un pavimento flexible en planta y elevación.

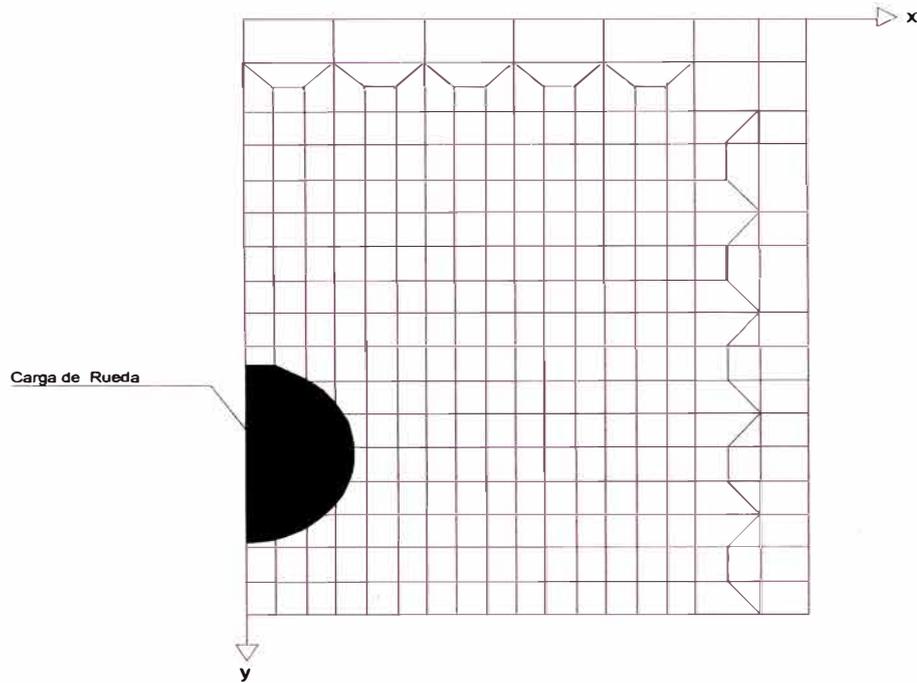


Figura 3.15: Vista en planta del enmallado de un pavimento

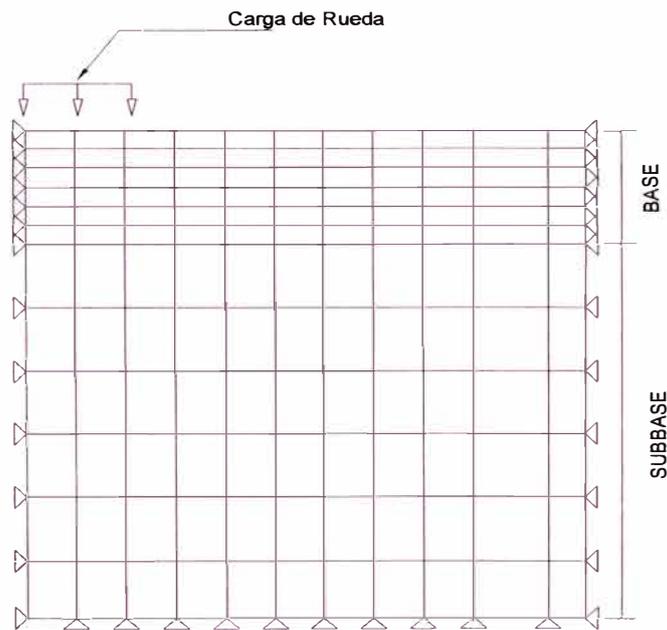


Figura 3.16: Vista en elevación del enmallado de un pavimento.

El pavimento representado con elementos finitos que se utiliza en este estudio se compone de 2 capas con diferentes características por capa, esta son la carpeta asfáltica y la subrasante. Cada capa del modelo tiene diferentes propiedades de los materiales que lo conforman y espesores determinados.

Región de refinamiento local

Las dimensiones de cada bloque (elemento) no son uniformes como podemos ver en la figura 3.15. Los esfuerzos máximos y las máximas deflexiones se producen alrededor de las cargas de la rueda, es por eso que se realiza un refinamiento de la malla, pues una mayor cantidad de elementos dará resultados más precisos. Sin embargo los elementos de malla refinados dará mejores resultados pero consumirá más tiempo a la hora de procesar los datos.

Por lo tanto, es eficaz refinar la malla alrededor de la región donde se aplica la carga y aumentar las dimensiones de la misma a medida que se aleja del área de contacto.

Elementos tipo

Existen varios tipos de bloques en elementos finitos que se pueden utilizar como son los elementos de 8 nodos, 27 nodos y 32 nodos; en general cuantos más nodos por elemento existan, más precisos será el elemento, pero la generación de mallas y su aplicación se vuelve más difícil.

El elemento de 20 nodos logra un equilibrio entre la dificultad del enmallado y la exactitud de los resultados. Cada modelo contiene elementos de malla de 20 nodos.

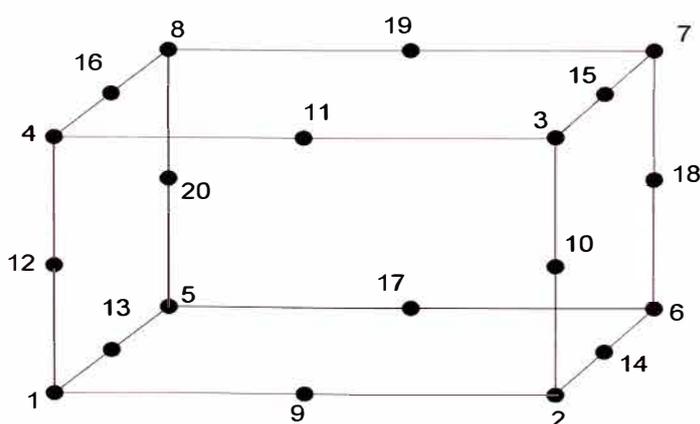


Figura 3.17: Vista en 3D de elementos de 20 nodos

Interfase: Son los elementos que sirven para modelar las transferencias de esfuerzo de corte entre capas de un pavimento.

b) Procedimiento de Generación de Sistema de Capas.

Todas las capas del modelo tienen exactamente la misma configuración o dimensión en su plano, la manera en que se genera el refinamiento de esta malla es con el siguiente algoritmo:

- a. *Loop* para reconocer todas las capas
- b. **for** $i=1$ a numero de capas
- c. la fracción de malla (l) cerca de la carga de las ruedas
- d. fracciones de malla de algunas capas a lo lardo de la superficie y unir a la fracción (l)
- e. **End**
- f. *Loop* para cada 2 intervalos
- g. **for** $i= 1$ to 2;
- h. fracción de la malla (*entre l*) cerca de carga de ruedas;
- i. Fracción de mallas de algunas capas a lo largo de la superficie y unir a la fracción (*entre l*);
- j. **End**
- k. Unir las capas de los intervalos a las capas que conforman el pavimento;
- l. **END**

c) Criterio del Backcalculation.

Cuando se trata de estimar la capacidad estructural del pavimento existente se recurre a medir el desplazamiento vertical (deflexión) bajo una carga conocida. Para realizar el cálculo se necesita conocer los espesores de las capas y los valores de la flexión en el punto de carga y en varios puntos alejados del punto de impacto. Mediante un cálculo inverso los valores de deflexión obtenidos se emplean para determinar los valores de los módulos de las capas.

En el cálculo inverso la solución no es exacta ni única y se requiere una serie de reiteraciones y de condiciones para ajustar la solución con criterios ingenieriles.

CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO km 94+000 – km 99+000

4.1. APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

La deflectometría consiste en el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de la calzada debido a la acción de una carga estándar de 8.2 ton. Aplicada al pavimento a través de un camión con movimiento lento.

Durante la evaluación de campo se cumplió con las siguientes pautas:

- Se hicieron las medidas desde el km 94+000 en forma decreciente terminado en el km 99+000. Se obtuvieron registros en 5 puntos (estacas).
- Se utilizó la viga Benkelman de brazo simple.
- Se utilizó un camión de un solo eje posterior, que transmitía una carga de 8.2 toneladas controladas por una balaza electrónica adecuada.
- La presión de inflado de las llantas será de 80 PSI.
- Se registró la temperatura de las capas asfálticas medidas con termómetro digital de precisión en el centro de las capas.
- Se midió el espesor de las capas asfálticas en cada punto.
- Se registró la lectura de las deflexiones.

4.1.1 Procedimiento de medición.

La toma de medidas hechas durante el ensayo de campo se basó en el siguiente procedimiento:

- Se deben marcar con anticipación los puntos de medición en el pavimento a ser ensayado de manera que permita agilizar el proceso.
- Antes de empezar a medir se colocará en la parte trasera del camión una regla de metal que sirva de plomada.
- Se marcarán en la viga previamente con papel adhesivo, en nuestro caso se ubicaron a 0, 25, 40 y 70 cm. respectivamente empezando en la punta final de la viga.
- La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado quedando éste ubicado entre ambas llantas.
- Se coloca la regla sobre el pavimento, detrás del camión perpendicularmente al eje de carga de modo que la punta de prueba (de la viga) coincida con el punto de ensayo y la regla no roce contra las cubiertas de la rueda dual.

- Se retira la traba de la regla y la base se ajusta por medio del tornillo trasero de modo tal que el brazo de medición quede en contacto con el vástago del dial.
- El extensómetro se ajusta de modo tal que el vástago tenga un recorrido libre comprendido entre 4 y 6 mm. Se gira la esfera del extensómetro hasta que la aguja quede en cero.
- El ensayo comenzará cuando se compruebe que dicha lectura permanece constante, asegurando el equilibrio del pavimento bajo carga. Se da por estabilizada la deformación producida por la carga cuando la lectura inicial varía en 0.01 mm/minuto o menos.
- Establecida la lectura inicial en cero, un operador indicará al conductor del camión que inicie el movimiento lento mientras que indicará a los operadores encargados de las lecturas el momento exacto cuando la regla colocada en el camión coincida con los puntos marcados previamente en la viga.



Figura 4.1 Varilla de ubicación de puntos para toma de datos

- Al escuchar las indicaciones los lectores dirán en voz fuerte y clara las medidas indicadas por el extensómetro, mientras que otro operador las anotará.



Figura 4.2 Lectura de deflexiones

- Se procede a la medición de la temperatura que presenta el asfalto en el punto en medición. Se toma una pequeña muestra del espesor del pavimento.

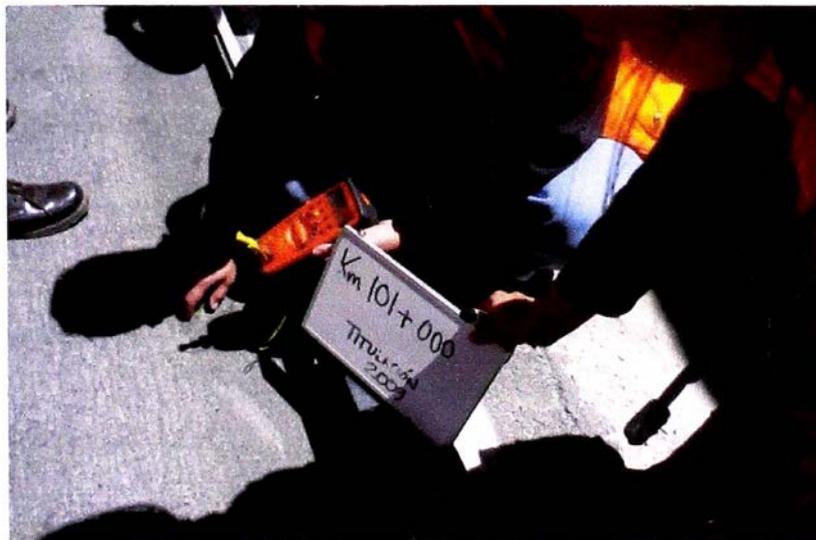


Figura 4.3 Medida de temperatura del asfalto.

Todo el proceso deberá ser supervisado por un ingeniero de campo experimentado quien verificará los valores que se vayan obteniendo.

Cuadro 4.1: Datos registrados en campo

N°	Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				Espesor (cm)	Temperat. (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
		L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{máx}			Deflexiones(x10 ⁻² mm)			
								D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀
42	97+800	20	28	40	50	3.00	52.0	200	120	88	40
43	97+900	12	18	20	22	3.00	55.0	88	40	16	8
44	98+000	8	12	14	16	3.00	57.0	64	32	16	8
45	98+100	8	10	12	14	3.00	58.0	56	24	16	8
46	98+200	14	24	28	30	3.00	50.0	120	64	24	8

4.2. APLICACIÓN CON MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

Se aproximan los desplazamientos teóricos con los desplazamientos de campo con ayuda del programa EverstreesFE (Washington State Departament of Transportation, WSDOT), el cual es un programa utilizado para la evaluación de pavimentos flexibles, este programa emplea un proceso de refinamiento continuo de la malla hasta llegar a la convergencia.

Un buen refinamiento bajo la zona de contacto (o donde se aplica la carga de la rueda) hace que las soluciones sean más exactas o de mayor precisión.

Este programa toma como datos de partida los valores del módulo de elasticidad E de la carpeta y subrasante del pavimento, obtenidos mediante la hoja de Cálculo del Modelo de Hogg (Ver anexos) y datos generales como: presión de la llanta del camión, espaciamiento de llantas, ratio de Poisson y espesores del pavimento.

Los parámetros variados fueron los siguientes:

1. Longitud a analizar en X (longitudinal a la carretera) y longitud a analizar en Y (transversal a la carretera)
- 1 Espesor de la carpeta asfáltica
- 2 Espesor de la subrasante
- 3 Enmallado

- Número de divisiones a lo largo de los elementos longitudinales.
- Número de divisiones a lo largo de los elementos transversales.
- Número de elementos de divisiones al espesor del pavimento
- Número de divisiones al espesor de la subrasante

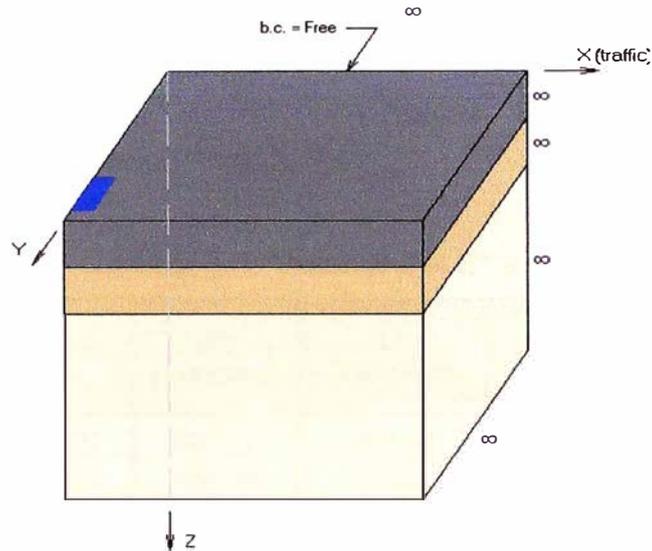


Figura 4.4 Idealización de las capas del pavimento.

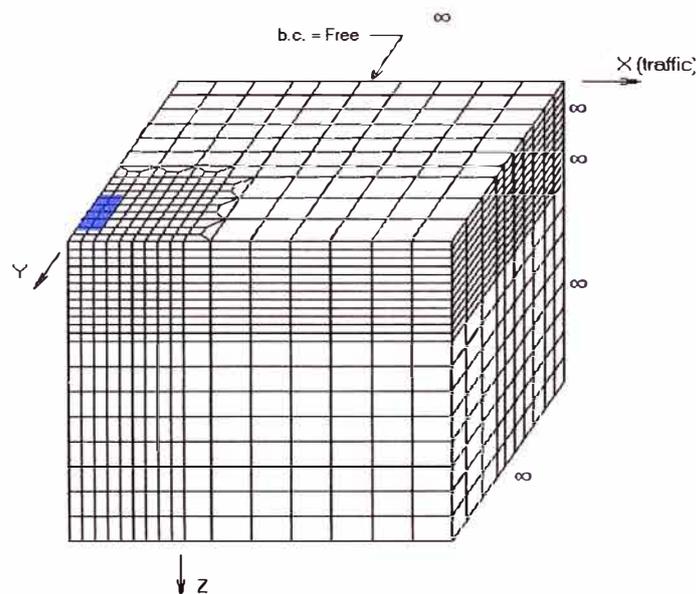


Figura 4.5 Refinamiento de la fracción de la vía en estudio.

CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los valores abajo indicados, muestran la ubicación de los puntos en los que se realizaron las mediciones con la Viga Benkelman, obtenidos los desplazamientos, los datos fueron ingresados a la hoja de cálculo del modelo de Hogg, la cual dio un valor de E^* y E_o para empezar a realizar las aproximaciones con el programa EVERSTRESSFE.

Los valores de E^* y E_o se obtienen en Kg/cm^2 , los que serán ingresados al programa en la unidades requeridas (MPa).

Cuadro 5.1: Valores del E^* y E_o

Nº	Estaca (km)	E_o (kg/cm ²)	E^* (kg/cm ²)	E_o (MPa)	E^* (MPa)
42	97+800	687.12	2536.73	67.38	248.77
43	97+900	400.04	3259.22	39.23	319.62
44	98+000	396.3	1777.55	38.86	174.32
45	98+100	568.47	609.46	55.75	59.77
46	98+200	391.23	1357.1	38.37	133.09

Se modela el pavimento en un sistema de 2 capas, donde la capa superior (base) tiene un espesor de 13.9 cm. y la capa inferior (sub base) para efectos de cálculo se toma un espesor de 1 m., cada una de las cuales presenta un valor de entrada de E_o , E^* así como sus respectivos ratios de poisson, para efectos de cálculo se analizara una sección de pavimento de 1m. x 1m.

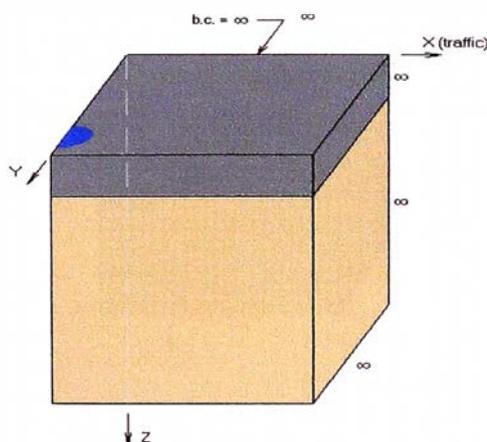


Figura 5.1 Ingreso de datos de la geometría del pavimento.

Las cargas que afectan el pavimento son transmitidas por las llantas, para esta modelación se debe contar con la presión de llantas, separación entre llantas, tipo de área de contacto con el pavimento (se analiza el caso circular) y la fuerza ejercida por cada llanta al pavimento.

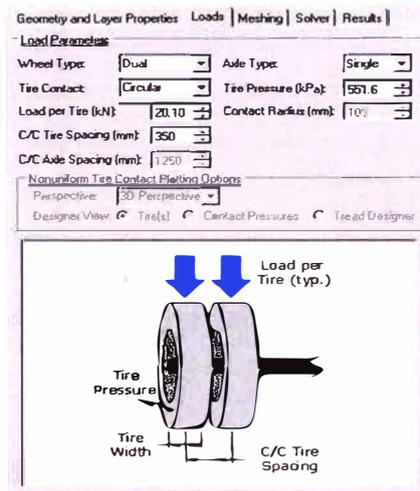


Figura 5.2 Ingreso de cargas aplicadas al pavimento

Se procede a crear la malla inicial con la cual el programa comienza a realizar el procesamiento de datos. Se ingresa la forma como estarán divididos los elementos al inicio del proceso, la malla que se encuentra bajo la rueda tendrá un mayor refinamiento que las más alejadas.

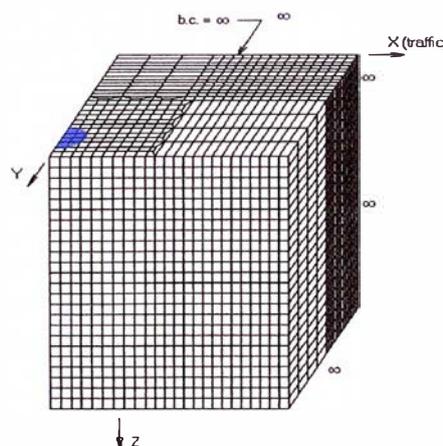


Figura 5.3 Ingreso de datos para el enmallado del pavimento.

Al ejecutar el programa, se mostraran las pantallas de resultados siendo la pantalla de deflexiones del pavimento el motivo de nuestro análisis.

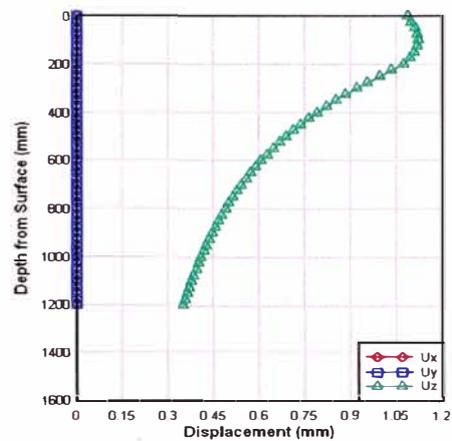


Figura 5.4 Desplazamientos en el punto de mayor deflexión

Uno de los resultados mostrados es la deformación del pavimento por acción de la llanta sobre el pavimento.

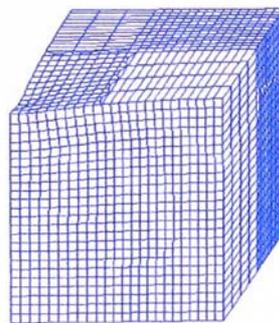


Figura 5.5 Deformación de la malla debida las cargas aplicadas.

5.1 PUNTOS ANALIZADOS.

Para cada tramo asignado de la carretera se analizaron 5 puntos, los cuales están distanciados 100 m. los desplazamientos de estos puntos fueron encontrados con ayuda del programa EVERESTRESSFE, estos desplazamientos fueron aproximados a partir de valores de Eo, previamente encontrado con el modelo de Hogg y el E* (5.1), de la relación planteada en el modelo de Hogg.

$$L_o = \sqrt[3]{\frac{(3 - 4\mu_0) \cdot E_1}{24(1 - \mu_0)^2 \cdot E_0} H^3} \tag{5.1}$$

Despejando (5.1) con $\mu_0=0.4$, se obtiene:

$$L_o = 0.55 H \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_0}} \tag{5.2}$$

Cuadro 5.2: Módulos de elasticidad E y Eo obtenidos con el modelo de Hogg.

N°	Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				PARAMETROS DEL MODELO DE HOGG				
		Deflexiones(x10 ⁻² mm)				R _s	L ₀	S ₀ /S	E ₀	E*
		D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀	cm	cm		kg/cm ²	kg/cm ²
42	97+800	200	120	88	40	35.05	16.78	0.74	249.32	1272.91
43	97+900	88	40	16	8	26.77	11.15	0.58	673.41	156.26
44	98+000	64	32	16	8	30.26	13.62	0.67	867.08	789.47
45	98+100	56	24	16	8	31.97	14.77	0.70	954.31	1925.43
46	98+200	120	64	24	8	26.90	11.25	0.59	492.94	118.10

De los datos de la tabla de Hogg, al ser el dato más confiable el Eo, se usara esté y el E* el obtenido de (5.2)

Cuadro 5.3: Módulos de elasticidad E y Eo según kilometraje.

N°	Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				Hogg			RELACION HOGG
		Deflexiones(x10 ⁻² mm)				L ₀	E ₀	relación	E*
		D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀	cm	kg/cm ²	eq(5.2)	kg/cm ²
42	97+800	200	120	88	40	16.78	249.32	10.57	2635.99
43	97+900	88	40	16	8	11.15	673.41	3.10	2089.86
44	98+000	64	32	16	8	13.62	867.08	5.66	4904.69
45	98+100	56	24	16	8	14.77	954.31	7.21	6879.04
46	98+200	120	64	24	8	11.25	492.94	3.18	1569.32

Se realizan 2 métodos de análisis, el METODO I mantiene constante el valor de Eo y varia el E* arbitrariamente, el METODO II varia los valores de Eo en 10% pero mantiene constante la relación planteada en (5.2) para obtener E*.

METODO I

km 97+800

Cuadro 5.4: Desplazamientos en km 97+800 (método I)

km 97+800							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		2.00	1.20	0.88	0.40	0.00	
EVER 1		2.08	1.48	1.04	0.55	0.37	0.091
EVER 2		2.06	1.47	1.04	0.55	0.37	0.089
EVER 3		2.03	1.46	1.03	0.55	0.37	0.085
EVER 4		2.00	1.45	1.03	0.55	0.36	0.082
EVER 5		1.11	0.75	0.51	0.28	0.19	0.268

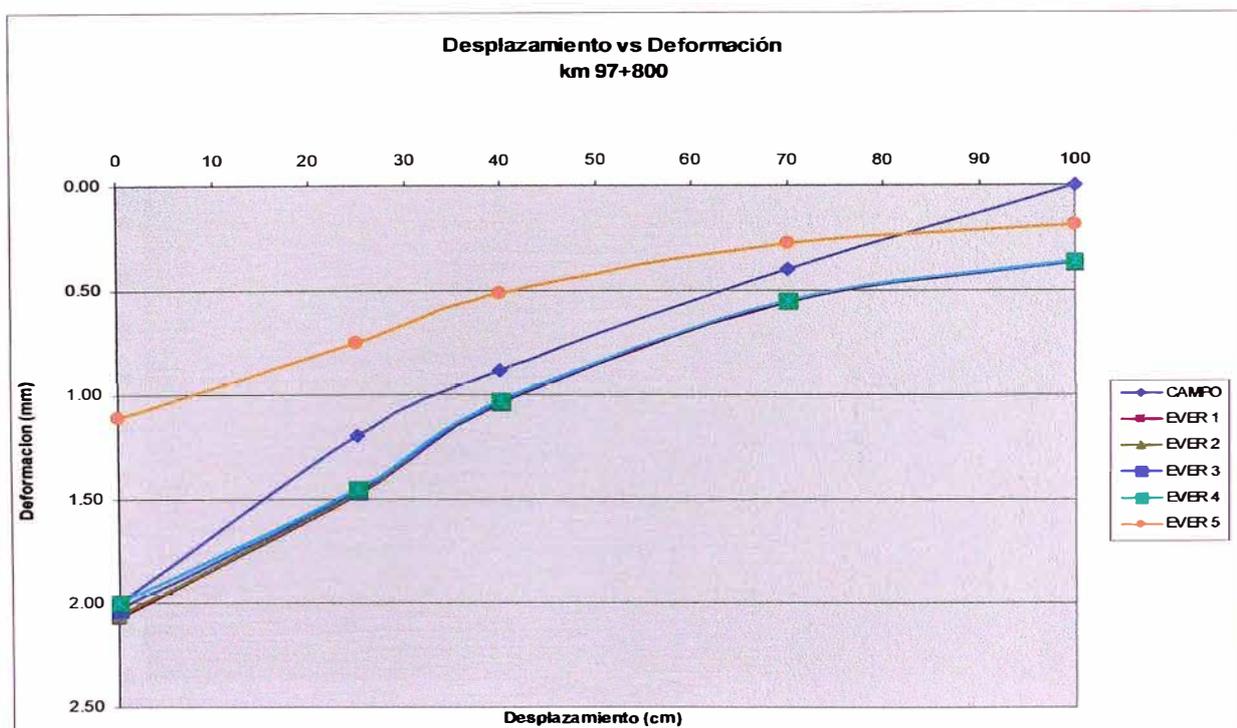


Figura 5.6: Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+800 (método I)

Cuadro 5.5: Módulos de elasticidad en km 97+800 (método I)

km 97+800					
Lectura	Eo	Eo	E*	E*	CBR
	Mpa	kg/cm2	Mpa	kg/cm2	
CAMPO					
EVER 1	24.45	249.32	258.50	2635.95	2.27
EVER 2	24.45	249.32	268.50	2737.92	2.27
EVER 3	24.45	249.32	288.50	2941.87	2.27
EVER 4	24.45	249.32	308.50	3145.81	2.27
EVER 5	50.45	514.44	308.50	3145.81	4.68

km 97+900

Cuadro 5.6: Desplazamientos en km 97+900 (método I)

km 97+900							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.88	0.40	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.94	0.59	0.39	0.22	0.15	0.092
EVER 2		0.93	0.59	0.39	0.22	0.15	0.092
EVER 3		0.92	0.59	0.39	0.22	0.15	0.092
EVER 4		0.92	0.59	0.40	0.22	0.15	0.092
EVER 5		0.65	0.40	0.27	0.15	0.11	0.071

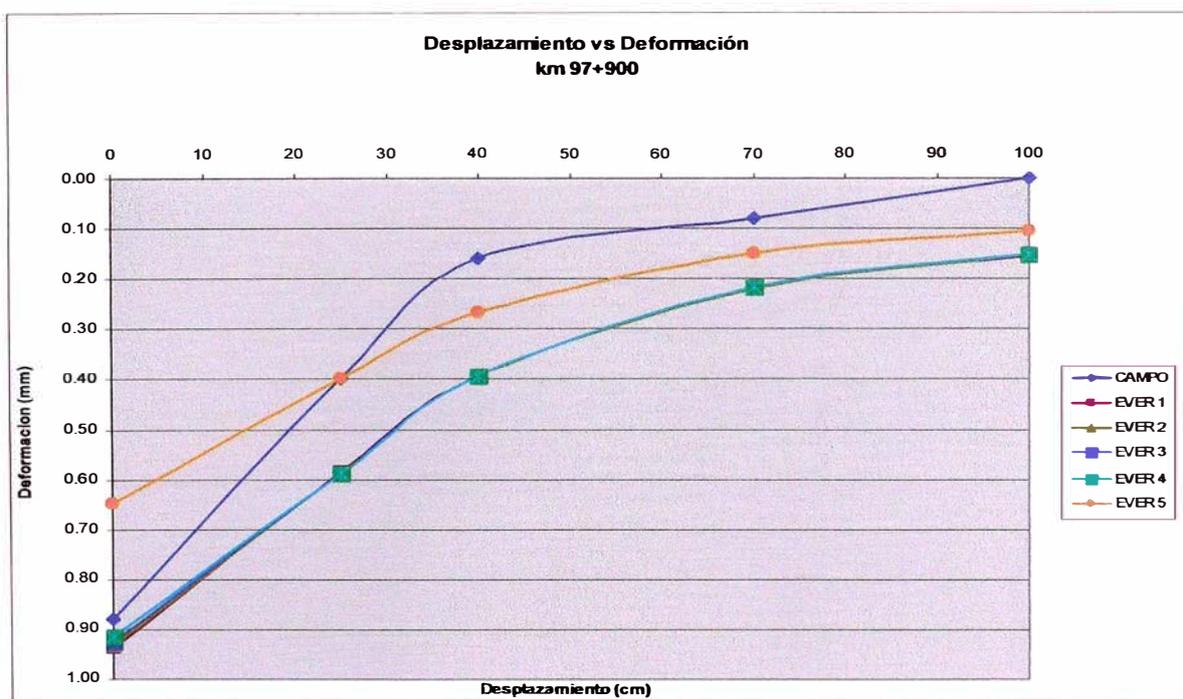


Figura 5.7: Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+900 (método I)

Cuadro 5.7: Módulos de elasticidad en km 97+900 (método I)

km 97+900					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	66.04	673.41	204.95	2089.86	6.12
EVER 2	66.04	673.41	214.95	2191.83	6.12
EVER 3	66.04	673.41	234.95	2395.77	6.12
EVER 4	66.04	673.41	254.95	2599.72	6.12
EVER 5	96.04	979.32	254.95	2599.72	8.90

km 98+000

Cuadro 5.8: Desplazamientos en km 98+000 (método I)

km 98+000							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.64	0.32	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.66	0.44	0.30	0.16	0.11	0.058
EVER 2		0.66	0.44	0.30	0.16	0.11	0.058
EVER 3		0.66	0.44	0.30	0.16	0.11	0.058
EVER 4		0.65	0.44	0.30	0.16	0.11	0.057
EVER 5		0.43	0.28	0.19	0.10	0.07	0.056

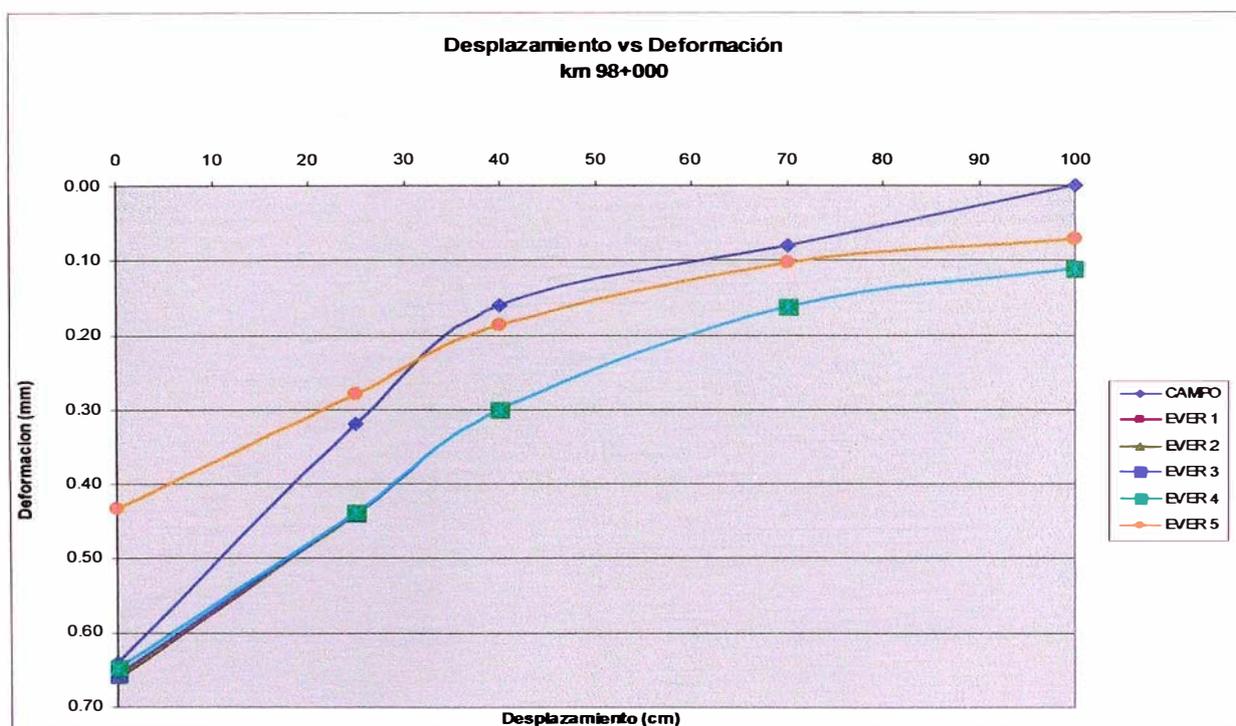


Figura 5.8: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+000 (método I)

Cuadro 5.9: Módulos de elasticidad en km 98+000 (método I)

km 98+000					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	85.03	867.06	480.99	4904.71	7.88
EVER 2	85.03	867.06	490.99	5006.68	7.88
EVER 3	85.03	867.06	510.99	5210.62	7.88
EVER 4	85.03	867.06	550.99	5618.51	7.88
EVER 5	135.03	1376.92	550.99	5618.51	12.52

km 98+100

Cuadro 5.10: Desplazamientos en km 98+100 (método I)

km 98+100							Desv. std σ
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.56	0.24	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.58	0.40	0.27	0.15	0.10	0.057
EVER 2		0.58	0.40	0.27	0.15	0.10	0.057
EVER 3		0.58	0.40	0.27	0.15	0.10	0.057
EVER 4		0.57	0.39	0.27	0.15	0.10	0.056
EVER 5		0.40	0.26	0.18	0.10	0.07	0.045

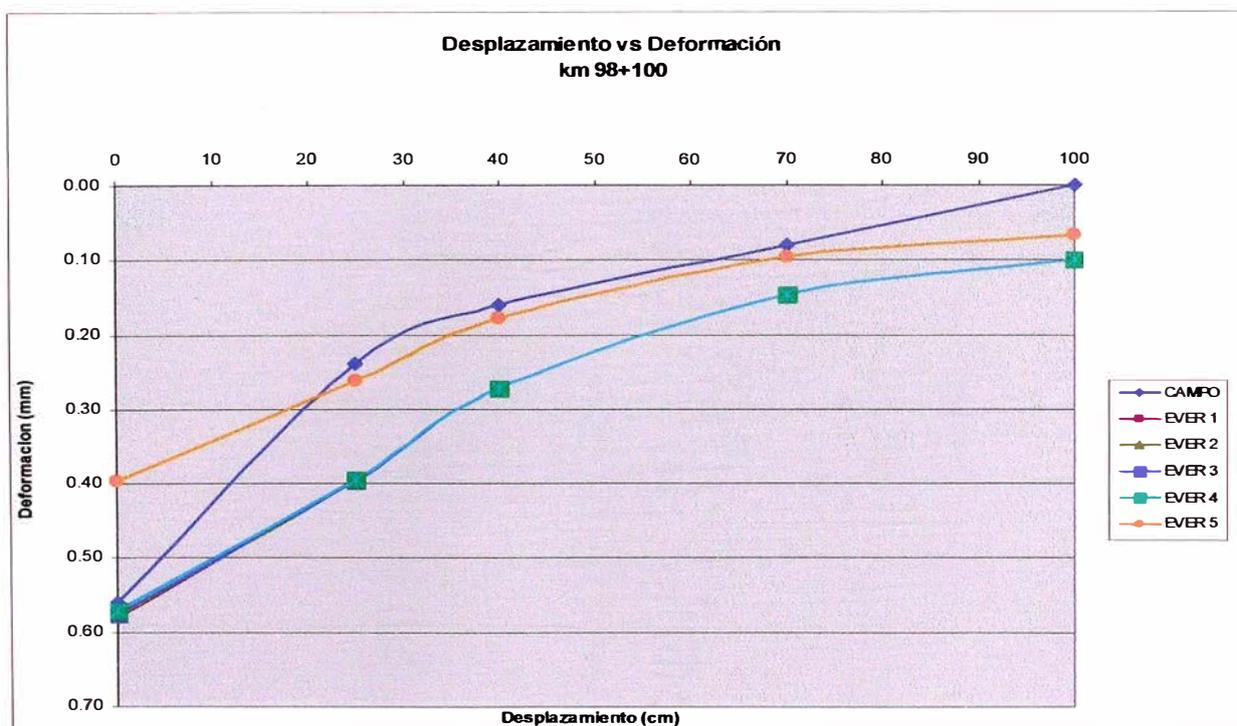


Figura 5.9: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+100 (método I)

Cuadro 5.11: Módulos de elasticidad en km 98+100 (método I)

km 98+100					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	93.59	954.35	674.61	6879.07	8.68
EVER 2	93.59	954.35	684.61	6981.04	8.68
EVER 3	93.59	954.35	704.61	7184.99	8.68
EVER 4	93.59	954.35	744.61	7592.87	8.68
EVER 5	143.59	1464.20	744.61	7592.87	13.31

km 98+200

Cuadro 5.12: Desplazamientos en km 98+200 (método I)

km 98+200							Desv. std σ
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					
		0	25	40	70	100	
CAMPO		1.20	0.64	0.24	0.08	0.00	
EVER 1		1.24	0.78	0.52	0.29	0.20	0.107
EVER 2		1.23	0.78	0.52	0.29	0.20	0.107
EVER 3		1.22	0.78	0.52	0.29	0.20	0.107
EVER 4		1.19	0.78	0.53	0.29	0.20	0.107
EVER 5		0.63	0.38	0.25	0.14	0.10	0.160

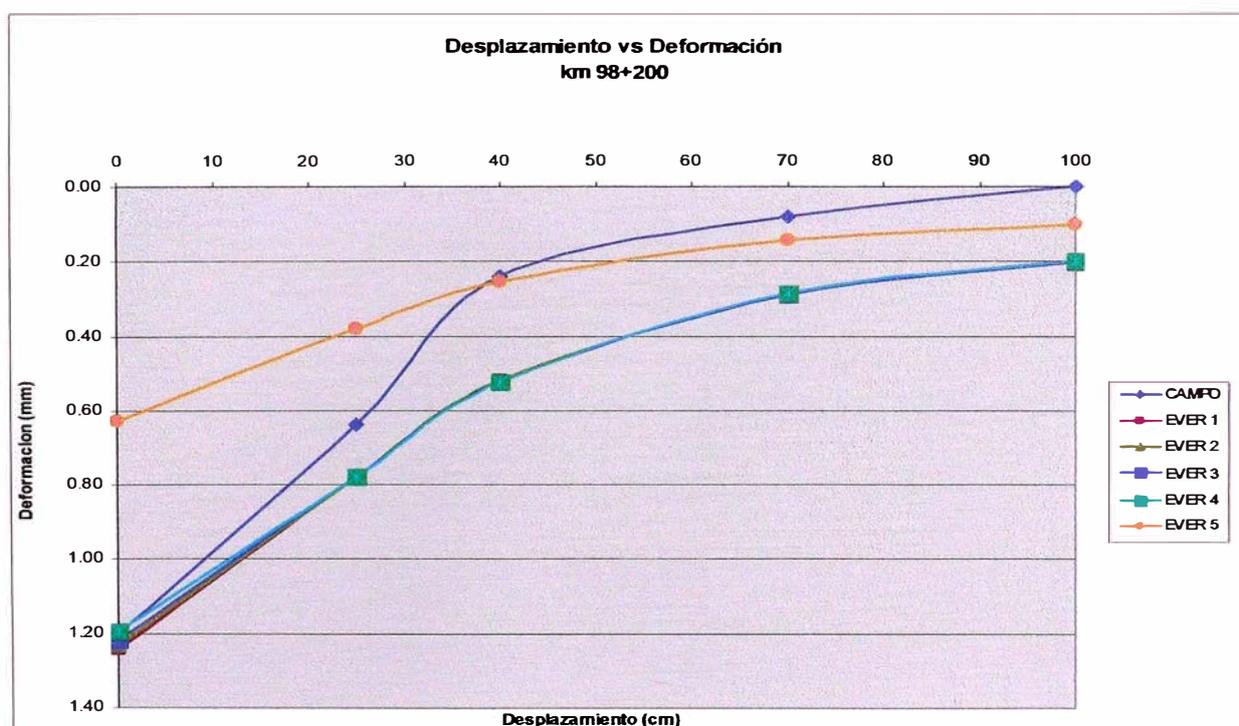


Figura 5.10: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+200 (método I)

Cuadro 5.13: Módulos de elasticidad en km 98+200 (método I)

km 98+200					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	48.34	492.93	153.90	1569.34	4.48
EVER 2	48.34	492.93	163.90	1671.31	4.48
EVER 3	48.34	492.93	183.90	1875.25	4.48
EVER 4	48.34	492.93	223.90	2283.13	4.48
EVER 5	98.34	1002.78	223.90	2283.13	9.12

METODO II

km 97+800

Cuadro 5.14: Desplazamientos en km 97+800 (método II)

km 97+800							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		2.00	1.20	0.88	0.40	0.00	
EVER 1		2.08	1.48	1.04	0.55	0.37	0.091
EVER 2		2.31	1.64	1.15	0.61	0.41	0.160
EVER 3		2.59	1.85	1.30	0.69	0.46	0.254
EVER 4		1.89	1.34	0.94	0.50	0.34	0.055
EVER 5		1.73	1.23	0.87	0.46	0.31	0.070

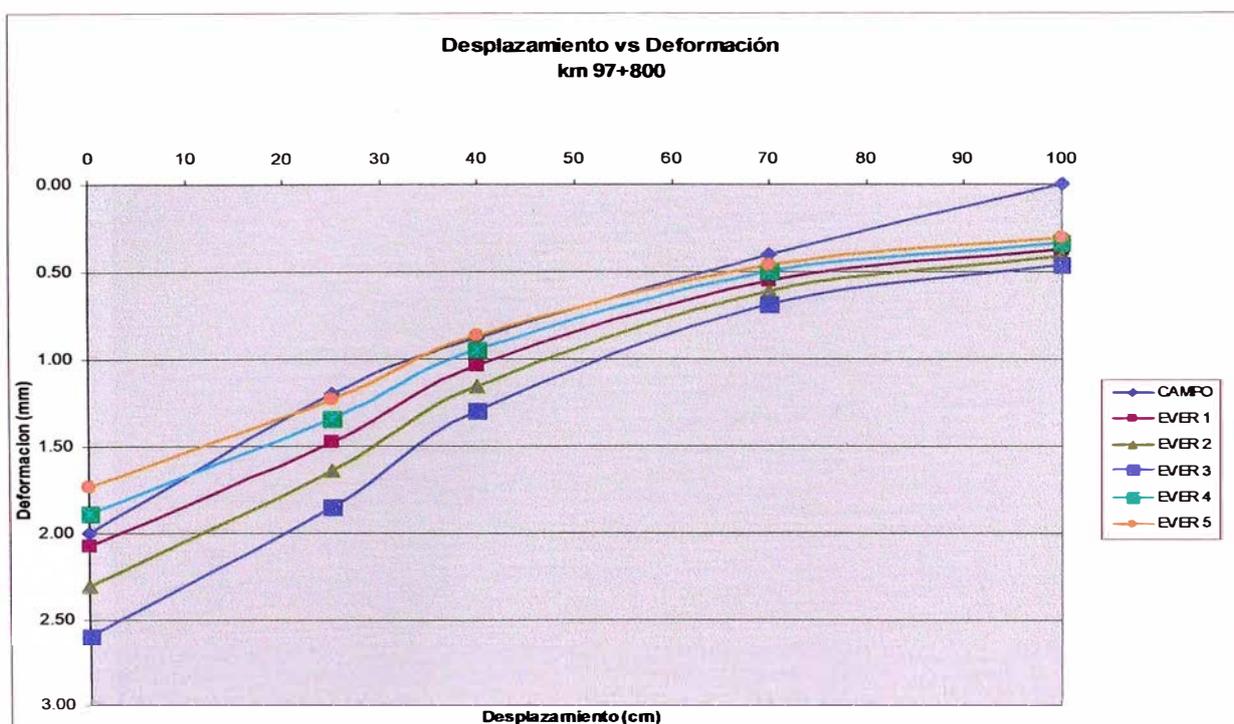


Figura 5.11: Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+800 (método II)

Cuadro 5.15: Módulos de elasticidad en km 97+800 (método II)

km 97+800					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	24.45	249.32	258.50	2635.99	2.27
EVER 2	22.00	224.39	232.65	2372.39	2.04
EVER 3	19.56	199.45	206.80	2108.79	1.81
EVER 4	26.89	274.25	284.35	2899.59	2.49
EVER 5	29.34	299.18	310.20	3163.19	2.72

km 97+900

Cuadro 5.16: Desplazamientos en km 97+900 (método II)

km 97+900							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.88	0.40	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.91	0.57	0.38	0.21	0.15	0.086
EVER 2		1.01	0.63	0.42	0.24	0.17	0.110
EVER 3		1.14	0.71	0.48	0.27	0.19	0.144
EVER 4		0.83	0.52	0.35	0.19	0.14	0.072
EVER 5		0.76	0.47	0.32	0.18	0.12	0.066

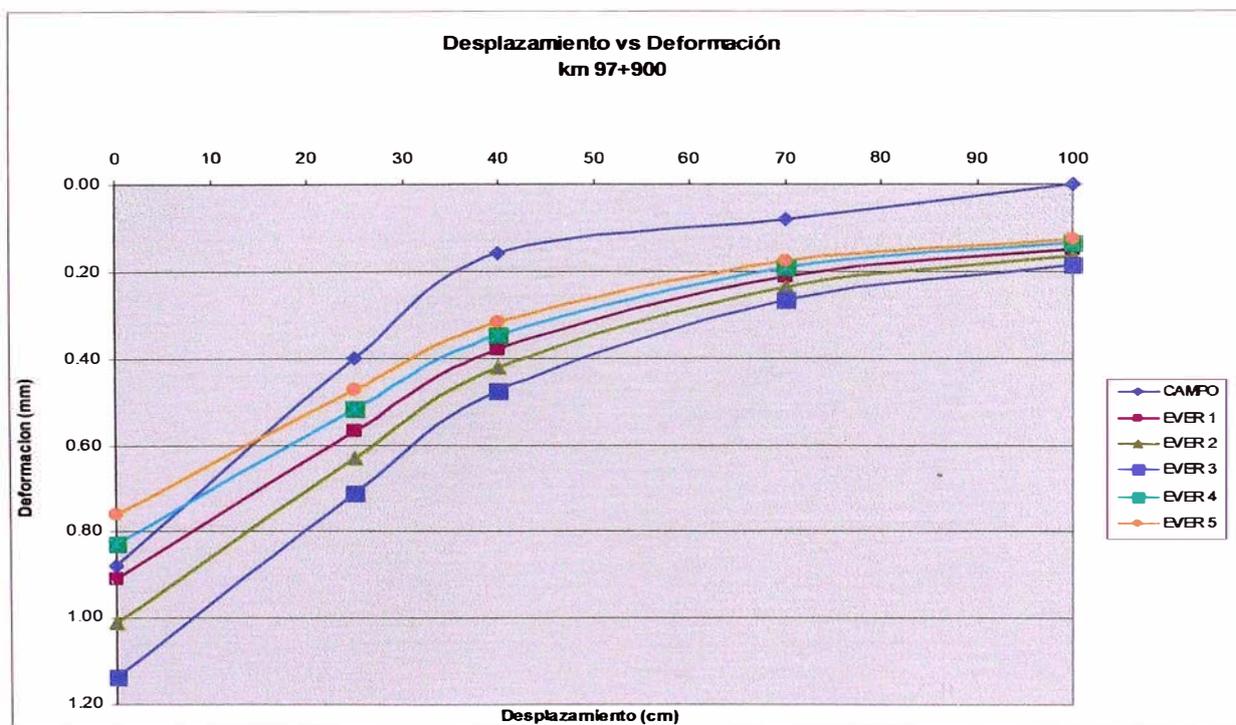


Figura 5.12: Gráfico desplazamiento vs deformación km 97+900 (método II)

Cuadro 5.17: Módulos de elasticidad en km 97+900 (método II)

km 97+900					
Lectura	E _o Mpa	E _o kg/cm ²	E* Mpa	E* kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	66.04	673.41	204.95	2089.86	6.12
EVER 2	59.44	606.07	184.45	1880.88	5.51
EVER 3	52.83	538.73	163.96	1671.89	4.90
EVER 4	72.64	740.75	225.44	2298.85	6.73
EVER 5	79.25	808.09	245.94	2507.83	7.35

km 98+000

Cuadro 5.18: Desplazamientos en km 98+000 (método II)

km 98+000							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.64	0.32	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.66	0.44	0.30	0.16	0.11	0.058
EVER 2		0.73	0.49	0.33	0.18	0.12	0.076
EVER 3		0.83	0.55	0.37	0.20	0.14	0.103
EVER 4		0.60	0.40	0.27	0.15	0.10	0.047
EVER 5		0.55	0.37	0.25	0.14	0.09	0.043

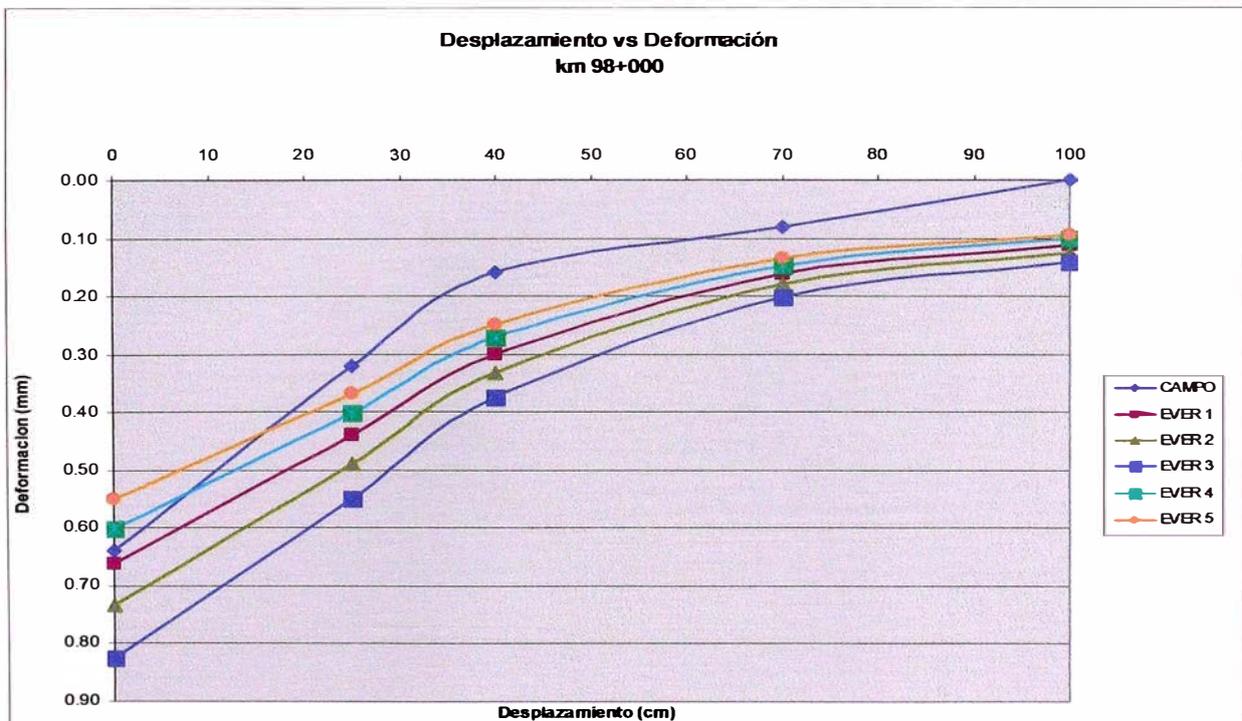


Figura 5.13: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+000 (método II)

Cuadro 5.19: Módulos de elasticidad en km 98+000 (método II)

km 98+000					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	85.03	867.08	480.99	4904.69	7.88
EVER 2	76.53	780.37	432.89	4414.22	7.09
EVER 3	68.03	693.66	384.79	3923.75	6.31
EVER 4	93.53	953.79	529.09	5395.16	8.67
EVER 5	102.04	1040.49	577.19	5885.63	9.46

km 98+100

Cuadro 5.20: Desplazamientos en km 98+100 (método II)

km 98+100							Desv. std σ
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.56	0.24	0.16	0.08	0.00	
EVER 1		0.58	0.40	0.27	0.15	0.10	0.057
EVER 2		0.64	0.44	0.30	0.16	0.11	0.074
EVER 3		0.72	0.50	0.34	0.18	0.13	0.097
EVER 4		0.53	0.36	0.25	0.13	0.09	0.046
EVER 5		0.48	0.33	0.23	0.12	0.08	0.041

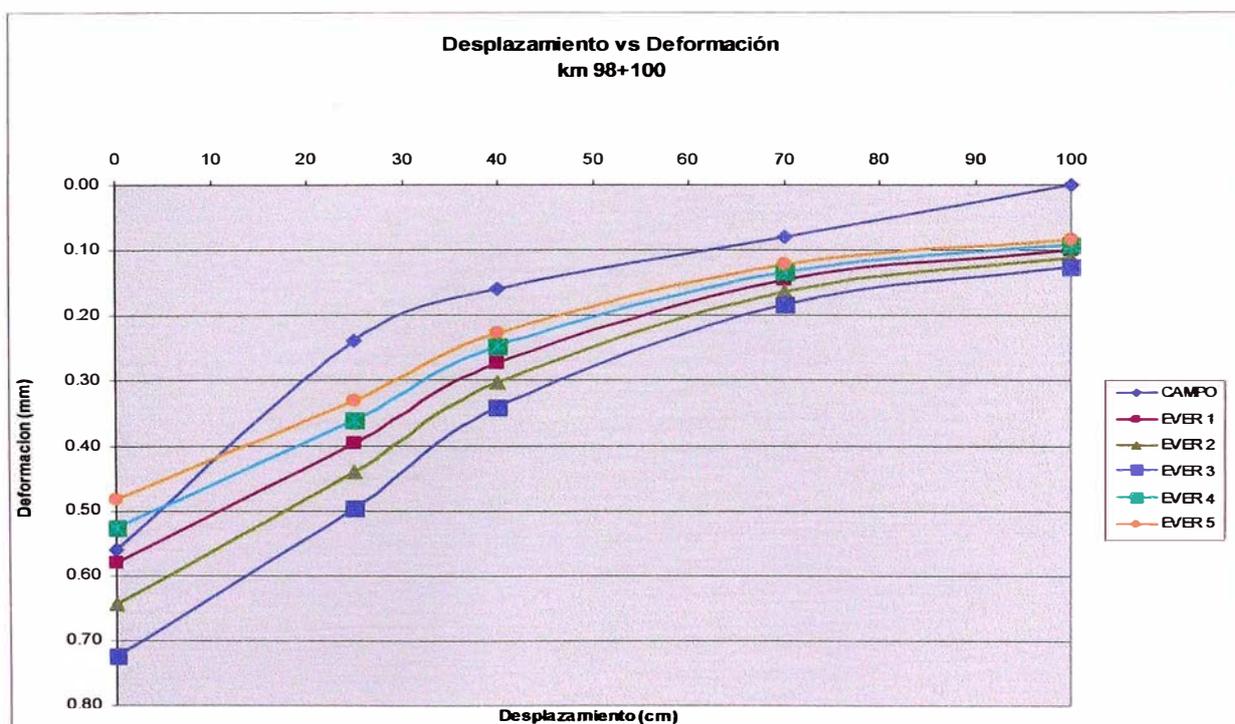


Figura 5.14: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+100 (método II)

Cuadro 5.21: Módulos de elasticidad en km 98+100 (método II)

km 98+100					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	93.59	954.31	674.61	6879.04	8.68
EVER 2	84.23	858.88	607.15	6191.13	7.81
EVER 3	74.87	763.45	539.69	5503.23	6.94
EVER 4	102.94	1049.74	742.07	7566.94	9.54
EVER 5	112.30	1145.17	809.53	8254.84	10.41

Km 98+200

Cuadro 5.22: Desplazamientos en km 98+200 (método II)

km 98+200							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		1.20	0.64	0.24	0.08	0.00	
EVER 1		1.24	0.78	0.52	0.29	0.20	0.107
EVER 2		1.38	0.86	0.58	0.32	0.23	0.138
EVER 3		1.55	0.97	0.65	0.36	0.25	0.185
EVER 4		1.13	0.71	0.47	0.26	0.18	0.091
EVER 5		1.03	0.65	0.43	0.24	0.17	0.087

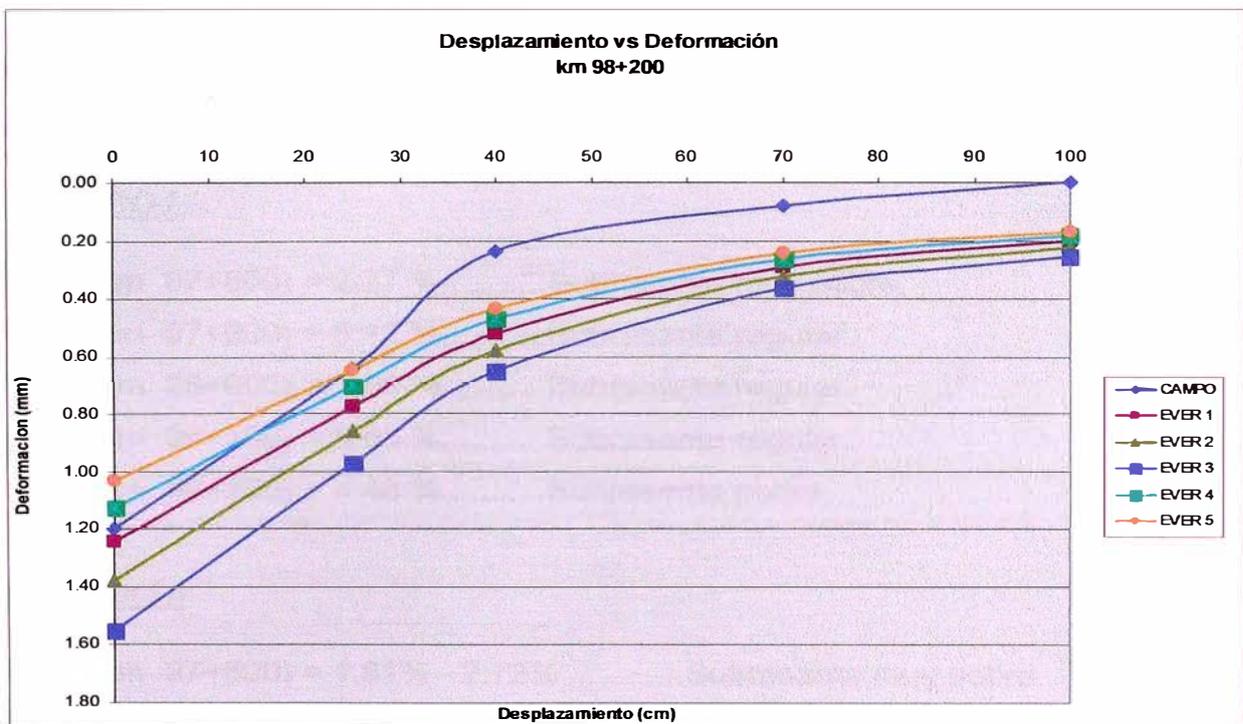


Figura 5.15: Gráfico desplazamiento vs deformación km 98+200 (método II)

Cuadro 5.23: Módulos de elasticidad en km 98+200 (método II)

km. 98+200					
Lectura	Eo Mpa	Eo kg/cm2	E* Mpa	E* kg/cm2	CBR %
CAMPO					
EVER 1	48.34	492.94	153.90	1569.32	4.48
EVER 2	43.51	443.65	138.51	1412.38	4.03
EVER 3	38.67	394.35	123.12	1255.45	3.59
EVER 4	53.18	542.23	169.29	1726.25	4.93
EVER 5	58.01	591.53	184.68	1883.18	5.38

5.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Cuadro 5.24: Rango de valores de CBR.

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

(Fuente : Manual para el diseño de caminos no pavimentados de Bajo Volumen de Transito del MTC)

De acuerdo al resultado en el cuadro N° 5.24, se puede apreciar la clasificación del estado actual del pavimento, según el rango establecido por el MTC.

METODO I

- CBR (km 97+800) = 2.27 %.....Subrasante muy pobre.
- CBR (km 97+900) = 6.12 %.....Subrasante regular.
- CBR (km 98+000) = 7.88 %.....Subrasante regular.
- CBR (km 98+100) = 8.68 %.....Subrasante regular.
- CBR (km 98+200) = 4.48 %.....Subrasante pobre.

METODO II

- CBR (km 97+800) = 1.81% - 2.72%.....Subrasante muy pobre.
- CBR (km 97+900) = 4.90% - 7.35%.....Subrasante entre pobre y regular.
- CBR (km 98+000) = 6.31% - 9.46%.....Subrasante regular.
- CBR (km 98+100) = 6.94% - 10.41%.....Subrasante regular.
- CBR (km 98+200) = 3.59% - 4.48%.....Subrasante pobre.

Las deflexiones con estos dos métodos obtienen resultados similares salvo los resultados obtenidos en el km 97+900.

En los puntos analizados el CBR varía de estación en estación dentro del tramo en estudio, la mayor parte de los puntos los valores de CBR presentan una subrasante regular, al tener la mayoría de puntos cumpliendo esta característica se califica la carretera con subrasante regular.

CONCLUSIONES

1. Los módulos E^* y E_0 del modelo de Hogg son valores iniciales para empezar a realizar los cálculos de aproximación, siendo el más confiable el E_0 .
2. La cantidad de puntos tomados en campo es insuficiente para aproximar los desplazamientos reales con los teóricos, se necesita de más puntos y mayor precisión en la toma de datos, lo que genera otro valor de incertidumbre para el cálculo de E^* con el método de Hogg.
3. Al cambiar los valores de E_0 , se producen variaciones mayores en los puntos de deflexión máxima, en los demás puntos, valores se acercan para converger al valor de cero, a una distancia mayor de 1m.
4. Al aumentar el valor de E_0 , se obtienen menos desplazamientos y viceversa.
5. La calificación del CBR de la carretera se da en función de la subrasante, ya que el material de subrasante con el material de la carpeta asfáltica son similares, puesto que las canteras de obtención de esta carpeta se encuentran próximos a la carretera.
6. Para este informe no se considero el tratamiento superficial monocapa, por constituir una capa no representativa del pavimento, debido a lo delgada y poco resistente.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una mayor toma de datos en cada punto para mejorar las aproximaciones de E_o y E^* .
2. La toma de datos se debe realizar por personal calificado, ya que al analizar los datos obtenidos de campo se observa que no guardan relación con las deflexiones teóricas obtenidas con el programa de elementos finitos.
3. Se recomienda usar modelos de elementos finitos para este tipo de trabajo, ya que se obtienen resultados más precisos, debido al refinamiento de la malla, lo que genera un mejor modelamiento (Jia Wang).
4. Realizar toma de datos en otras carreteras con las mismas condiciones para obtener un patrón de deflexiones en este tipo de carreteras, ya que no son las mismas que se observan en un pavimento flexible tradicional en la cual sus deflexiones ya están estandarizadas y validadas por WSDOT (Departamento de Transporte de Washington).
5. Realizar un monitoreo periódico de la carretera, la zona analizada presenta tratamiento monocapa y en el tiempo que lleva en servicio su deterioro ya se hace notorio, por lo que se debería analizar tramos con otro tipo de tratamiento.

BIBLIOGRAFIA:

1. DASHKO 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 Yacoub Tramer E., "Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study", University of Toronto, Canada, 2007.
3. HOFFMAN, Mario S. - Louis Berger Internacional Inc., Pablo m. Del Aguila, 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. REYES, Fredy L., "Diseño de Pavimentos por Métodos Racionales". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá, 1999.
6. TIMOSHENKO S., Woinowosky-Krieger S., "Teoría de Placas y Láminas", URMO SA, España, 1975
7. WANG, JIA, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements", The University of Maine, 2001.
8. ZIENKIEWICS O.C-TAYLOR R.L, "El Método de los Elementos Finitos", Mc Graw Hill, 1993.

ANEXO:

TOMA DE DATOS CON VIGA BENKELMAN

Diagrama de Flujo

