

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARETERA
CAÑETE – YAUYOS – CHUPACA CON VIGA
BENKELMAN MÉTODO MATEMÁTICO
TRAMO km 89 + 000 - km 94 + 000**

INFORME DE SUFICIENCIA

*Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL*

**FREDHY PABLO VILCHEZ CANCHUCAJA
Lima – Perú**

2009

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS	6
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Tramo Evaluado km 89+000 – km 94+000	15
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE	17
2.1 Sistemas de Análisis	17
2.1.1 Sistemas elásticos de capas.....	17
2.1.2 Sistemas no lineales de capas.....	17
2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos.....	17
2.2 Ensayos no destructivos	18
2.2.1 Viga Benkelman.....	18
2.2.2 Dynaflec.....	18
2.2.3 Road Rater.....	19
2.2.4 RDD.....	20
2.2.5 FWD.....	20
2.2.6 KUAB – FWD.....	21
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO	22
3.1 Viga Benkelman	22
3.2 Caracterización del material	25
3.2.1 Definiciones previas.....	25
3.2.2 Modelo Básico.....	27
3.2.3 Modelo de Maxwell.....	28
3.2.4 Modelo de Kelvin.....	28
3.2.5 Modelo de Burgers.....	28
3.2.6 Modelo Generalizado.....	28
3.3 Modelos para determinar esfuerzos y deformaciones	29
3.3.1 Modelo de Boussinesq.....	29
3.3.2 Modelo de Hogg.....	31

3.3.3 Modelo de Westergaard.....	33
3.3.4 Modelos bicapas.....	33
3.3.5 Modelos multicapas.....	34
3.4 Métodos de Solución de Pavimentos.....	34
3.4.1 Fórmula de Boussinesq.....	34
3.4.2 Fórmula de Westergaard.....	37
3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber generalizada	38
3.4.4 Fórmula de Odemark.....	38
3.4.5 Método de Elementos Finitos.....	39
CAPÍTULO IV APLICACIÓN TRAMO km 89+000 – km 94+000.....	40
4.1 Aplicación de la Viga Benkelman.....	40
4.2 Aplicación de la teoría Boussinesq.....	44
CAPÍTULO V ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXO 1	61
ANEXO 2	62
ANEXO 3	65
ANEXO 4	75
ANEXO 5	76

RESUMEN

El presente Informe de suficiencia trata sobre la evaluación y el comportamiento estructural del pavimento, de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, del tramo km 89+000 – km 94+000. La evaluación estructural del pavimento se ha llevado a cabo mediante Ensayos No Destructivos (END), empleando la medición de deflexiones y haciendo uso del deflectógrafo conocido como Viga Benkelman. Este instrumento portátil, permite medir las deformaciones elásticas que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar, de una manera sencilla, práctica y económica.

El procesamiento de datos de medición de deflexiones y el análisis de los resultados de estas, será interpretado mediante el método matemático de Boussinesq, con el cual se determina el módulo elástico de la subrasante, para luego comparar con el método matemático de Hogg.

Se espera que, al realizar la evaluación estructural en la vía en estudio, se encuentre en aceptable comportamiento, ya que en el tramo en estudio se han realizado los trabajos de Mantenimiento y Conservación Vial (capa base estabilizada y carpeta asfáltica monocapa), entre febrero y marzo del 2009.

LISTA DE CUADROS

CUADRO N° 1.1	Tramos y longitudes de la carretera en estudio	13
CUADRO N° 1.2	Clasificación del clima en la carretera	15
CUADRO N° 4.1	Datos de campo	44
CUADRO N° 5.1	Deflexiones corregidas por relación de brazos	50
CUADRO N° 5.2	Resultados de R, DR Y E_s	55
CUADRO N° 5.3	Resultados de los módulos de elasticidad y CBR	56
CUADRO N° 5.4	Rangos de valores de CBR (MTC)	56
CUADRO N° 5.5	Comparación de los módulos de elasticidad E_o y E^* entre los valores de Boussinesq y Hogg	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA N° 1.1	Mapa de ubicación	12
FIGURA N° 1.2	Plano Clave de la Ruta 22	14
FIGURA N° 1.3	Perfil estratigráfico del tramo en estudio ..	16
FIGURA N° 2.2.1	Viga Benkelman (1952)	19
FIGURA N° 2.2.2	Equipo Dynaflec Estacionado	20
FIGURA N° 2.2.3	Equipo Road Rater	20
FIGURA N° 2.2.4	Equipo RDD	21
FIGURA N° 2.2.5	Equipo FWD	21
FIGURA N° 2.2.6	Equipo KUAD – FWD	22
FIGURA N° 3.1.1	Esquema y Principio de Operación de la Viga Benkelman...	23
FIGURA N° 3.1.2	Configuración geométrico del sistema de carga en ensayos con Viga Benkelman	24
FIGURA N° 3.1.3	Esquematzación del proceso de medición con la Viga Benkelman	25
FIGURA N° 3.2.1	Modelo mecanicos para materiales viscoelásticos.....	28
FIGURA N° 3.3.1	Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada	30
FIGURA N° 3.3.2	Modelo de Hogg	34
FIGURA N° 3.3.3	Modelo de Westergaard	34
FIGURA N° 3.3.5	Modelo multicapas	35
FIGURA N° 3.4.1a	Representación de un masivo semi infinito	35
FIGURA N° 3.4.1b	Distribución de presion sobre el pavimento	36
FIGURA N° 3.4.1c	Esquematzación de las cargas distribuidas de las llantas para la formulacion del modelo de boussinesq	37
FIGURA N° 3.4.3	Multicapa propuesto con la fórmula de palmer y modelo de Baber generalizada	39
FIGURA N° 3.4.4	Multicapa propuesto con la fórmula de odemark	40
FIGURA N° 3.4.5	Método de elementos finitos	40
FIGURA N° 5.1	Deflexiones corregidas por relación de brazos	54

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.
LVDT	Transformador Diferencial Variable Lineal
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
MCCP	Mezclas de Concreto con Cemento Pórtland
M_r	Módulo Resiliente
MDS	Máxima Densidad Seca
NTP	Norma Técnica Peruana
OCH	Óptimo Contenido de Humedad
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
PROMCEPRI	Promoción de Concesiones Privadas
RDD	El Deflectómetro dinámico del balanceo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SN	Número Estructural
TSB	Tratamiento Superficial Bicapa
WASHO	Western Association of State Highway Organizations
Vac	Vertientes Aluviales de cultivo

A	Radio de la huella de la llanta
D₀	Deflexión máxima.
D_R	Deflexión a una distancia R
D_t	Deflexión teórica
D_c	Deflexión de Campo
E	Módulo de Young
E_S	Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq
E*	Módulo de elasticidad del Pavimento
E₀	Módulo de elasticidad de la Subrasante o del modelo de Maxwell
E₁	Módulo de elasticidad del modelo Kelvin
E_i	Módulo de elasticidad de la capa i
E₂	Módulo de elasticidad de la capa 2
E₃	Módulo de elasticidad de la capa 3
H	Espesor del Pavimento y capa de la subrasante
h₂	Espesor de capa subrasante
h₁	Espesor de Pavimento
i	Numero entero mayor igual que cero
J₀	Función de Bessel de primera especie de orden 0
J₁	Función de Bessel de primera especie de orden 1
J_i	Función de Bessel de primera especie de orden i
K	Distancia donde se aplica la carga hacia el punto donde se mide el esfuerzo
K₁	Coeficiente no lineal del material granular
K₂	Exponente no lineal del material granular
k	Módulo de reacción
L₀	Longitud Característica
m	Variable de integración
P	Carga
l	Rigidez del Pavimento
m	Numero de cargas axiales
μ	Ratio de Poisson
μ₀	Ratio de Poisson en el modelo de Maxwell
μ₁	Ratio de Poisson en el modelo de Kelvin

P	Carga
q₀	Presión de Inflado
R	Distancia a la que se mide la deflexión D _R
T₀	Tiempo de retardo para el modelo Maxwell
T₁	Tiempo de retardo para el modelo de Kelvin
t	Tiempo
v	Presión Vertical
W₁₈	Número estimado de ejes simples equivalentes a 8.2 t
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)	Deflexión a una distancia r y profundidad o

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente Informe de suficiencia tiene por objetivo la evaluación estructural del pavimento, haciendo uso de la Viga Benkelman y aplicando un método matemático para el procesamiento de los datos de campo. El tramo en estudio es desde el km 89+000 hasta el km 94 y se encuentra entre los poblados de Canchan y Chichicay. Mediante la medición de deflexiones y usando el deflectógrafo conocido como Viga Benkelman, se pueden medir las deformaciones elásticas que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar, de una manera sencilla, práctica y económica. Para interpretar los resultados, es posible evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura del pavimento, debido a que los pavimentos durante su vida útil, presentan deterioros en su estructura, por una serie de causas que contribuyen al mal estado de la superficie.

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

El capítulo I describe las generalidades de la carretera y el tramo en estudio, sobre la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca. El estudio describe el estado del arte de la carretera, su ubicación y las características más importantes del tramo en estudio.

En el capítulo II se comenta sobre el estado del arte de la metodología a emplearse para realizar la evaluación estructural, sistemas de análisis y los diferentes equipos existentes.

En el capítulo III se explica todos los conceptos relacionados a la evaluación estructural con Viga Benkelman mediante el método matemático, como son las deformaciones, módulos de elasticidad, CBR, etc. Además se dan posibles valores a considerar.

El capítulo IV describe todo lo referente a la recopilación y procesamiento de datos con la Viga Benkelman de las medidas de deflexiones, para luego aplicar el método Bussinesq.

El capítulo V describe el análisis de resultados mediante la interpretación de fórmulas matemáticas.

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La carretera Cañete-Yauyos-Huancayo, fue proyectada y ejecutada por partes durante el gobierno del Sr. Augusto B. Leguía entre la década de 1920 a 1930. En estos años se avanzaron los trabajos de construcción en el lado de la sierra; y por el lado de la costa durante el gobierno del Dr. Manuel Prado Ugarteche. Entre los años 1940 y 1944 se avanzaron los trabajos de la carretera desde Cañete, llegando a Yauyos en abril de 1944; quedando postergado todo trabajo de la carretera entre Yauyos-Huancayo. En febrero de 1957 se prosiguieron los trabajos de la carretera en los tramos faltantes, terminándose los trabajos de la carretera y con su puesta en servicio en mayo de 1957.

En el año 1998 la Comisión de Promoción de Concesiones Privadas adjudicó la Buena Pro al Consorcio AYESA – ALPHA CONSULT para realizar el Servicio de Consultoría a Nivel de Estudio Definitivo de la Carretera Lunahuana - Chupaca.

En el año 2003, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) encargó al consultor Ing. Floriano Palacios León, la elaboración del Estudio de Preinversión a Nivel de Perfil de la Carretera Ruta 22, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca de 245.15 km de longitud. En el año 2005, PROVIAS NACIONAL – MTC realizó el Estudio de Pre Inversión a nivel de Factibilidad del Proyecto Mejoramiento y Rehabilitación de la Carretera Ruta 22, enfatizando el tema de Diseño Vial.

El Estado Peruano mediante Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC-02, modificada por Resolución Ministerial N° 408-2007-MTC/02, creó el Programa “Proyecto Perú”, que viene a ser un programa de infraestructura vial diseñado para mejorar las vías de integración de corredores económicos, conformando ejes de desarrollo sostenido con el fin de elevar el nivel de competitividad de las zonas rurales, en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal.

El Programa “Proyecto Perú” aspira a establecer políticas de mantenimiento para la conservación de la infraestructura vial, mediante contratos en los que las

prestaciones se controlen por niveles de servicio y por plazos iguales o superiores a tres años, que implican el concepto de “transferencia de riesgo” al Contratista.

Mediante el Contrato: N° 288-2007-MTC/20, del 27 de Diciembre del 2007 celebrado con PROVIAS NACIONAL, el Consorcio Gestión de Carreteras asume la responsabilidad de efectuar el servicio de Conservación del Corredor Vial Cañete – Lunahuana – Pacarán – Dv. Yauyos – Ronchas – Chupaca (271 km) y el Mejoramiento del Tramo Zúñiga – Dv. Yauyos – Ronchas a nivel de solución básica.

UBICACIÓN DE LA CARRETERA

La carretera de penetración y enlace entre Cañete – Yauyos - Chupaca, se encuentra ubicada en:

Departamento : Lima-Junín
Provincia : Cañete -Yauyos – Concepción - Chupaca



FIGURA N° 1.1: MAPA DE UBICACIÓN

(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

CARACTERÍSTICAS DE LA CARRETERA

La carretera Cañete - Yauyos - Chupaca es una carretera de tercer orden y pertenece al corredor vial N°13, que atraviesa diferentes poblados y regiones del Perú, siendo entre los poblados principales, los que se puede observar en la FIGURA N° 1.1. Se considera como punto de inicio de la carretera a la ciudad de Cañete km 1+805 con una altitud de 71 msnm y como punto de término la provincia de Chupaca km 273+531, con una altitud de 3270 msnm.

Esta carretera tiene una longitud de 271.73 km y se encuentra dentro de la cuenca del río Cañete, presentando una pendiente promedio de 2%. Sin embargo, presenta sectores en donde la pendiente es más pronunciada llegando hasta 8%, especialmente en la zona alta.

La carretera se encuentra dividida en seis tramos, de los cuales dos se encuentran pavimentadas con una infraestructura vial apropiada, y los otros 4 tramos se encuentran con tratamiento superficial y nivel afirmado que cuenta con una infraestructura vial insuficiente e inadecuada. Esta tramificación se describe en el siguiente CUADRO N° 1.1 antes y después de la intervención del mantenimiento.

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

CUADRO N° 1.1: TRAMOS Y LONGITUDES DE LA CARRETERA EN ESTUDIO

(Fuente: MTC – Provias Nacional - proyecto Perú)

PLANO CLAVE

CARRETERA CAÑETE-LUNAHUANA-PACARAN-ZUÑIGA-DV. YAUYOS-RONCHA-CHUPACA

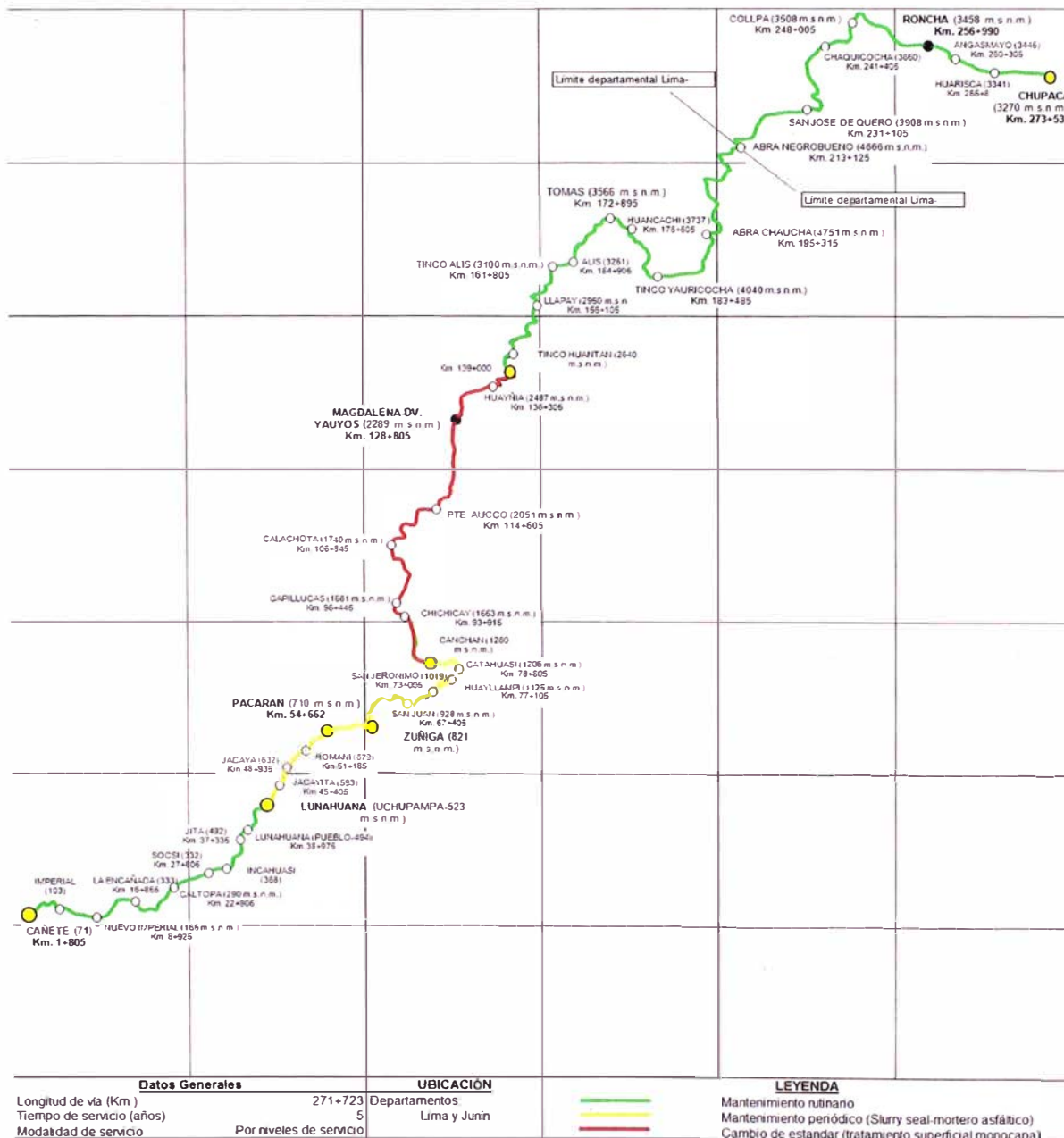


FIGURA N° 1.2. PLANO CLAVE DE LA RUTA 22
(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

El clima que se presenta en la carretera en estudio es variable, pues el área comprometida en el estudio se ubica en diferentes regiones según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal (expuesta en su "Geografía del Perú"). En el siguiente CUADRO N° 1.2 se señalan las temperaturas típicas y precipitaciones que se dan en estas regiones.

Región	Tem. mínima	Tem. media	Tem. Máxima	Precipitación	Característica
Yunga (500-2300 msnm)		20° a 27°C		Pprom=100-150 mm	Sol dominante casi todo el año.
Quechua (2300-3500 msnm)	-4 a 7°C	11° a 16°C	22° a 29°C	Pprom=800-1200 mm	Clima templado
Suni o Jalca (3500-4000 msnm)	-1 a -16°C	7° a 10°C	>20°C	Pprom. = 800 mm por año.	Clima frío
Puna (4000-4800msnm)	-25° a -9°C	0° a 7°C	22°C	Pprom entre 200 mm y 1000 mm al año.	Clima muy frío

CUADRO N° 1.2. CLASIFICACIÓN DEL CLIMA EN LA CARRETERA

(Fuente: Recopilación del informe del cambio estándar y estudios de preinversión a nivel de perfil para el rehabilitación y mejoramiento de la carretera)

La carretera tiene una topografía bastante sinuosa transformándose en agreste en la medida que se interna en la cordillera de los andes; mientras que se vuelve a ampliar, ya en la cima de la cordillera. El ancho de la actual plataforma vial es variable entre 3m y 8m.

La geomorfología de la zona en estudio, se encuentra conformada sobre las unidades sedimentarias volcánicas y metamórficas. En cuanto a las formaciones geológicas de la ruta se encuentran las formaciones de Cañete, Cerro Negro, Torán, Cocachacra y Pariatambo. La composición de los suelos tiene un 49% de material suelto, 33% de roca suelta y 18% de roca fija, en el tramo de Lunahuana a Yauyos y en el Tramo Yauyos Chupaca se tiene 53% de material suelto, roca suelta 32% y roca fija 15%.

1.2 TRAMO EVALUADO km 89+000 – km 94+000

El tramo en estudio de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca se encuentra ubicado entre km 89+000 – km 94+000, presenta las siguientes características que a continuación se describen.

Este tramo de la carretera en estudio se inscribe dentro de los poblados de Canchan ubicado en el km 83+345 a una altitud de 1260 msnm y Chichicay ubicado en el km 93+915 a una altitud de 11553 msnm, ambos poblados pertenecen a la región Yunga. Como ya se ha mencionado en el CUADRO N° 1.2 este tramo presenta un clima caluroso. La temperatura varía entre 20°C y 27°C durante el día y en las noches son frescas a causa de los vientos que bajan de las regiones más altas.

La topografía en este tramo se desarrolla sobre media ladera y terrenos deleznable, cuya plataforma consta de una calzada con un solo carril de dos sentidos de circulación y con un ancho que varía de 3.5 a 5.0 m, y pendientes en el rango de 7 % a 10 %. Este tramo se encuentra geológicamente en la quebrada del río Cañete, conformado por material aluvional, terrazas de depósitos fluviales y cortes en rocas macizas.

El tipo de suelo de fundación del tramo en estudio se clasifica según el Sistema SUCS como SC-SM (Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla y Arenas limosas, mezclas de arena y limo) principalmente, ver FIGURA 1.3.

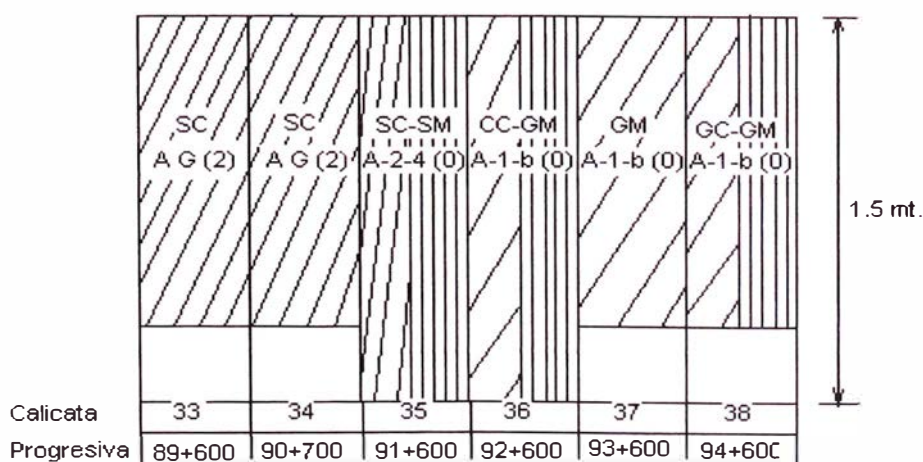


FIGURA N° 1.3. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL TRAMO EN ESTUDIO

(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

El sistema de drenaje en este tramo es deficiente e inadecuada, con presencia de tramos críticos debido a huaycos. En la actualidad el tramo en estudio de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca km 84+000 – km 89+000, se han realizado los trabajos de Mantenimiento y Conservación Vial (capa base estabilizada con emulsión asfáltica y recubrimiento bituminoso monocapa con RC - 250). Estos trabajos fueron ejecutados entre febrero y marzo del 2009 por la concesionaria CGC.

Como otros datos importantes y de acuerdo al estudio técnico para el cambio estándar de afirmado a solución básica de la concesionaria CGC proyectado para el periodo del 2009 al 2013, se puede mencionar lo siguiente:

EAL (Número de ejes equivalentes a 8.2 t) = 1.69 E+06.

IMDA = 53 veh/día

Tasa de Crecimiento = 3.6%

CBR (al 95% del MDS) = 20, Buena capacidad portante del terreno.

Módulo Resiliente $M_r = 13,201$ psi

Coefficiente de Drenaje (CD) = 1.

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 qué tipo de comportamiento tendrá el suelo. A continuación se indican los principales sistemas de análisis.

2.1.1 Sistemas elásticos de capas

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

2.1.2 Sistemas no lineales de capas

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

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

2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos

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

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

2.2 Ensayos no Destructivos

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

2.2.1 Viga Benkelman

La viga Benkelman es un instrumento manual que consta de dos (2) brazos, uno que va en contacto con el terreno y el otro que sirve de pivote donde se realizan las mediciones producidas por la carga estática normalizada (8200 kg). Este equipo se verá con más detalle en el capítulo III.



Figura 2.2.1: Viga Benkelman

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

2.2.2 Dynaflec

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



Figura 2.2.2: Equipo Dynaflec

2.2.3 Road Rater

Existen varios modelos, que varían sobre todo en la magnitud de las cargas, y las cargas estáticas o dinámicas; emplea cuatro sensores para medir la deflexión base. El dispositivo se mueve a la localización de la prueba, donde se coloca la placa de carga y 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.

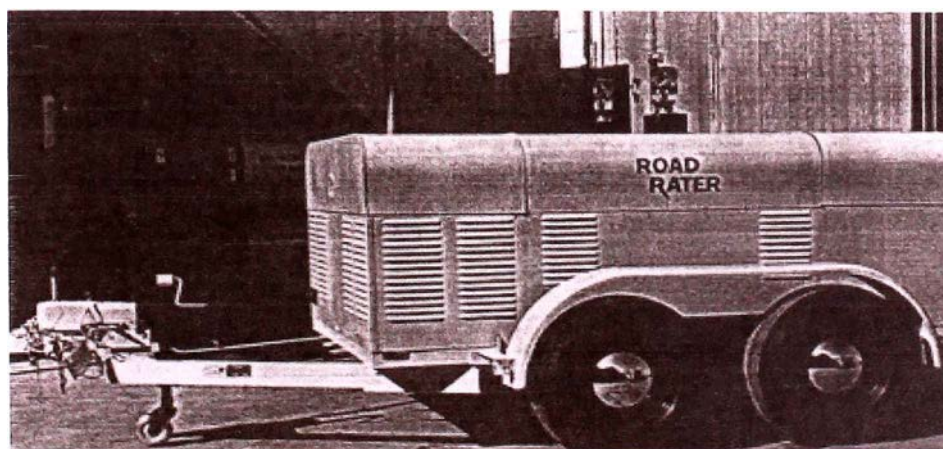


Figura 2.2.3: Equipo Road Rater

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.



Figura 2.2.4: Equipo RDD

2.2.5 FWD

El FWD empleado frecuentemente en los Estados Unidos es el sistema Dynatest modelo 8000. La fuerza de impulso es creada soltando un peso al pavimento. 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.



Figura 2.2.5: 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 emplea para generar una subida gradual de un pulso de fuerza sobre el pavimento, para detectar la rigidez de la subrasante.



Figura 2.2.6: Equipo KUAB FWD

CAPITULO III.- MARCO TEÓRICO

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

3.1 Viga Benkelman

El deflectógrafo Benkelman funciona mediante el principio de palanca. Es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura 3.1.1. A su vez la viga consta principalmente de dos partes. Un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

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

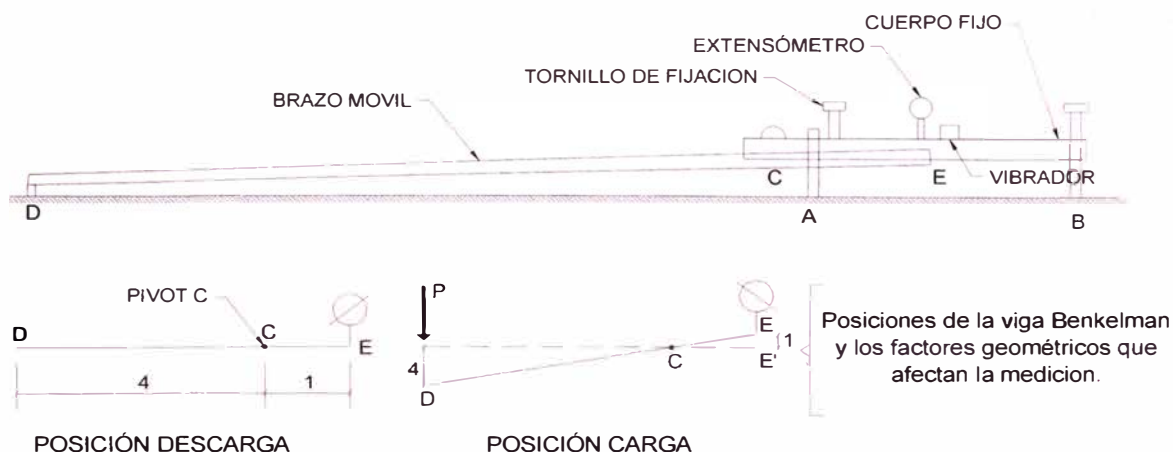


Figura 3.1.1 Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

Metodología de medición de deflexiones con Viga Benkelman

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada a 8,200 kg. Previamente a la realización de los ensayos, deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las

llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 3.1.2 (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 3.1.2 (b)], se hace coincidir las marcas de la viga con la varilla para medir las deflexiones del pavimento.

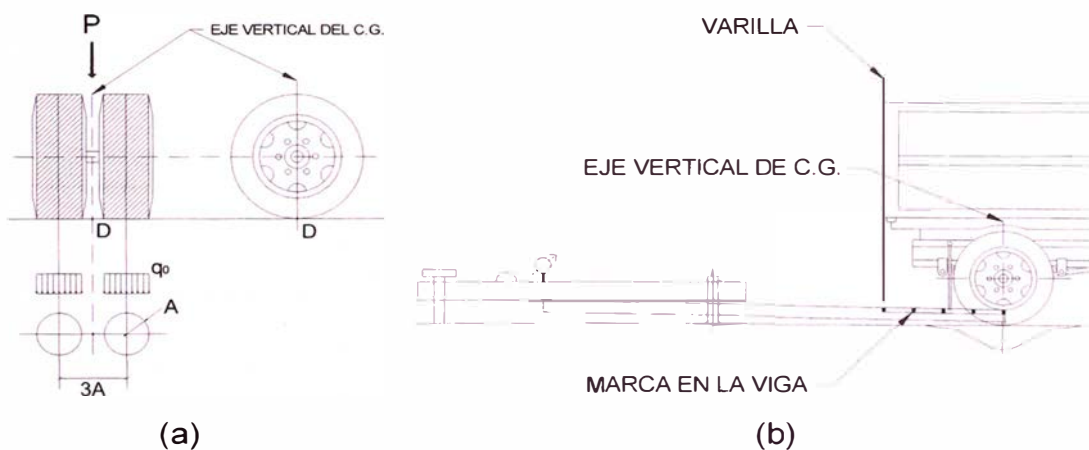


Figura 3.1.2. Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.

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 en el brazo de la viga a la altura de la varilla que se encuentra adosada en la parte posterior del camión cuando la Viga Benkelman se encuentra en posición correcta para realizar el ensayo, tal como se muestra en la Figura 3.1.2 (b). Las siguientes marcas se realizan a una distancia de 25, 40, 70 y 100 cm del primer punto marcado.

Una vez instalada la viga en el punto de medición, haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial (ver figura 3.1.3 a), se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del

camión. Luego se pone el dial del extensómetro en cero, se activa el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas según la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas. (Ver Figuras 3.1.3 (b) y (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.

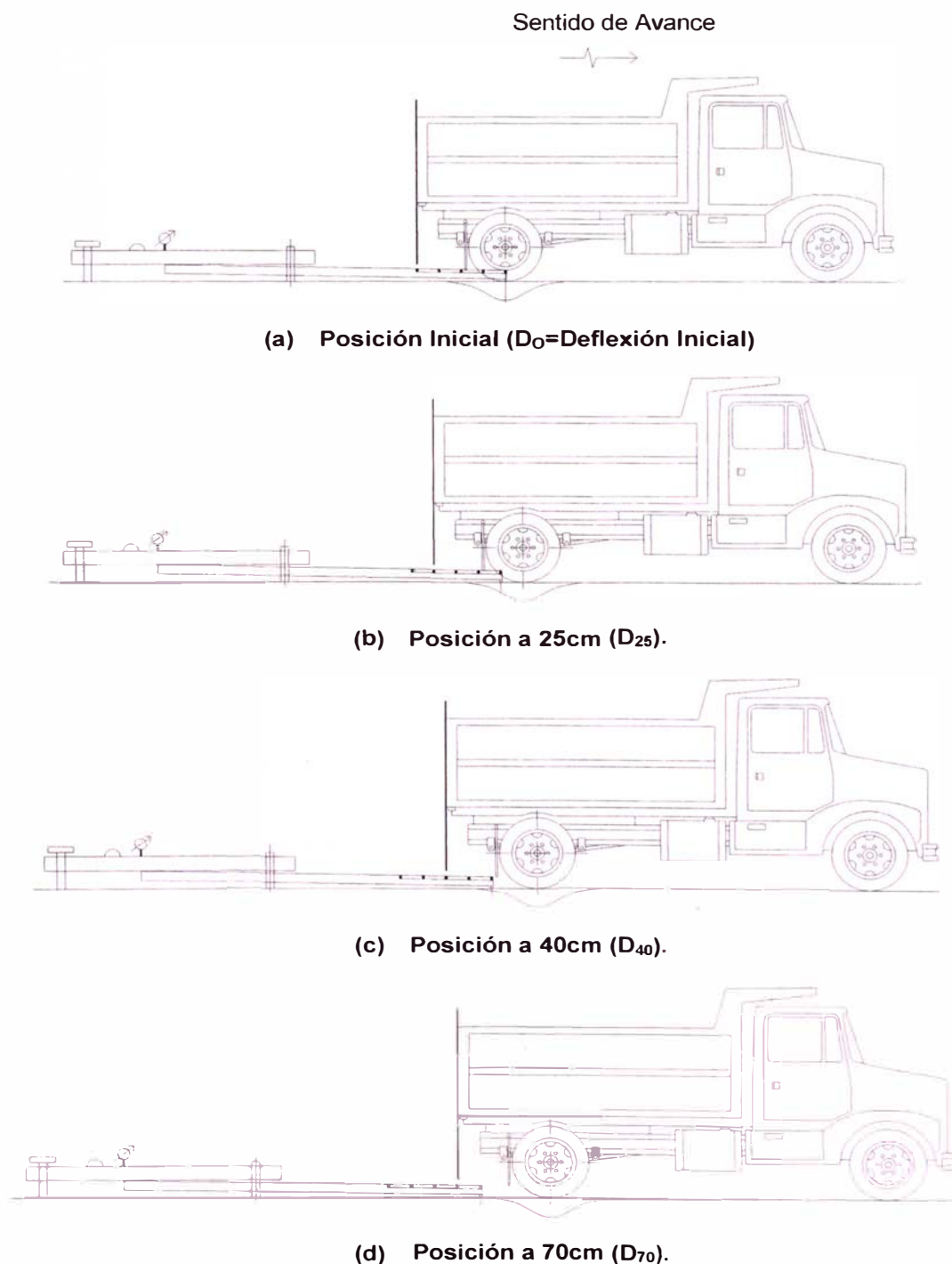


Figura 3.1.3 Esquematzación del proceso de medición de la Viga Benkelman

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 dé aviso al técnico que realiza las lecturas.

EQUIPO REQUERIDO

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

- a) Deflectógrafo Viga Benkelman, con relación de brazos 1:4
- b) Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm
- c) Camión cargado, cuyo eje tenga un peso de 18000 libras y un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- d) Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo (camioneta).
- e) Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- f) Accesorios de medición como: Regla de aluminio de 1.5 m, 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 2 m y alambre de amarre.

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 resilente

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

$$M = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.2.1)$$

Donde:

σ_d : Es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en un ensayo no confinado. (kg/cm²)

ε_r : Deformación Recuperable, (cm)

Ratio de Poisson

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

Módulo de elasticidad

Se le designa por **E**. Está asociado directamente con los cambios de longitud que experimenta el pavimento, cuando se le somete a la acción de esfuerzos de tracción o de compresión.

Peso unitario

Es el peso por unidad de volumen.

CBR

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lb/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo con un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lb/pulg²) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Coefficiente de expansión térmica

Cambio en las dimensiones de un material por variación 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:

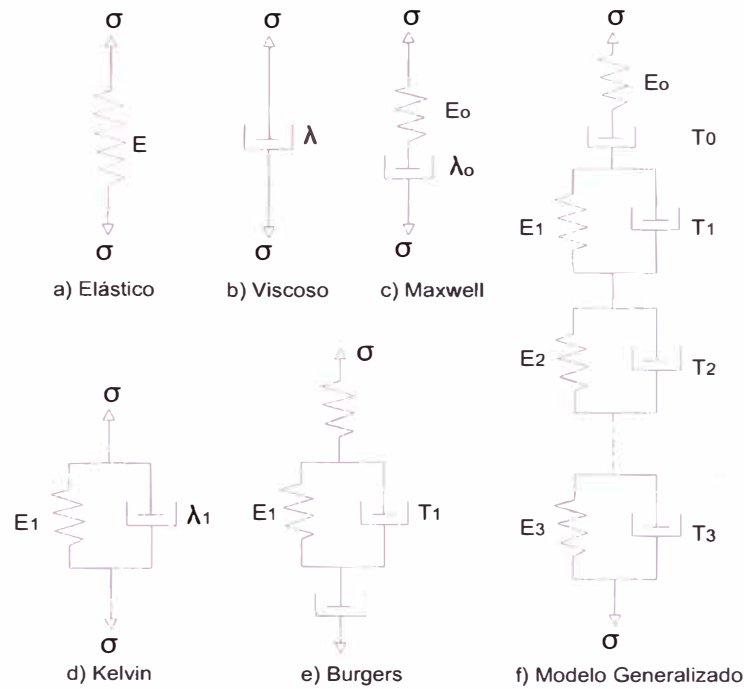


Figura 3.2.1. Modelos Mecánicos para materiales viscoelásticos

3.2.2 Modelo Básico

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en Figura 3.2.1(a) y obedece la ley de Hooke, y la tensión es proporcional a la deformación:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.2.2.a)$$

Donde:

σ = Esfuerzo

ε = Deformación

E = Módulo de elasticidad

Un material viscoso es representado por un amortiguador hidráulico, según lo indicado en Figura 3.2.1(b) y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo:

$$\sigma = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.2.2.b)$$

3.2.3 Modelo de Maxwell

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la Figura 3.2.1(c). Se usa el subíndice 0 para indicar un modelo de Maxwell:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (3.2.3)$$

3.2.4 Modelo de Kelvin

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la Figura 3.2.1(d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usa el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin.

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.2.4)$$

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 3.2.1(e).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1} \right) \right] \quad (3.2.5)$$

3.2.6 Modelo Generalizado

La Figura 3.2.1(f) muestra un modelo generalizado que se pueda utilizar para caracterizar cualquier material viscoelástico.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i} \right) \right] \quad (3.2.6)$$

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 círculos de radio "A".

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

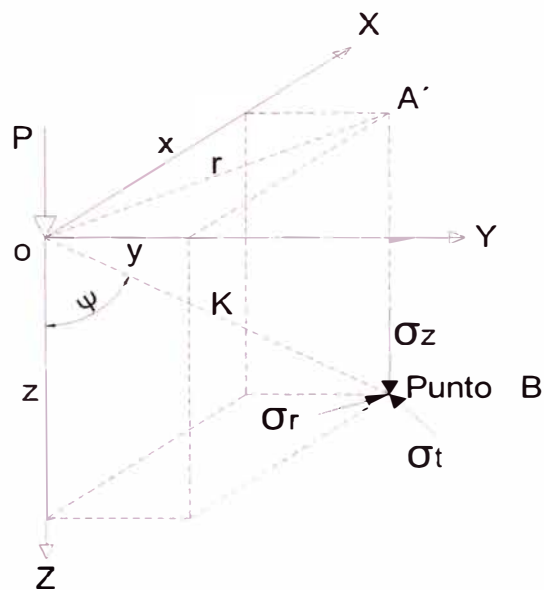


FIGURA N° 3.3.1 Esfuerzos provocados en un Punto de una masa de suelo por una Carga Concentrada

De la Figura 3.3.1 se tiene que los esfuerzos en el punto "B" se pueden determinar con las siguientes Ecuaciones:

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

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

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

Si se tiene una carga vertical concentrada actuando en la frontera de un medio elástico semiinfinito, se estima el asentamiento bajo la carga, siguiendo el método aproximado basado en la fórmula de Boussinesq para el esfuerzo normal vertical (Ec. 3.3.1 a). El análisis que se sigue supone que los esfuerzos restantes son despreciables.

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi K^5} \quad (3.3.1 d)$$

Para puntos bajo la carga $K=z$, se tendrá:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (3.3.1e)$$

Aplicando la ley de Hooke en su forma más simple, correspondiente a un estado monoaxial de esfuerzos se tiene:

$$d\rho = \frac{\sigma_z}{E_s} dz \quad (3.3.1 f)$$

En donde $d\rho$ representa la deformación vertical del elemento dz a la profundidad z bajo la carga, integrando la expresión anterior entre z e infinito (suponiendo estado de profundidad infinita)

$$\rho = \frac{3P}{2\pi E_s} \int_z^\infty \frac{dz}{z^2} = \frac{3P}{2\pi E_s z} \quad (3.3.1 g)$$

Nótese que la integración fue hecha a partir del nivel z hacia abajo, para evitar la singularidad que presenta la fórmula de Boussinesq inmediatamente bajo la carga.

La fórmula obtenida por Boussinesq para el desplazamiento vertical de un punto a la profundidad z de radio K es:

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[2(1 - \mu) + \left(\frac{z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (3.3.1 h)$$

Donde μ es la relación de Poisson.

La fórmula obtenida a partir de la ecuación anterior para el desplazamiento vertical de un punto en la superficie generada por dos cargas distribuidas es la siguiente:

$$\delta = \frac{\rho}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2+3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx \right\} \quad (3.3.1 i)$$

3.3.2 Modelo de Hogg

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

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

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

La ecuación que resuelve Hogg es:

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

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

D = rigidez de la placa que representa al pavimento.

w = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

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

q_0 = Carga distribuida.

E_1 = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

μ_1 = Ratio de Poisson.

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

Con la transformada de Hankel la ecuación 3.3.2a para z=0 tiene como solución:

$$\Delta(0,r) = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)q_0 A}{2(1 - \mu_o)E_o} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mR}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{mA}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mH}{L_0}\right)} dm \quad (3.3.2 \text{ b})$$

Donde:

$$\phi_{(m)} = \frac{\text{Senh}(m) \times \text{Cosh}(m) + \frac{m}{3 - 4\mu_o}}{\text{Senh}^2(m) - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_o)^2}} \quad (3.3.2 \text{ c})$$

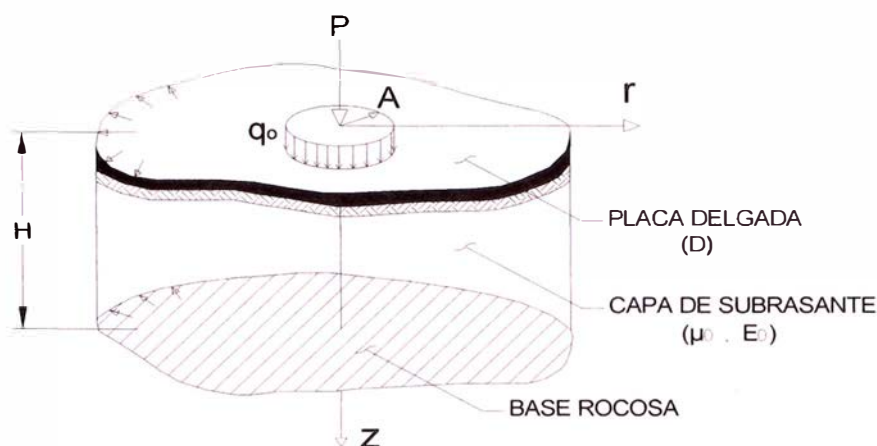


FIGURA N° 3.3.2: Modelo de Hogg

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 “ δ ” es proporcional a la presión vertical “ v ” en ese punto.

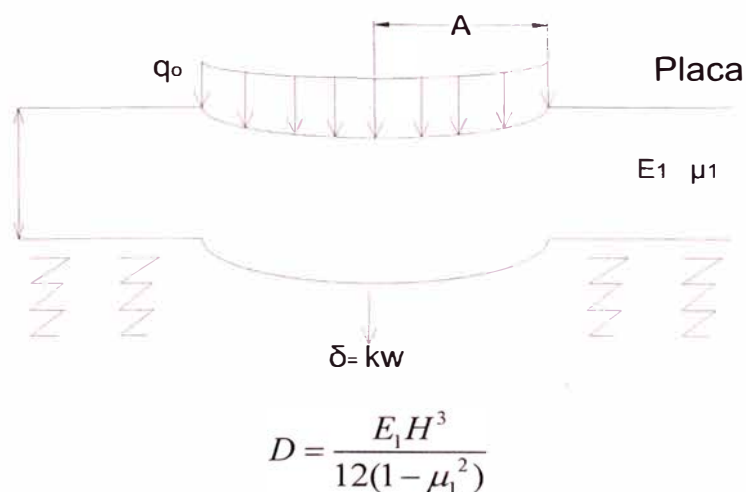


Figura 3.3.3 Modelo de Westergaard

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).

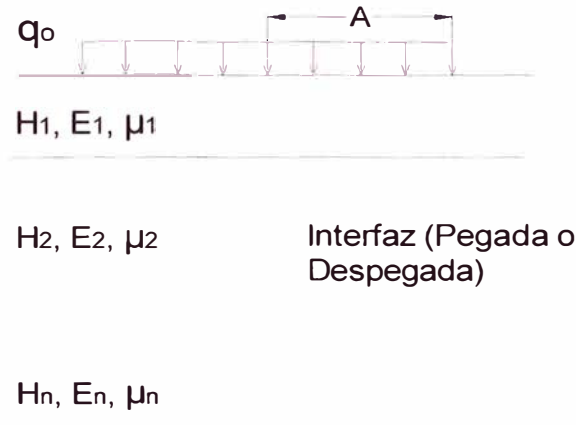


Figura 3.3.5 Modelo multicapas.

3.4 Métodos de Solución de Pavimentos

3.4.1 Fórmulas de Boussinesq

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

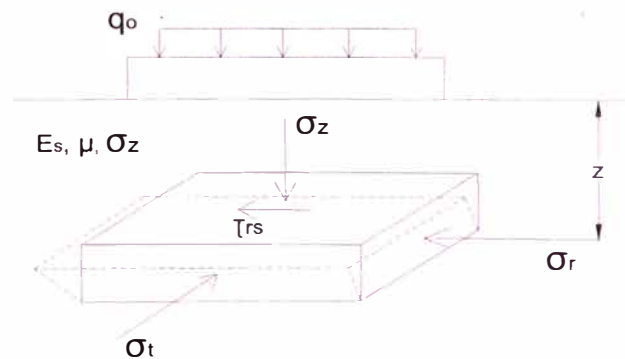


FIGURA N° 3.4.1 a Representación de un masivo semi infinito.

Para ejes gemelos

De la fórmula de Boussinesq para hallar el desplazamiento de un punto en el suelo provocado por una carga puntual, se puede deducir la ecuación para hallar el desplazamiento total producido por la distribución de las cargas de las dos llantas. Así tenemos la ecuación (3.3.1 h)

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[2(1 - \mu) + \left(\frac{z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (\text{Ec. 3.3.1 g})$$

Considerando el desplazamiento en la superficie (z=0) para una carga puntual obtenemos:

$$\delta = \frac{P}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \frac{1}{K} \quad (3.4.1 a)$$

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

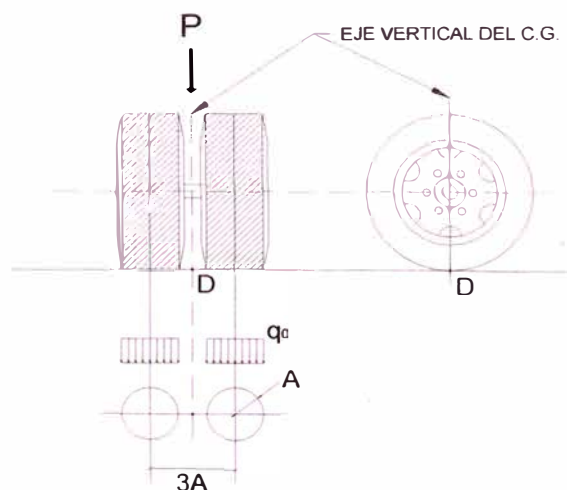


FIGURA Nº 3.4.1 b Distribución de presiones sobre el pavimento

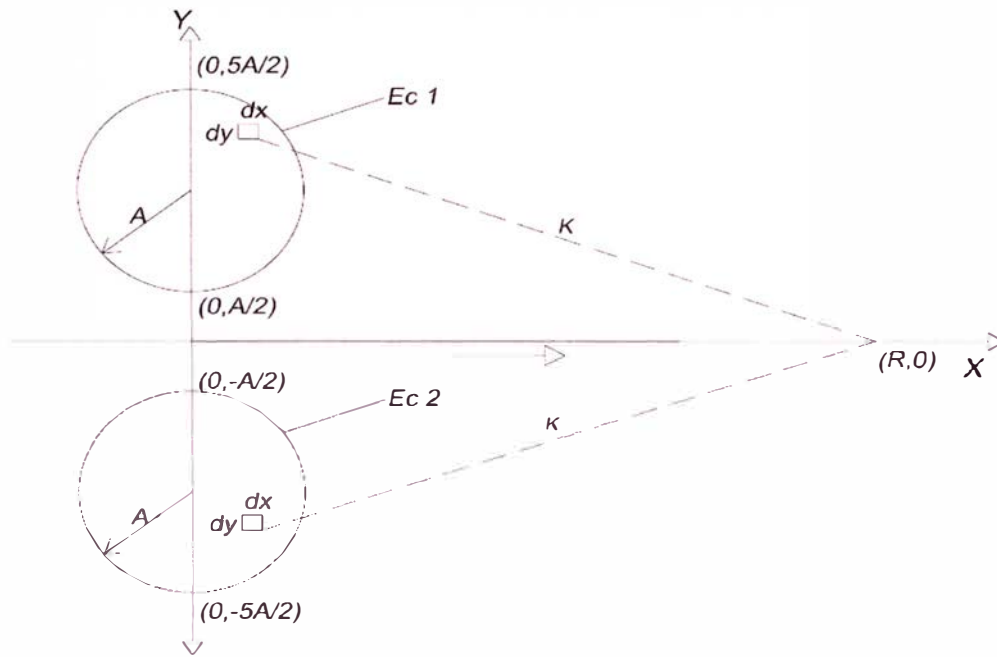


FIGURA N° 3.4.1 c Esquematización de la carga distribuida de las llantas para la formulación del método de Boussinesq

Donde, de la figura 3.4.1, se obtiene:

$$K^2 = (x - R)^2 + (y)^2 \quad (3.4.1 \text{ b})$$

$$\text{Relación 1: } x^2 + \left(y - 3\frac{A}{2}\right)^2 = A^2 \quad (3.4.1 \text{ c})$$

$$\text{Relación 2: } x^2 + \left(y + 3\frac{A}{2}\right)^2 = A^2 \quad (3.4.1 \text{ d})$$

El diferencial de desplazamiento para un diferencial de carga puntual es:

$$\Delta\delta = \frac{w}{\pi E_s} \frac{(1 + \mu^2)}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} dydx \quad (3.4.1 \text{ e})$$

Integrando se obtiene el desplazamiento total de todos los diferenciales de presiones provocadas por la carga puntual sobre el eje de las dos llantas del camión.

$$\delta = \frac{\rho}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2+3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx \right\} \quad (3.4.1 f)$$

Despejando el E del pavimento

$$E_s = \frac{\rho}{\pi \delta} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2+3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2+3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}}^{\sqrt{A^2-x^2-3\frac{A}{2}}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} \right] dy dx \right\} \quad (3.4.1 g)$$

Donde:

δ : Desplazamiento

E_s : Módulo de elasticidad del masivo semi infinito

μ : Ratio de Poisson

A: Radio de la huella circular de contacto

ρ : Presión de inflado.

R: Distancia hasta donde $D_R/D_{max} = 0.5$

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:

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

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 igual a:

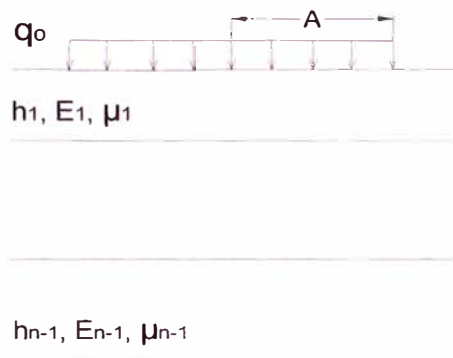


FIGURA N° 3.4.3 Modelo de Multicapa propuesto con la Fórmula de Palmer y Baber generalizada.

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

La ecuación 3.4.3 será necesaria para relacionar los módulos de elasticidad en la aplicación del módulo de Boussinesq.

3.4.4 Fórmula de Odemark

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

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

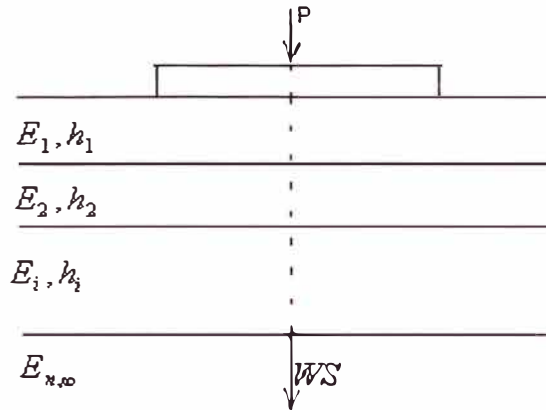


FIGURA N° 3.4.4: Modelo de multicapa Propuesto con la Fórmula de Odemark

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

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

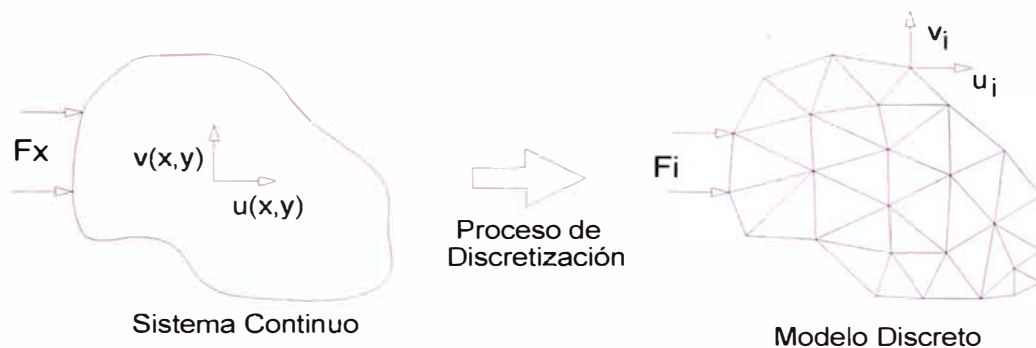


Figura 3.4.5. Modelo de Elementos Finitos

CAPITULO IV.- APLICACIÓN TRAMO km 89+000 – km 94+000

4.1 Aplicación de la Viga Benkelman.

La aplicación consiste en la determinación de las deformaciones verticales (deflexiones) que experimenta la superficie del pavimento al aplicarle a través de un camión de eje simple (eje trasero) una carga estándar de 8.2 t.

A continuación se describe los trabajos realizados en campo durante la evaluación del pavimento:

- Se marcan los puntos a evaluar cuyos puntos se encuentran distante cada 100 m, el primer punto se ubica en la progresiva 91+100 y el punto final en la progresiva 91+500, siendo 5 puntos a ser evaluados.
- Se utilizó una viga Benkelman de brazo simple. (Relación de brazos: 4/1)
- Se utilizó un volquete de eje simple, cuyo eje posterior transmite una carga de 8.2 t.
- La presión de inflado de las llantas fue de 80 psi (lb/plg²)
- Se toma la temperatura de la capa asfáltica mediante un termómetro de precisión digital.
- Se mide el espesor de la capa asfáltica en cada punto de evaluación.
- Se registra la lectura de las deflexiones en el extensómetro de la Viga Benkelman.
- Se mide el ahuellamiento de la superficie en el punto de evaluación.



Procedimiento de medición.

La toma de datos que se obtiene durante la evaluación de campo, se basa en el siguiente procedimiento:

- En el pavimento se deben marcar con anticipación los puntos a ser evaluados de manera que permita agilizar el proceso de evaluación.



- Antes de empezar a medir se fija en la parte trasera del volquete una regla de metal que sirva de plomada para saber en que momento el camión pasa por los puntos que serán marcados en el brazo de la viga.



- Se marca en el brazo de la viga, previamente, con papel adhesivo, los puntos previstos que son materia de estudio. En nuestro caso se ubicaron a 0, 25, 40, 70 y 100 cm. El punto 0 en la viga se ubica a la altura de la regla que se encuentra fijada en la parte posterior del volquete, cuando el extremo del brazo de la viga se encuentra coincidiendo con el eje de la rueda posterior.



- La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado (progresiva) quedando éste ubicado entre ambas llantas.



- Se coloca la viga sobre el pavimento, detrás del camión perpendicularmente al eje de carga de modo que la punta de la viga coincida con el punto de ensayo y el brazo de la viga no roce contra las cubiertas de la rueda dual.



- Se retira la traba de la viga y luego se instala la base por medio de un 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 y se verifica la lectura golpeando suavemente con un lápiz y poniendo en marcha el vibrador de la regla. Se deberá girar la esfera si es necesario y repetir la operación hasta fijarlo en la posición "0" (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 volquete que inicie el movimiento lento mientras que otro indicará a los operadores encargados de leer las lecturas, el momento exacto en que la regla fijada en el volquete coincida con los puntos marcados previamente en el brazo de la viga. Ver Figura N° 4.1 (Anexo N° 5)
- Al escuchar las indicaciones los lectores leerán en voz alta y clara las lecturas que indican en el extensómetro, mientras que otro operador las anotará, esta operación se realiza, con el fin de no equivocarse al momento de tomar las lecturas. Ver Figura N° 4.2 (Anexo N° 4)
- Luego se procede a la medición de la temperatura de la carpeta asfáltica en el punto de evaluación, para el cual se necesita realizar un agujero en el asfalto para introducir el sensor del termómetro digital. Además se toma una pequeña muestra del espesor del asfalto en el extremo de la calzada. Ver Figura N° 4.3 y 4.4 (Anexo N° 5)
- Se anota la medida del Ahuellamiento en el punto de evaluación y se hacen anotaciones y tomas de fotografías generales de las fallas superficiales aledañas. Ver Figura N° 4.5 (Anexo N° 5)



- Para la evaluación de los demás puntos se sigue el mismo procedimiento descrito líneas arriba.



Todo este proceso deberá ser supervisado por un ingeniero de campo experimentado, quien verificará los valores que se vayan obteniendo, así como otras observaciones, tales como fallas en la superficie, tipo de material, abolladura, entre otras características.

Obtenida toda la información de campo se procede a calcular los valores de las deflexiones de cada uno de los puntos evaluados para luego realizar las correcciones por relación de brazo (4:1).

En el siguiente cuadro se muestran las lecturas obtenidas en campo.

N°	Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)
		L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}		
37	91+100	10	16	20	22	0.01	54
38	91+200	8	14	20	22	0.01	53
39	91+300	8	14	18	24	0.01	53
40	91+400	12	16	20	48	0.01	54
41	91+500	8	14	16	20	0.01	54

Cuadro N° 4.1 Datos tomados en campo

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2 Aplicación de la teoría de Boussinesq.

Para la aplicación de la teoría de Boussinesq se definirá los siguientes parámetros:

Modelo de carga

La carga de ensayo para la viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión, cuya carga en el eje posterior es del orden de 8.2 t y la presión de inflado de las llantas es de 80psi (lb/plg²). Estos datos serán usados en la aplicación de Boussinesq.

En el modelo de carga, la presión de contacto que ejerce sobre la huella, se asume igual a la presión de inflado de la llanta. Además la huella de contacto de cada llanta con la superficie es circular de radio A y la distancia entre los ejes de las huellas de la llanta doble es 3A.

Por las condiciones se establece las siguientes relaciones:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}} ; \quad w = \frac{P}{\pi / 4 (2A)^2}$$

Donde:

A= Radio de la huella circular de contacto

w= Carga Distribuida

P= Carga sobre una llanta

ρ = Presión de Inflado

Cálculo de R

R representa la distancia del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se cumple que la relación $D_R/D_0=0.5$. Quiere decir que deflexión D_R es la mitad de la deflexión máxima D_0 . Con el método de Boussinesq se calculará el valor de R de una manera estadística.

Utilizando la ecuación (3.4.1g) se determinara el valor de "E" utilizando D_R y un "R" cercano a la relación $D_R/D_0=0.5$ donde D_0 es la deflexión máxima. Con la

ecuación (3.4.1f) calcularemos las deflexiones teóricas para luego compararlas gráficamente con las deflexiones de campo. Para resolver la ecuación se utilizó un programa en Matlab (Anexo N° 1). Para el método de Boussinesq se determinará el valor de R de una manera estadística.

Para diferentes valores de “R” cercanos a la relación $D_R/D_0=0.5$ se graficarán varias curvas teóricas de las deflexiones asociadas a un módulo de elasticidad E_S mediante la ecuación (3.4.1g) y se comprobará con la curva de deflexiones de campo. Estadísticamente se ajustará la curva que mejor se ajuste a la curva de campo, esta será la que tenga menor desviación estándar con el cual obtendremos los valores de R, D_R y E_S , que servirán para el cálculo de los demás parámetros.

Cálculo del módulo de elasticidad del masivo semi infinito “ E_S ”

El módulo de elasticidad del masivo “ E_S ”, representa a todas las capas compuesto de la carpeta asfáltica, base granular y subrasante.

Obtenido los valores de R y D_R se puede calcular el valor de “ E_S ” con la ecuación (3.4.1g) de Boussinesq.

Para la simplificación de las operaciones y poder resolver las ecuaciones (3.4.1f) y (3.4.1g) se realizó un programa en el Matlab. (Ver. Anexo 1).

Cálculo del módulo de elasticidad de la Subrasante (E_0)

La determinación del módulo de elasticidad de la subrasante constituye un punto central de la metodología de evaluación.

El valor de E_0 se determinará con la longitud característica (L_0) del pavimento obtenido por el modelo de Hogg (Ver Anexo N°4), de las ecuaciones (3.4.3) y (3.4.4), se tiene:

$$E_S = E^* \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_0}{E^*}}}{h_1 + h_2} \right]^3 \dots \alpha$$

$$L_0 = 0.55h_1 \sqrt[3]{\frac{E^*}{E_0}} \dots\dots\dots \beta$$

Para la obtención del L_0 y h_2 se utilizó la metodología de Hogg teniendo en consideración la siguiente relación $H/l_0=10$.

Donde:

E_s = Módulo de elasticidad del masivo semiinfinito.

E_0 = Módulo de elasticidad de la subrasante.

E^* = Módulo de elasticidad del Pavimento.

h_1 = Espesor del Pavimento

h_2 = Espesor del masivo semiinfinito

$H = h_1 + h_2$

$H = 10 \times L_0$

L_0 = Longitud característica de Hogg

Cálculo del módulo de elasticidad equivalente del pavimento (E^*)

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

El pavimento está compuesto de una carpeta monocapa, base granular estabilizada y una sub-base de afirmado.

Para la determinación de E^* se utiliza la ecuación (β) (Boussinesq)

$$L_0 = 0.55h_1 \sqrt[3]{\frac{E^*}{E_0}} \quad \text{Entonces se tiene} \quad E^* = E_0 \left[\frac{l_0}{0.55h_1} \right]^3$$

Significado de E_0 y su relación con el CBR

El parámetro E_0 representa el módulo de elasticidad de la masa de subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento-subrasante.

Esta relación ha sido establecida experimentalmente, comparando los valores de E_0 obtenidos de la metodología de evaluación estructural, usando deflexiones medidas con la Viga Benkelman y valores de CBR obtenidos insitu.

De numerosas comparaciones de este tipo se ha podido establecer la siguiente relación:

$$E_0 = (100 \text{ a } 160) \times \text{CBR} \quad (4.2)$$

Donde:

E_0 : Expresado en (kg/cm²)

CBR: Expresado en (%).

Resulta interesante notar que esta relación es similar a la obtenida por Heukelom y Klomp, durante ensayos de propagación y análisis de ondas vibratorias realizadas en Holanda para determinar lo que denominaron el "E dinámico" de los suelos.

El coeficiente numérico (100 a 160) se denomina "Factor de CBR" y se recomienda utilizar un factor de 100 a 110 para ensayos rutinarios a menos que exista alguna razón que justifique su cambio.

CAPITULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Según el procedimiento e indicaciones descritos en el capítulo IV, se obtendrán los siguientes resultados por cada punto evaluado en campo. En el tramo evaluado se tiene 5 puntos que hacen una longitud de 400 m.

Procesamiento de datos y Cálculo de los Módulos de Elasticidad y CBR

El análisis de los datos de campo de la evaluación estructural, determinará los diferentes parámetros tales como el Módulos de Elasticidad del masivo, Módulos de Elasticidad del pavimento y el CBR en cada punto.

Para una mayor comprensión se cita un ejemplo completo del procesamiento de los datos de las mediciones de deflexiones elásticas o recuperables que fueron obtenidos en campo:

Paso 1.-

Se calcula las deflexiones elásticas recuperables de cada punto evaluado, para cada distancia de $R= 0, 25, 40, 70$, restando a la deflexión máxima la lectura tomada en cada punto marcado en el brazo de la viga cuyas distancias son. $0, 25, 40, 70$.

Ejemplo: (Prog. 91+100)

Para el tramo en estudio en la Prg. 91+100, se tiene que la deflexión máxima es 22×10^{-2} mm, entonces la deflexión inicial (L_0) es cero, la deflexión a $R= 25$ cm (L_{25}) es 10.00×10^{-2} mm, la deflexion a $R=40$ (L_{40}) es 16×10^{-2} mm y la deflexion a $R=70$ (L_{70}) es 20×10^{-2} mm.

Luego se tiene:

$$D_0 = (22.00 - 00.00) = 22.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{25} = (22.00 - 10.00) = 12.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{40} = (22.00 - 16.00) = 06.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{70} = (22.00 - 20.00) = 02.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Paso 2.-

En el siguiente paso, se realizara la corrección por relación de brazos, dado que la Viga Benkelman utilizada tiene una relación de brazos de 4:1, entonces todas las deflexiones recuperables obtenidas en el paso 1 se deberá multiplicar por 4, obteniendo así las deflexiones corregidas que servirán para los cálculos correspondientes.

Para la Prog. 91+100 se obtuvo:

$$D_0 = (22.00) \times 4 = 88.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{25} = (12.00) \times 4 = 48.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{40} = (06.00) \times 4 = 24.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{70} = (02.00) \times 4 = 08.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

N°	Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
		L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}			Deflexiones(x10 ⁻² mm)			
								D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀
37	91+100	10	16	20	22	0.01	54	88	48	24	8
38	91+200	8	14	20	22	0.01	53	88	56	32	8
39	91+300	8	14	18	24	0.01	53	96	64	40	24
40	91+400	12	16	20	48	0.01	54	192	144	128	112
50	91+500	8	14	16	20	0.01	54	80	48	24	16

Cuadro N 5.1 Deflexiones corregidas por relación de brazos (4:1)

Paso 3.-

Para determinar los valores de R y E_s para el ejemplo, cuyo punto tiene como progresiva 91+100 se hará uso de un programa en Matlab (Ver Anexo N° 1), el cual calculará las curvas de deflexiones teóricas (R vs D_i) para diferentes distancias de R; estas curvas de deflexiones teóricas serán comparadas con las

curvas de deflexiones de campo (R vs D_c). Luego se tomará como resultado la curva de deflexiones teóricas, cuya desviación estándar sea la menor, obteniendo así los valores de R y E_s .

Los datos de ingreso para el programa son los siguientes:

m : Es el intervalo donde se encuentra el 50% de D_0 (Ejemplo: $m=[25\ 40]$)

Dz : Deflexión igual a $D_0/2$ (ejemplo: $Dz=88/2 =44$)

Dist : Distancia donde se tomaron las deflexiones de campo
(Ejemplo: Dist = [0 25 40 70])

n : Numero de datos de campo evaluado por punto (Ejemplo: $n=4$)

Dz-C : Deflexiones corregidas de campo en cm.
(Ejemplo: Dz-C = [0.088 0.048 0.024 0.008])

sss : Identificación de la función = a la progresiva de evacuación.
(Ejemplo: $sss='91+100'$)

A continuación se presenta los resultados del proceso de ejecución del programa cuyo proceso de ajuste se muestran en los siguientes cuadros:

Cuadros de Resultados: (Se toma la de menor Desviación Estándar)

R=5 cm
DR=0.044 cm
 $E=1671.1\text{ kg/cm}^2$

Distancia R (cm)	Defl exiones Teóricas Dt (cm)	Defl exiones Campo Dc (cm)	$(Dc-Dt)^2$
0	0.046252	0.088	0.001743
25	0.025066	0.048	0.000526
40	0.017306	0.024	0.000045
70	0.010397	0.008	0.000006
Desviación Estándar			0.002319

R=10 cm
DR=0.044 cm
E=1486.1 kg/cm²

Distancia R (cm)	Deflexiones Teóricas Dt (cm)	Deflexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.05201	0.088	0.001295
25	0.028187	0.048	0.000393
40	0.01946	0.024	0.000021
70	0.011692	0.008	0.000014
Desviación Estándar			0.001722

R=15 cm
DR=0.044 cm
E=1280.4 kg/cm²

Distancia R (cm)	Deflexiones Teóricas Dt (cm)	Deflexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.060365	0.088	0.000764
25	0.032715	0.048	0.000234
40	0.022587	0.024	0.000002
70	0.01357	0.008	0.000031
Desviación Estándar			0.00103

R=20 cm
DR=0.044 cm
E=1098.0 kg/cm²

Distancia R (cm)	Deflexiones Teóricas Dt (cm)	Deflexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.070393	0.088	0.00031
25	0.038149	0.048	0.000097
40	0.026339	0.024	0.000005
70	0.015824	0.008	0.000061
Desviación Estándar			0.000474

Curva con menor Desviación Estándar

R=25 cm
DR=0.044 cm
E=948.6 kg/cm²

Distancia R (cm)	Def lexiones Teóricas Dt (cm)	Def lexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt)^2
0	0.081478	0.088	0.000043
25	0.044157	0.048	0.000015
40	0.030487	0.024	0.000042
70	0.018316	0.008	0.000106
Desviación Estándar			0.000206

R=30 cm
DR=0.044 cm
E=828.9 kg/cm²

Distancia R (Cm.)	Def lexiones Teóricas Dt (Cm.)	Def lexiones Campo Dc (Cm.)	(Dc-Dt)^2
0	0.093248	0.088	0.000028
25	0.050535	0.048	0.000006
40	0.03489	0.024	0.000119
70	0.020962	0.008	0.000168
Desviación Estándar			0.000321

R=35 cm
DR=0.044 cm
E=732.8 kg/cm²

Distancia R (cm)	Def lexiones Teóricas Dt (cm)	Def lexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt)^2
0	0.105473	0.088	0.000305
25	0.057161	0.048	0.000084
40	0.039465	0.024	0.000239
70	0.02371	0.008	0.000247
Desviación Estándar			0.000875

R=40 cm
DR=0.044 cm
E=654.9 kg/cm²

Distancia R (cm)	Deflexiones Teóricas Dt (cm)	Deflexiones Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.118013	0.088	0.000901
25	0.063957	0.048	0.000255
40	0.044157	0.024	0.000406
70	0.026529	0.008	0.000343
Desviación Estándar			0.001905

Deflexiones

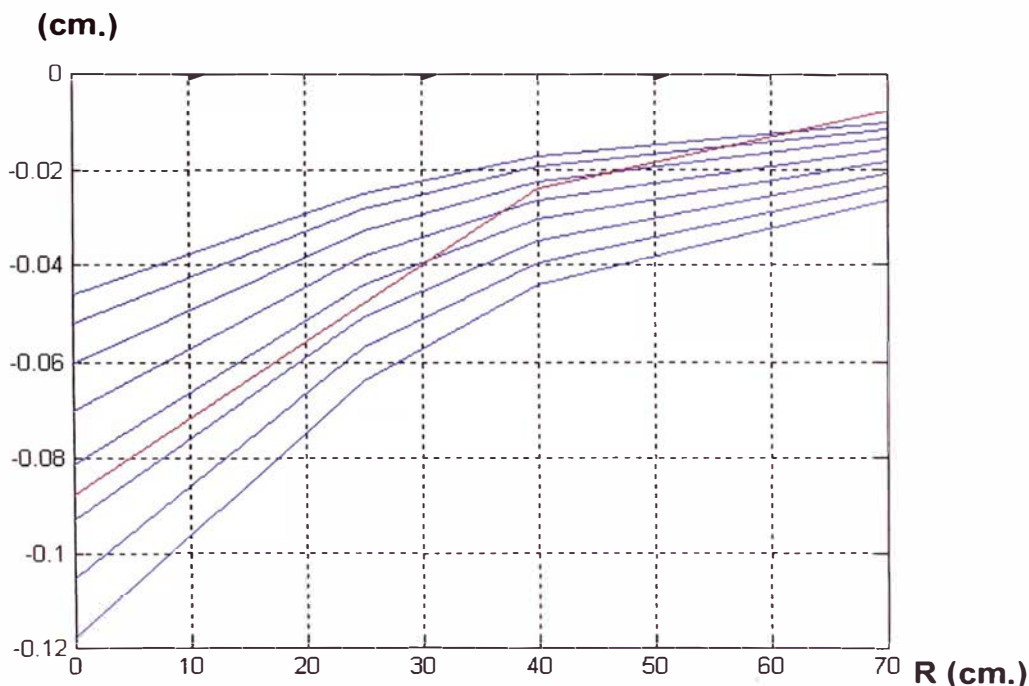


Figura N° 5.1 Grafico R vs Deflexiones
Progresiva 91+100

Del grafico 5.1: ----- R vs Deflexiones de campo
----- R vs Deflexiones teóricas

Para el punto evaluado cuya progresiva es 91+100 la menor desviación estándar ocurre para R= 25 cm. Por lo tanto el valor de E_s es igual a 948.6 kg/cm² ($E_s=948.6$ kg/cm²)

Del grafico 5.1, se verifica el ajuste de curvas.

El Anexo 3 muestra todas las tendencias de las curvas desde la progresiva 91+100 hasta la progresiva 91+500.

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10^{-2} mm)				RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS Deflexiones($\times 10^{-2}$ mm)				R (cm)	DR (cm)	E_s (kg/cm ²)
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}	D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀			
91+100	10	16	20	22	88	48	24	8	25	0.044	948.6
91+200	8	14	20	22	88	56	32	8	30	0.044	828.9
91+300	8	14	18	24	96	64	40	24	30	0.048	759.8
91+400	12	16	20	48	192	144	128	112	35	0.096	335.9
91+500	8	14	16	20	80	48	24	16	30	0.04	911.8

CUADRO N° 5.2 RESULTADOS DE R , DR y E_s

Paso 4.-

Cálculo de los valores de " E_0 " y " E^* " para el tramo 91+100.

El valor de " L_0 " será recopilado de los cálculos realizados mediante el modelo de Hogg (Anexo 4).

Para hallar el valor de " E_0 " y " E^* " se utilizara las ecuaciones (α) y (β) del capítulo IV, siendo el resultado el siguiente: (Boussinesq)

$$E_0 = 869.35 \text{ kg/cm}^2$$

$$E^* = 1494.23 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$$h_1 = 17 \text{ cm}$$

$$H = h_1 + h_2 = L_0 \times 10 \text{ entonces: } h_2 = L_0 \times 10 - h_1 \text{ (revisar teoría de Hogg)}$$

El siguiente cuadro muestra los valores de los módulos de elasticidad obtenido por Boussinesq:

Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				R (cm)	DR (cm)	Es (kg/cm ²)	Eo (kg/cm ²)	Lo (cm)	E* (kg/cm ²)	CBR (%)
	Deflexiones(x10 ⁻² mm)										
	D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀							
91+100	88	48	24	8	25	0.044	948.6	868	11.2	1492	7.9
91+200	88	56	32	8	30	0.044	828.9	704	13.5	2119	6.4
91+300	96	64	40	24	30	0.048	759.8	613	15.8	2958	5.6
91+400	102	144	128	112	35	0.096	335.9	246	23.5	3905	2.2
91+500	80	48	24	16	30	0.04	911.8	760	14.3	2700	6.9

CUADRO N° 5.3 Resultados de los Módulos de Elasticidad y CBR (Boussinesq)

Interpretación de Resultados

De acuerdo al cuadro de resultado (cuadro N° 5.3), se puede apreciar que los valores del CBR obtenidos son muy bajos, en el cuadro N° 5.4 se presenta los rangos de valores del CBR establecido por el MTC.

RANGO DE VALORES DE CBR ESTABLECIDO POR EL MTC		
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%

CUADRO N° 5.4 RANGOS DE VALORES DE CBR

(Fuente : Manual de Diseño de caminos no pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito del MTC.)

Por lo tanto, comparando, se puede interpretar lo siguiente:

- Los valores del CBR obtenidos para el tramo evaluado entre la progresiva 91+100 y la progresiva 91+500 y según los rangos de valores del CBR del cuadro N° 5.4 se puede calificar como un suelo regular.
- También se puede apreciar que la progresiva 91+400 tiene un CBR bajísimo. Por lo que se descarta dicho punto por inconsistencia comparado con los demás puntos.

A continuación mostraremos la comparación de los valores de los módulos de elasticidad obtenidos por **Boussinesq** y **Hogg**

R (cm)	DR (cm)	Es (kg/cm ²)	Eo BOUSSINESQ (kg/cm ²)	Eo HOGG (kg/cm ²)	Lo (cm)	E* BOUSSINESQ (kg/cm ²)	E* HOGG (kg/cm ²)	CBR BOUSSINESQ	CBR HOGG
25	0.044	948.6	868	673	11.2	1,492	369	7.2	6.1
30	0.044	828.9	704	632	13.5	2,119	368	13.6	12
30	0.48	759.8	613	537	15.8	2,958	1,153	10.2	9.2
35	0.96	335.9	246	208	23.5	3,905	2,305	6.8	6
30	0.04	911.8	760	679	14.3	2,700	903	10	7.9

CUADRO N° 5.5 Comparación entre los métodos de Boussinesq y Hogg

Se observa que existen valores similares del módulo de elasticidad de la subrasante “E₀” de ambos métodos.

Respecto al módulo de elasticidad del pavimento (E*) se observa que el método de Boussinesq tiene valores más confiables porque se ajustan los puntos teóricos a los puntos de campo.

De acuerdo a las lecturas del MTC, E*/E₀ está entre los valores de 2 y 4 que es una buena relación.

CONCLUSIONES

- Para la evaluación estructural de pavimentos, existen diferentes equipos automatizados como se describe en el capítulo II, el alto costo de estos equipos hace que no se utilicen en el Perú.
- Para la determinación de los módulos de elasticidad de la subrasante (E_0) y el módulo de elasticidad del pavimento (E^*), un buen dato de partida es la longitud característica (L_0) obtenido por Hogg. Ver cuadro (Anexo N° 4).
- Los resultados de E_0 obtenidos por el método de Boussinesq, son mas confiables que los obtenidos con el procedimiento abreviado de Hogg (Ver Anexo N° 4), dado que estos se aceptan cuando las curvas de campo y las teórica coincidan.
- De acuerdo a los valores de CBR obtenidos (ver el cuadro N° 5.3) la subrasante se puede clasificar como **S2** (Subrasante Regular), y esto unido a la falta de obras de arte y drenaje, así como factores climáticos, indican que la carretera tendrá problemas estructurales con el paso del tiempo.
- Para la evaluación estructural de pavimentos empleando Viga Benkelman, se puede mencionar que para el procesamiento de datos de campo, se pueden emplear diferentes métodos matemáticos, ejemplo: Elementos Finitos, Boussinesq, Hogg.
- Para el tramo evaluado se concluye que según el resultado del CBR obtenido, la carretera tiene una subrasante regular.
- El tratamiento superficial aplicado con Monocapa, presenta un deterioro prematuro debió a deficiencias en el proceso constructivo, uso de material inadecuado, trafico inesperado, entre otros factores naturales.

RECOMENDACIONES

- Para la medición de las deflexiones haciendo uso de la Viga Benkelman se recomienda que los operadores, sean personas con experiencia en dichos trabajos, esto para que los datos de campo obtenidos sean confiables.
- Para tener una mejor idea del comportamiento estructural de la carretera se recomienda realizar una evaluación en un tramo de mayor longitud, dado que para tramos pequeños los datos no son muy representativos.
- Debido a que esta carretera es una vía alterna para conectar Lima con la ciudad de Huancayo, se recomienda hacer un seguimiento riguroso de la capacidad estructural con mayor frecuencia.
- Se recomienda el mejoramiento de la subrasante dado que los valores de CBR obtenidos en el presente estudio son bajos.
- Se recomienda realizar un diseño adecuado para el tránsito de tráfico pesado, ya que en poco tiempo esta vía será de mucha importancia.

BIBLIOGRAFÍA

- DASHO R.E., A.A. Kagán "Mecánica de Suelos en la Práctica de la Geología Aplicada a la Ingeniería", MIR. RUSIA 1980.
- HAZZARD, James F. and Yacoub Tramer E. "Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study", University of Toronto, Canadá, 2007.
- 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
- HUANG, Yang H. "Pavement analysis and design", Prentice Hall. United States of América, 1993.
- JUÁREZ BADILLO – RICO RODRÍGUEZ "Mecánica de Suelos". Tomo II EDITORIAL LIMUSA (NORIEGA EDITORES)
- REYES, Fredy L. "Diseño de pavimentos por métodos racionales". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá, 1999.
- TIMOSHENKO S., Woinowosky-Krieger S. "Teoría de placas y láminas", URMO, SA Ediciones, España, 1975

ANEXO 1

R : Es el intervalo donde se encuentra el 50% de D_0 ; intervalo entre corchetes

Dz: Deflexión igual a $D_0/2$.

Dist: Intervalos de distancia donde se tomaron las deflexiones de campo; intervalo entre corchetes [0 25 40 70] .

n: Numero de datos de campo evaluado por punto (ejemplo: n=4)

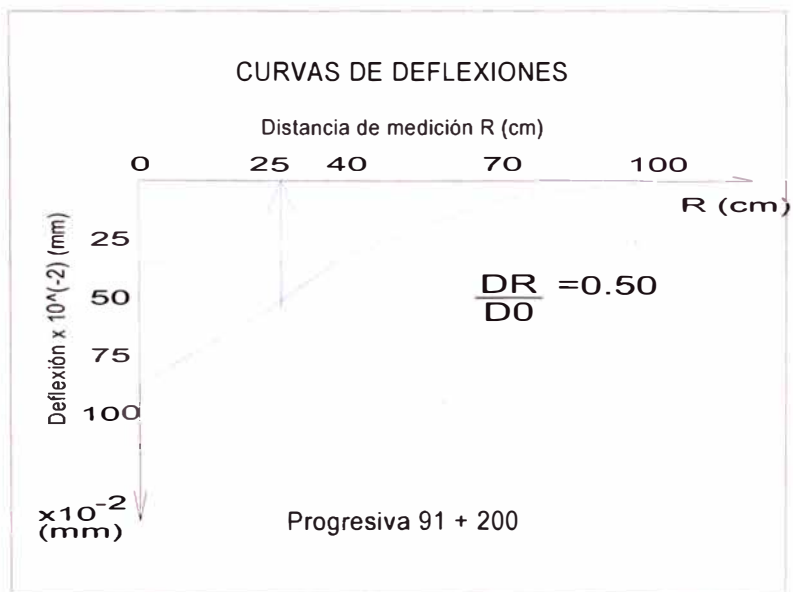
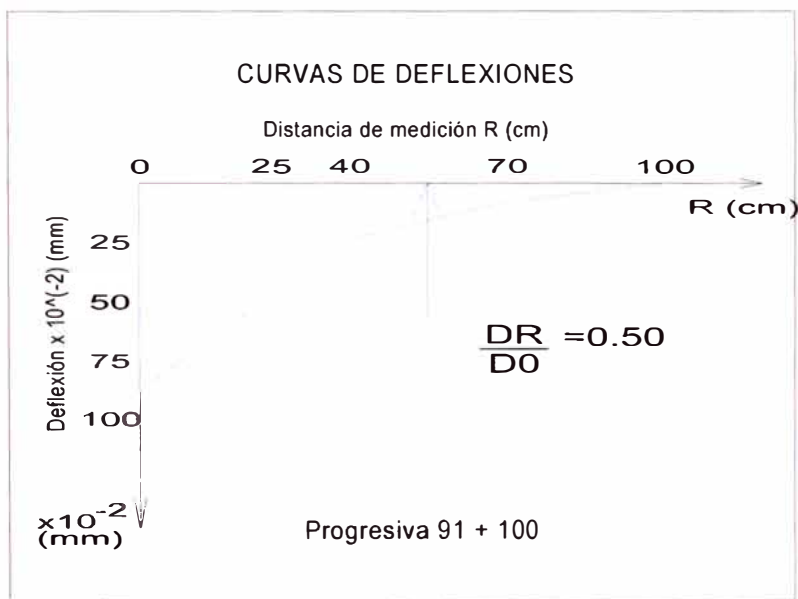
Dz-C: Intervalo de deflexiones corregidas de campo en cm.; intervalo entre corchetes.

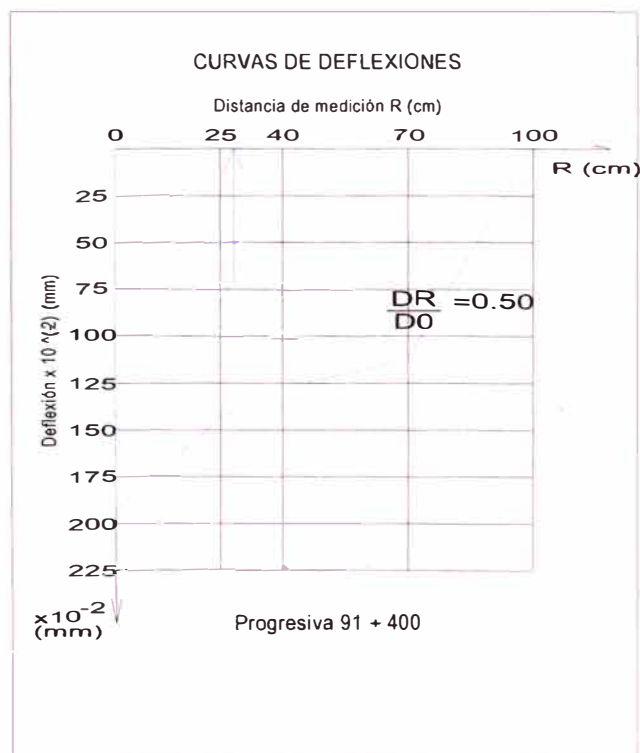
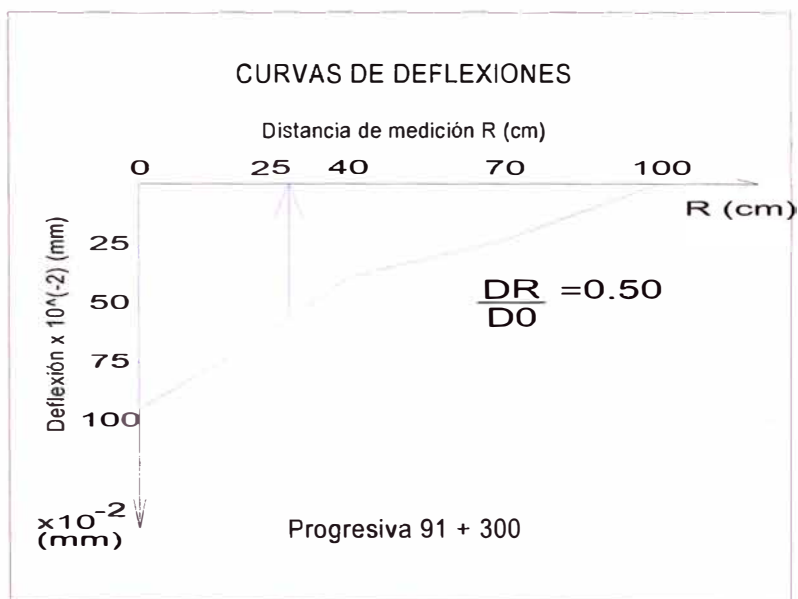
Sss: Nombre del archivo de Excel que tiene los resultados ; Nombre entre comillas.

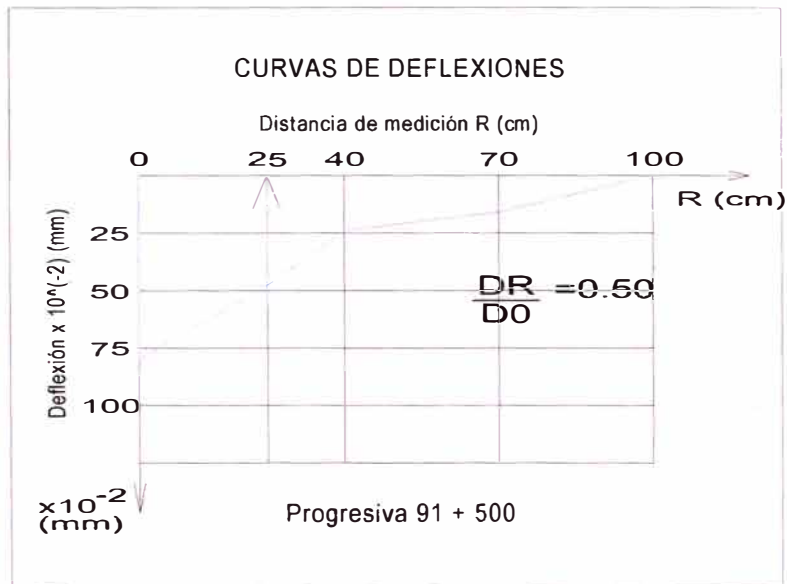
```
function [E Des_T]=deflexiones(R,Dz,dist,n,Dz_c,sss)
nn=length(R);
ppp=strcat(sss, '.', 'xls');
A=fopen(ppp, 'w');
for k=1:nn
Des_T=zeros(1,n);
fun = @(x,y) 1./ (sqrt((x-R(k)).^2 + (y).^2));
ymin=@(x) -sqrt(11.5^2-x.^2)+3*11.5/2;
ymax = @(x) sqrt(11.5^2-x.^2)+3*11.5/2;
ymin1=@(x) -sqrt(11.5^2-x.^2)-3*11.5/2;
ymax1 = @(x) sqrt(11.5^2-x.^2)-3*11.5/2;
I1=quad2d(fun,-11.5,11.5,ymin,ymax);
I2=quad2d(fun,-11.5,11.5,ymin1,ymax1);
E=0.84*5.6./ (pi.*Dz) .* (I1+I2);
mmm=num2str(m(k));
vv=strcat('distancia_',mmm);
fprintf(A, '\n\n%s\n', vv);
fprintf(A, '%f\n\n', E);
for i=1:n
fun = @(x,y) 1./ (sqrt((x-dist(i)).^2 + (y).^2));
ymin=@(x) -sqrt(11.5^2-x.^2)+3*11.5/2;
ymax = @(x) sqrt(11.5^2-x.^2)+3*11.5/2;
ymin1=@(x) -sqrt(11.5^2-x.^2)-3*11.5/2;
ymax1 = @(x) sqrt(11.5^2-x.^2)-3*11.5/2;
I1=quad2d(fun,-11.5,11.5,ymin,ymax);
I2=quad2d(fun,-11.5,11.5,ymin1,ymax1);
Des_T(i)=0.84*5.62./ (pi.*E) .* (I1+I2);
end
suma=0;
for i=1:n
aa=(Des_T(i)-Dz_c(i))^2;
YY=[dist(i) Des_T(i) Dz_c(i) aa];
fprintf(A, '%f\t%f\t%f\t%f\n', YY);
suma=suma+aa;
end
fprintf(A, '\t\t\t%f\n\n', suma);
plot(dist, -Des_T);
hold on;
end
grid on;
plot(dist, -Dz_c, 'r');
fclose(A);
```

ANEXO Nº 2

GRÁFICA DISTANCIA VS DEFLECCIÓN
(DEL TRAMO EVALUADO)

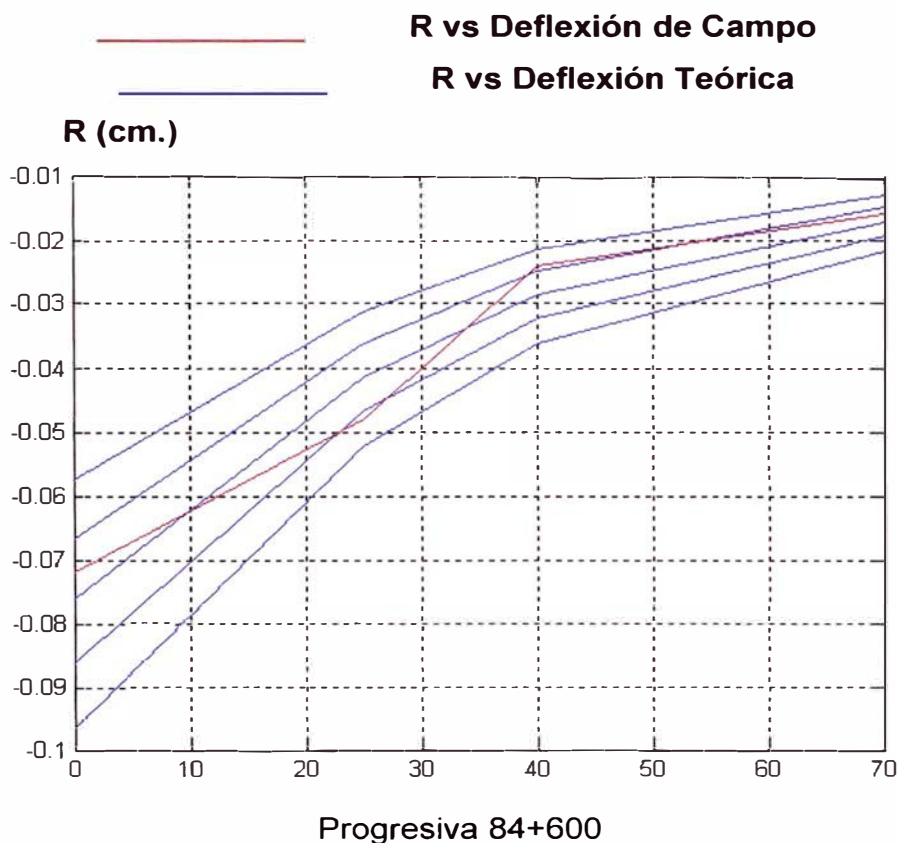






ANEXO N° 3

GRÁFICAS



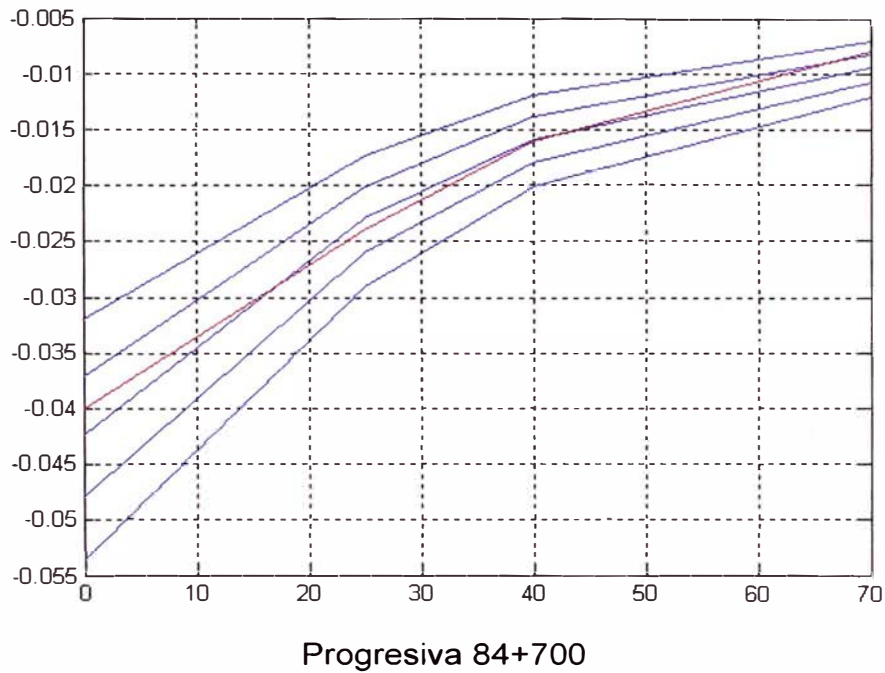
m=30
E=1013.10709

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.076293	0.072	0.000018
25	0.041347	0.048	0.000044
40	0.028547	0.024	0.000021
70	0.017151	0.016	0.000001
		Desviación mínima	0.000085

Del cuadro tenemos:

m=30 cm.

E= 1013.11 kg/cm²



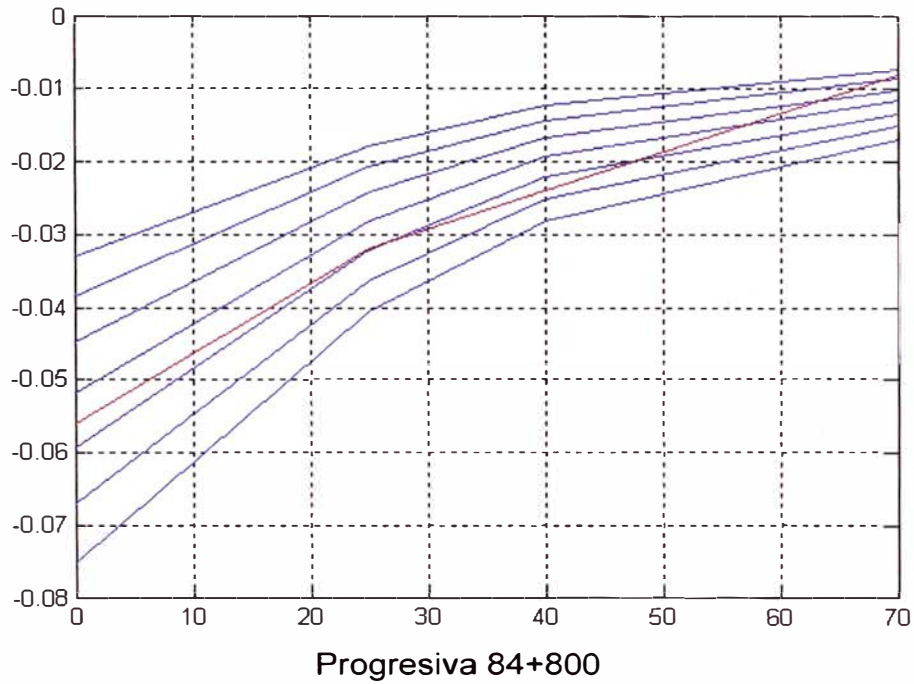
m=30
E=1823.59276

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.042385	0.04	0.000006
25	0.022971	0.024	0.000001
40	0.015859	0.016	0
70	0.009528	0.008	0.000002
		Desv. mínima	0.000009

Del cuadro tenemos:

m=30 cm.

E= 1823.59 kg/cm²



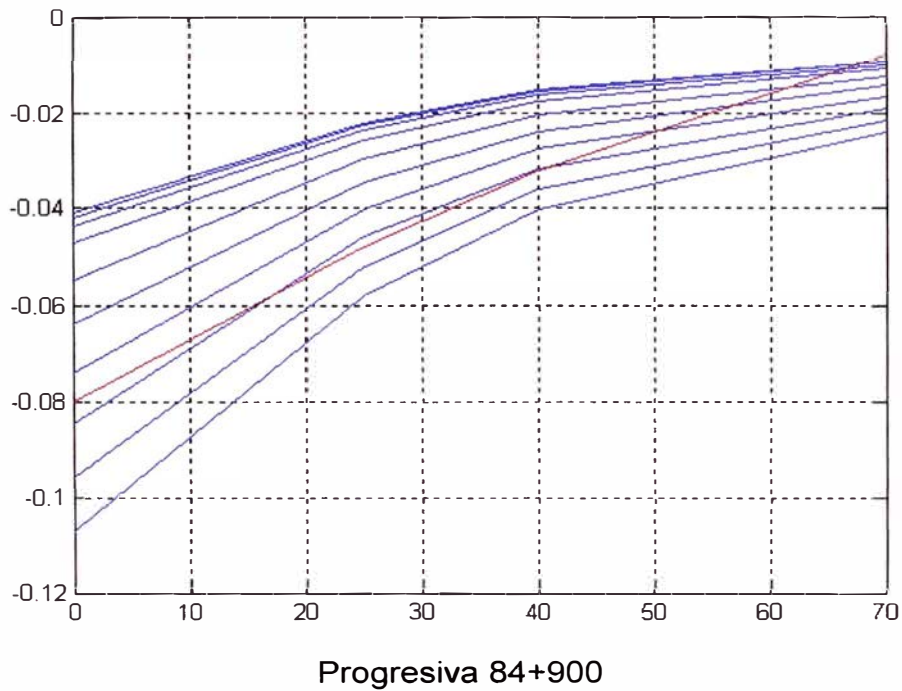
m=30
E=1302.56626

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc(cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.059339	0.056	0.000011
25	0.032159	0.032	0
40	0.022203	0.024	0.000003
70	0.013339	0.008	0.000029
		Desviación mínima	0.000043

Del cuadro tenemos:

m=30 cm

E= 1302.56 kg/cm²



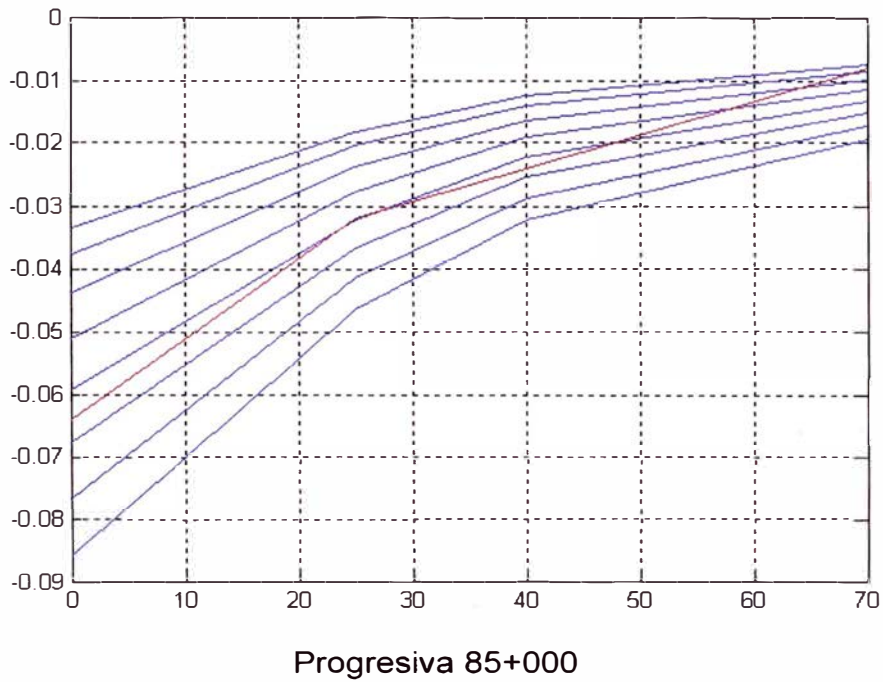
m=30
E=911.796381

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.084771	0.08	0.000023
25	0.045941	0.048	0.000004
40	0.031719	0.032	0
70	0.019056	0.008	0.000122
		Desv. mínima	0.000149

Del cuadro tenemos:

m=30 cm

E= 911.7 kg/cm²



m=25
E=1304.37564

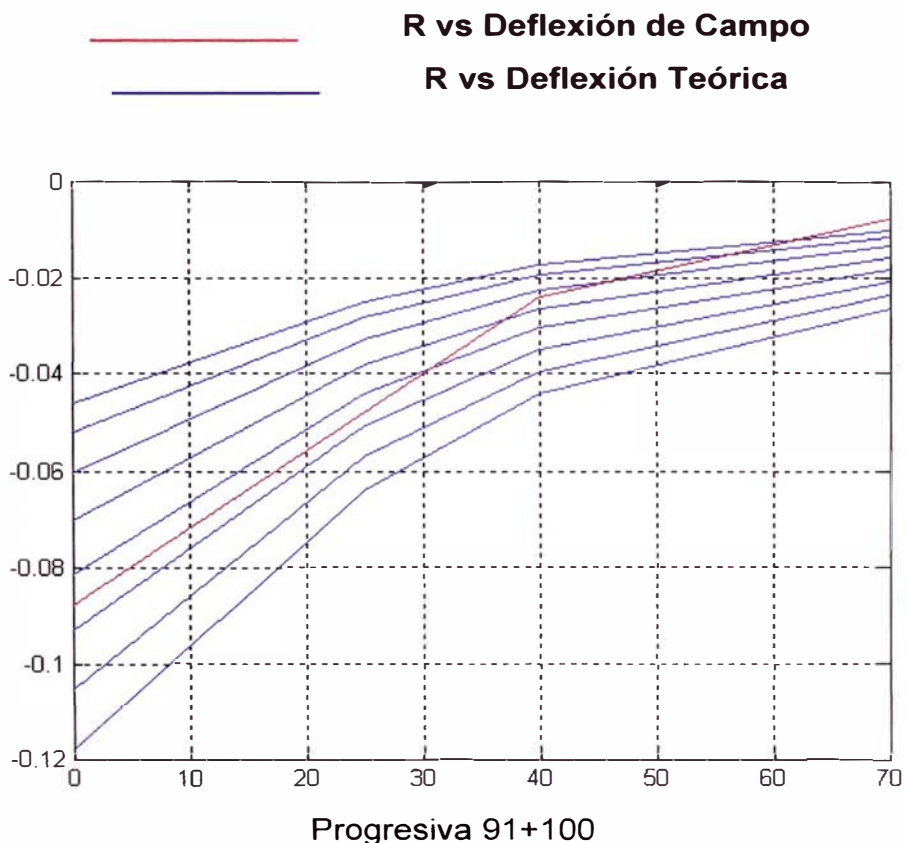
R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.059257	0.064	0.000022
25	0.032114	0.032	0
40	0.022172	0.024	0.000003
70	0.013321	0.008	0.000028
		Desv. mínima	0.000054

Del cuadro tenemos:

m=25 cm
 E= 1304.37 kg/cm²

TRAMO EVALUADO: Prog. 91+100 - Prog. 91+500

GRÁFICAS



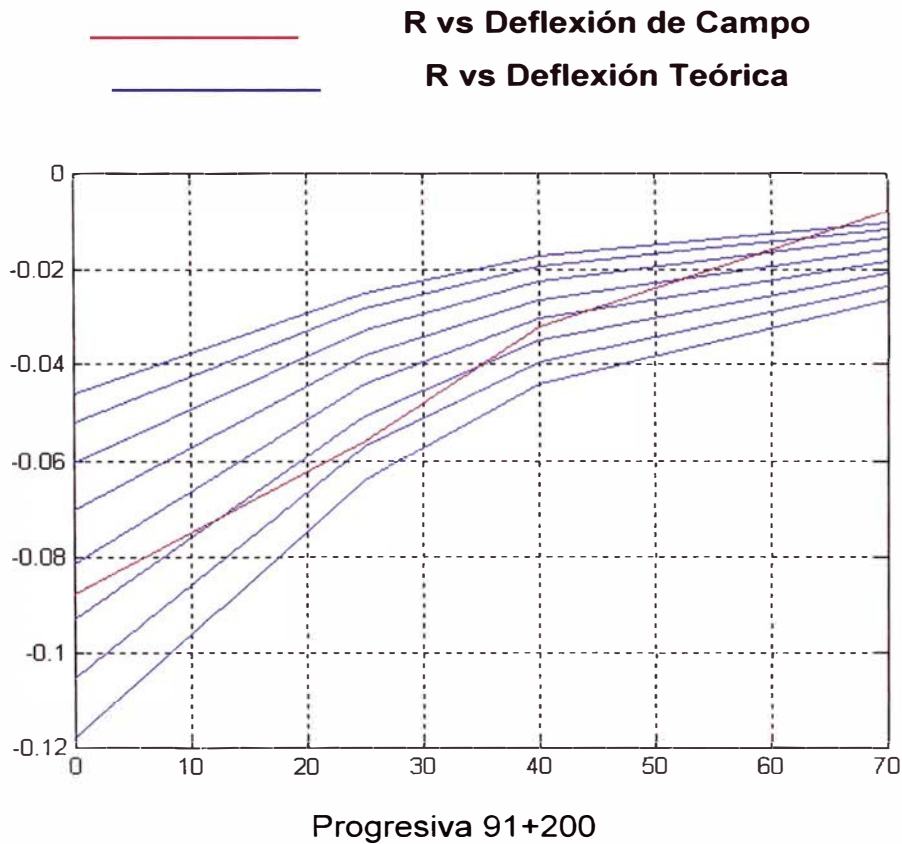
m=25
E=948.636827

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.081478	0.088	0.000043
25	0.044157	0.048	0.000015
40	0.030487	0.024	0.000042
70	0.018316	0.008	0.000106
		Desviación mínima	0.000206

Del cuadro tenemos:

m=25 cm
 E= 948.63 kg/cm²

GRÁFICAS



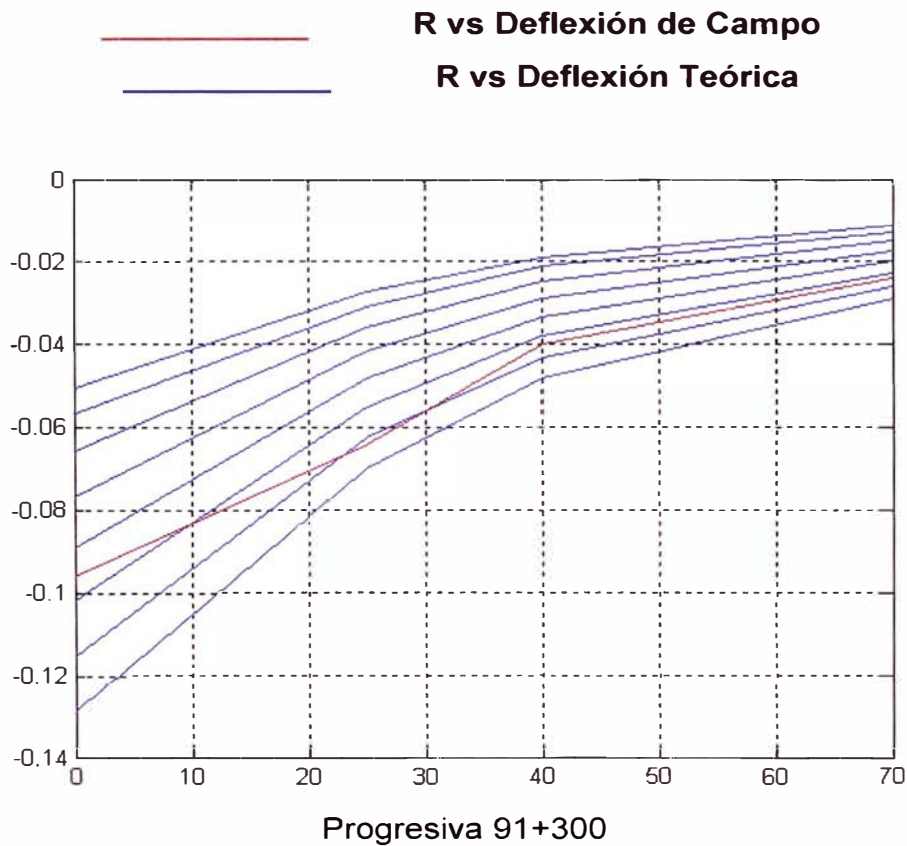
m=30
E=828.905801

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.093248	0.088	0.000028
25	0.050535	0.056	0.00003
40	0.03489	0.032	0.000008
70	0.020962	0.008	0.000168
		Desviación mínima	0.000234

Del cuadro tenemos:

m=30 cm
 E= 828.91 kg/cm²

GRÁFICAS



m=30
E=759.830317

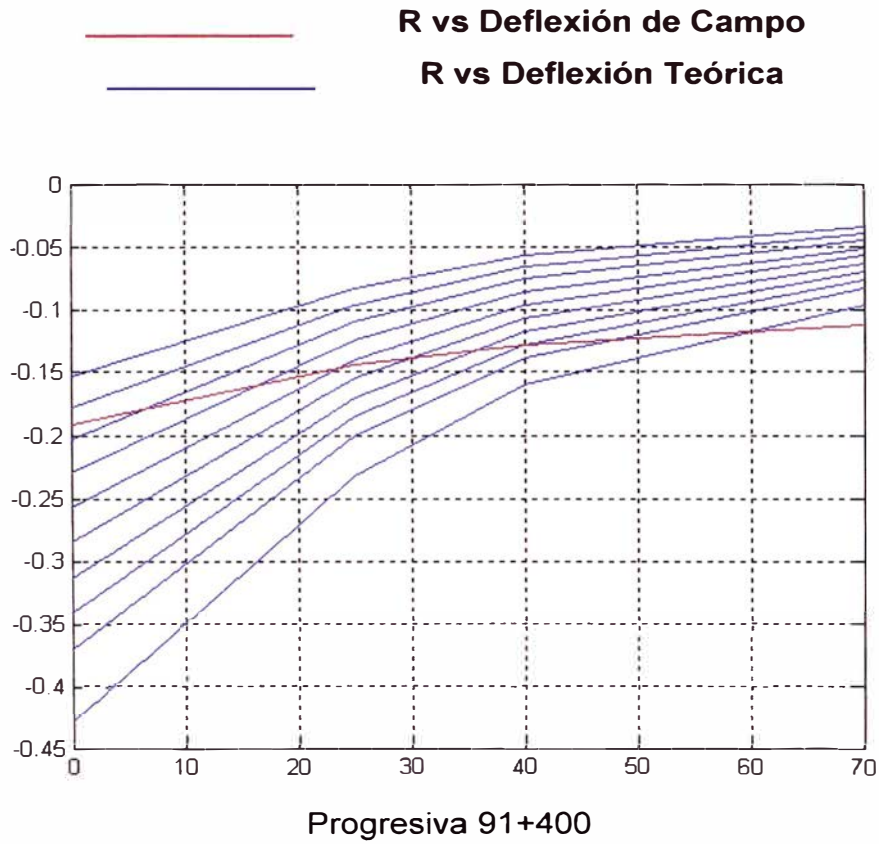
R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.101725	0.096	0.000033
25	0.05513	0.064	0.000079
40	0.038062	0.04	0.000004
70	0.022867	0.02408	0.000001
		Desviación mínima	0.000117

Del cuadro tenemos:

m=30 cm

E= 759.83 kg/cm²

GRÁFICAS



m=35
E=335.879356

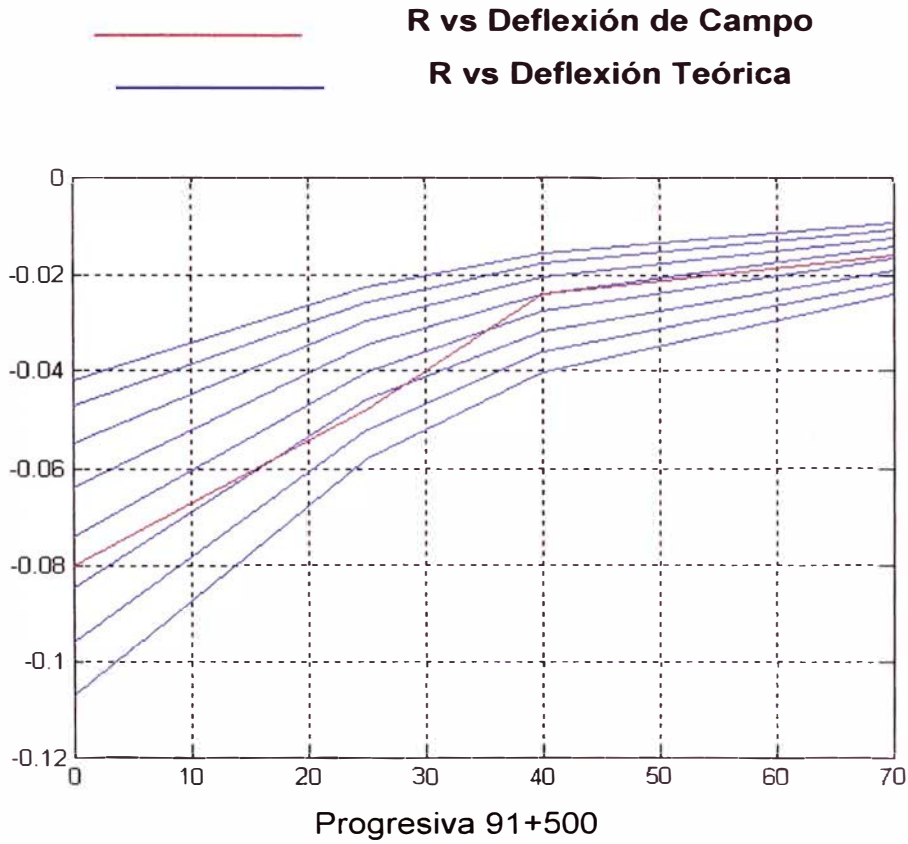
R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.230123	0.192	0.001453
25	0.124715	0.144	0.000372
40	0.086105	0.128	0.001755
70	0.051731	0.112	0.003632
		Desviación mínima	0.007213

Del cuadro tenemos:

m=35 cm

E= 335.88 kg/cm²

GRÁFICAS



m=30
E=911.796381

R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dt-Dc) ²
0	0.084771	0.08	0.000023
25	0.045941	0.048	0.000004
40	0.031719	0.024	0.000006
70	0.019056	0.016	0.000009
		Desviación mínima	0.000096

Del cuadro tenemos:

m=30 cm

E= 911.80 kg/cm²

ANEXO N° 4

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA CAÑETE-YAUYOS-CHUPACA TRAMO KM 91 + 100 - KM 91 + 500

Datos Generales :

A (radio)	10.78	cm
HC (cm) Espesor de Pavimento	17	cm
Carga de Ensayo (kg)	2050	kg
Presión de Inflado (kg/cm ²)	5.62	kg/cm ²
Ratio de Poisson μ	0.4	
N	10	
H/Lo	10	

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				PARAMETROS DEL MODELO DE HOGG							
							Deflexiones(x10 ⁻² mm)				R	DR/D0	R5 cm	L0 cm	S0/S	E0 kg/cm ²	E* kg/cm ²	E* / E0
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}			D0	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀								
91+100	10	16	20	22	0.01	54	88	48	24	8	25	0.091	26.8	11.2	0.58	673.4	369.4	0.55
91+200	8	14	20	22	0.01	53	88	56	32	8	30	0.364	30.1	13.5	0.67	632.1	667.5	1.06
91+300	8	14	18	24	0.01	53	96	64	40	24	30	0.417	33.6	15.8	0.72	537.1	1153.2	2.15
91+400	12	16	20	48	0.01	54	192	144	128	112	35	0.750	45.6	23.5	0.83	207.8	2305.33	11.1
91+500	8	14	16	20	0.01	54	80	48	24	16	30	0.600	31.2	14.3	0.69	679.2	902.96	1.33

ANEXO N° 5

PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 4.1 Vista de toma de lectura en campo



Figura 4.2 Vista de la pos posición de la viga en campo



Figura 4.3 Vista de la toma de temperatura del asfalto

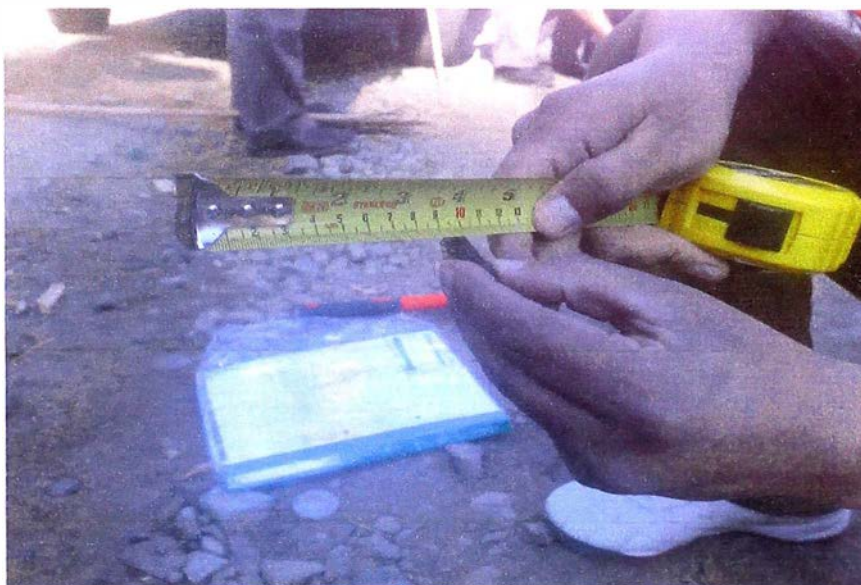


Figura 4.4 Medición del espesor de la capa de asfalto



Figura 4.5 Medición del ahuellamiento



Figura 4.6 Vista de la Viga Benkelman en posición correcta