

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA
CAÑETE - YAUYOS – CHUPACA
CON VIGA BENKELMAN MÉTODO MATEMÁTICO
TRAMO km 79+000 - km 84+000**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

EDUARDO ALIAGA SILVA

Lima – Perú

2009

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
LISTA DE CUADROS.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.....	11
1.2 CARACTERÍSTICAS.....	12
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO	13
1.4 CLIMA	13
1.5 TRAMO EVALUADO km. 79+000- km 84+000	13
1.5.1 Ubicación	13
1.5.2 Descripción del tramo	15

CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE

2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS	
2.1.1 Sistemas elásticos de capas.....	16
2.1.2 Sistemas no lineales de capas.....	16
2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos.....	16
2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
2.2.1 Viga Benkelman.....	17
2.2.2 Dynaflec.....	17
2.2.3 Road Rater.....	18
2.2.4 RDD.....	19
2.2.5 FWD.....	19
2.2.6 KUAB – FWD.....	20

CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO

3.1 VIGA BENKELMAN	21
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	
3.2.1 Definiciones previas.....	24
3.2.2 Modelo Básico.....	26
3.2.3 Modelo de Maxwell.....	26

3.2.4	Modelo de Kelvin.....	26
3.2.5	Modelo de Burgers.....	26
3.2.6	Modelo Generalizado.....	27
3.3	MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	
3.3.1	Modelo de Boussinesq	27
3.3.2	Modelo de Hogg.....	28
3.3.3	Modelo de Westergaard.....	29
3.3.4	Modelos Bicapas.....	30
3.3.5	Modelos Multicapas.....	30
3.4	MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS	
3.4.1	Fórmula de Boussinesq.....	31
3.4.2	Fórmula de Westergaard.....	32
3.4.3	Fórmula de Palmer y Baber.....	32
3.4.4	Fórmula de Odemark.....	33
3.4.5	Método de Elementos Finitos.....	34
(a)	Descripción general de un modelo de MEF	34
(b)	Procedimiento de Generación de Sistemas de Capas	36
(c)	Criterio de Backcalculation.....	37
CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO KM. 79+000 – KM. 84+000		
4.1.	APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.....	38
4.2.	APLICACIÓN DEL MODELO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	42
CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		
5.1.	PUNTOS ANALIZADOS.....	44
CONCLUSIONES.....		58
RECOMENDACIONES.....		59
BIBLIOGRAFÍA.....		60
ANEXOS.....		61

RESUMEN

El presente documento contiene aspectos teóricos y técnicos para poder realizar una evaluación estructural del pavimento de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, precisamente del tramo km. 79+000 – km.84+000, mediante Ensayos No Destructivos (E.N.D) utilizando los valores obtenidos en campo mediante el deflectómetro mecánico conocido como Viga Benkelman, con el cual se mide la magnitud de la deflexión de cada punto donde se aplicó la carga rodante estandar.

Una vez obtenidos los valores de la deflexión se utiliza un programa de Elementos Finitos donde se ingresa las características propias del material que conforman el pavimento y con el cual se obtienen los desplazamientos verticales y la deformaciones.

Con la utilización del programa de Elementos Finitos se espera hallar las deflexiones teóricas del pavimento muy próximas a las tomadas en campo, el E con el que se calculen estas deflexiones es el que caracteriza al pavimento y con este valor obtenemos el valor de CBR, para luego hacer una comparación con el rango de valores del CBR que MTC recomienda.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 : Tramos y longitudes de la carretera.....	12
Cuadro 1.2 : Ubicación tramo en estudio.....	14
Cuadro 1.3 : Ensayos realizados en el Tramo km 79+000 - km 80+000 ...	15
Cuadro 4.1 : Datos registrados en campo.....	41
Cuadro 5.1 : Valores del E_o y E^*	44
Cuadro 5.2 : Deflexiones de campo.....	44
Cuadro 5.3 : Rango de valores del CBR	46
Cuadro 5.4 : Valores obtenidos en campo km 80+100 (Caso I)	47
Cuadro 5.5: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado ... (Caso I)	47
Cuadro 5.6 : Valores obtenidos en campo km 80+200 (Caso I)	48
Cuadro 5.7: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado (Caso I)	48
Cuadro 5.8 : Valores obtenidos en campo km 80+300 (Caso I)	49
Cuadro 5.9: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado (Caso I)	49
Cuadro 5.10 : Valores obtenidos en campo km 80+400 (Caso I)	50
Cuadro 5.11: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado (Caso I)	50
Cuadro 5.12: Valores obtenidos en campo km 80+500 (Caso I)	51
Cuadro 5.13: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado(Caso I)	51
Cuadro 5.14: Valores obtenidos en campo km 80+100 (Caso II)	52
Cuadro 5.15: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado ... (Caso II)	52
Cuadro 5.16 : Valores obtenidos en campo km 80+200 (Caso II)	53
Cuadro 5.17: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado (Caso II)	53
Cuadro 5.18: Valores obtenidos en campo km 80+300. (Caso II)	54
Cuadro 5.19: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado(Caso II)	54
Cuadro 5.20: Valores obtenidos en campo km 80+400 .(Caso II)	55
Cuadro 5.21: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado ... (Caso II)	55
Cuadro 5.22: Valores obtenidos en campo km 80+500 .(Caso II)	56
Cuadro 5.23: Módulo E_o, E_I y valor de CBR hallado (Caso II)	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	: Mapa de ubicación del Corredor Vial N° 13.....	11
Figura 1.2	: Plano Clave del Corredor Vial N°1.....	14
Figura 2.1	: Viga Benkelman.....	17
Figura 2.2	: Equipo Dynaflec.....	18
Figura 2.3	: Road Rater.....	18
Figura 2.4	: Deflectómetro dinámico de balanza.....	19
Figura 2.5	: Equipo Dynaflec.....	19
Figura 2.6	: Equipo KUAB FWD.....	20
Figura 3.1	: Operación Viga Benkelman.....	21
Figura 3.2	: Configuración geométrica.....	22
Figura 3.3	: Esquematización de medición.....	23
Figura 3.4	: Modelos mecánicos de materiales viscosos.....	25
Figura 3.5	: Esfuerzos provocados en un punto.....	27
Figura 3.6	: Modelo de Hogg.....	29
Figura 3.7	: Modelo de Westergaard.....	30
Figura 3.8	: Modelo multicapas.....	31
Figura 3.9	: Representación de un masivo infinito.....	31
Figura 3.10	: Multicapa propuesto con Palmer y Baber.....	32
Figura 3.11	: Multicapa propuesto por Odemark.....	33
Figura 3.12	: Modelo de Elementos Finitos.....	34
Figura 3.13	: Vista en planta del enmallado.....	34
Figura 3.14	: Vista en elevación del enmallado.....	35
Figura 3.15	: Vista en 3D del elemento.....	36
Figura 4.1	: Varilla de ubicación de puntos.....	40
Figura 4.2	: Lectura de deflexión.....	40
Figura 4.3	: Medida de temperatura del asfalto.....	41
Figura 4.4	: Idealización de las capas del pavimento.....	43

Figura 4.5 : Refinamiento de la malla para análisis del pavimento.....	43
Figura 5.1 : Desplazamiento vs Deformación km 80+100 (Caso I).....	47
Figura 5.2 : Desplazamiento vs Deformación km 80+200 (Caso I)	48
Figura 5.3 : Desplazamiento vs Deformación km 80+300 (Caso I).....	49
Figura 5.4 : Desplazamiento vs Deformación km 80+400 (Caso I)	50
Figura 5.5 : Desplazamiento vs Deformación km 80+500 (Caso I)	51
Figura 5.6 : Desplazamiento vs Deformación km 80+100 (Caso II).....	52
Figura 5.7 : Desplazamiento vs Deformación km 80+200 (Caso II)	53
Figura 5.8 : Desplazamiento vs Deformación km 80+300 (Caso II).....	54
Figura 5.9 : Desplazamiento vs Deformación km 80+400 (Caso II)	55
Figura 5.10 : Desplazamiento vs Deformación km 80+500 (Caso II).....	56

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
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
M_r	Módulo Resiliente
MDS	Máxima Densidad Seca
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
RDD	El Deflectómetro dinámico del balanceo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TSB	Tratamiento Superficial Bicapa
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería
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

h_1	Espesor de Pavimento
i	Número entero mayor igual que cero
J_0	Función de Bessel de primera especie y orden 0
J_1	Función de Bessel de primera especie y orden 1
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
K_1	Coefficiente no lineal del material granular
K_2	Exponente no lineal del material granular
k	Módulo de reacción
L_0	Longitud Característica
m	Variable de integración
P	Carga
q_0	Presión de Inflado
R	Distancia a la que se mide la deflexión D_R
μ	Ratio de Poisson
μ_0	Ratio de Poisson de la capa subarasante
μ_1	Ratio de Poisson del Pavimento
T_i	Tiempo de retardo del i ésimo modelo de Maxwell
T_0	Tiempo de retardo del modelo de Maxwell
T_1	Tiempo de retardo del modelo de Kelvin
t	Tiempo
σ	Esfuerzo
σ_0	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell
σ_i	Esfuerzo del modelo de Kelvin
ε	Deformación unitaria
δ	Desplazamiento vertical unitario
λ	Viscosidad
λ_0	Viscosidad del modelo de Maxwell
λ_1	Viscosidad del modelo de Kelvin
θ	Primer esfuerzo Invariante
ρ	Presión vertical
∇	Operador naba
$\Delta(0, r)$	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 presente año 2009, en la especialidad de vialidad, ha programado como Informe de Suficiencia del Proyecto de Diseño no Tradicional para Pavimentos de Bajo Volumen de Tránsito, enmarcado en el Convenio UNI-MTC para los trabajos de evaluación estructural de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, tramo Km. 79+000 al Km. 84+000, cuyo objetivo es identificar, evaluar, analizar y dar soluciones a los problemas de ingeniería que se presenten.

El desarrollo del presente informe tiene como objetivo verificar los datos estándares de capacidad estructural en el monitoreo de los trabajos de mantenimiento y conservación de carreteras, respecto al comportamiento en el tiempo de la superficie de rodadura, contribuyendo así a la elaboración de un manual para vías de bajo volumen de tránsito.

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

Capítulo I: *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 analizado en el presente trabajo.

Capítulo II: *Estado del Arte*.- Este capítulo se desarrollarán los fundamentos teóricos y/o conceptuales que se requieren para el desarrollo del Informe de Suficiencia.

Capítulo III: *Marco Teórico*.- En este capítulo se presentan los modelos, métodos que estudian a los pavimentos flexibles y sus respectivas ecuaciones.

Capítulo IV: *Aplicación al Tramo Km.79+000 al Km.84+000.*- En este capítulo se aplican los procedimientos indicados en el capítulo 3 para obtener los desplazamientos en los puntos seleccionados para la evaluación.

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

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La Carretera Cañete-Yauyos-Chupaca es una vía de 271.73 km. que integra los centros poblados de las provincias de Lima y Junín, como también las zonas rurales que se encuentran a todo lo largo de ésta. El mantenimiento, conservación y mejora de esta vía ayuda a la integración de los poblados, eleva la calidad de vida, produce mejoras económicas, propicia el desarrollo sostenido de la zona.

Inicialmente la Carretera de penetración fue proyectada por partes durante el gobierno de Augusto B. Leguía entre los años 1920 y 1930, mediante la ley 4113 decretada por la conscripción Vial Territorial del Perú, y durante el gobierno del Dr. Manuel Prado en los años 1940 y 1944 desde Cañete hasta Yauyos, quedando paralizada a mediados de los años 50 y no se llegó a realizar los trabajos de las zonas de Yauyos –Huancayo.



Figura N°1.1. Mapa de Ubicación del Corredor Vial N°13 (Fuente: Provias Nacional)

Mediante Resolución Ministerial N°223-2007- MTC-02, modificada por Resolución Ministerial 408-2007-MTC/02, se crea el programa Proyecto Perú, que se encuentra bajo responsabilidad de Provias Nacional y el cual es un programa de infraestructura vial diseñado para mejorar las vías de integración y en el cual está incluida la Carretera Cañete-Yauyos-Chupaca.

Con el fin de mantener en óptimas condiciones la carretera se realiza la convocatoria, para el concurso público N°034-2007-MTC/20 Servicio de Conservación vial por Niveles de servicio de la Carretera “Cañete-Lunahuana-Pacarán-Chupaca y rehabilitación del tramo Zuñiga- Dv. Yauyos-Ronchas”.

Esta convocatoria la gana el Consorcio Gestión de Carreteras (CGC), donde mediante el contrato N° 288-2007-MTC/20 del 27 de Diciembre del 2007 asume la responsabilidad de efectuar el “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete-Lunahuana-Pacaran-Dv. Yauyos-Ronchas” por un período de 5 años y un valor de S/. 131,589,139.71.

1.2 CARACTERISTICAS

Nombre de la Carretera: CARRETERA CAÑETE – YAUYOS – CHUPACA.

Lugar de inicio: CAÑETE, Km.1+805.

Lugar de término: CHUPACA, Km.273+531.

Longitud: 271.73 Km.

Corredor Vial N°13.

Ruta Nacional: 024.

Carretera de 3er Orden.

Tramo evaluado por el Curso de Titulación:

Inicio: ZUÑIGA, km: 59+000; Final: CALACHOTA, km: 104+000

CUADRO 1.1 TRAMOS Y LONGITUDES DE LA CARRETERA EN ESTUDIO

(Fuente: Elaboración Propia)

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

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La carretera se desarrolla en las márgenes del Río Cañete; el valle del Río Cañete se forma a manera de una estrecha garganta cuanto más se aproxima a los contrafuertes andinos. Todas las superficies de los cerros son pétreas, rocallosas, reseca y completamente desprovistas de condiciones naturales para la agricultura, por falta de agua. Esta área corresponde a la región Yunga (500 msnm - 2300 msnm).

1.4 CLIMA

El tramo de carretera evaluado por el Curso de Titulación corresponde a la región Yunga, según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal (expuesta en su obra "Geografía del Perú").

Esta región se caracteriza por ser de sol dominante durante casi todo el año. La temperatura fluctúa entre 20 y 27°C durante el día; las noches son frescas, a causa de los vientos que bajan de las regiones más altas.

1.5 TRAMO EVALUADO km 79+000 – km 84+000

1.5.1 Ubicación

El tramo de la carretera en estudio, la cual es parte de la ruta N° 022 de la Red Vial Nacional (Hoy corredor Vial N°13) tiene los siguientes datos:

Inicio: CATAHUASI (1250m.s.n.m.), Km. 79+000.

Final: CATAHUASI (1370m.s.n.m.), Km. 84+000.

Longitud: 5.00 Km.

Altitud: 1310m.s.n.m. prom.

Temp. Mín.: 20°C, Temp. Max.: 27°C.

Época de lluvias: Enero a Marzo.

Años de servicio hasta la fecha: más de 50 años

Valor de CBR al 95% de la MDS : 19.2 (%)

CUADRO 1.2 UBICACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

Departamento / Región:	Lima
Provincia:	Yauyos
Distrito:	Catahuasi
Localidad:	Catahuasi
Región Geográfica:	Costa
Altitud:	1250 m.s.n.m. - 1370 m.s.n.m.
Coordenadas:	403276 E – 8584899 N
	400045 E – 8587062 N

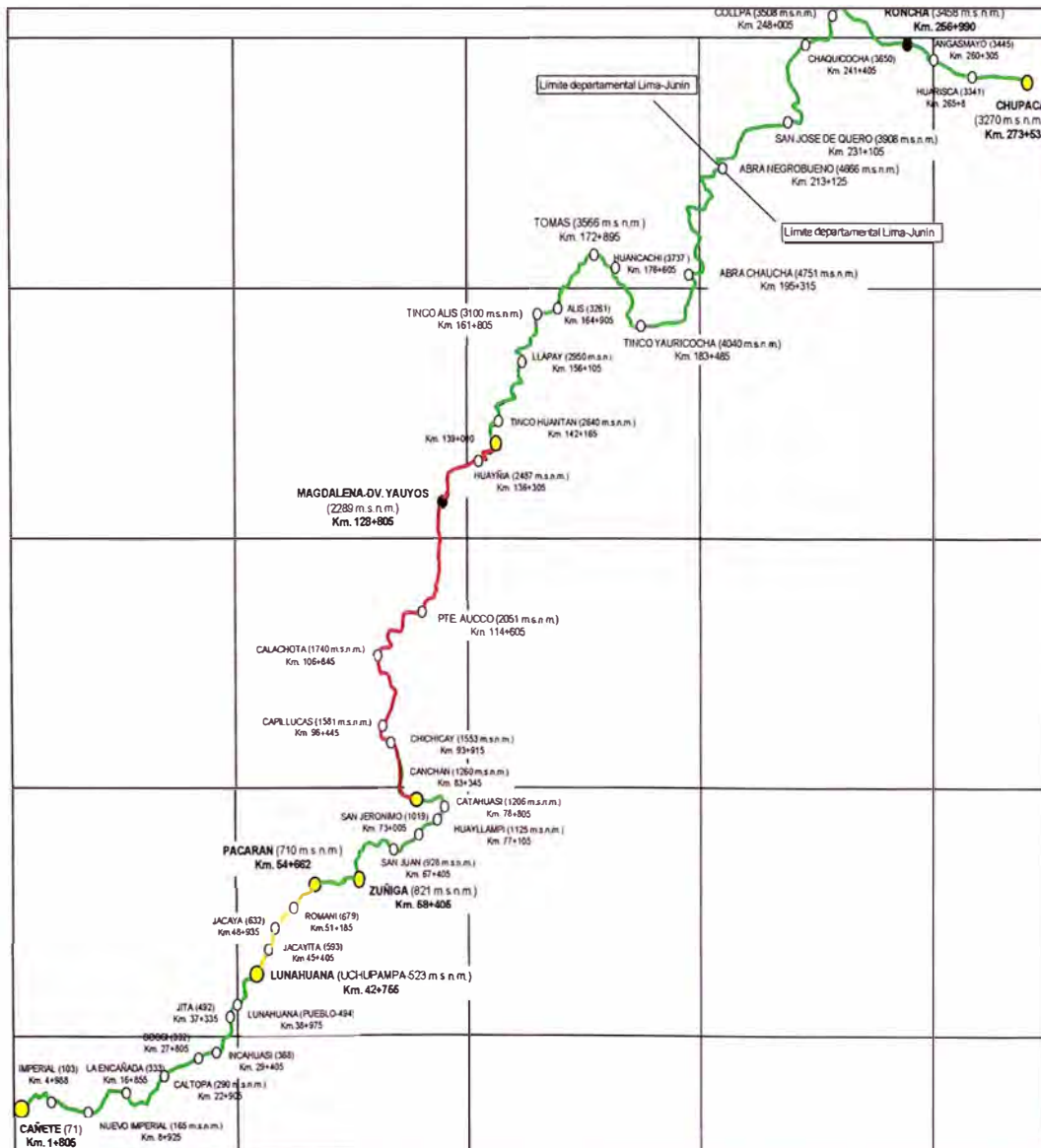


Figura 1.2 Plano Clave del Corredor Vial N°13






(Fuente: Provias Nacional)

1.5.2 Descripción del tramo

El tramo en estudio presenta una topografía bastante sinuosa, siguiendo el flujo del río Cañete aguas arriba cuyo valle es estrecho. Los agregados gruesos de este material arenoso son de forma subangular, mientras que la matriz tiene plasticidad comprendida entre escasa a moderada (como máximo I.P. = 6%). La carretera se desarrolla en media ladera, cuyo material de plataforma vial se clasifica según el sistema SUCS como SC-SM (arena arcillosa y limosa).

Cuadro 1.3: Ensayos realizados en el tramo km 79+000 - km 84+000

FENOMENOS GEODINAMICOS		80	81	82	83	84				
RUGOSIDAD										
CALICATA N°		CV-78	CV-79	CV-80	CV-81	CV-82	CV-83	CV-84	CV-85	CV-86
PROGRESIVA		80+040	80+510	80+980	81+460	81+980	82+580	82+920	83+410	83+900
PROFUNDIDAD		0.00-1.60	0.00-1.50	0.00-1.60	0.00-1.60	0.00-1.40	0.00-0.50	0.00-1.50	0.00-0.40	0.00-0.15
HUMEDAD NATURAL										
L. L.		NT	NT	NT	NT	NT	NT		NT	NT
L. P.		NP	NP	NP	NP	NP	NP		NP	NP
I. P.		NP	NP	NP	NP	NP	NP		NP	NP
%PASA MALLA NRO 200		7.7	10.9	8.2	7.8	11.1	5.7		10.6	5.6
CLASIFICACION AASHTO		A-1-b(0)	A-1-b(0)	A-1-b(0)	A-1-b(0)	A-1-b(0)	A-1-a(0)		A-2-4(0)	A-1-a(0)
CLASIFICACION SUCS		SC-SM	SC-SM	SC-SM	SC-SM	SC-SM	GC-GM		(R)	SC-SM
PROCTOR (MDS)										
CBR (100%)										
PROFUNDIDAD						0.50-1.50			0.40-1.60	0.15-1.50
HUMEDAD NATURAL (%)										
L. L.							NT		NT	NT
L. P.							NP		NP	NP
I. P.							NP		NP	NP
%PASA MALLA NRO 200							20.2		22.4	19.7
CLASIFICACION AASHTO							A-1-b(0)		A-1-b(0)	A-1-b(0)
CLASIFICACION SUCS							GM		SM	GM
PROCTOR (MDS)							2.206			
CBR (100%)							56.0			

CUADRO DE REFERENCIAS					
	GRAVA REDONDEADA	GRAVA ANGULAR	ARENA	LIMO	ARCILLA DE BAJA A MEDIANA PLASTICIDAD

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 que tipo de comportamiento tendrá el suelo, a continuación se indica las 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.

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

Donde K_1 y K_2 son constantes experimentales y θ es el esfuerzo invariante. El cual es la sumatoria de los esfuerzos normales $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ó la suma de los 3 principales esfuerzos $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

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

2.1.3 Sistemas lineales Viscoelásticos

Ciertos materiales pueden presentar combinaciones de características sólidas 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 la aplicaciones de cargas estáticos 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 III.



(fuente propia)

Figura N° 2.1: Viga Benkelman

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")

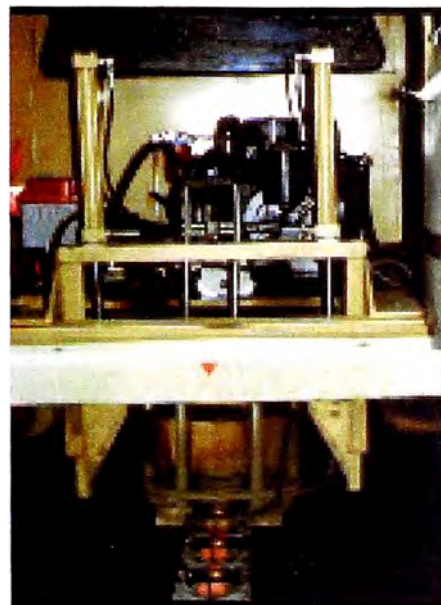


Fuente: internet

Figura 2.2: Equipo Dynaflec

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: 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: Equipo 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 semiarmónica, 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: internet

Figura 2.6: Equipo KUAB FWD

CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO

Para obtener las propiedades de la carpeta de rodadura se miden las deflexiones con la Viga Benkelman (V.B). 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 deflectómetro Benkelman funciona mediante el principio de palanca, es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura 3.1a. 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.

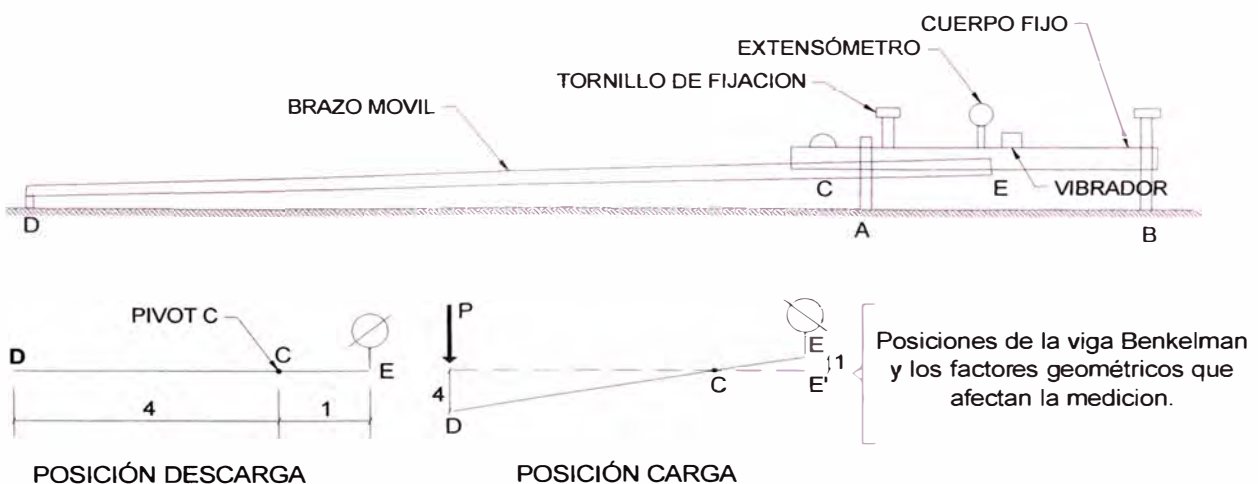


Figura N°3.1: Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

METODOLOGÍA DE MEDICION 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 3.2(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 3.2(b)), se hace coincidir (las marcas de la viga con la varilla). Para medir las deflexiones del pavimento.

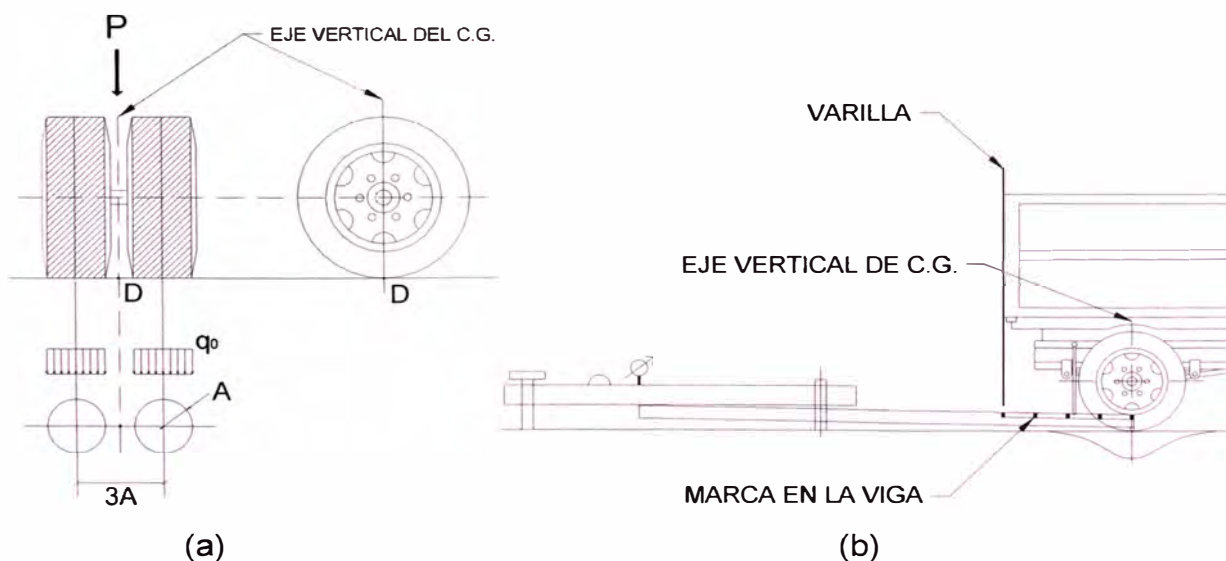
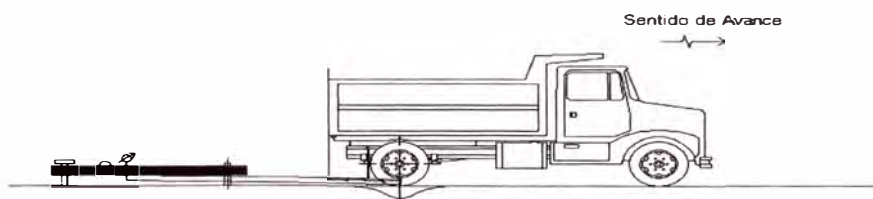


Figura N°3.2: Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.

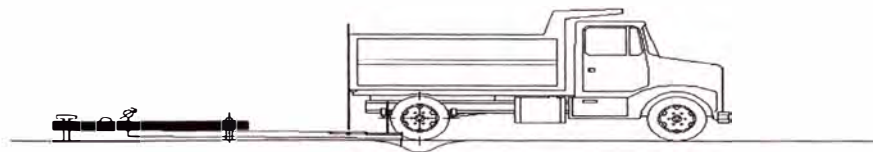
Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, pero se pueden obtener más con fines de verificación, lo cual es recomendable si se desea tener una idea gráfica del tipo de curva de deflexión que se produce.

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.

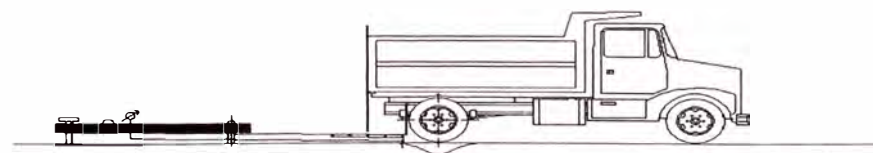
Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial (ver Figura 3.3(a)), se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas (Figuras 3.3(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 3.3(d)).



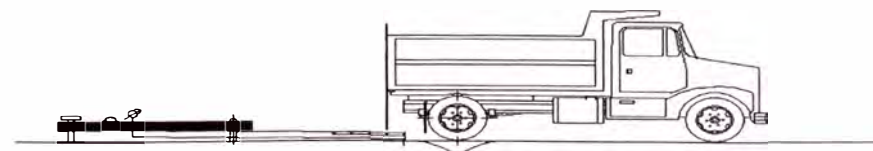
a) Posición Inicial (D_0 =Deflexión Inicial)



b) Posición a 25cm (D_{25}).



c) Posición a 40cm (D_{40}).



d) Posición a 70cm (D_{70}).

Fuente: Pablo del Águila

Figura N°3.3 Esquematzación del proceso de medición con 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.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

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

3.2.1 Definiciones previas

Módulo resiliente (M_r)

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

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

Donde:

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

ε_r : Deformada Recuperable (cm)

Ratio de Poisson (ν)

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

Módulo de Elasticidad (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.

Peso unitario (γ)

Es el peso por unidad de volumen

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

Coeficiente de expansión térmica

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

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:

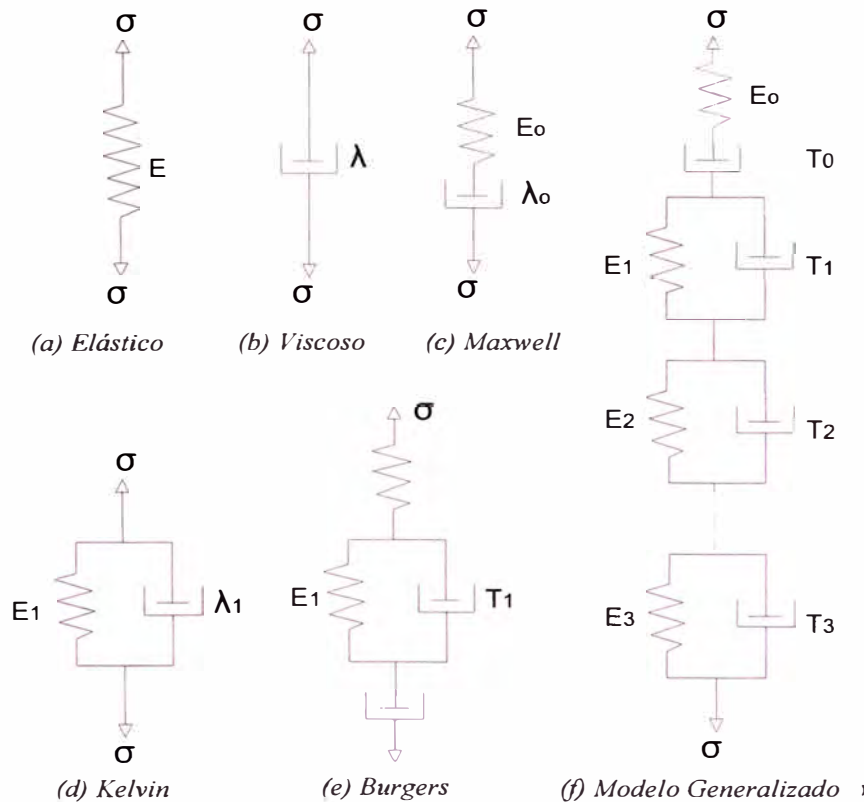


Figura N°3.4: Modelos Mecánicos para materiales viscoelásticos

3.2.2 Modelo Básico

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en Figura 3.4(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 Figura 3.4(b), y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo:

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

3.2.3 Modelo de Maxwell

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la Figura 3.4(c)

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

3.2.4 Modelo de Kelvin

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la Figura 3.4(d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usa el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin,

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

3.2.5 Modelo de Burgers

Un modelo de Burgers es una combinación del modelo del Maxwell y de Kelvin, según lo indicado en la Figura 3.4(e).

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

3.2.6 Modelo Generalizado

La Figura 3.4(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 podemos 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".

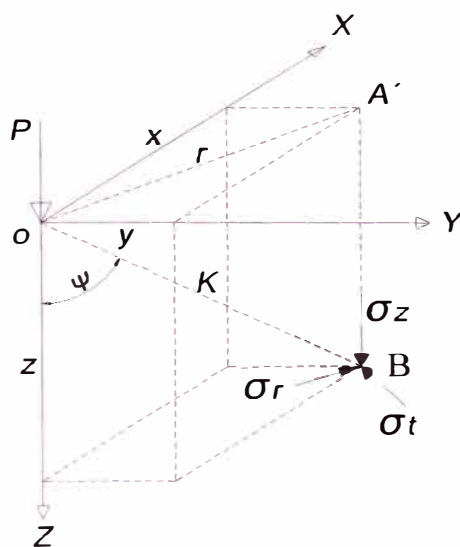


FIGURA N° 3.5: Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada

En el problema de Boussinesq se plantea las siguientes expresiones para la determinación de los esfuerzos. De la Figura 3.5 los esfuerzos en el punto B pueden escribirse:

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

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

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

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:

$$D \cdot \nabla^2 \bar{\omega} = p \quad (3.11)$$

Donde :

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

D = rigidez de la placa.

$\bar{\omega}$ = 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_j = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

μ = Ratio de Poisson.

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

Con la transformada de Hankel la ecuación 3.17 para $z=0$ tiene como solución:

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

Donde:

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

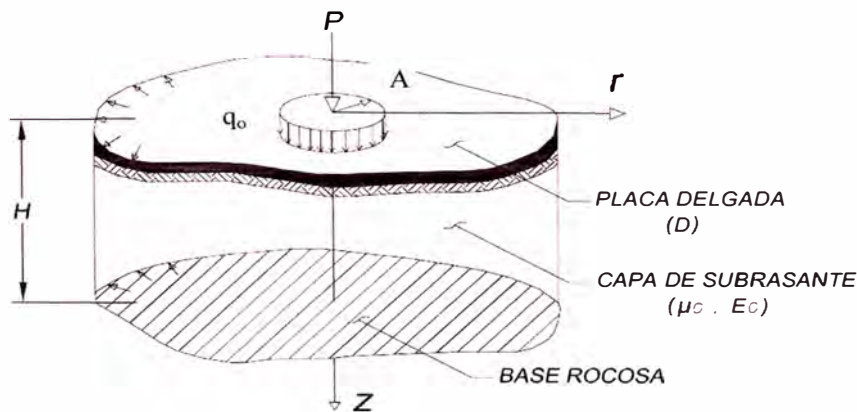


FIGURA N° 3.6 Modelo de Hogg

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 “ 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.

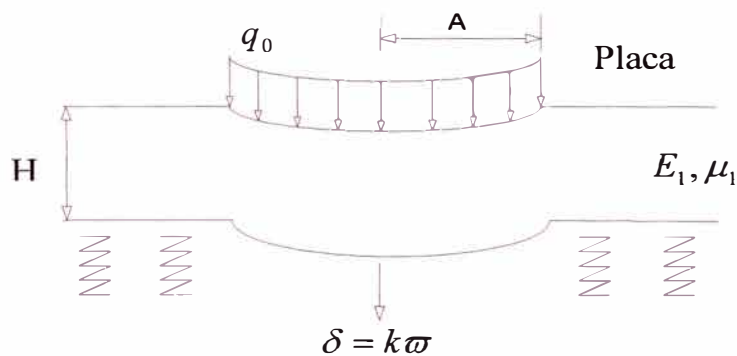


Figura N°3.7: Modelo de Westergaard

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).

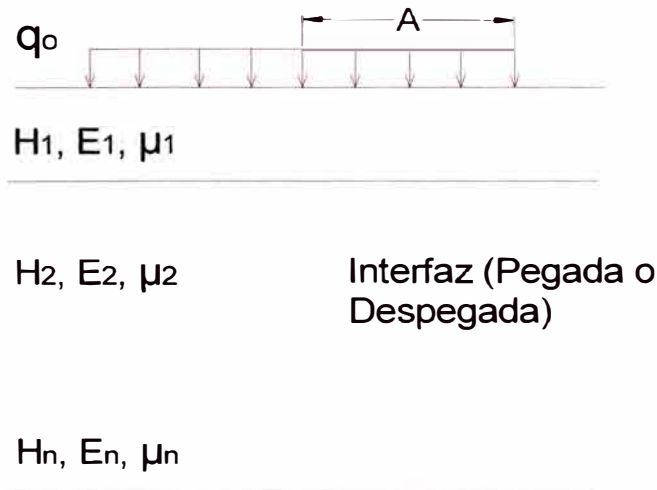


Figura N° 3.8: Modelo multicapas.

3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS

3.4.1 Fórmulas de Boussinesq

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

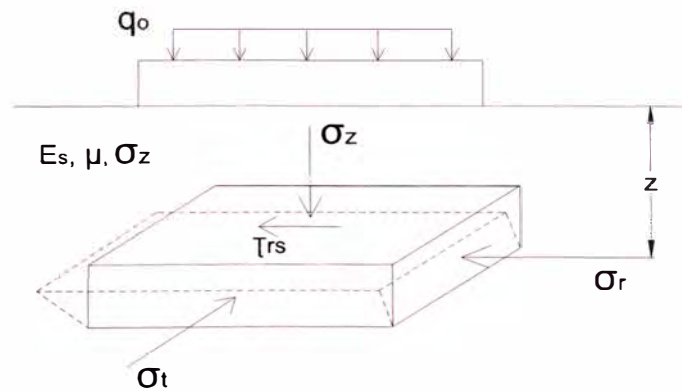


FIGURA N° 3.9: Representación de un masivo infinito

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

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

Donde K la distancia de donde se aplica un diferencial de carga hasta el punto en el suelo donde se mide el esfuerzo

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.

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

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

Donde : k es el módulo de reacción.

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:

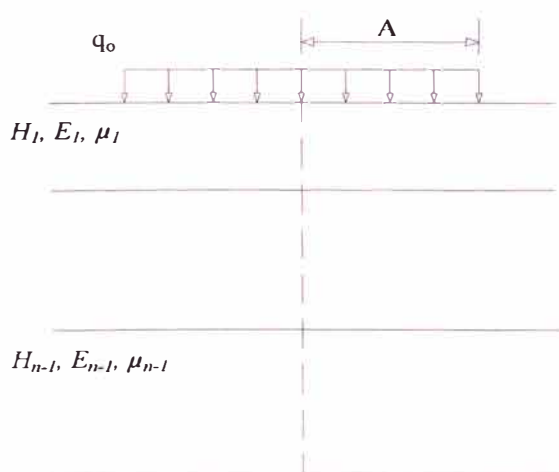


FIGURA N°3.10: Multicapa propuesta con la fórmula de Palmer y Baber generalizada.

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

La ecuación 3.19 será necesaria para relacionar los módulos de elasticidad en la aplicación del método 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 semiinfinito de características mecánicas E_n y μ_n .

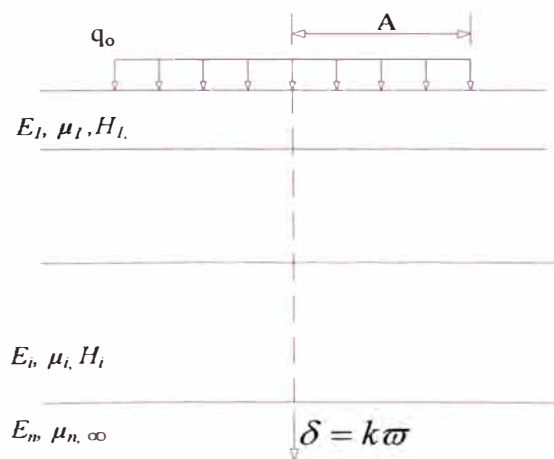


FIGURA N° 3.11: Multicapa propuesta con la fórmula de Odemark

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

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.

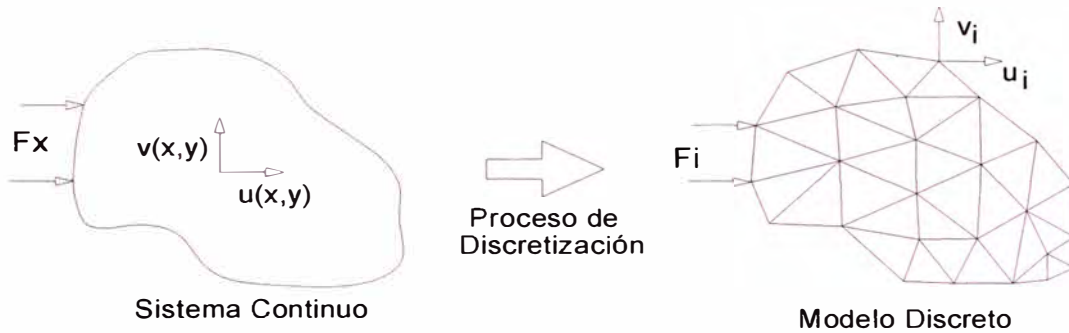


Figura N° 3.12 Modelo de Elementos Finitos

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.

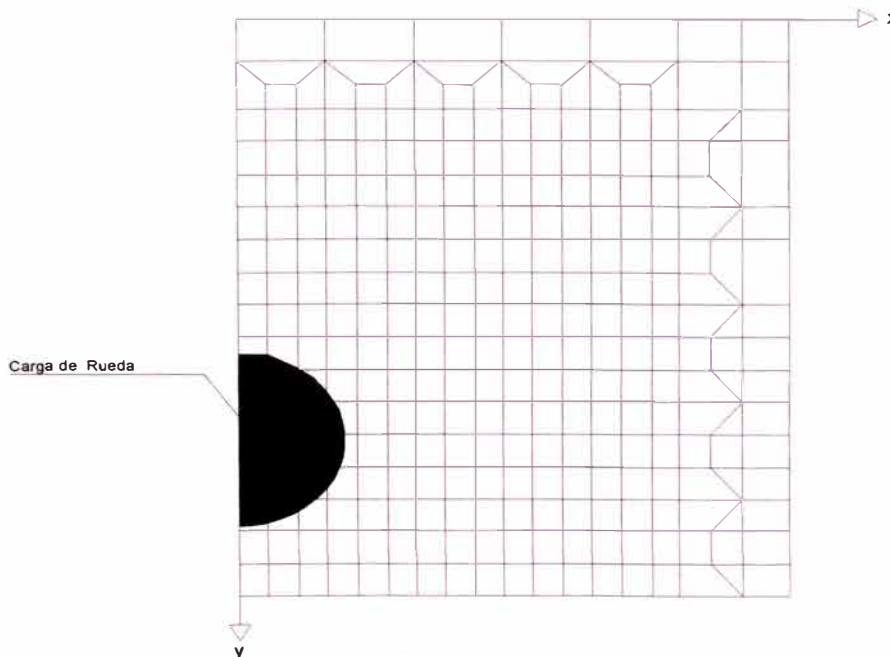


Figura N°3.13: Vista en planta del enmallado de un pavimento

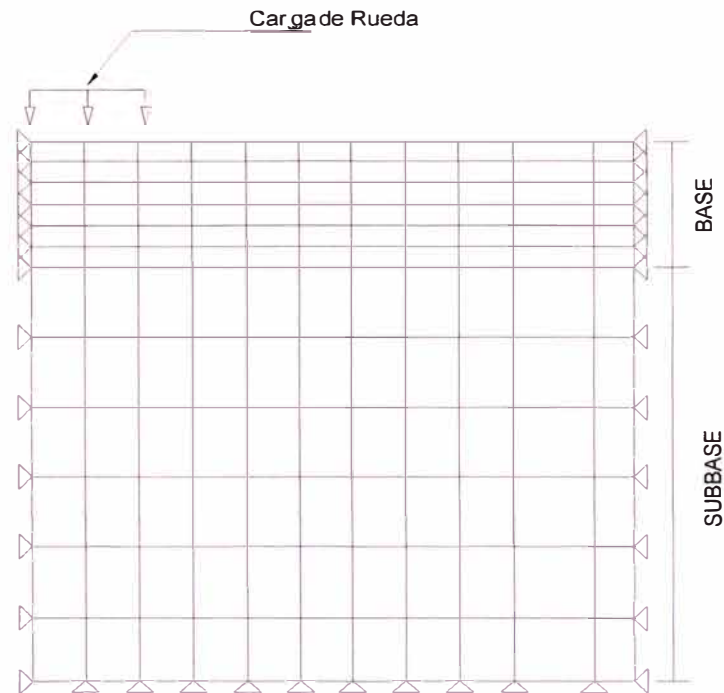


Figura N°3.14 Vista en elevación del enmallado de un pavimento.

El pavimento representado con elementos finitos está compuesto de 2 capas con diferentes características, estas capas 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 3.13. 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 darán mejores resultados pero consumirá más tiempo a la hora de procesar los datos.

Por lo tanto, es conveniente 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, el programa EVERSTRESS realiza un refinamiento a partir de una malla base integrado con el fin lograr la convergencia de los resultados.

Elementos Tipo.

Existen varios tipos de bloques en elementos finitos (E.F) como los elementos de 8 nodos, 27 nodos y 32 nodos; en general cuantos más nodos por elemento existan, mejores funciones de frontera existe entre elementos contiguos.

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

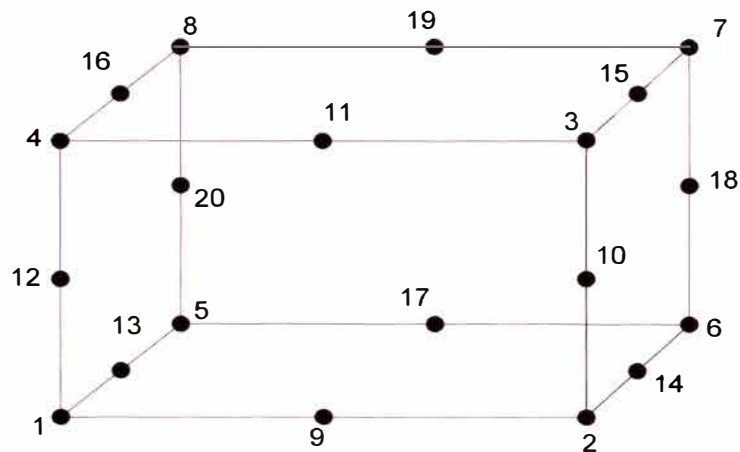


Fig.Nº3.15: Vista en 3D del Elementos Enmallado

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:

- 1 *Loop* para reconocer todas las capas
- 2 **for** $i=1$ a numero de capas
- 3 la fracción de malla (l) cerca de la carga de las ruedas

- 4 fracciones de malla de algunas capas a lo largo de la superficie y unir a la fracción (*l*)
- 5 **End**
- 6 *Loop* para cada 2 intervalos
- 7 **for** *i*= 1 to 2;
- 8 fracción de la malla (*entre l*) cerca de carga de ruedas;
- 9 Fracción de mallas de algunas capas a lo largo de la superficie y unir a la fracción (*entre l*);
- 10 **End**
- 11 Unir las capas de los intervalos a las capas que conforman el pavimento;
- 12 **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 requieren una serie de reiteraciones y de condiciones para ajustar la solución con criterios de ingenieriles

CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO km 79+000 – km 84+000

4.1. APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

La deflectometría consistió 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 hizo las medidas desde el km 80+500 en forma decreciente terminado en el km 80 +100 . Se obtuvieron registros en 5 puntos (estacas).
- Se utilizó la viga Benkelman de brazo simple con relación de brazo 1:4.
- 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 fue 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.

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.



Figura N°4.1 Varilla de ubicación de puntos para toma de datos

- 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, ver fig. N° 4.1.
- Al escuchar las indicaciones los lectores dirán en voz fuerte y clara las medidas indicadas por el extensómetro, mientras que otro operador las anotará, ver Figura N° 4.2.



Figura N° 4.2 Lectura de deflexiones

- Se procede a la medición de la temperatura que presenta el asfalto en el punto en medición, ver fig. 4.3. Se toma una pequeña muestra del espesor del pavimento.



Figura N°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 .

Finalmente , obtenida toda la información de campo se procede a calcular los valores de las deflexiones de cada subtramo.

Cuadro N° 4. 1 Datos registrados en campo

N°	Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)
		L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}		
12	80+100	6	10	14	18	0.01	55.0
13	80+200	8	12	20	26	0.01	52.0
14	80+300	10	16	24	30	0.01	56.0
15	80+400	8	18	24	26	0.01	56.0
16	80+500	12	18	28	32	0.01	54.0

4.2. APLICACIÓN CON MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se aproxima los desplazamientos teóricos con los de campo con ayuda del programa EverstreesFE (programa desarrollado en Washington State Department 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 la convergencia se realice en menos tiempo.

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)
2. Espesor de la carpeta asfáltica
3. Espesor de la subrasante
4. Enmallado
 - Número de divisiones a lo largo de los elementos Longitudinales
 - Número de divisiones a lo largo de los elementos Tranversales
 - Número de elementos de divisiones al espesor del pavimento
 - Número de divisiones al espesor de la subrasante

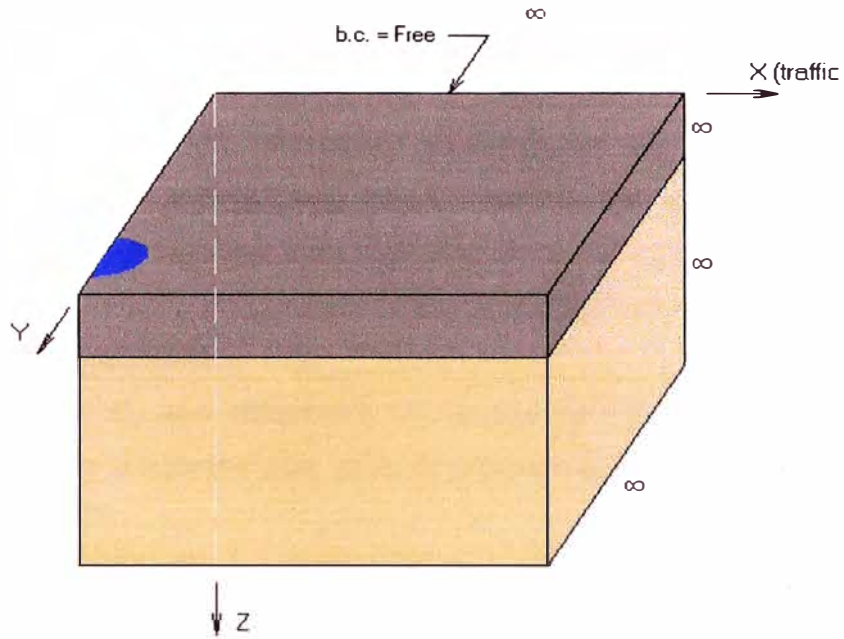


Figura N° 4.4 Idealización de las capas del pavimento

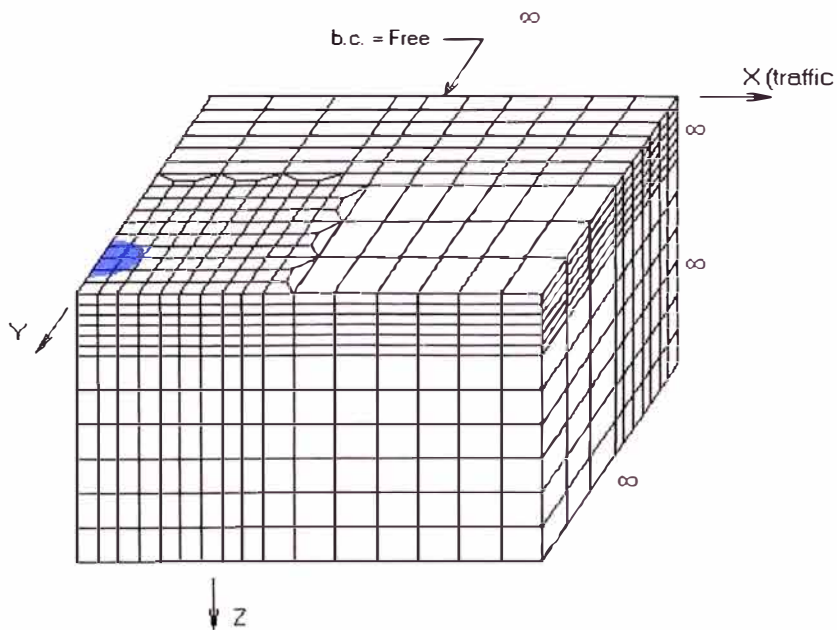


Figura N°4.5 Refinamiento de la malla para el análisis del pavimento

CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los valores abajo indicados muestran la ubicación de los puntos donde se hicieron las mediciones con la Viga Benkelman, luego, una vez obtenidos los desplazamientos, los datos han sido ingresados de la hoja de cálculo de Hogg, el 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 son obtenidos en unidas de kg/cm^2 luego estos valores son convertidos a las unidades que pide el programa (MPa).

Cuadro 5.1 Valores del E_o y E^* utilizados

N°	Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				PARÁMETROS DEL MODELO DE HOGG				
		Deflexiones($\times 10^{-2}$ mm)				R_5	L_o	S_o/S	E_o	E^*
		D_o	D_{25}	D_{40}	D_{70}	cm	cm		kg/cm^2	kg/cm^2
27	80+100	72	48	32	16	35.40	17.00	0.74	687.18	3794.83
28	80+200	104	72	56	24	43.53	22.14	0.81	400.06	7627.20
29	80+300	120	80	56	24	37.18	18.14	0.76	396.32	3115.86
30	80+400	104	72	32	8	38.99	19.29	0.78	439.64	4657.12
31	80+500	128	80	56	16	34.85	16.65	0.74	391.26	1908.69

Cuadro 5.2 Deflexiones de Campo

N°	Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				Hogg			Relación Hogg
		Deflexiones($\times 10^{-2}$ mm)				L_o	E_o	relación	E^*
		D_o	D_{25}	D_{40}	D_{70}				
27	80+100	72	48	32	16	17.0	687.18	11.00	7560.21
28	80+200	104	72	56	24	22.1	400.06	24.28	9711.79
29	80+300	120	80	56	24	18.1	396.32	13.37	5297.37
30	80+400	104	72	32	8	19.3	439.64	16.05	7064.15
31	80+500	128	80	56	16	16.7	391.26	13.34	4044.65

5.1 PUNTO ANALIZADOS:

Para cada tramo asignado de la carretera, se analizaron 5 puntos, los cuales están distanciados 100 metros. Los desplazamientos de estos puntos fueron obtenidos con ayuda del EVERSTRESSFE. Estos desplazamientos se

obtuvieron considerando los valores de E_o encontradas con el modelo de Hogg y E^* hallado con la ecuación 5.2 de la relación de Hogg.

Partiendo de la siguiente relación:

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

Si consideramos $\mu_0 = 0.4$ tenemos:

$$L_o = 0.55H \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_o}} \quad (5.2)$$

Se obtiene el valor de E_1 (E_1 equivale a E^*), ya que E_o y L_o son conocidos de la hoja de cálculo del modelo de Hogg.

Para un primer caso (Caso I), una vez conocida la relación entre módulos se procede a variar el E_1 en 10 o 20 unidades del valor original, manteniendo constante el valor de E_o , generando 5 valores para E_1 , luego se procede a graficar y evaluar los resultados.

Los módulos EVER1 son los obtenidos por el modelo de Hogg, los otros módulos considerados variando el E^* y manteniendo constante el E_o se muestran en los respectivos cuadros desde EVER2 hasta EVER5

Para un segundo caso (Caso II), conocidos los valores de E_o y E_1 iniciales y conociendo la relación que existe entre estos módulos, se procede a variar en 10 o 20 unidades arbitrariamente el valor de E_o y así obtener un valor de E_1 respectivamente, siempre manteniendo la relación que existe entre estos módulos. Estos módulos se muestran en los respectivos cuadros desde EVER1 hasta EVER5.

Una vez tomados los datos respectivos a cada punto se podrá obtener el valor del CBR para dicho pavimento, con lo cual se tomará una decisión respecto al mantenimiento o mejoramiento de la vía.

Los valores que se tendrán de referencia son los proporcionados por el MTC y se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro N°5.3 : Rango 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%

Se modela el pavimento en un sistema de 2 capas, donde la capa superior (base) tiene un espesor de 13.9 cm.(ver anexo 2) 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,

Se considera la separación entre llantas donde estará colocada la Viga Benkelman de 35 cm.

Los demás datos que se le proporciona al programa son los datos considerados para el ensayo de Viga Benkelman en la salida de campo (ver anexo 1)

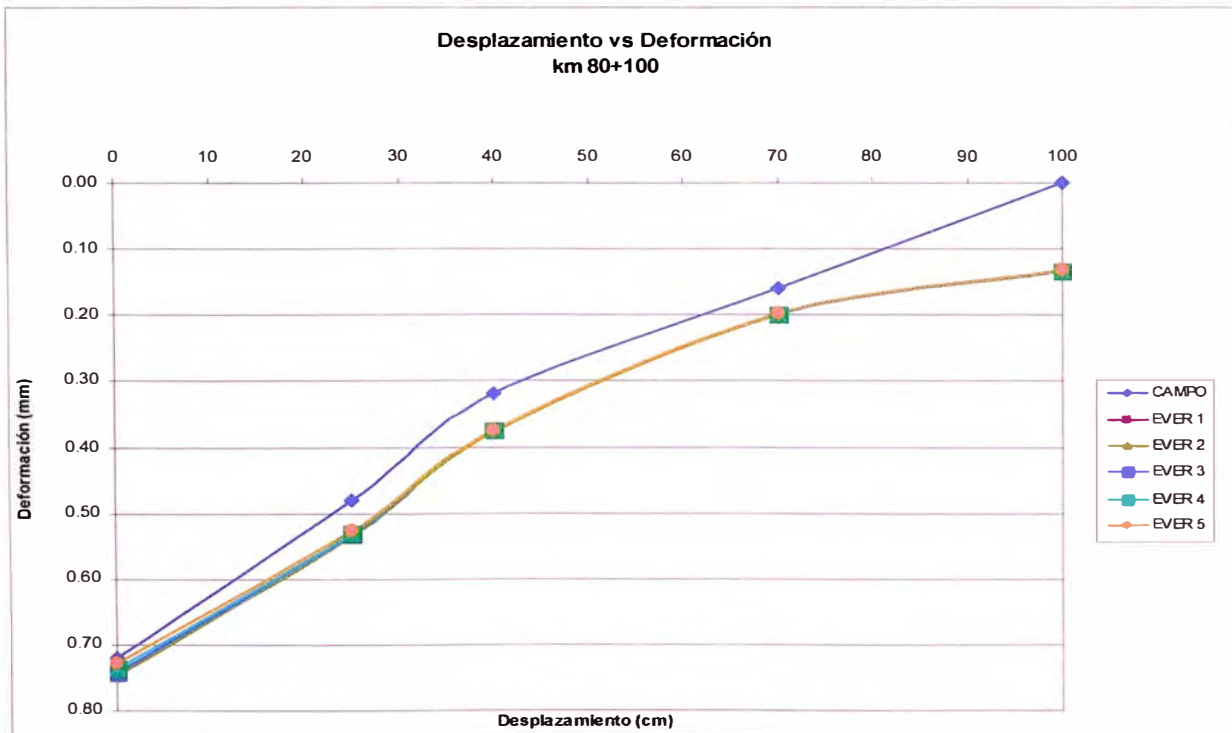
En los siguientes cuadros y gráficos se muestran los valores obtenidos con los desplazamientos tomados en campo.

*)**Caso I** :Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km 80+100 considerando E_o constante y variando E_1

Cuadro N°5.4 : Valores obtenidos en campo

km 80+100 (Caso I)							Desv. std σ
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.72	0.48	0.32	0.16	0.00	
EVER 1		0.75	0.53	0.38	0.20	0.13	0.0461
EVER 2		0.75	0.53	0.38	0.20	0.13	0.0455
EVER 3		0.74	0.53	0.38	0.20	0.13	0.0444
EVER 4		0.74	0.53	0.38	0.20	0.13	0.0429
EVER 5		0.73	0.53	0.37	0.20	0.13	0.0411

Figura 5.1: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.5 : Módulos E_o , E_1 y valor de CBR hallado

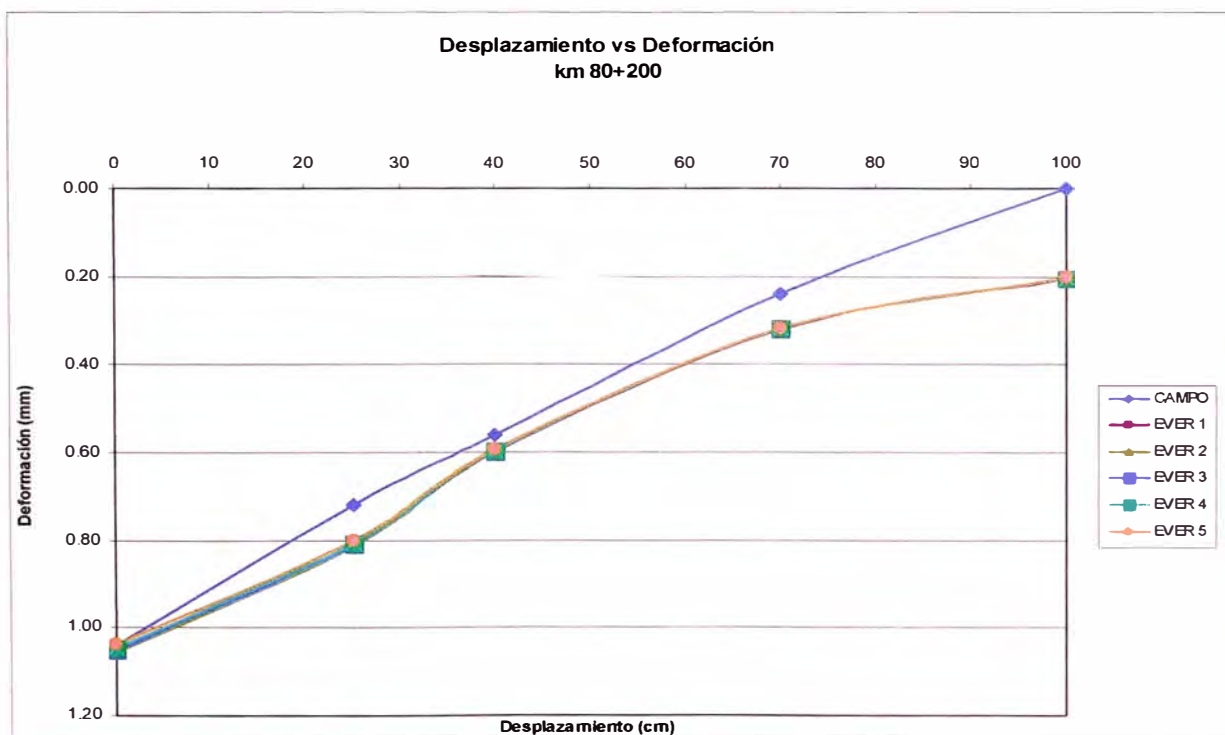
KM. 80+100					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	67.39	687.18	741.41	7560.21	6.25
EVER 2	67.39	687.18	751.41	7662.21	6.25
EVER 3	67.39	687.18	771.41	7866.15	6.25
EVER 4	67.39	687.18	801.41	8172.07	6.25
EVER 5	67.39	687.18	841.41	8575.77	6.25

*)**Caso I:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km 80+200 considerando E_o constante y variando E_1

Cuadro N°5.6 : Valores obtenidos en campo

km 80+200 (Caso I)							Desv. Std σ
Lectura		Desplazamiento (cm.)					
	Deform. (mm)	0	25	40	70	100	
CAMPO		1.04	0.72	0.56	0.24	0.00	
EVER 1		1.06	0.81	0.60	0.32	0.20	0.0662
EVER 2		1.06	0.81	0.60	0.32	0.20	0.0651
EVER 3		1.05	0.81	0.60	0.32	0.20	0.0639
EVER 4		1.05	0.81	0.60	0.32	0.20	0.0618
EVER 5		1.04	0.80	0.60	0.32	0.20	0.0589

Figura 5.2: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.7 : Módulos de E_o , E_1 y valor de CBR hallado

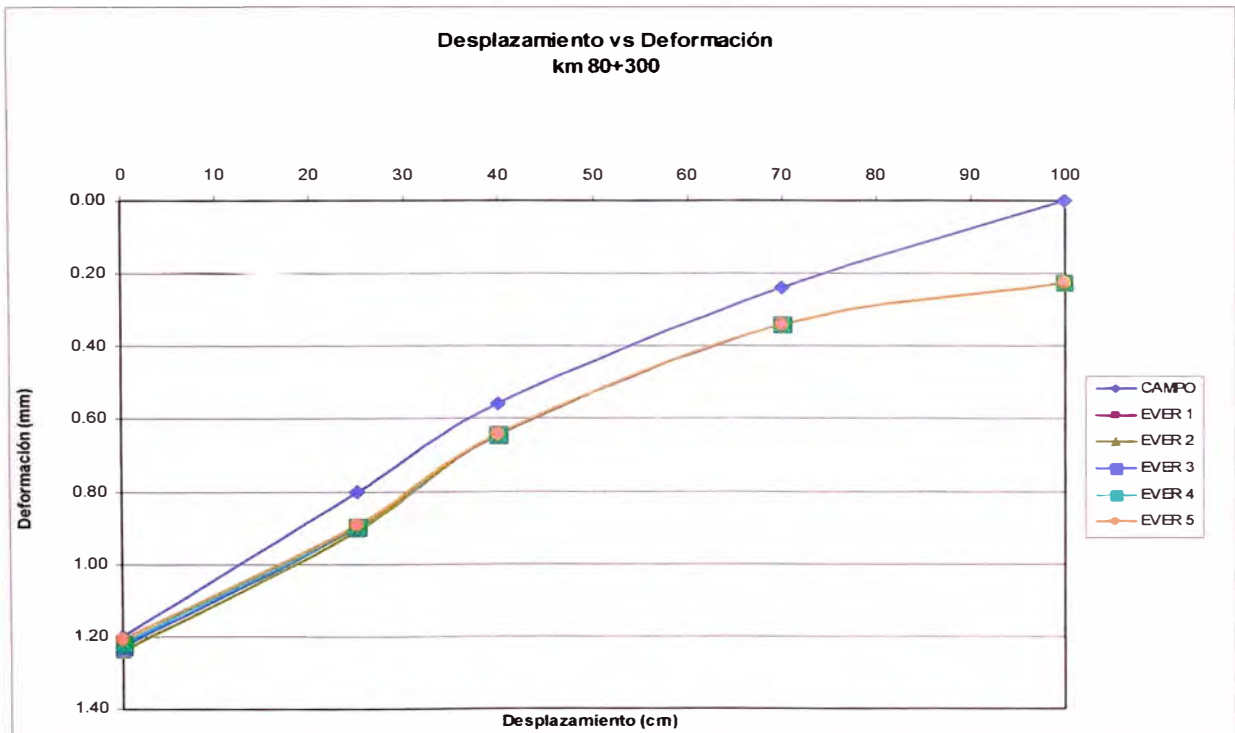
KM. 80+200					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	39.23	400.03	952.41	9711.83	3.64
EVER 2	39.23	400.03	962.41	9813.80	3.64
EVER 3	39.23	400.03	972.41	9915.77	3.64
EVER 4	39.23	400.03	992.41	10119.71	3.64
EVER 5	39.23	400.03	1022.41	10425.63	3.64

*) **Caso I:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km 80+300 considerando E_o constante y variando E_1 .

Cuadro N°5.8 : Valores obtenidos en campo

km 80+300 (caso I)							
Lectura		Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO	Deform. (mm)	1.20	0.80	0.56	0.24	0.00	0.0888
EVER 1		1.24	0.91	0.65	0.34	0.23	
EVER 2		1.24	0.91	0.65	0.34	0.23	
EVER 3		1.23	0.90	0.64	0.34	0.23	
EVER 4		1.22	0.90	0.64	0.34	0.22	
EVER 5		1.21	0.89	0.64	0.34	0.22	

Figura 5.3:Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.9 : Módulo E_o , E^* y valor de CBR hallado

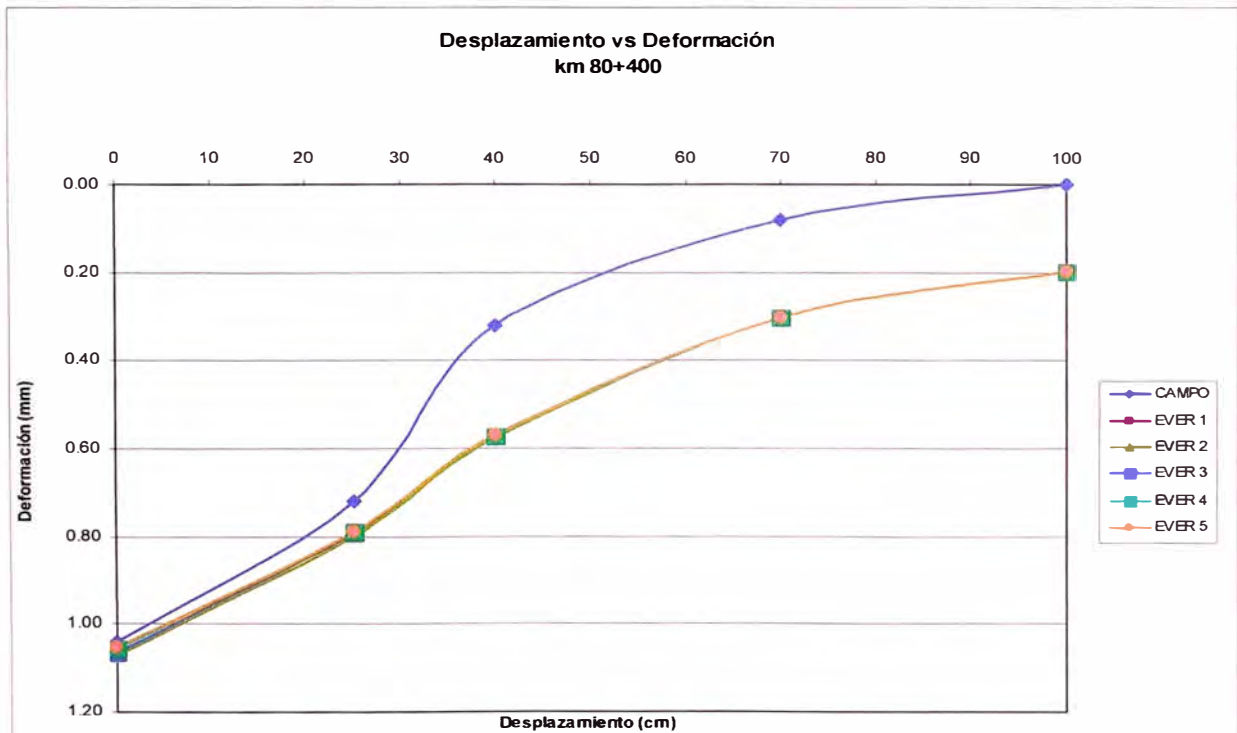
KM. 80+300					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	38.87	396.36	519.50	5297.40	3.60
EVER 2	38.87	396.36	529.50	5399.37	3.60
EVER 3	38.87	396.36	549.50	5603.31	3.60
EVER 4	38.87	396.36	569.50	5807.25	3.60
EVER 5	38.87	396.36	589.50	6011.20	3.60

*) **Caso I:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km 80+400 considerando E_o constante y variando E_1

Cuadro N°5.10 : Valores obtenidos en campo

km 80+400 (Caso I)							
Lectura		Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO	Deform. (mm)	1.04	0.72	0.32	0.08	0.00	
EVER 1		1.08	0.80	0.58	0.30	0.20	0.0175
EVER 2		1.07	0.80	0.57	0.30	0.20	0.1746
EVER 3		1.06	0.79	0.57	0.30	0.20	0.1733
EVER 4		1.06	0.79	0.57	0.30	0.20	0.1720
EVER 5		1.05	0.79	0.57	0.30	0.20	0.1714

Figura 5.4: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.11 : Módulos de E_o, E_1 y valor de CBR hallado

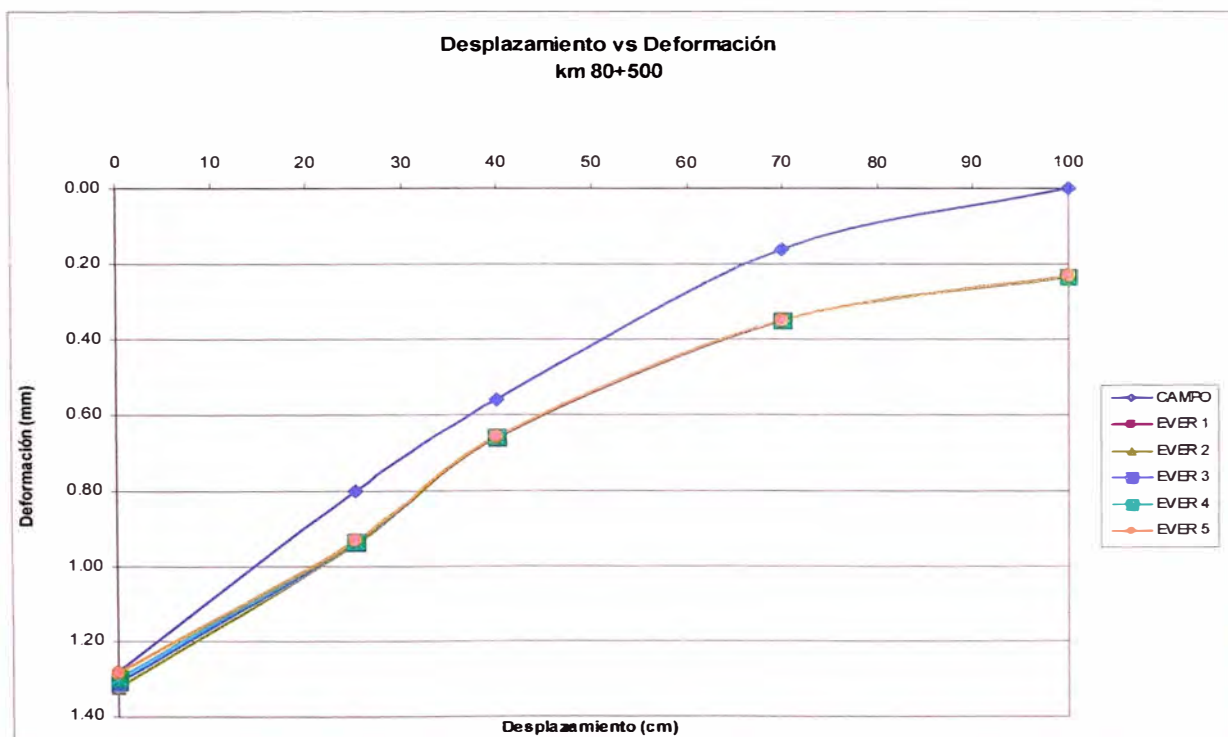
KM. 80+400					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	43.11	439.60	692.76	7064.15	4.00
EVER 2	43.11	439.60	702.76	7166.12	4.00
EVER 3	43.11	439.60	722.76	7370.06	4.00
EVER 4	43.11	439.60	742.76	7574.01	4.00
EVER 5	43.11	439.60	752.76	7675.98	4.00

*)**Caso I:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el Km. 80+500 considerando E_o constante y variando E_1

Cuadro N°5.12 : Valores obtenidos en campo

km 80+500 (Caso I)							Desv. std σ
Lectura		Desplazamiento (cm.)					
	Deform. (mm)	0	25	40	70	100	
CAMPO		1.28	0.80	0.56	0.16	0.00	
EVER 1		1.33	0.94	0.66	0.35	0.24	0.1328
EVER 2		1.32	0.94	0.66	0.35	0.24	0.1314
EVER 3		1.31	0.94	0.66	0.35	0.23	0.1289
EVER 4		1.30	0.93	0.66	0.35	0.23	0.1266
EVER 5		1.29	0.93	0.66	0.35	0.23	0.1247

Figura 5.5: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.13 : Módulo de E_o, E_1 y valor de CBR hallado

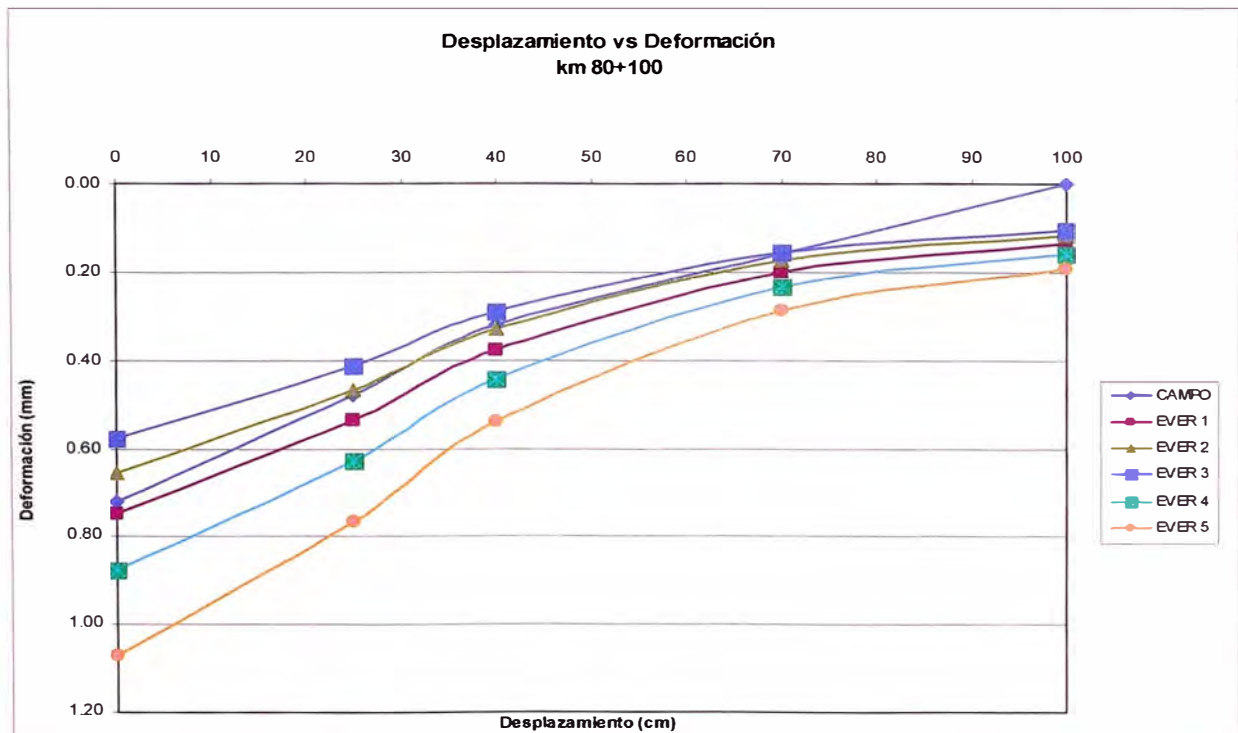
KM.80+500					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	38.37	391.26	396.65	4044.68	3.56
EVER 2	38.37	391.26	406.65	4146.65	3.56
EVER 3	38.37	391.26	426.65	4350.60	3.56
EVER 4	38.37	391.26	446.65	4554.54	3.56
EVER 5	38.37	391.26	466.65	4758.48	3.56

*)**Caso II:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km. 80+100 variando E_o y obteniendo el E_1 respectivo.

Cuadro N°5.14 : Valores obtenidos en campo

km. 80+100 (Caso II)							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		0.72	0.48	0.32	0.16	0.00	
EVER 1		0.75	0.53	0.38	0.20	0.13	0.0813
EVER 2		0.65	0.47	0.33	0.17	0.12	0.0681
EVER 3		0.58	0.41	0.29	0.15	0.10	0.0947
EVER 4		0.88	0.63	0.44	0.23	0.16	0.1515
EVER 5		1.07	0.77	0.54	0.29	0.19	0.2764

Figura 5.6: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.15 : Módulos de E_o, E_1 y valores de CBR hallados

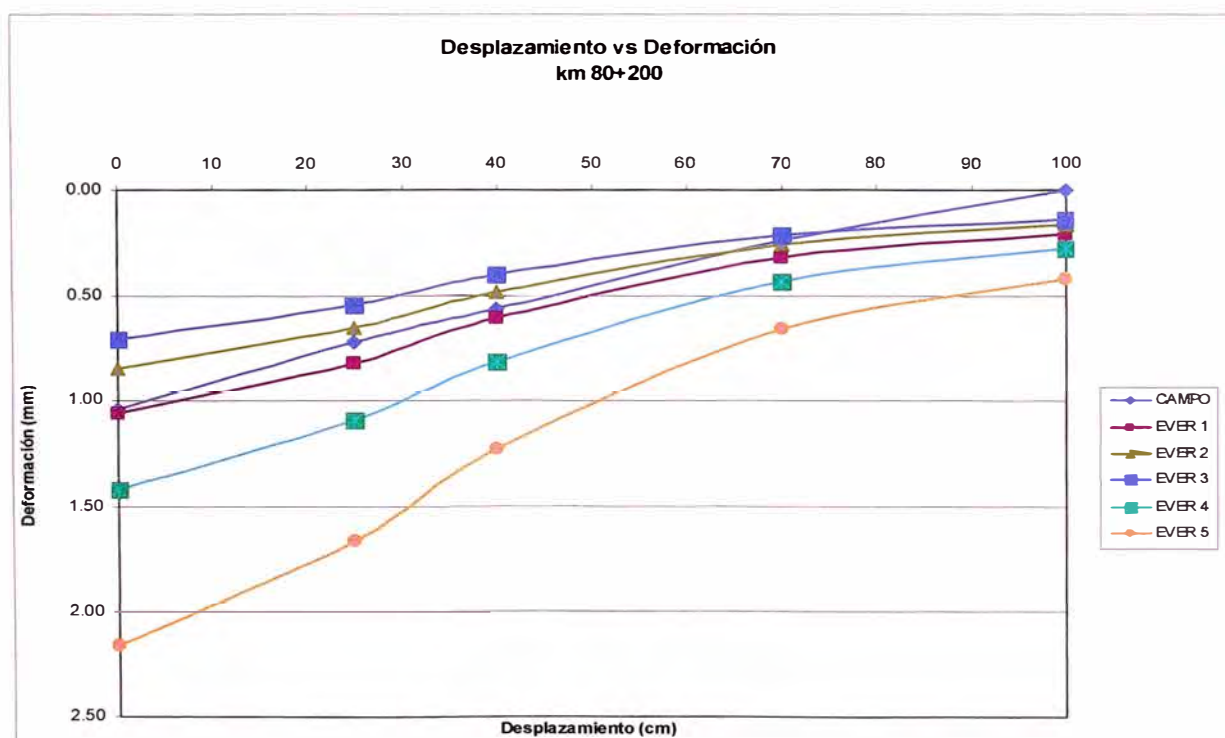
km 80+100					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	67	683.21	741.00	7556.06	6.21
EVER 2	77	785.18	847.00	8636.95	7.14
EVER 3	87	887.15	957.00	9758.63	8.06
EVER 4	57	581.24	631.29	6437.33	5.28
EVER 5	47	479.26	519.35	5295.87	4.36

*)Caso II: Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km. 80+100 variando E_o y obteniendo el E_I respectivo.

Cuadro N°5.16 : Valores obtenidos en campo

km. 80+200 (Caso II)							
Lectura	Desplazamiento (cm.)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO	Deform. (mm)	1.04	0.72	0.56	0.24	0.00	
EVER 1		1.06	0.81	0.60	0.32	0.20	0.1237
EVER 2		0.84	0.65	0.48	0.26	0.16	0.1384
EVER 3		0.70	0.54	0.40	0.21	0.14	0.2192
EVER 4		1.42	1.09	0.81	0.43	0.27	0.3382
EVER 5		2.16	1.66	1.23	0.65	0.42	0.8564

Figura 5.7: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.17 : Módulos de E_o, E_1 y valores de CBR hallados

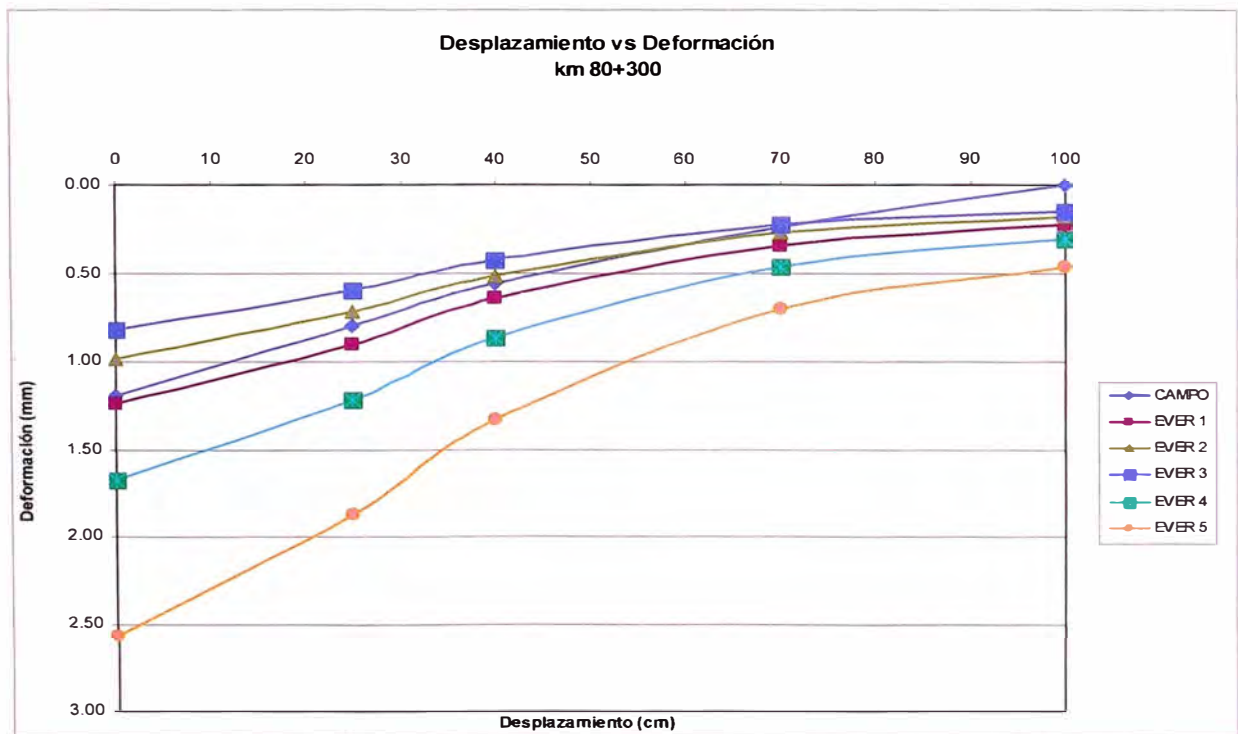
Km. 80+200					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	39.23	400.03	952.41	9711.83	3.64
EVER 2	49.23	502.00	1195.30	12188.61	4.56
EVER 3	59.23	603.97	1438.10	14664.46	5.49
EVER 4	29.23	298.06	709.70	7236.93	2.71
EVER 5	19.23	196.09	466.90	4761.03	1.78

*)Caso II: Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km. 80+300 variando E_o y obteniendo el E_1 respectivo.

Cuadro N°5.18 : Valores obtenidos en campo

km. 80+300 (Caso II)							
Lectura	Desplazamiento (cm.)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO	Deform. (mm)	1.20	0.80	0.56	0.24	0.00	
EVER 1		1.24	0.91	0.65	0.34	0.23	0.1441
EVER 2		0.99	0.72	0.51	0.27	0.18	0.1467
EVER 3		0.82	0.60	0.43	0.23	0.15	0.2366
EVER 4		1.68	1.22	0.87	0.46	0.31	0.4008
EVER 5		2.56	1.87	1.33	0.71	0.47	1.0040

Figura 5.8: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.19 : Módulos de E_o, E^* y valores de CBR hallados

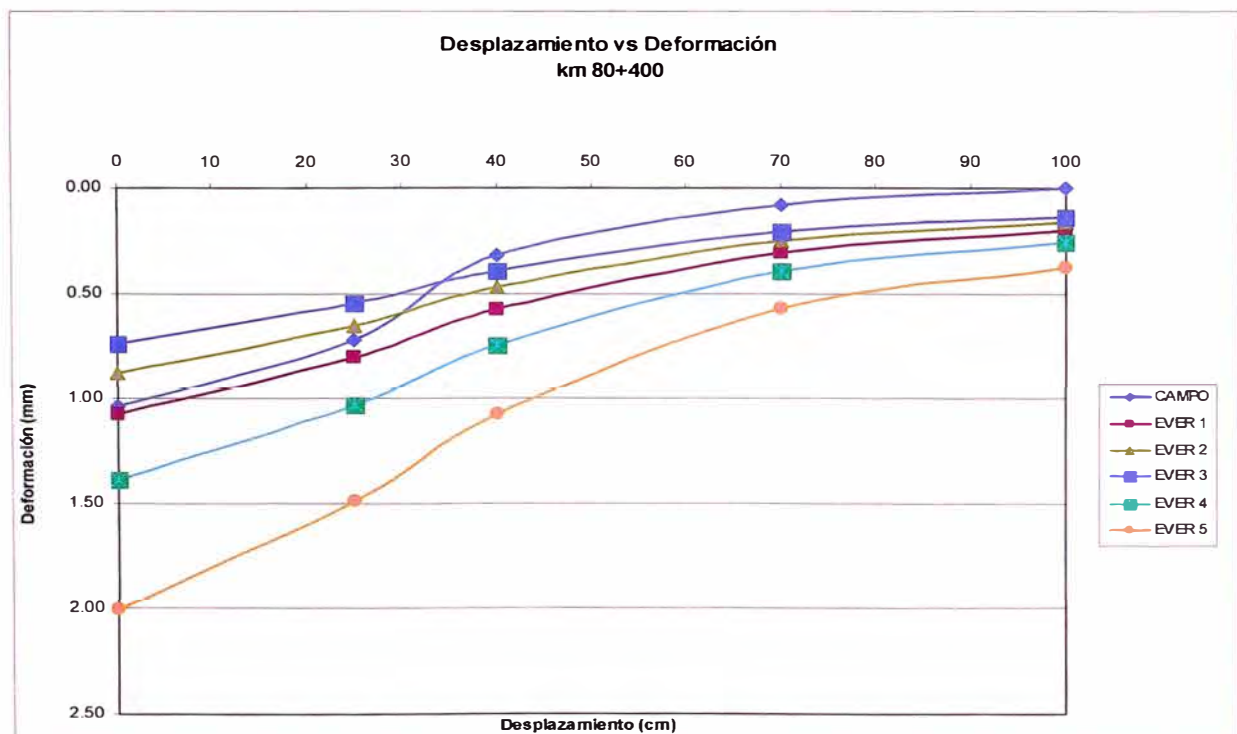
Km. 80+300					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	38.87	396.36	519.50	5297.40	3.60
EVER 2	48.87	498.33	653.39	6662.69	4.53
EVER 3	58.87	600.30	787.09	8026.04	5.46
EVER 4	28.87	294.39	385.85	3934.55	2.68
EVER 5	18.87	192.42	252.20	2571.71	1.75

*)**Caso II:** Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km. 80+400 variando E_0 y obteniendo el E_1 respectivo.

Cuadro N°5.20 : Valores obtenidos en campo

km. 80+400 (Caso II)							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		1.04	0.72	0.32	0.08	0.00	
EVER 1		1.08	0.80	0.58	0.30	0.20	0.2018
EVER 2		0.87	0.65	0.47	0.25	0.16	0.1650
EVER 3		0.73	0.55	0.39	0.21	0.14	0.2025
EVER 4		1.39	1.03	0.75	0.40	0.26	0.3766
EVER 5		2.01	1.49	1.07	0.57	0.37	0.7858

Figura 5.9: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.21 : Módulos de E_0, E^* y valores de CBR hallados

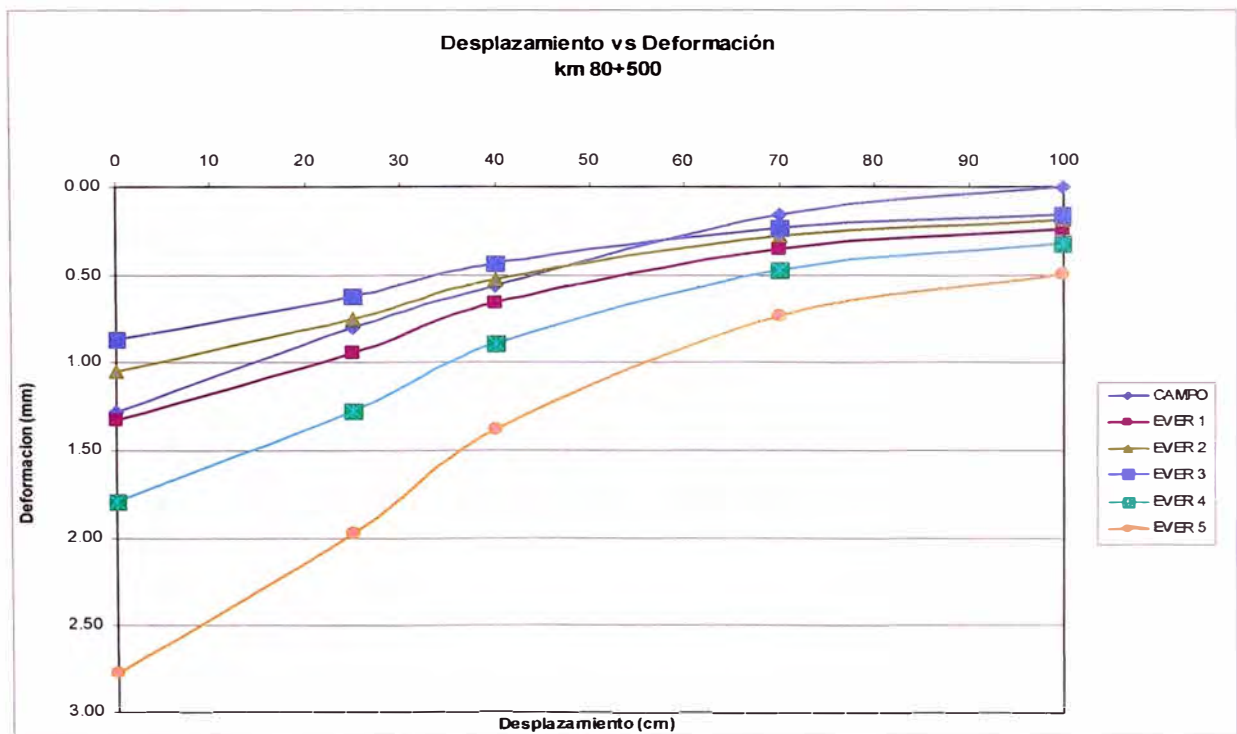
km. 80+400					
Lectura	E_0 MPa	E_0 kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	43.11	439.60	692.76	7064.15	4.00
EVER 2	53.11	541.57	853.48	8703.03	4.92
EVER 3	63.11	643.54	1014.18	10341.71	5.85
EVER 4	33.11	337.63	552.94	5638.39	3.07
EVER 5	23.11	235.66	371.38	3787.00	2.14

*)Caso II: Gráfica donde se observa las diferentes deflexiones obtenidas en el km. 80+500 variando E_o y obteniendo el E_1 respectivo.

Cuadro N°5.22 : Valores obtenidos en campo

km. 80+500 (Caso II)							
Lectura	Deform. (mm)	Desplazamiento (cm.)					Desv. std σ
		0	25	40	70	100	
CAMPO		1.28	0.80	0.56	0.16	0.00	
EVER 1		1.33	0.94	0.66	0.35	0.24	0.1779
EVER 2		1.05	0.75	0.53	0.28	0.19	0.1616
EVER 3		0.87	0.62	0.44	0.23	0.16	0.2464
EVER 4		1.80	1.28	0.90	0.48	0.32	0.4494
EVER 5		2.77	1.97	1.38	0.74	0.49	1.1024

Figura 5.10: Desplazamiento vs Deformación



Cuadro N°5.23 : Módulos de E_o , E^* y valores de CBR hallados

km. 80+500					
Lectura	E_o MPa	E_o kg/cm ²	E_1 MPa	E_1 kg/cm ²	CBR %
CAMPO					
EVER 1	38.37	391.26	396.65	4044.68	3.56
EVER 2	48.37	493.23	500.15	5100.04	4.48
EVER 3	58.37	595.21	605.29	6172.21	5.41
EVER 4	28.37	289.29	294.19	2999.89	2.63
EVER 5	18.37	187.32	189.94	1936.84	1.70

Interpretación: Se puede observar el CBR obtenido en cada tramo y para cada caso analizado comparando los resultados obtenidos con los rangos de valores de CBR que proporciona el MTC (ver cuadro N°5.3)

CASO I

CBR (km 80+100) = 6.25 %.....Subrasante regular.

CBR (km 80+200) = 3.64 %.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+300) = 3.60 %.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+400) = 4.00 %.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+500) = 3.56 %.....Subrasante pobre.

CASO II

CBR (km 80+100) = 4.36% - 8.06%.....Subrasante regular.

CBR (km 80+200) = 1.78% - 5.49%.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+300) = 1.75% - 5.46%.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+400) = 2.14% - 5.85%.....Subrasante pobre.

CBR (km 80+500) = 1.70% - 5.41%.....Subrasante pobre.

CONCLUSIONES

1. Los módulos E_i y E_o obtenidos del modelo de Hogg son valores iniciales para empezar a realizar los cálculos de aproximación, siendo el más confiable el E_o , puesto que al mantener constante este valor, la desviación estandar de las deflexiones están en el rango aceptable (menor al 20%).
2. La cantidad de puntos (5 puntos por tramo) tomados en campo es insuficiente para aproximar los desplazamientos reales con los teóricos.
3. Para validar este tipo de método se necesita generar una base de datos (deflexiones) en diversas carreteras con similares características; sin embargo el programa ha sido validado en otros ensayos donde se han utilizado mayores cantidades de datos (fuente WDOT)
4. La carpeta de monocapa no contribuye estructuralmente al pavimento.
5. Los programas que utilizan MEF caracterizan mejor al material que un modelo de Hogg, por lo tanto los desplazamientos obtenidos con este método son más confiables.
6. Los valores obtenidos del CBR indican que el pavimento necesita ser mejorado puesto que tiene una rasante pobre (ver Cuadro N°5.3)

RECOMENDACIONES

1. Tomar una mayor cantidad de datos en campo (10 como mínimo) para mejorar las aproximaciones de E_o y E^*
2. Realizar un mayor refinamiento de la malla que se encuentra cerca de la carga aplicada al pavimento para disminuir el tiempo de análisis.
3. Se recomienda emplear MEF para este tipo de trabajos , ya que los resultados obtenidos en los ensayos son más próximos a los reales.
4. Se recomienda hacer evaluaciones estructurales cada año para ver el estado del pavimento, puesto que el pavimento tiene 9 meses de construido y ya presenta deterioro.

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 ZIENKIEWICS O.C-TAYLOR R.L "El Método de los Elementos Finitos" , Mc Graw Hill 1993
- 8 WANG, JIA, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements", The University of Maine, 2001.

ANEXO 1: Ingreso de Datos del Programa EVERSTRESSFE

Se observa que se ingresan las dimensiones del pavimento a estudiar, las dimensiones de las capas y sus respectivas propiedades

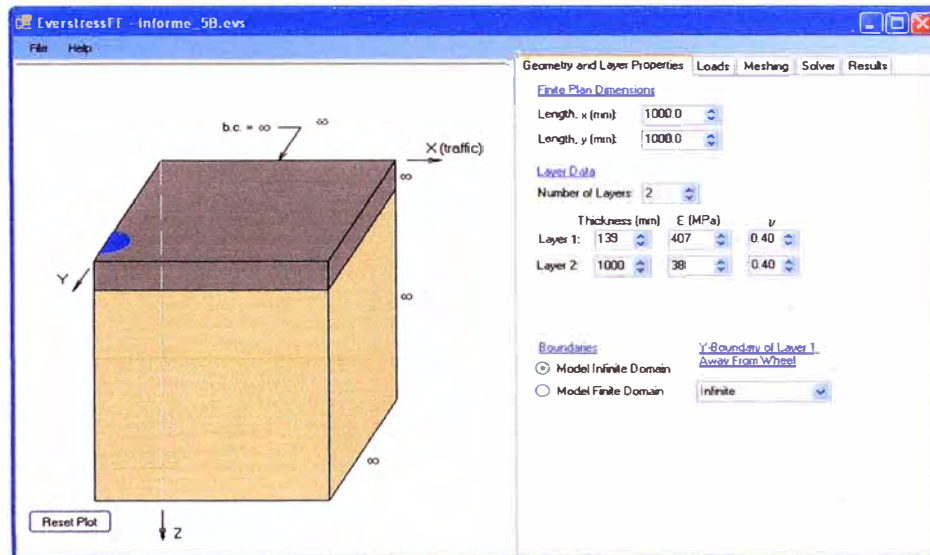


Figura 1 ingreso de datos de la geometría del pavimento.

Se ingresa el valor de la presión de las ruedas, el tipo de ruedas, el área que ocupa, el peso que el camión ejerce sobre el pavimento y la separación entre las ruedas donde se realizó la medición con la Viga Benkelman; la figura muestra el ingreso de los datos pedidos.

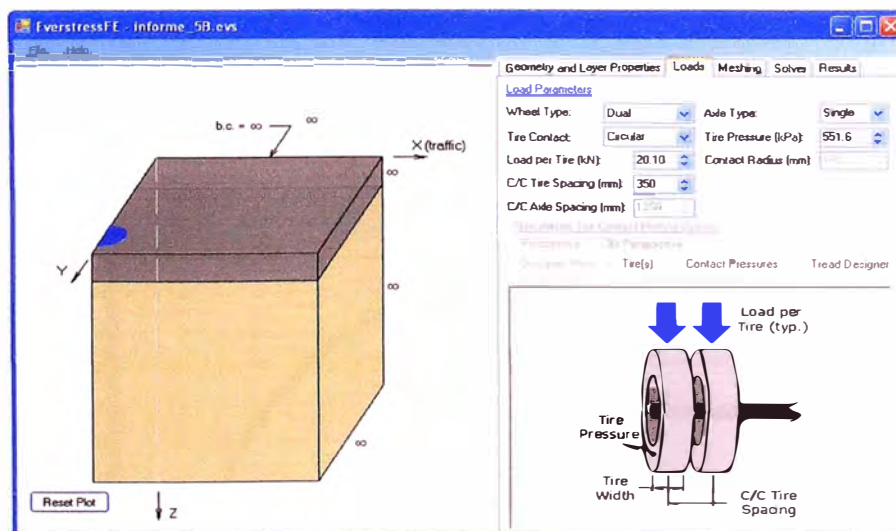


Figura 2 ingreso de cargas aplicadas al pavimento

Seguidamente se procede a crear la malla inicial con la cual el programa comenzará a realizar el procesamiento de datos con la finalidad de obtener los

resultados óptimos. Como puede observarse se ingresa la forma como estarán divididos los elementos al inicio del proceso, teniendo cuidado que la malla que se encuentra bajo la rueda, tenga un mejor refinamiento que la más alejadas.

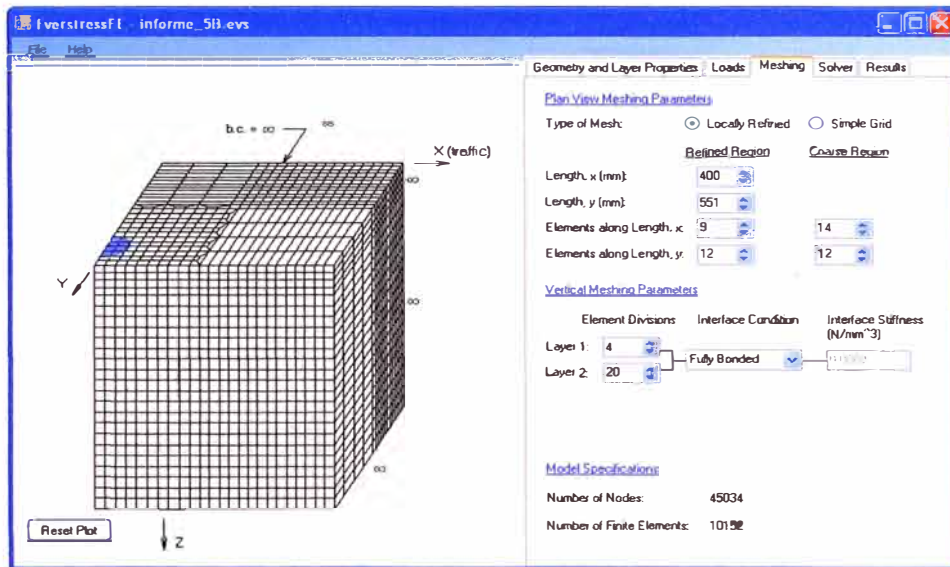


Figura.3 ingreso de datos para el enmallado del pavimento.

Una vez que se han ingresado los datos, se corre el programa y se procede a interpretar los resultados obtenidos.

El programa muestra una pantalla que indica cual es la tendencia de los desplazamientos y las deformaciones del pavimento. Como se puede observar en la Figura 4 la curva es la tendencia que tendrá la deflexión del pavimento de acuerdo a la profundidad.

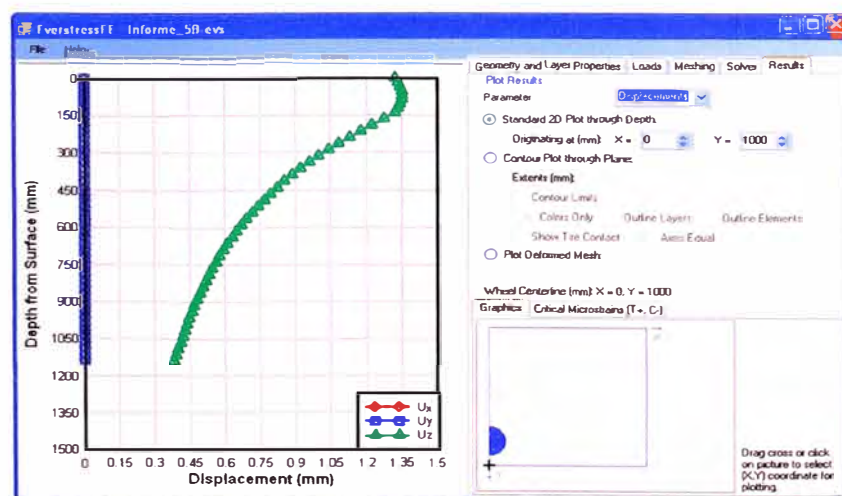


Figura 4 Desplazamientos en el punto de mayor deflexión

El programa muestra además una imagen en 3D de la deflexión en el punto donde se aplica la carga.

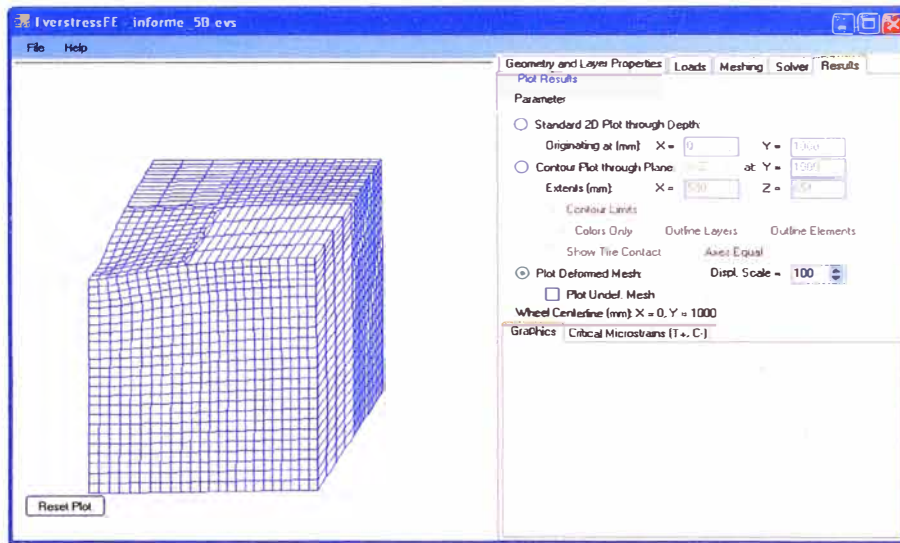


Figura 5 Deformación de la malla debido las cargas aplicadas.

ANEXO 2: ESPEORES DEL PAVIMENTO CONSIDERADO

SECTOR		ESTRUCTURA DE PAVIMENTO		
		Tratamiento Superficial Monocapa (cm)	Afirmado Estabilizado con Emulsión (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