

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA
CAÑETE - YAUYOS – CHUPACA CON VIGA
BENKELMAN MÉTODO MATEMÁTICO
TRAMO km 84+000 - km 89+000**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

RENATTO ESTANISLAO DEXTRE GAMARRA

Lima – Perú

AÑO 2009

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS	7
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Tramo Evaluado km 84+000 – km 89+000	16
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	18
2.1 Sistemas de Análisis	18
2.1.1 Sistemas elásticos de capas.....	18
2.1.2 Sistemas no lineales de capas.....	18
2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos.....	18
2.2 Ensayos no destructivos	19
2.2.1 Viga Benkelman.....	19
2.2.2 Dynaflec.....	19
2.2.3 Road Rater.....	20
2.2.4 RDD.....	20
2.2.5 FWD.....	21
2.2.6 KUAB – FWD.....	21
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	23
3.1 Viga Benkelman	23
3.2 Caracterización del material	26
3.2.1 Definiciones previas.....	26
3.2.2 Modelo Básico.....	28
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.....	29
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.....	34
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.....	38
3.4.3	Fórmula de Palmer y Baber Generalizada	38
3.4.4	Fórmula de Odemark.....	39
3.4.5	Método de Elementos Finitos.....	40
	CAPÍTULO IV: APLICACIÓN TRAMO km 84+000 – km 89+000.....	41
4.1	Aplicación de la Viga Benkelman.....	41
4.2	Aplicación de la teoría Boussinesq.....	45
	CAPÍTULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	56
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXOS.....	58

RESUMEN

El presente Informe contiene estudios para evaluar el comportamiento estructural del pavimento, de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca del tramo km 84+000 – km 89+000. La evaluación estructural del pavimento se ha llevado a cabo mediante Ensayos No Destructivos (END), empleando la medición de deflexiones usando el deflectógrafo conocido como Viga Benkelman, esta elección de 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, el cual determina desplazamientos para calcular el módulo elástico de la subrasante y poder decidir la mejor alternativa para su mantenimiento.

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.....	14
CUADRO N° 4.1	Datos tomados en campo.....	44
CUADRO N° 5.1	Deflexiones corregidas por Ratio de brazos.....	49
CUADRO N° 5.2	Resultados de R , D_R y E_S	52
CUADRO N° 5.3	Resultados de módulos de elasticidad y CBR.....	52
CUADRO N° 5.4	Rango de valores de CBR.....	53
CUADRO N° 5.5	Comparación entre métodos matemáticos.....	53

LISTA DE FIGURAS

FIGURA N° 1.1	Mapa de ubicación.....	12
FIGURA N° 1.2	Plano clave de la ruta 22.....	68
FIGURA N° 1.3	Sección típica de Zúñiga a Catahuasi.....	69
FIGURA N° 1.4	Sección típica de Catahuasi a Calachota	69
FIGURA N° 1.5	Perfil estratigrafico del tramo en estudio.....	17
FIGURA N° 2.1	Pruebas con Viga Benkelman (1952).....	19
FIGURA N° 2.2	Equipo Dinaflec transpotado.....	20
FIGURA N° 2.3	Equipo Road Rater.....	20
FIGURA N° 2.4	Equipo RDD	21
FIGURA N° 2.5	Equipo FWD en prueba.....	21
FIGURA N° 2.6	Equipo KUAB - FWD	22
FIGURA N° 3.1	Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman	23
FIGURA N° 3.2	Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con Viga Benkelman	24
FIGURA N° 3.3	Esquematización del proceso de medición con la Viga Benkelman.	25
FIGURA N° 3.4	Modelos mecánicos para materiales viscoelásticos	27
FIGURA N° 3.5	Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada.....	29
FIGURA N° 3.6	Modelo de Hogg	33
FIGURA N° 3.7	Modelo de Westergaard.....	33
FIGURA N° 3.8	Modelo multicapas.....	34
FIGURA N° 3.9	Representación de un masivo semi infinito.....	34
FIGURA N° 3.10	Distribución de presiones sobre el pavimento.....	36
FIGURA N° 3.11	Esquematización de carga distribuida de las llantas sobre la superficie del pavimento.....	36
FIGURA N° 3.12	Deflexión producida por dos llantas.....	38
FIGURA N° 3.13	Modelo de multicapa propuesto con la fórmula de Palmer y Baber generalizada.....	39
FIGURA N° 3.14	Modelo de multicapa propuesto con la fórmula de Odemark	39
FIGURA N° 3.15	Método de Elementos Finitos.....	40

FIGURA Nº 4.1	Ubicación del eje posterior del volquete en el punto marcado.....	70
FIGURA Nº 4.2	Lectura de las deflexiones con dial.....	71
FIGURA Nº 4.3	Toma de temperatura al pavimento.....	71
FIGURA Nº 4.4	Medición del espesor de la carpeta.....	71
FIGURA Nº 4.5	Medición del ahuellamiento.....	72
FIGURA Nº 5.1	Grafico "R" vs Deflexiones.....	51

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 Portland
M_r	Módulo Resiliente
MDS	Máxima Densidad Seca
NTP	Norma Técnica Peruana
OCH	Óptimo Contenido de Humedad
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
PROMCEPRI	Promoción de Concesiones Privadas
RDD	El Deflectómetro dinámico del balanceo
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SN	Número Estructural
TSB	Tratamiento Superficial Bicapa
WASHO	Western Association of State Highway Organizations
Vac	Vertientes Aluviales de cultivo

A	Radio de la huella de la llanta.
D₀	Deflexión máxima
D_R	Deflexión a una distancia R
D_(R,0)	Deflexión a una distancia R y profundidad cero
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
E₀	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
E₃	Módulo de elasticidad de la capa 3
H	Espesor de 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 y orden 0
J₁	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
K₁	Coeficiente no lineal del material granular
K₂	Exponente no lineal del material granular
k	Módulo de reacción
L₀	Longitud Característica
m	Variable de integración
P	Carga
q₀	Presión de Inflado
R	Distancia a la que se mide la deflexión D _R
μ	Ratio de Poisson
μ₀	Ratio de Poisson de la capa subarasante

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
W_{18}	Número estimado de ejes simples equivalentes a 8.2t.
σ	Esfuerzo
σ_0	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell
σ_i	Esfuerzo del modelo de Kelvin
ε	Deformación unitaria
δ	Desplazamiento vertical 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 nabra

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente Informe de suficiencia tiene por objetivo evaluar la condición de la capacidad estructural del pavimento de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca en el tramo km 84+000 – km 89+000, mediante la medición de deflexiones usando el deflectógrafo conocido como Viga Benkelman, la elección de la Evaluación Estructural de un pavimento mediante la Viga Benkelman permite medir las deformaciones elásticas que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar; y usando métodos matemáticos 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 a su mal estado.

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 sencilla, práctica y 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 se describe el estado del arte, su ubicación y las características más importantes del tramo km 84+000 – km 89+000 así mismo sus características más relevantes.

En el capítulo II se detalla sobre el estado del arte de la metodología a emplearse para realizar la evaluación estructural, sistema 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 métodos matemáticos, como son las deformaciones, módulos de elasticidad, CBR, etc.

El capítulo IV describe todo lo referente a la recopilación y procesamiento de datos de las medidas de deflexiones realizadas en campo. Y en el capítulo V se realiza el análisis de resultados mediante la interpretación de las fórmulas matemáticas del Método de Boussinesq.

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La carretera de penetración y enlace entre Cañete-Yauyos-Chupaca, fue proyectada y ejecutada por partes, durante el gobierno del Sr. Augusto B. Leguía entre la década de 1920 a 1930 y 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. Posteriormente el 11 de mayo de 1957 el pueblo de Alis logró atravesar el cañón de Uccho, con la ayuda del gobierno Central se continua los trabajos hasta concluir la carretera.

El estudio definitivo de la carretera lo elaboró el consorcio AYESA – ALPHA CONSULT en el año 1998 mediante contrato con PROMCEPRI (Comisión de Promoción de Concesiones Privadas) el cual sirvió para la elaboración del estudio del Perfil de la carretera Lunahuana-Yauyos-Chupaca.

Con Oficio N° 1411-2004-EF/68.01 de fecha 06.10.2004, se autorizó la elaboración del Estudio de Factibilidad del Proyecto Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Ruta 22, Tramo Lunahuana-Yauyos-Chupaca de 245.15 kilómetros de longitud siendo aprobado el 09.12.2005 por el Director de Inversiones de la Oficina General de Planificación y Presupuesto, del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. El 17.03.2005, el Director General de la Dirección General de Programación Multianual del Sector Público declara Viable al Proyecto Estudio de Factibilidad del Proyecto de Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lunahuana-Dv. Yauyos-Chupaca, perteneciente al corredor vial N°13 de la Red Vial Nacional que forma parte del programa de desarrollo vial “Proyecto Perú”, creado mediante Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC-02.

El 27 de diciembre de 2007 se realiza firma del Contrato N°288-2007-MTC/20, con el CONSORCIO GESTIÓN DE CARRETERAS, por un monto total del contrato de S/.131'589,139.31 y con un plazo de contrato de 5 años.

El Consorcio está conformado por la Cía. ICCGSA (Ingenieros Civiles y Contratistas Generales S.A.), Corporación Mayo SAC y Empresa de Mantenimiento Vial La Marginal S.R.L.

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.

UBICACIÓN DE LA CARRETERA

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

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



FIGURA Nº 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 Nº13, que atraviesa diferentes poblados y regiones del Perú, siendo entre los poblados principales, los que se puede observar en la

FIGURA N° 1.2 (Anexo 5). 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 el poblado 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: Elaboración Propia)

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	Temperatura mínima	Temperatura media	Temperatura 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%.

ESTADO SITUACIONAL

1) Antecedentes y motivos que generaron la propuesta del proyecto.

El programa de desarrollo vial "Proyecto Perú" considera, dentro de su plan de mejoramiento de la carretera Cañete - Yauyos - Chupaca, elevar su nivel de competitividad y de esta manera convertirse en ruta alterna para la Carretera

Central, con lo que se aligerará el tránsito vehicular y disminuirá el tiempo de viaje entre Lima (Cañete) y Huancayo.

2) Características de la situación negativa que se intenta modificar.

Actualmente la carretera tiene deficiencias en la superficie de rodadura; además de tener características de diseño geométrico que no son las adecuadas para una vía de dos carriles que permita el uso cómodo de la misma. También se observa deficiencias en la señalización y sistemas de drenaje.

3) Razones de interés de la comunidad para resolver dicha situación

La carretera Cañete - Yauyos - Chupaca, al proyectarse como ruta alterna de la Carretera Central, necesita elevar su capacidad vehicular para atender la demanda futura, además de convertirse en un eje de vital importancia, ya que a través de ella se podrán transportar los productos de exportación de las regiones del centro del país (alcachofas, tara, truchas, cuy, mármoles) hacia otros países, considerando que en la actualidad el Perú viene participando en tratados de libre comercio.

4) Competencia del Estado para resolver dicha situación

Porque el objetivo del proyecto beneficiará económicamente al país, además de beneficiar directamente a los pobladores de las zonas que se encuentran dentro su área de influencia, mejorando su calidad de vida y por ende disminuyendo el nivel de pobreza de la zona.

5) Mejoramiento a Nivel de solución Básica

En la actualidad se han culminado los trabajos de Mejoramiento a Nivel de Solución Básica en el tramo evaluado por el Curso de Titulación: Zúñiga - Calachota (km 59+000 – km 104+000).

Con esta solución básica aplicada se busca obtener un “Cambio de Estándar” de la vía, desde el punto de vista del mejoramiento de la serviciabilidad, respecto del actualmente brindado, mediante la colocación de material granular estabilizado con emulsión asfáltica y protegida con una capa bituminosa.

Dicha capa bituminosa que trabaja como una superficie de rodadura corresponde al siguiente material:

- Slurry Seal de Zuñiga a Catahuasi (59+000 – 79+000). Ver FIGURA N1.3 (Anexo 5).
- Tratamiento Superficial Monocapa de Catahuasi a Calachota (79+000 – 104+000). Ver FIGURA N1.4 (Anexo 5).

Cabe indicar que la vía ha sido previamente reconformada antes de colocar la Solución Básica que se observa sobre la superficie actual de la vía, además no se han realizado cambios en la geometría.

1.2 TRAMO EVALUADO km 84+000 – km 89+000

El tramo en estudio de la carretera Cañete-Yauyos-Chupaca km se encuentra ubicado entre km 84+000 – km 89+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 1228 msnm y Chichicay ubicado en el km 92+110 a una altitud de 1392 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 5.0m, 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 en el Sistema SUCS como SC-SM (Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla y Arenas limosas, mezclas de arena y limo) principalmente, Ver FIGURA 1.5.

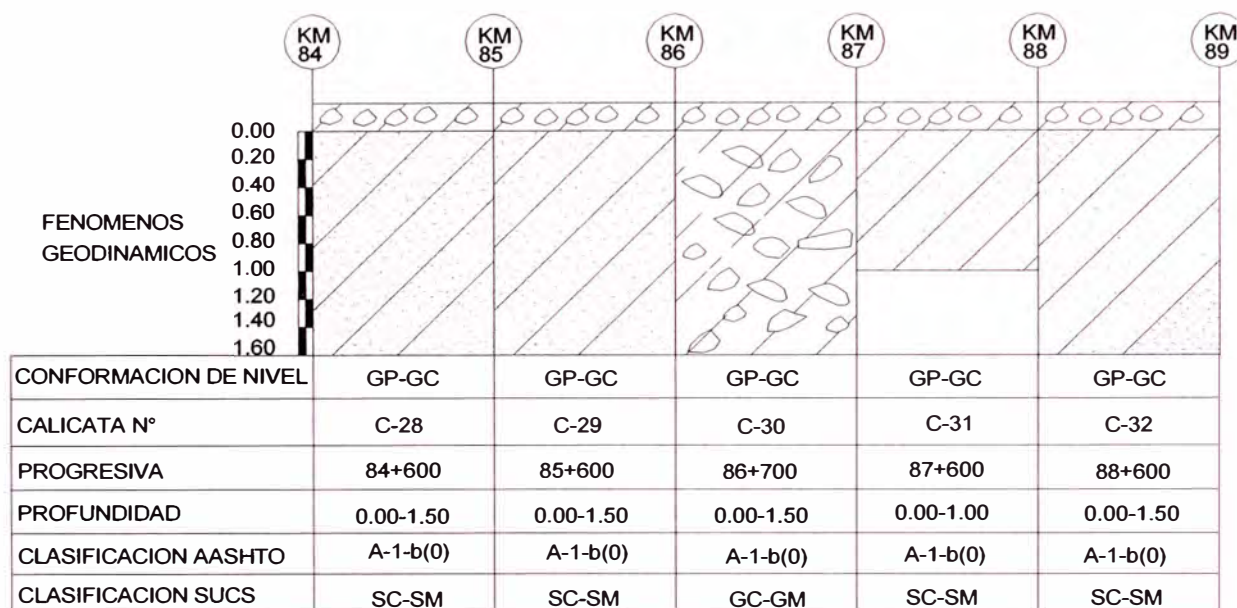


FIGURA N° 1.5. PERFIL ESTRATIGRÁFICO DEL TRAMO EN ESTUDIO

(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

El sistema de drenaje en este tramo tiene una forma 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 8.2t) = 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.

CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas de Análisis

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

2.1.1 Sistemas elásticos de capas

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

2.1.2 Sistemas no lineales de capas

Es bien conocido que los materiales granulares y la subrasante de los suelos son no lineales y tienen 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. Se puede representar mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

E: Modulo de Elasticidad (kg/cm²)

K₁= Coeficiente no lineal del material granular

K₂= Exponente no lineal del material granular

θ = Nivel de esfuerzo invariante

2.1.3 Sistemas lineales viscoelásticos

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

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

2.2 Ensayos no Destructivos

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

2.2.1 Viga Benkelman

La viga Benkelman es un instrumento manual que consta de dos brazos, uno que va en contacto con el 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 N° 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 N° 2.2 EQUIPO DINAFLEC TRANSPORTADO

(Fuente: Internet, http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/09_pavement_evaluation/09-5_body.htm, Nov. 2009)

2.2.3 Road Rater

Existen varios modelos, que varían sobre todo en la magnitud de las cargas y en si las cargas estáticas 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.

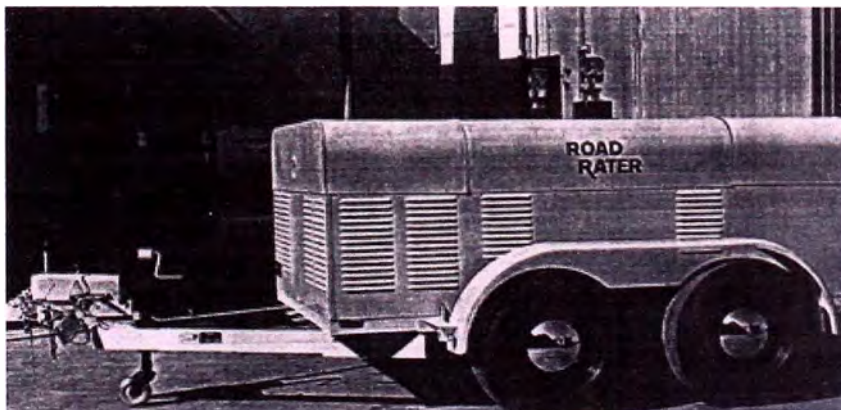


FIGURA N° 2.3. ROAD RATER

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.



FIGURA N° 2.4 EQUIPO RDD

(Fuente: Departamento de transportes de Texas, Diseño de Pavimentos, 2008, página 137)

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 N° 2.5 EQUIPO FWD EN PRUEBA

(Fuente: Internet, http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/09_pavement_evaluation/09-5_body.htm, Nov 2009)

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 y así detectar la rigidez de la subrasante.



FIGURA N° 2.6 EQUIPO KUAB - FWD

(Fuente: Internet, http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/09_pavement_evaluation/09-5_body.htm, Nov. 2007)

CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO

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

3.1 Viga Benkelman

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

Para la toma de medidas de las deflexiones se debe tener presente que el extremo del brazo móvil (D), es el que varía debido de la carga del vehículo, está variación es registrada en el extensómetro.

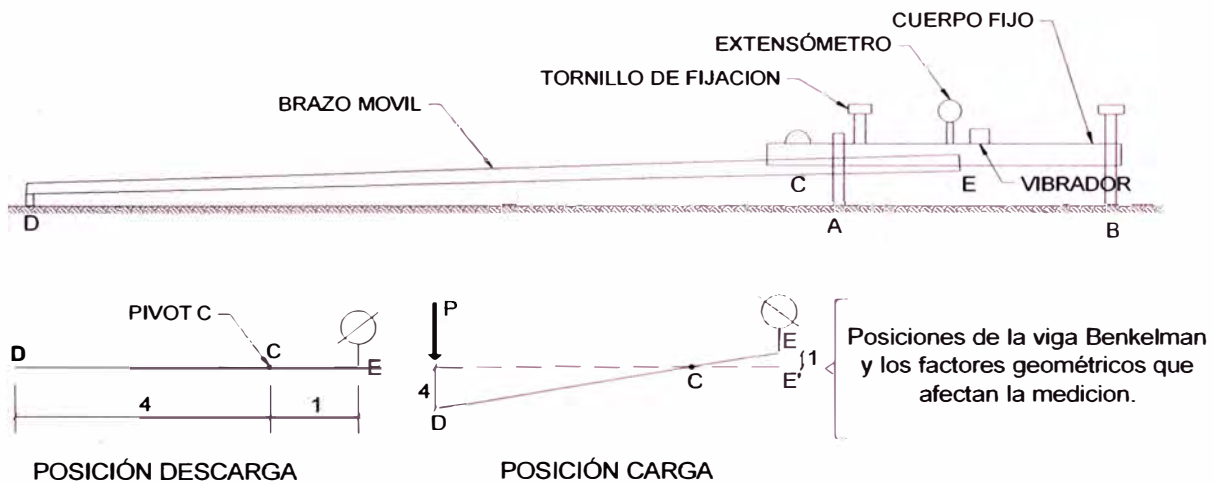


FIGURA N° 3.1. ESQUEMA Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

Metodología de medición de deflexiones con Viga Benkelman

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo

(usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto, de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto [ver FIGURA 3.2 (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.

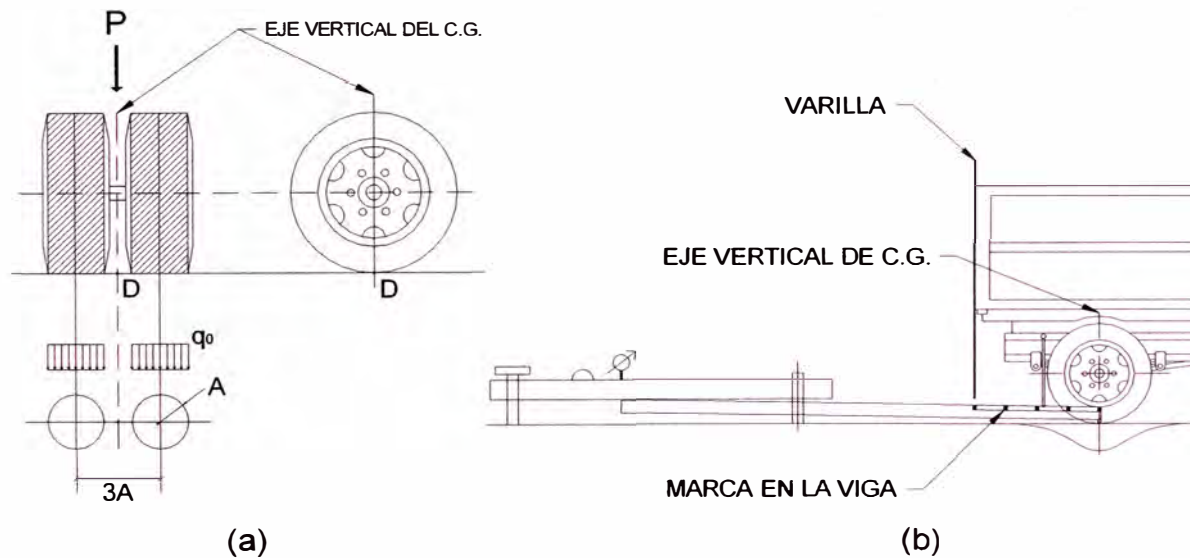


FIGURA N° 3.2 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA DE CARGA EN ENSAYOS CON VIGA BENKELMAN.

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 [ver 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)].

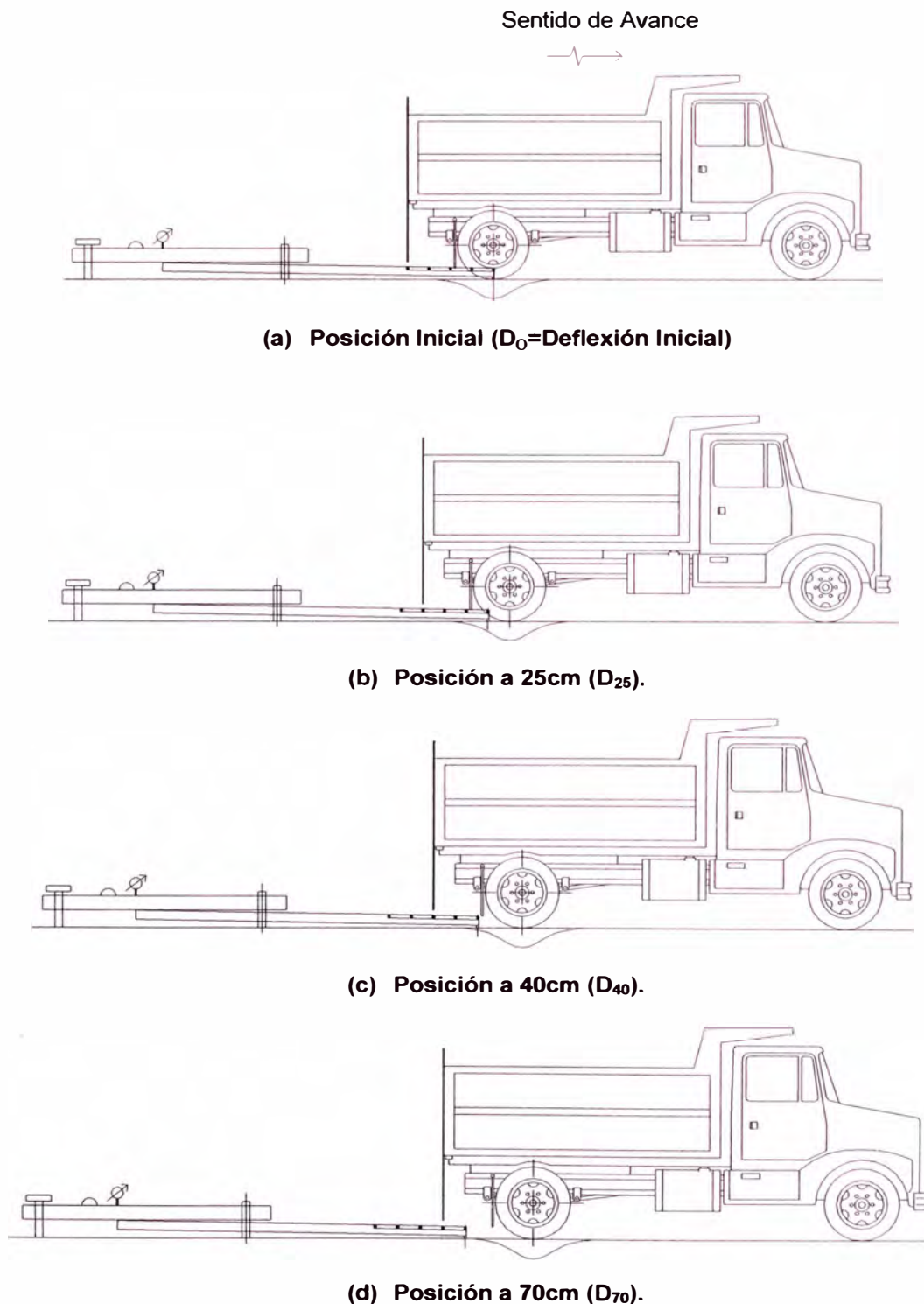


FIGURA N° 3.3. ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN CON LA VIGA BENKELMAN.

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 dé aviso al técnico que realiza las lecturas.

3.2 Caracterización del Material

Para la caracterización del material. Se describen diversos modelos en los siguientes párrafos.

3.2.1 Definiciones previas

Módulo resiliente

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 (kg/cm^2).

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

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. Su símbolo es E.

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 (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 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:

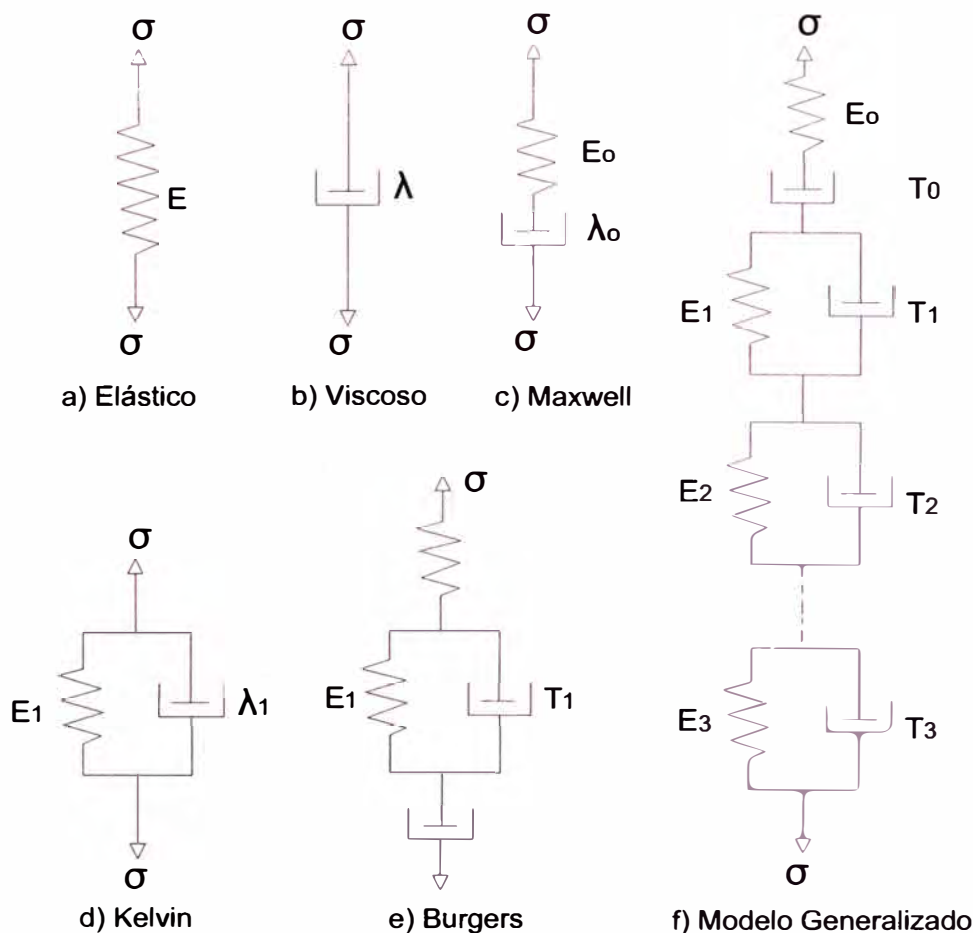


FIGURA N° 3.4 MODELOS MECÁNICOS PARA MATERIALES VISCOELÁSTICOS

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 puede utilizar para caracterizar cualquier material viscoelástico.

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

3.3 Modelos para determinar Esfuerzos y Deformaciones

3.3.1 Modelo de Boussinesq

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

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

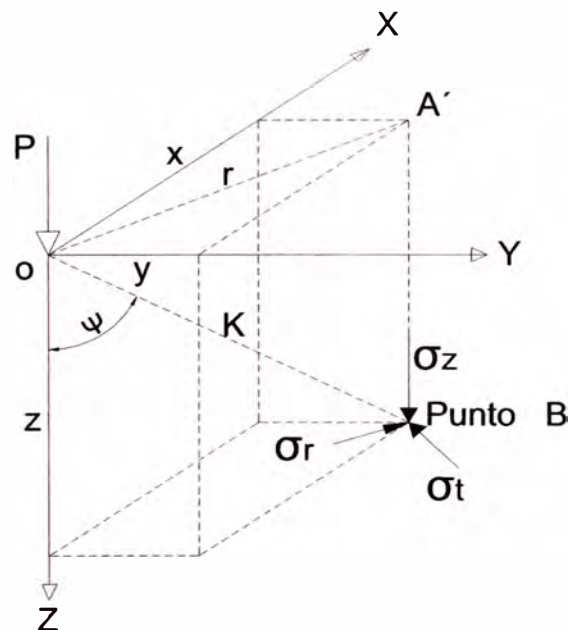


FIGURA N° 3.5 ESFUERZOS PROVOCADOS EN UN PUNTO DE UNA MASA DE SUELO POR UNA CARGA CONCENTRADA

De la Figura N° 3.5, los esfuerzos en el punto "B" pueden escribirse:

Esfuerzo Vertical:

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

Esfuerzo Radial:

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

Esfuerzo Tangencial:

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

Si se tiene una carga vertical concentrada actuando en la frontera de un medio elástico semi infinito, se estima el asentamiento bajo la carga, siguiendo el método aproximado basado en la fórmula de Boussinesq para el esfuerzo normal vertical (Ec. 3.8). El análisis que se sigue supone que los esfuerzos restantes son despreciables.

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi K^5} \quad (3.11)$$

Para puntos bajo la carga $K=z$, por tanto:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (3.12)$$

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

$$d\rho = \frac{\sigma_z}{E_s} dz \quad (3.13)$$

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 estrado de profundidad infinita)

$$\rho = \frac{3P}{2\pi E_s} \int_z^{\infty} \frac{dz}{z^2} = \frac{3P}{2\pi E_s z} \quad (3.14)$$

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:

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[2(1 - \mu) + \left(\frac{z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (3.15)$$

Donde:

μ : Ratio de Poisson.

E_s : Módulo de elasticidad del masivo semiinfinito de Boussinesq.

K : Distancia donde se aplica la carga hacia el punto donde se mide el esfuerzo.

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:

$$D \cdot \nabla^2 \delta = \rho \quad (3.16)$$

Donde:
$$D_{rig} = \frac{E^* h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)}$$

D_{rig} = rigidez de la placa que representa el pavimento.

δ = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

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

q_0 = Carga distribuida.

E^* = Módulo de elasticidad del Pavimento.

H = Espesor de Pavimento y capa de la subrasante.

h_1 = Espesor de Pavimento.

μ_1 = Ratio de Poisson del Pavimento.

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

Con la transformada de Hankel la ecuación 3.16 para $z=0$ tiene como solución:

$$D_{(R,0)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)q_0 A}{2(1 - \mu_o)E_o} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mR}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{mA}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mH}{L_0}\right)} dm \quad (3.17)$$

Donde:

$$\phi_{(m)} = \frac{\text{Senh}(m) \times \text{Cosh}(m) + \frac{m}{3 - 4\mu_o}}{\text{Senh}^2(m) - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_o)^2}} \quad (3.18)$$

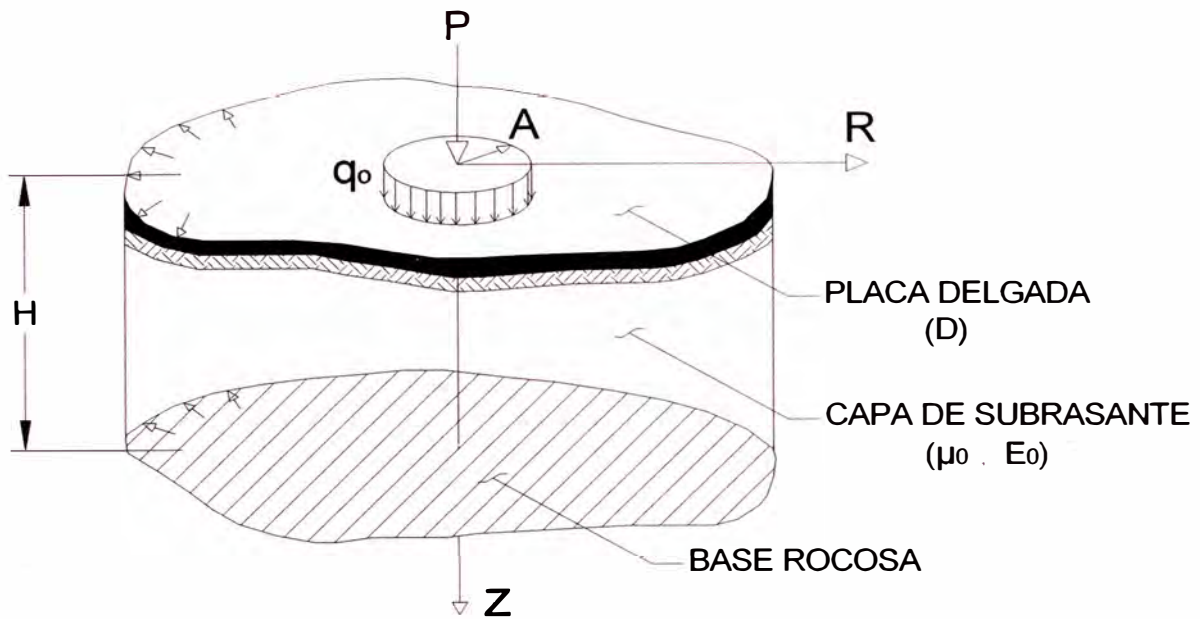


FIGURA N° 3.6 MODELO DE HOGG.

3.3.2 Modelo de Westergaard

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

$$D_{rig} = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (3.19)$$

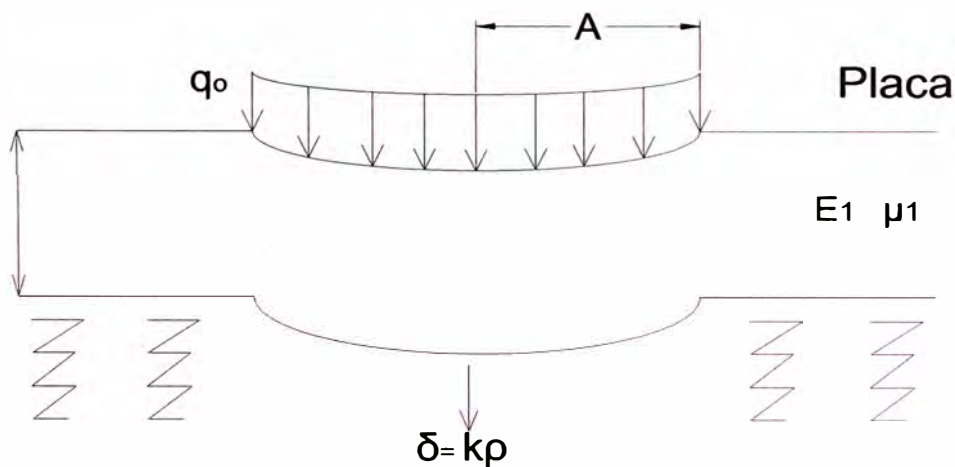


FIGURA N° 3.7 MODELO DE WESTERGAARD

3.3.3 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.

3.3.4 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).

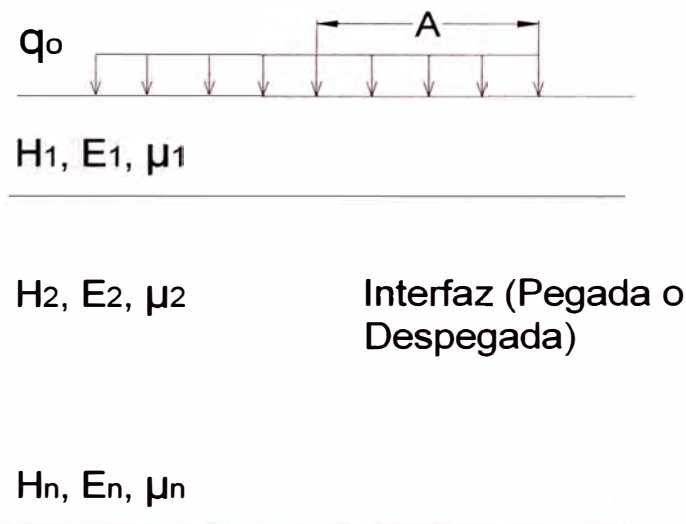


FIGURA N° 3.8 MODELO MULTICAPAS.

3.4 Métodos de Solución de Pavimentos

3.4.1 Fórmula de Boussinesq

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

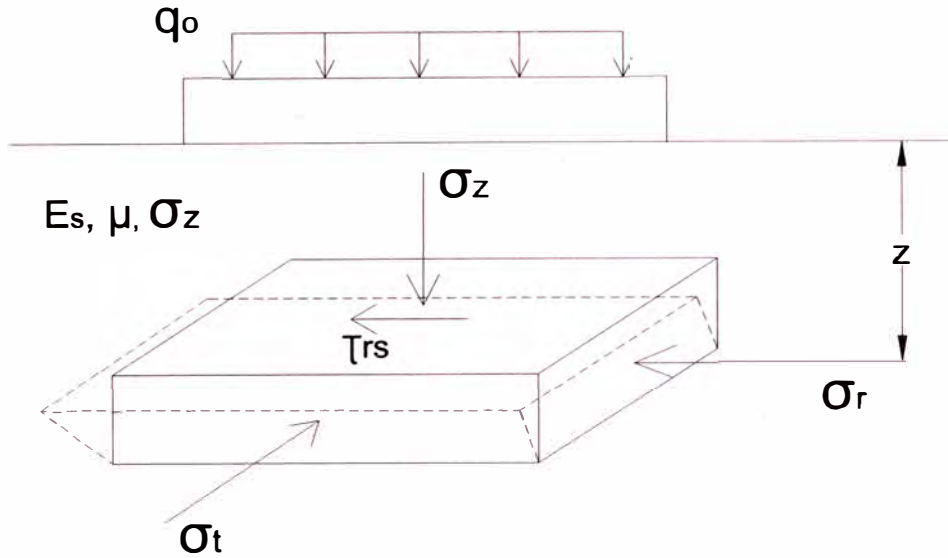


FIGURA N° 3.9 REPRESENTACIÓN DE UN MASIVO SEMI INFINITO.

Para ejes gemelos

Se determinará una ecuación para calcular el desplazamiento total de un punto en la superficie, producida por dos cargas distribuidas verticales sobre el pavimento.

Considerando el desplazamiento en la superficie (\$z=0\$) para una carga puntual se obtiene de la ecuación (3.15) la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{P}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \frac{1}{K} \tag{3.20}$$

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

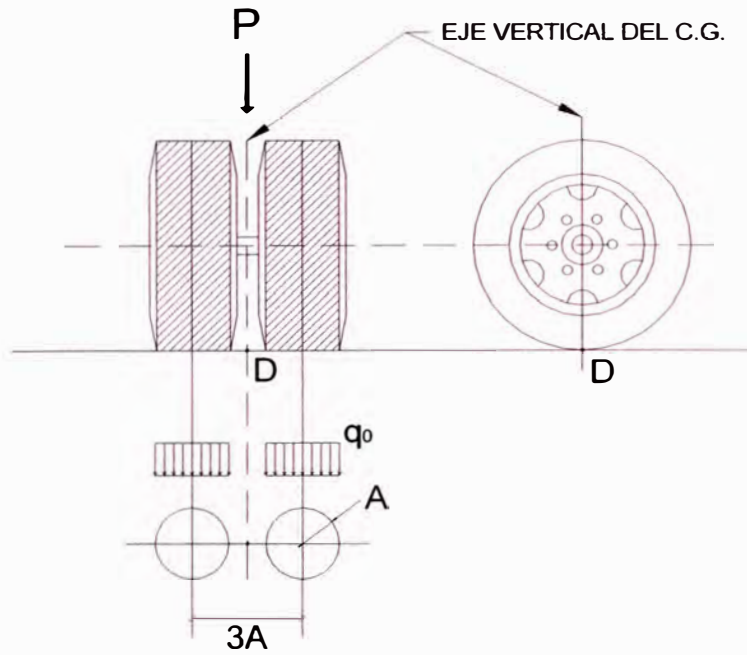


FIGURA N° 3.10 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE EL PAVIMENTO

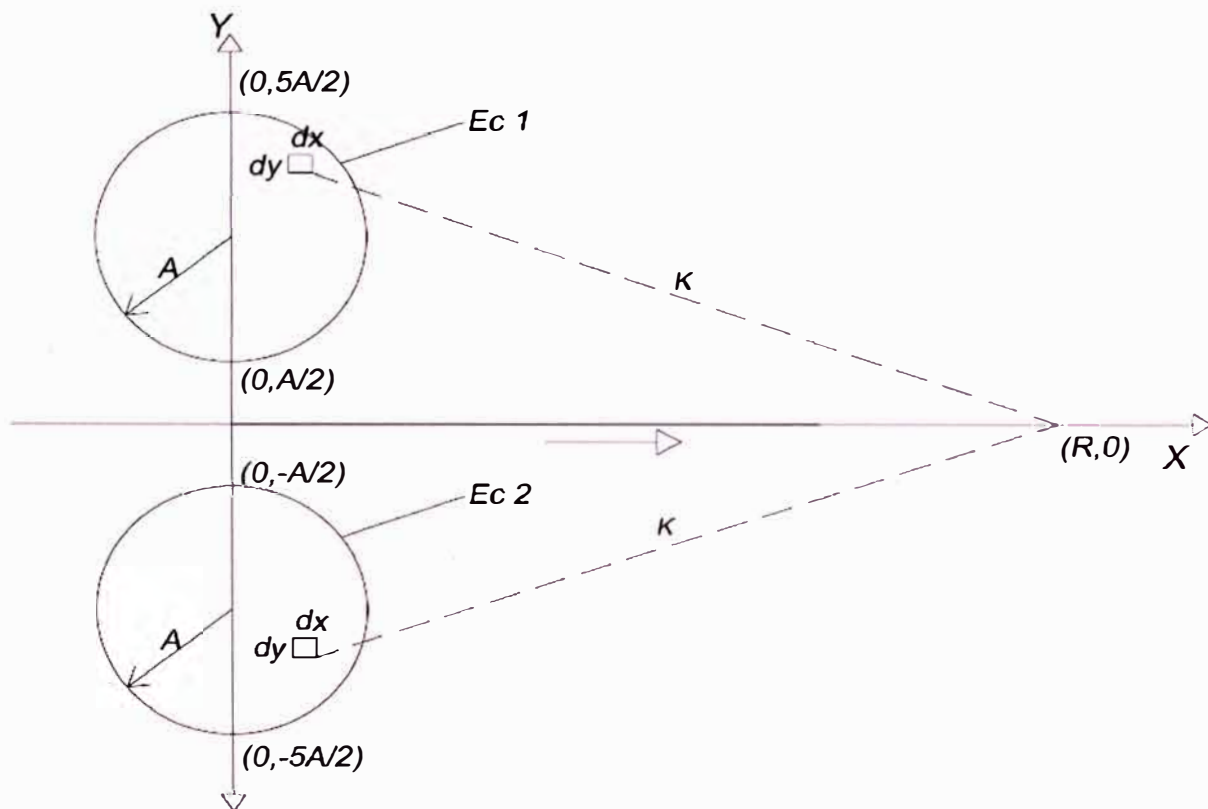


FIGURA N° 3.11 ESQUEMATIZACIÓN DE LAS CARGA DISTRIBUIDA DE LAS LLANTAS PARA LA FORMULACIÓN DEL MÉTODO DE BOUSSINESQ

De la figura 3.11 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$K^2 = (x - R)^2 + (y)^2 \quad (3.21)$$

$$\text{Relación 1: } x^2 + \left(y - 3\frac{A}{2}\right)^2 = A^2 \quad (3.22)$$

$$\text{Relación 2: } x^2 + \left(y + 3\frac{A}{2}\right)^2 = A^2 \quad (3.23)$$

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

$$\Delta\delta = \frac{q_0}{\pi E_s} \frac{(1 + \mu^2)}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} dydx \quad (3.24)$$

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.

$$D_R = \frac{q_0}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2} + 3\frac{A}{2}}^{\sqrt{A^2 - x^2} + 3\frac{A}{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} \right] dydx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2} - 3\frac{A}{2}}^{\sqrt{A^2 - x^2} - 3\frac{A}{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} \right] dydx \right\} \quad (3.25)$$

Despejando el E_s del Pavimento

$$E_s = \frac{q_0}{\pi D_R} (1 + \mu^2) \left\{ \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2} + 3\frac{A}{2}}^{\sqrt{A^2 - x^2} + 3\frac{A}{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} \right] dydx + \int_{-A}^A \int_{-\sqrt{A^2 - x^2} - 3\frac{A}{2}}^{\sqrt{A^2 - x^2} - 3\frac{A}{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{(x - R)^2 + y^2}} \right] dydx \right\} \quad (3.26)$$

Donde:

D_R : Deflexión a una distancia R.

E_s : Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq

μ : Ratio de Poisson

A: Radio de la huella circular de contacto

q_0 : Presión de inflado.

R: Distancia a la que se mide la deflexión D_R

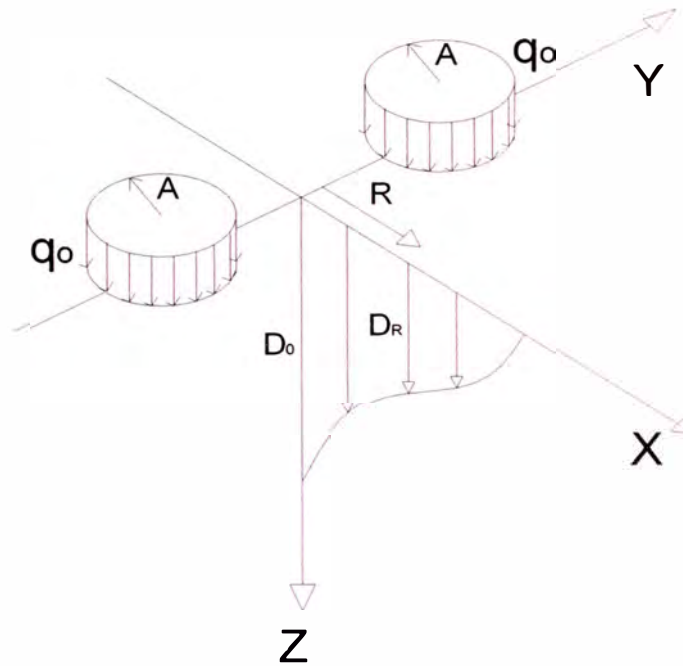


FIGURA N° 3.12 DEFLEXIÓN PRODUCIDA POR DOS LLANTAS

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 elasticidad E y ratio de Poisson μ y su espesor h es constante.

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

$$D_{rig} = \sqrt[4]{\frac{Eh_1^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (3.27)$$

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 elasticidad E_i y de coeficiente de Poisson μ_i igual a:

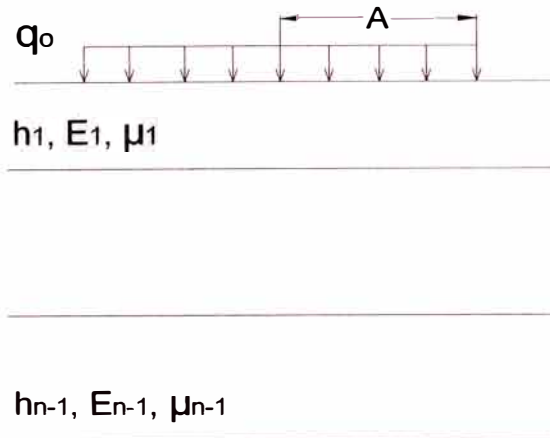


FIGURA Nº 3.13 MODELO DE MULTICAPA PROPUESTO CON LA FÓRMULA DE PALMER Y BABER GENERALIZADA.

$$E_s = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (3.28)$$

La ecuación 3.27 será necesaria para relacionar los módulos de elasticidad del pavimento y de la subrasante, 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 elasticidad E_i y de coeficiente de Poisson μ_i , la caracterización de la base es un masivo semi infinito de características mecánicas E_n y μ_n

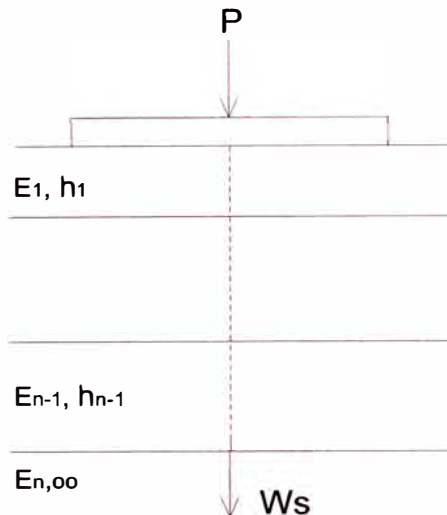


FIGURA N° 3.14 MODELO MULTICAPA PROPUESTO CON LA FÓRMULA DE ODEMARK

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.29)$$

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.

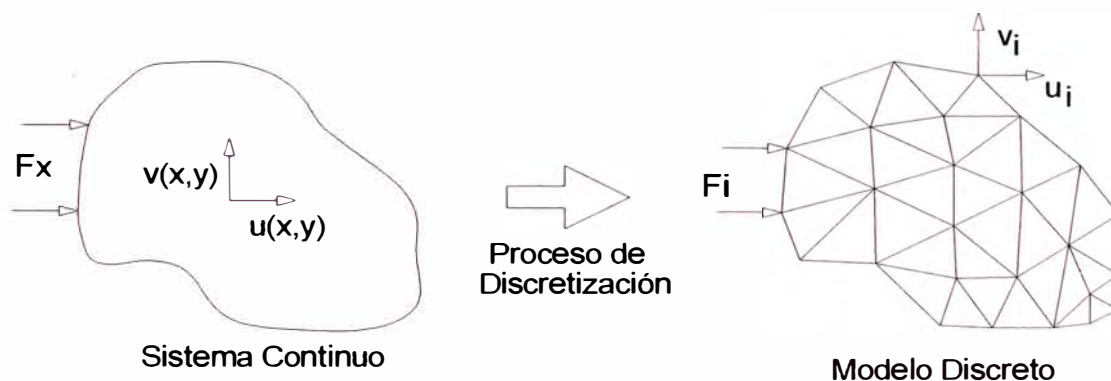


FIGURA N° 3.15 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO km 84+000 – km 89+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 t, aplicada al pavimento a través de un camión con movimiento lento.

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

- Se hicieron las medidas desde el km 85+000 en forma decreciente terminado en el 84+600 km.
- Se utilizó la viga Benkelman de brazo simple con relación de brazo de 1:4 y con un dial de precisión de 0.02 mm.
- Se utilizó un camión de un solo eje posterior, que transmitía una carga de 8.2 toneladas controladas por una balanza 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 mido el espesor de las capas asfálticas en cada punto.
- Se registró la lectura de las deflexiones.

Procedimiento de medición.

La toma de medidas 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 para saber en qué momento el camión pasa por los puntos previstos para el estudio.
- Se marcarán en la viga previamente con papel adhesivo los puntos previstos que son materia de estudio, en este caso se ubicaron a 0, 25, 40, 70 y 100 cm respectivamente.
- 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 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 obtener 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 camión que inicie el movimiento lento mientras que indicará a los operadores encargados de las lecturas el momento exacto cuando la regla colocada en el camión coincida con los puntos marcados previamente en la viga. (Figura 4.1 Anexo 4)

- Al escuchar las indicaciones los lectores dirán en voz fuerte y clara las medidas indicadas por el extensiómetro, mientras que otro operador las anotará, esto se hace con el fin de que no se presente problema alguno en la toma de medidas. (Figura 4.2 Anexo 4)
- Se procede a la medición de la temperatura que presenta el asfalto en el punto en medición. Se toma una pequeña muestra del espesor del pavimento haciendo una pequeña incisión en el costado del pavimento más cercano al punto de toma. (Figura 4.3 Anexo 4) y (Figura 4.4 Anexo 4)
- Se anota la medida del Ahuellamiento en el punto de ensayo y se hacen anotaciones y tomas de fotografías generales de las fallas superficiales aledañas. (Figura 4.5 Anexo 4)
- Se continúa con el siguiente punto. Con el objetivo de ahorrar tiempo terminadas las anotaciones de las lecturas el camión se trasladará al siguiente punto.

Todo el proceso deberá ser supervisado por un ingeniero de campo experimentado quien verificará los valores que se vayan obteniendo así como las anotaciones de fallas, tipo de material, superficie, abolladura entre otras características.

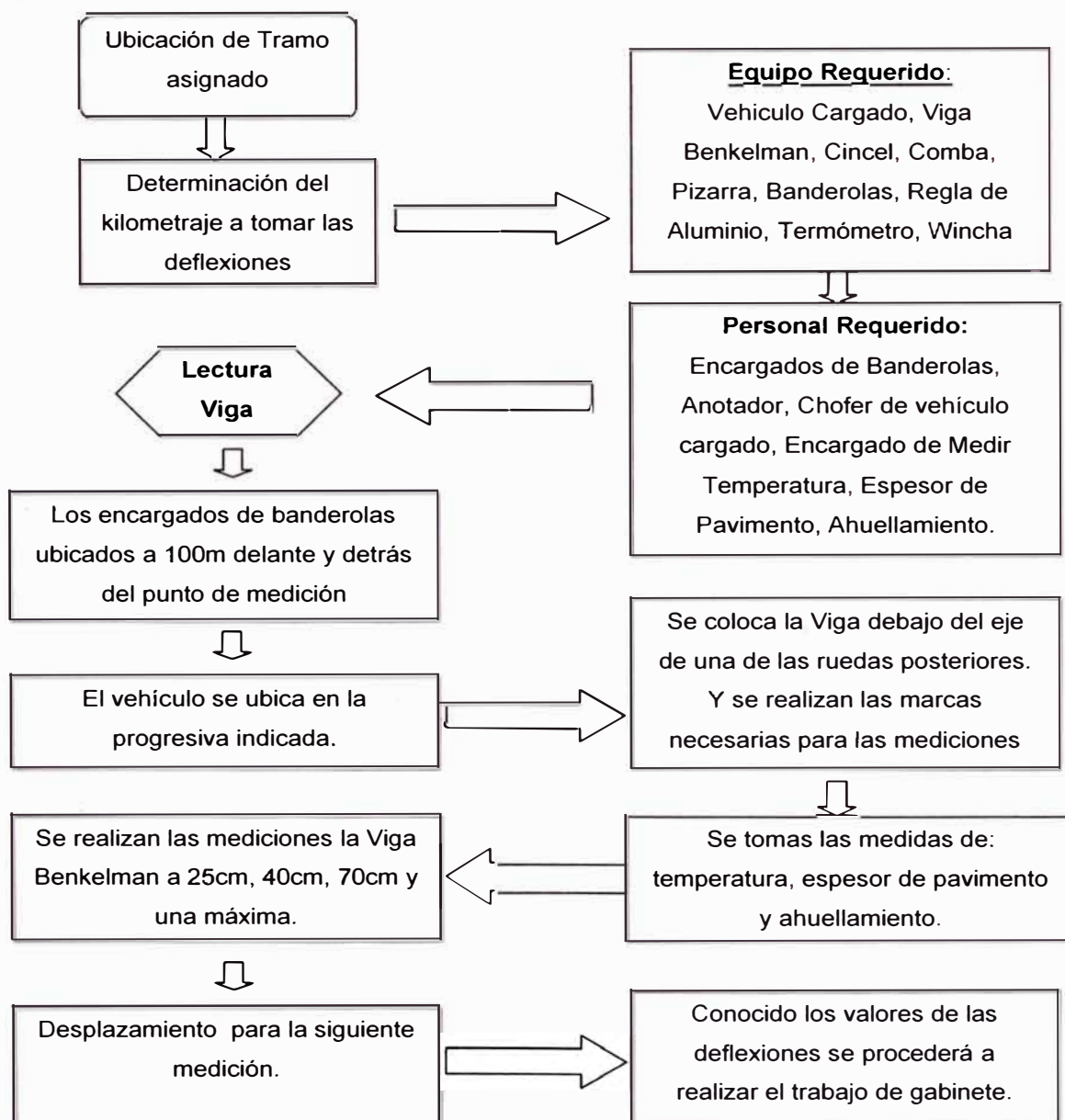
Finalmente, obtenida toda la información de campo se procede a calcular los valores de las deflexiones de cada sub tramo. De acuerdo a los formatos establecidas para la anotación de las deflexiones encontradas, a continuación se muestra en cuadro donde se indica las medidas por cada sub tramo de 100m.

N°	Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)
		L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}		
32	84+600	6	12	14	18	0.011	54.0
33	84+700	4	6	8	10	0.009	56.0
34	84+800	6	8	12	14	0.012	57.0
35	84+900	8	12	18	20	0.013	60.0
36	85+000	8	10	14	16	0.013	61.0

CUADRO N° 4.1. DATOS TOMADOS EN CAMPO

(Fuente: Elaboración Propia)

Diagrama de Flujo



4.2 Aplicación de la Teoría de Boussinesq.

Para la aplicación de la teoría se define los siguientes parámetros:

Modelo de carga

La carga en el ensayo con la viga Benkelman proviene del eje trasero simple con llanta doble de un camión. La carga del eje es de orden de los 8.2 t. y la presión de inflado es de 80 psi. En el modelo de carga se asume que la presión de inflado es igual a la presión de contacto donde la huella de contacto de cada llanta es circular de radio A y la distancia entre los ejes de las dos llantas es 3A. Por equilibrio se establece las siguientes relaciones:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi q_0}} \quad (4.1)$$

A= Radio de la huella circular de contacto

P= Carga sobre una llanta

q_0 = Presión de Inflado

Cálculo de R

R es la distancia del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal, en la cual se obtiene que la relación $D_R/D_0=0.5$ en la curva de deflexiones en donde D_0 es la máxima deflexión tomada en campo. Para el método de Boussinesq se calculará el valor de R de una manera estadística.

Para diferentes valores de "R" cercano a la relación $D_R/D_0=0.5$ se graficará varias curvas teóricas de las deflexiones asociadas a un Módulo de elasticidad E_s mediante la ecuación (3.25) y se comparará con la curva de deflexiones de campo.

Estadísticamente se determinará la curva teórica que mejor se ajuste a la curva de campo mediante la menor desviación estándar y se elegirá el valor de R donde la desviación estándar sea menor.

Cálculo del módulo de elasticidad del masivo semi infinto “E_s”

El módulo de elasticidad masivo E_s representa el módulo de todas las capas, compuesto de la carpeta asfáltica, base granular y subrasante.

Obtenidos los valores de R y D_R, Se puede calcular el valor de “E_s” con la ecuación (3.26).

Para la simplificación de las operaciones de las ecuaciones (3.25) y (3.26) se realizó un programa en el Matlab. Revisar Anexo 1.

Cálculo del módulo de elasticidad de la Subrasante (E₀)

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

El valor de E₀ se determinara con ayuda de la longitud característica del pavimento (l₀), calculado en el modelo de Hogg cuya ecuación es:

$$L_0 = \sqrt[3]{\frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{24(3 - 4\mu_0)^2} \cdot \frac{E_1}{E_0} Hc} \quad (4.2)$$

Si consideramos $\mu_0 = 0.4$ tenemos:

$$L_0 = 0.55h_1 \sqrt[3]{\frac{E^*}{E_0}} \quad (4.3)$$

También se utilizara la ecuación (4.4) que se deduce de la ecuación (3.28).

$$E_S = E^* \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_0}{E^*}}}{h_1 + h_2} \right]^3 \quad (4.4)$$

Con ambas ecuaciones se calcular el valor de E₀.

Para la obtención del L₀ y h₂ se utilizó la metodología de Hogg teniendo en consideración la siguiente relación H/L₀=10. La ecuación 4.3 se deduce del modelo matemático de Hogg.

Donde:

E_S = Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq

E_0 = Módulo de elasticidad de la subrasante.

E^* = Módulo de elasticidad del Pavimento.

h_1 = Espesor del Pavimento

h_2 = Espesor del masivo semi infinito

$H = h_1 + h_2$

L_0 = longitud característica de Hogg.

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

El módulo 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 del E^* se utilizara la ecuación (4.4)

Relación entre E_0 y 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 en sitio.

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

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

Para E_0 expresado en kg/cm^2 y CBR en porcentaje.

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

CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Según el procedimiento descrito en el capítulo IV, se obtendrán los siguientes resultados para cada 100m del tramo asignado.

Procesamiento de datos y cálculo de módulos de Elasticidad y CBR.

El objetivo de la evaluación estructural, es encontrar tramos homogéneos en función de las deflexiones, que pueda dar una idea del comportamiento estructural del pavimento.

Para una mayor comprensión se cita a continuación un ejemplo completo del procesamiento de datos de mediciones de deflexiones elásticas o recuperables de campo.

Paso 1.- Se calcula las deflexiones elásticas recuperables de cada estación restando la deflexión máxima a cada una de ellas.

Para el tramo en estudio en la Progresiva 84+600, se tiene que la deflexión máxima es 18×10^{-2} mm, la deflexión inicial (D_0) es cero y la deflexión a 25cm (D_{25}) es 6.00×10^{-2} mm:

$$D_0 = (18.00 - 0.00) = 18.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{25} = (18.00 - 6.00) = 12.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{40} = (18.00 - 12.00) = 6.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{70} = (18.00 - 14.00) = 4.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

Paso 2.- Dado que la Viga Benkelman tenía una relación de brazos de 4:1, todas las lecturas de deflexiones recuperables de campo se deberán multiplicar por 4. Revisar Anexo 2 para visualización de graficas de las deflexiones.

Para el tramo en estudio en la Progresiva 84+600 se tiene:

$$D_0 = (18.00) \times 4 = 72.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

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

$$D_{40} = (6.00) \times 4 = 24.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$D_{70} = (4.00) \times 4 = 16.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

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
32	84+600	6	12	14	18	0.01	54.0	72	48	24	16
33	84+700	4	6	8	10	0.01	56.0	32	24	16	8
34	84+800	6	8	12	14	0.01	57.0	56	32	24	8
35	84+900	8	12	18	20	0.01	60.0	80	48	32	8
36	85+000	8	10	14	16	0.01	61.0	64	32	24	8

CUADRO N° 5.1 DEFLEXIONES CORREGIDAS POR RELACION DE BRAZO 4:1.

Paso 3.- Cálculo de los valores de “R” y “E_s” para el tramo 84+600.

Se probará valores de R hasta ajustar las curvas de deflexiones teóricas vs la curva de deflexiones de campo.

Se iniciará con valores de “R” igual a 20, 25, 30, 35 y 40 cm. Obteniendo valores de “E_s” respectivamente y mediante el ajuste de curvas determinaremos con que valor de R ocurre la menor desviación estándar

A continuación se describe el proceso:

$$R \text{ (cm)} = 20$$

$$D_R \text{ (cm)} = 0.036$$

$$E_s \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1342.0$$

Distancia R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.057594	0.072	0.000208
25	0.031213	0.048	0.000282
40	0.02155	0.024	0.000006
70	0.012947	0.016	0.000009
Desviación Estándar			0.000505

$$R \text{ (cm)} = 25$$

$$D_R \text{ (cm)} = 0.036$$

$$E_s \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 1159.4$$

Distancia R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.066664	0.072	0.000028
25	0.036129	0.048	0.000141
40	0.024944	0.024	0.000001
70	0.014986	0.016	0.000001
Desviación Estándar			0.000171

R (cm) = 30
 D_R (cm) = 0.036
 E_s (kg/ cm²)= 1013.1

Distancia R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) 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 Estándar			0.000085

R (cm) = 35
 D_R (cm) = 0.036
 E_s (kg/ cm²)= 895.7

Distancia R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.086296	0.072	0.000204
25	0.046768	0.048	0.000002
40	0.032289	0.024	0.000069
70	0.019399	0.016	0.000012
Desviación Estándar			0.000286

R(cm) = 40
 D_R (cm) = 0.036
 E_s (kg/ cm²)= 800.5

Distancia R (cm)	Deflexiones teóricas Dt (cm)	Deflexiones de Campo Dc (cm)	(Dc-Dt) ²
0	0.096556	0.072	0.000603
25	0.052329	0.048	0.000019
40	0.036129	0.024	0.000147
70	0.021706	0.016	0.000033
Desviación Estándar			0.000801

Deflexiones

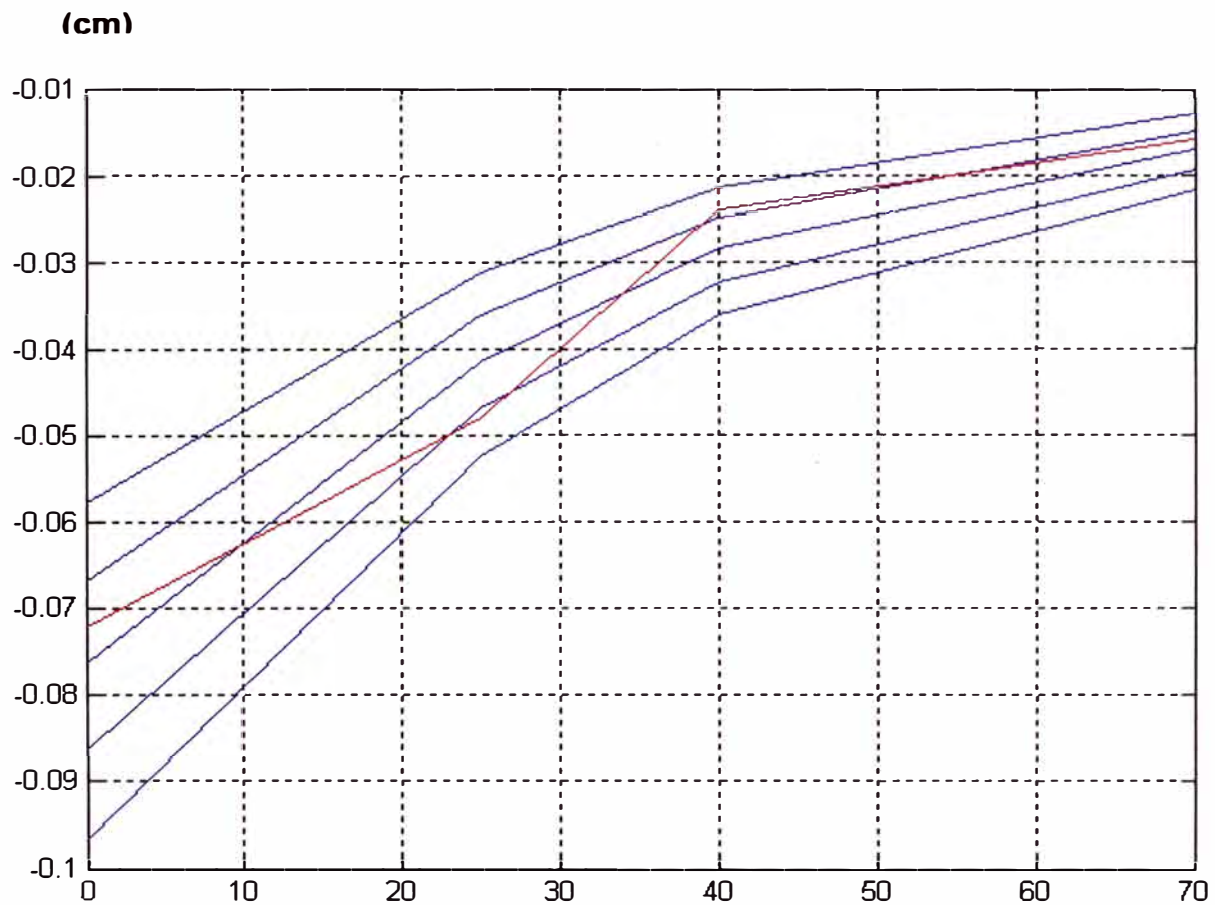


FIGURA N° 5.1 GRÁFICO “R” vs DEFLEXIONES
PARA EL TRAMO 86+400

R (cm)

Del gráfico 5.1: R vs D campo —————
 R vs D teóricas —————

Para este tramo la menor desviación estándar ocurre cuando R es igual 30cm
 Por tanto el valor de $E_s = 1013 \text{ kg/cm}^2$

Del gráfico 5.1, verificamos el ajuste de curvas.

El Anexo 3 muestra todas las tendencias de las curvas y los valores de los módulos de elasticidad desde el tramo 84+600 hasta el 91+500 para poder determinar la menor desviación estándar.

Para los demás tramos se tiene:

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻² mm)				RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				R (cm)	D _R (cm)	E _s (kg/cm ²)
					Deflexiones(x10 ⁻² mm)						
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}	D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀			
84+600	6	12	14	18	72	48	24	16	30.0	0.036	1013
84+700	4	6	8	10	40	24	16	8	30.0	0.020	1824
84+800	6	8	12	14	56	32	24	8	250	0.028	1303
84+900	8	12	18	20	80	48	32	8	30.0	0.040	912
85+000	8	10	14	16	64	32	24	8	25.0	0.032	1304

CUADRO N° 5.2 RESULTADOS DE R, D_R y E_s.

Paso 4.- Cálculo de los valores de “E₀” y “E*” para el tramo 84+600.

El valor de “L₀” será recopilado de los cálculos realizados mediante el modelo de Hogg (Anexo 4).

Para hallar el valor de “E₀” y “E*” se utilizara las ecuaciones 4.3 y 4.4.

Resolviendo:

$$E_0 = 791 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$$h_1 = 17 \text{ cm (espesor de pavimento dato recopilado del expediente técnico)}$$

$$H = h_1 + h_2 = L_0 * 10 \text{ entonces: } h_2 = (L_0 * 10 - 17). \text{ (Revisar teoría de Hogg)}$$

Reemplazando E₀ en la ecuación 4.3 obtenemos:

$$E^* = 5406 \text{ kg/cm}^2$$

N°	Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				PARÁMETROS DEL MODELO DE BOUSSINESQ							
		Deflexiones(x10 ⁻² mm)				R (cm)	DR (cm)	Es (kg/cm ²)	Lo (cm)	Eo (kg/cm ²)	E* (kg/cm ²)	CBR (%)	E*/Eo
		D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀								
32	84+600	72	48	24	16	30	0.036	1013.1	17.7	791	5406	7.2	6.8
33	84+700	40	24	16	8	30	0.020	1823.6	15.1	1492	6260	13.6	4.2
34	84+800	56	32	24	8	30	0.028	1302.6	12.9	1124	2981	10.2	2.7
35	84+900	80	48	32	8	30	0.040	911.8	15.1	746	3130	6.8	4.2
36	85+000	64	32	24	8	25	0.032	1304.4	13.6	1104	3415	10.0	3.1

CUADRO N° 5.3 RESULTADOS DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y CBR

Interpretación de Resultados

De acuerdo al resultado en el cuadro N° 5.4, se puede apreciar la clasificación del estado actual del pavimento, según el rango de porcentajes 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 para el Diseño de caminos no pavimentados de Bajo Volumen de Tránsito del MTC.)

Por ende se puede interpretar lo siguiente:

- Los valores varían de regulares a buenos, medianamente aceptables para una carretera nueva.
- En el tramo del Km 84+600 al 85+000 según los rangos de valores del CBR arrojan CBR bajos que indican algún tipo de deficiencia en el proceso constructivo o en la mala calidad de los materiales utilizados.

A continuación se mostrara un cuadro comparando los valores de los módulos de elasticidad obtenidos por Boussinesq y Hogg.

R (cm)	D _R (cm)	E _s (kg/cm ²)	E ₀ BOUSSINESQ (kg/cm ²)	E ₀ HOGG (kg/cm ²)	L ₀ (cm)	E* BOUSSINESQ (kg/cm ²)	E* HOGG (kg/cm ²)	CBR BOUSSINESQ (%)	CBR HOGG (%)
30	0.036	1013.1	791	670	17.7	5406	2437	7.2	6.1
30	0.020	1823.6	1492	1322	15.1	6260	2270	13.6	12.0
25	0.028	1302.6	1124	1012	12.9	2981	888	10.2	9.2
30	0.040	911.8	746	661	15.1	3130	1135	6.8	6.0
25	0.032	1304.4	1104	867	13.6	3415	938	10.0	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" en ambos métodos.

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

De acuerdo a las lecturas del MTC, la relación de Boussinesq (E^*/E_0) está entre los valores de 2 y 4 que es una buena relación.

CONCLUSIONES

- El método de Boussinesq propuesto es una herramienta simple de cálculo que ayuda a estimar el estado del pavimento de manera rápida, confiable y se presenta como una alternativa de solución para el modelamiento de pavimentos.
- Los valores encontrados de CBR en el tramo evaluado arrojan valores entre regulares a bueno (CBR=7% y CBR=14%) según la clasificación del método usado.
- Para la utilización del modelo de Boussinesq se requiere conocer los espesores de las capas del pavimento por tanto se deberá contar con espesores de diseño para la determinación de los parámetros del modelo.
- Para fines de diseño del refuerzo del pavimento, el modelo de Boussinesq determina el módulo de elasticidad de la subrasante el cual sirve para calcular el valor de CBR, parámetro indispensable para el diseño.
- El parámetro de la longitud característica L_0 es importante para la determinación de los módulos de elasticidad del pavimento y subrasante, dicho parámetro se detalladamente y explica en el modelo de Hogg

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el número de deflexiones de campo deben de ser mayores o iguales a 10 en cada punto evaluado con la Viga Benkelman para tener mayor exactitud en la obtención de los parámetros del modelo a utilizar.
- La medición de deflexiones mediante la Viga Benkelman, es un procedimiento práctico y económico, pero es un ensayo puntual y lento por lo tanto se producen problemas de circulación y peligro de accidentes incluso para los operarios del equipo, por lo que se recomienda al personal encargado de realizar dichas mediciones tomar las medidas de seguridad necesarias.
- Debido a que esta carretera conecta Lima con Huancayo, siendo una como alternativa a la Carretera Central, es probable que el tráfico aumente considerablemente en pocos años lo que se recomienda hacer un mayor seguimiento de la capacidad estructural del pavimento.
- Debido a la presencia de la Central Hidroeléctrica del Platanal se ha podido observar la presencia de tráfico pesado, esta afecta considerablemente a la estructura del pavimento, recomendándose un diseño adecuado para este tipo de tráfico.

BIBLIOGRAFÍA

- DASHKO R.E., A.A. KAGÁN “Mecánica de Suelos en la Práctica de la Geología Aplicada a la Ingeniería”, MIR. RUSIA 1980.
- HAZZARD, JAMES F., YACOB 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 ÁGUILA, 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 America, 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, España, 1975

ANEXOS

ANEXO 01:

INGRESO DE DATOS Y CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA EN EL MATLAB

ANEXO 02:

GRÁFICAS DE DEFLEXIONES DE CAMPO

ANEXO 03:

GRÁFICAS DE DEFLEXIONES TEÓRICAS vs DEFLEXIONES DE CAMPO

ANEXO 04:

DETERMINACIÓN DEL E_0 MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE HOGG

ANEXO 05:

PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXOS 1

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

D_z : Deflexión igual a $D_0/2$

Dist: Intervalos de distancia donde se tomaron las deflexiones de campo;
intervalo entre corchetes

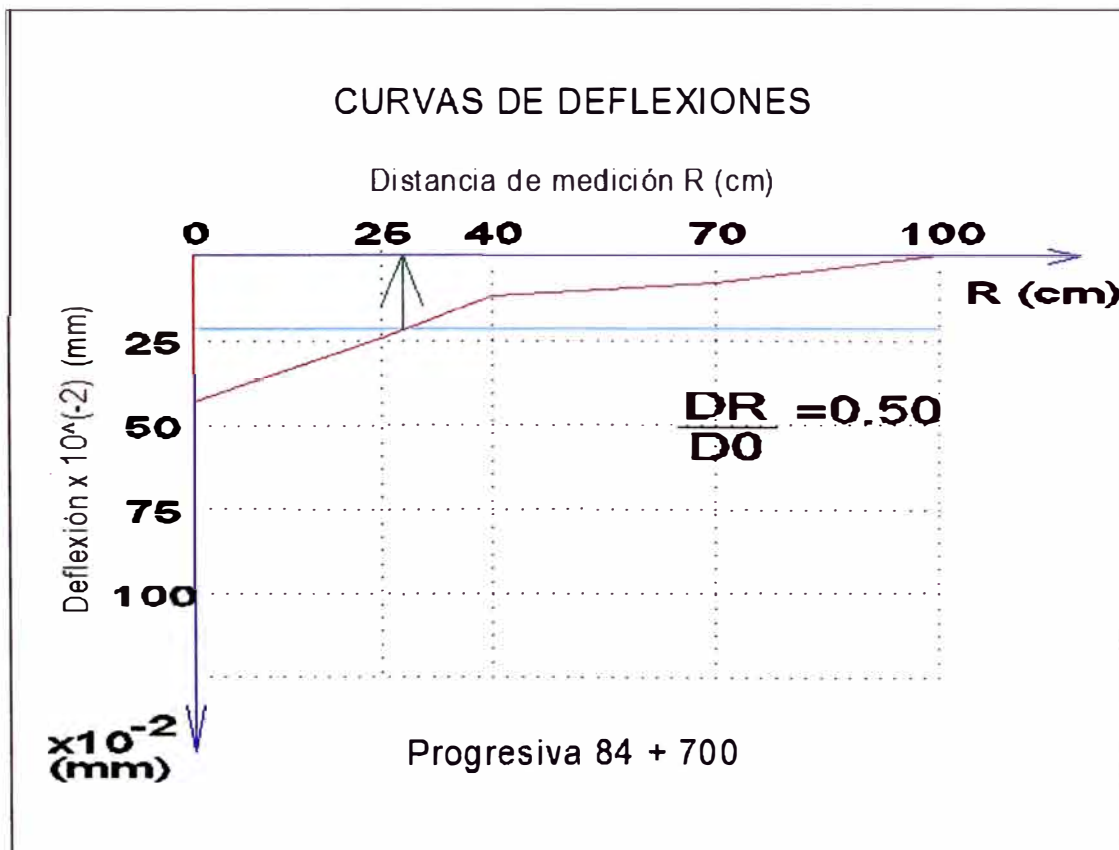
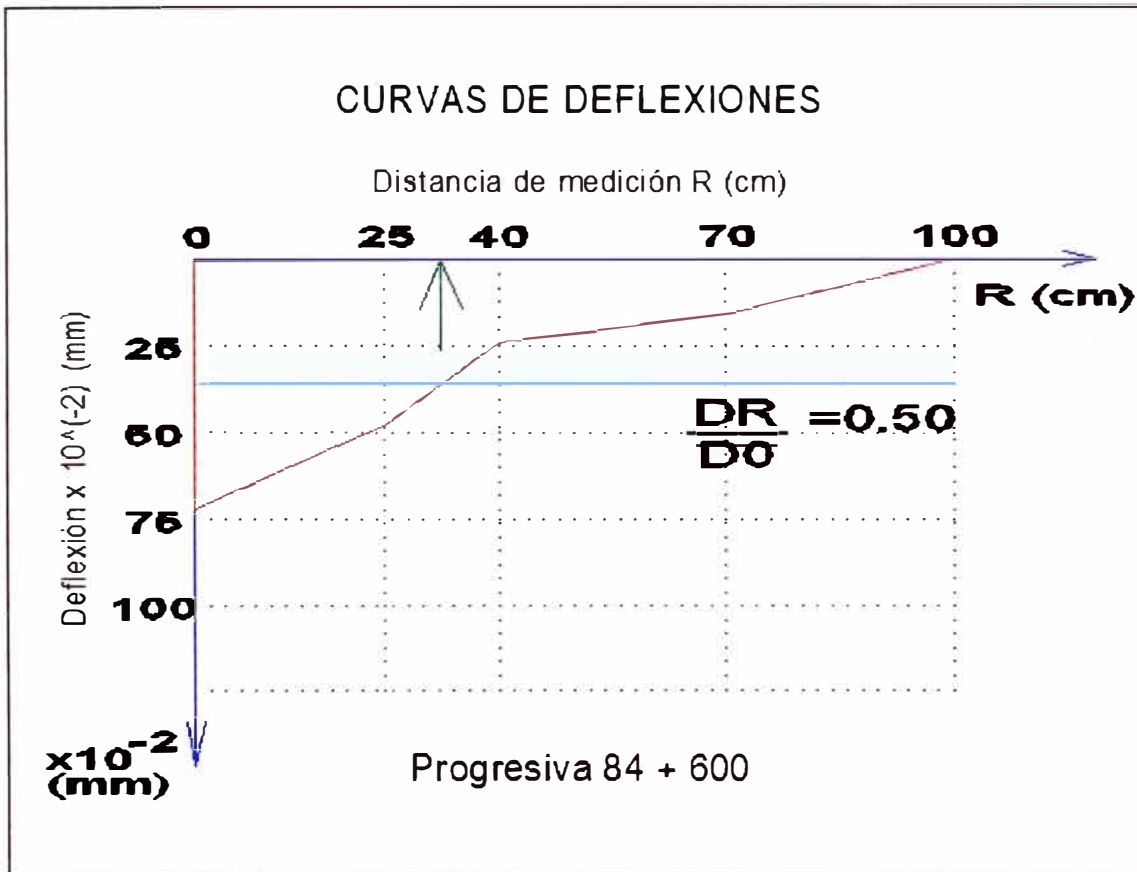
n: Numero de datos de campo evaluado por punto (ejemplo: $n=4$)

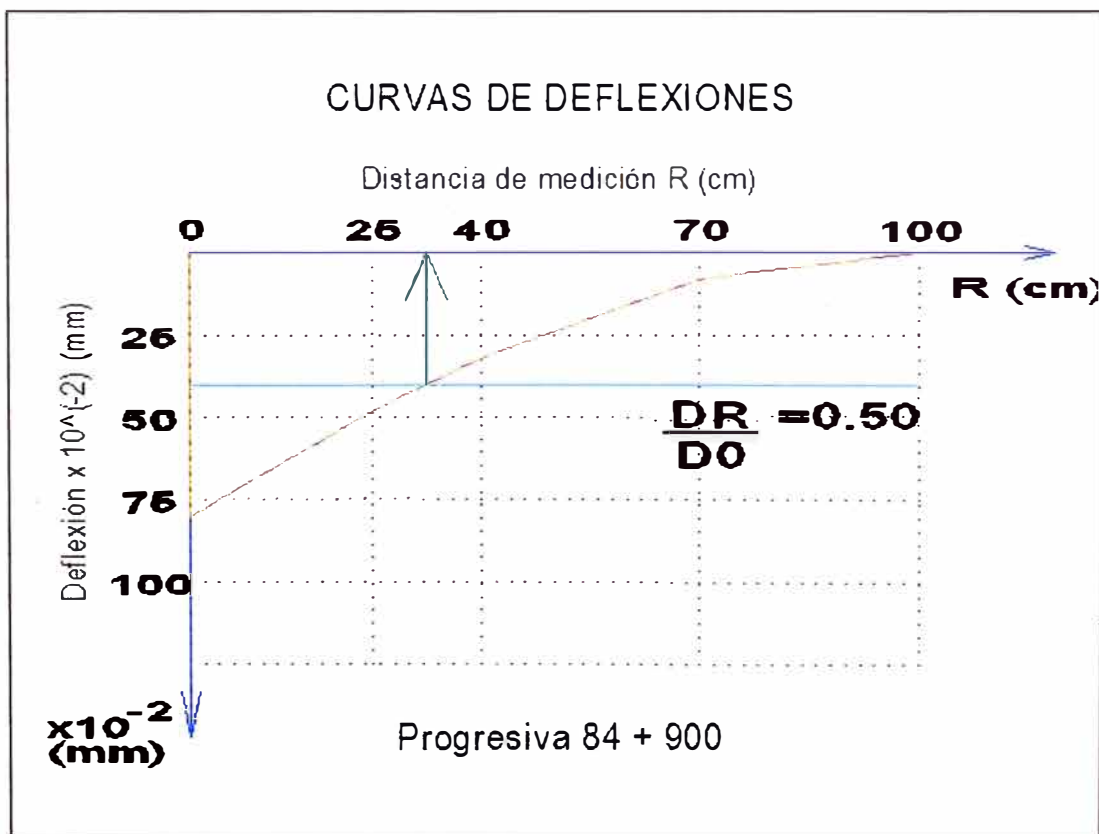
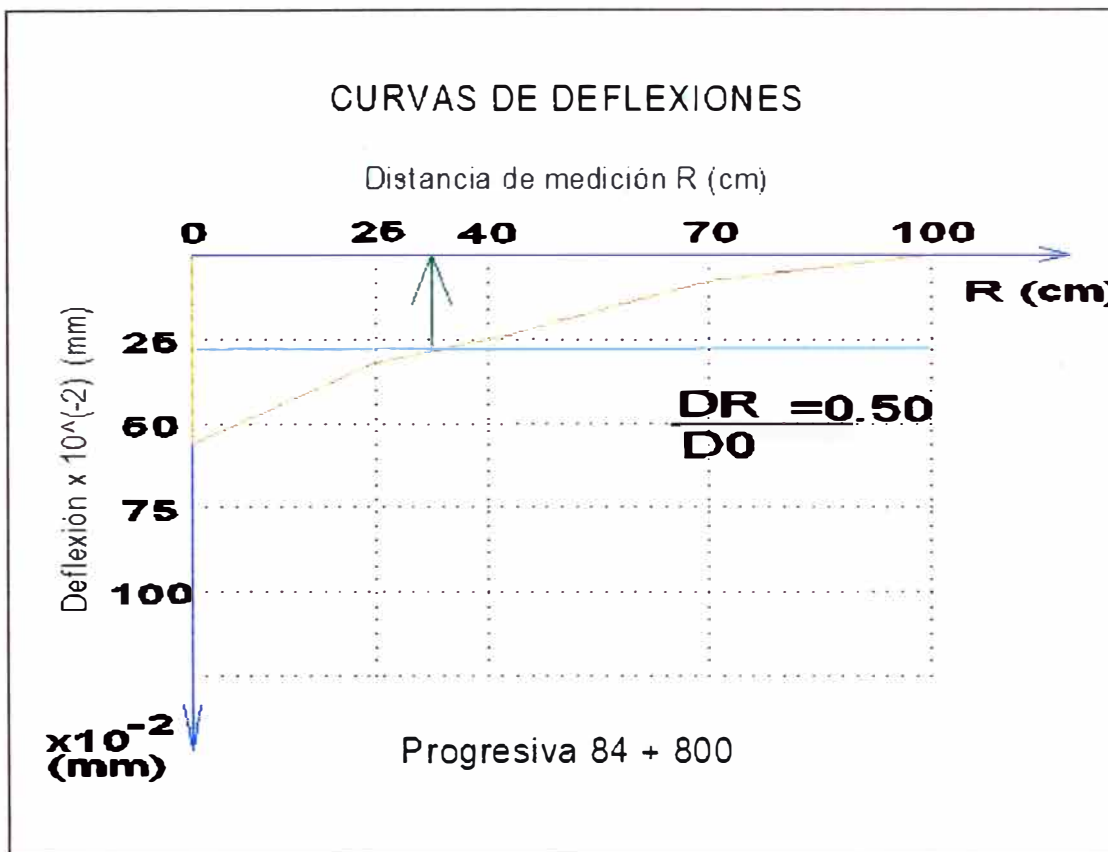
Dz-C: Intervalo de deflexiones corregidas de campo en cm; intervalo entre corchetes

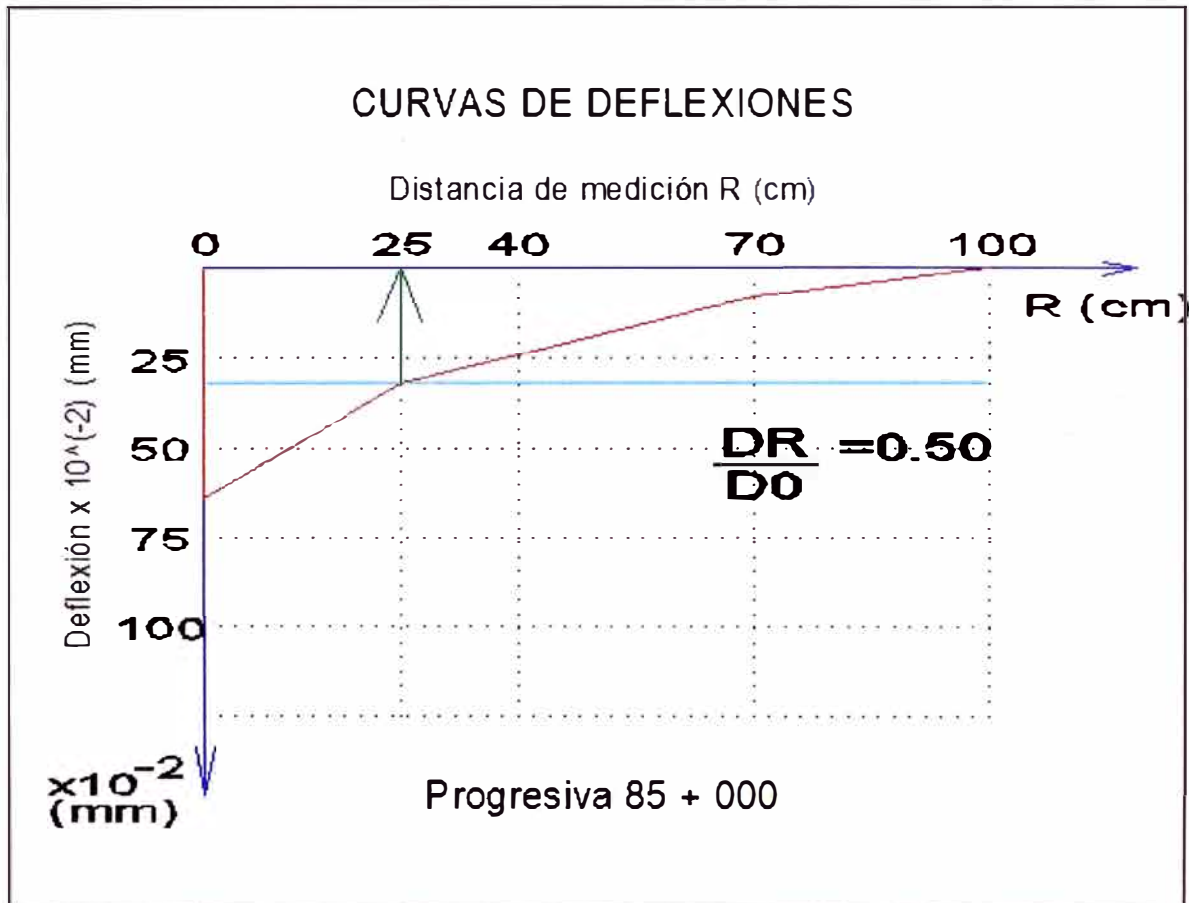
Sss: Nombre del archivo de Excel saliente con los resultados; nombre entre comillas

```
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\%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);
```

ANEXOS 2







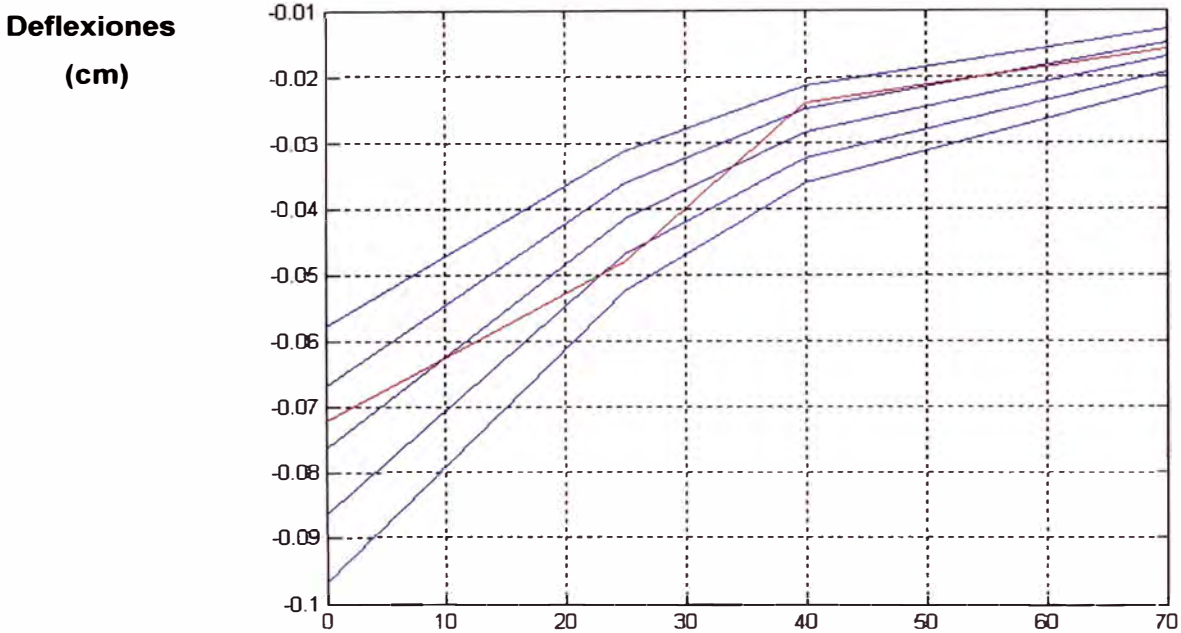
ANEXOS 3

LEYENDA DE GRÁFICO "R" vs DEFLEXIONES

R vs D campo —

R vs D teóricas —

PARA EL TRAMO 84+600

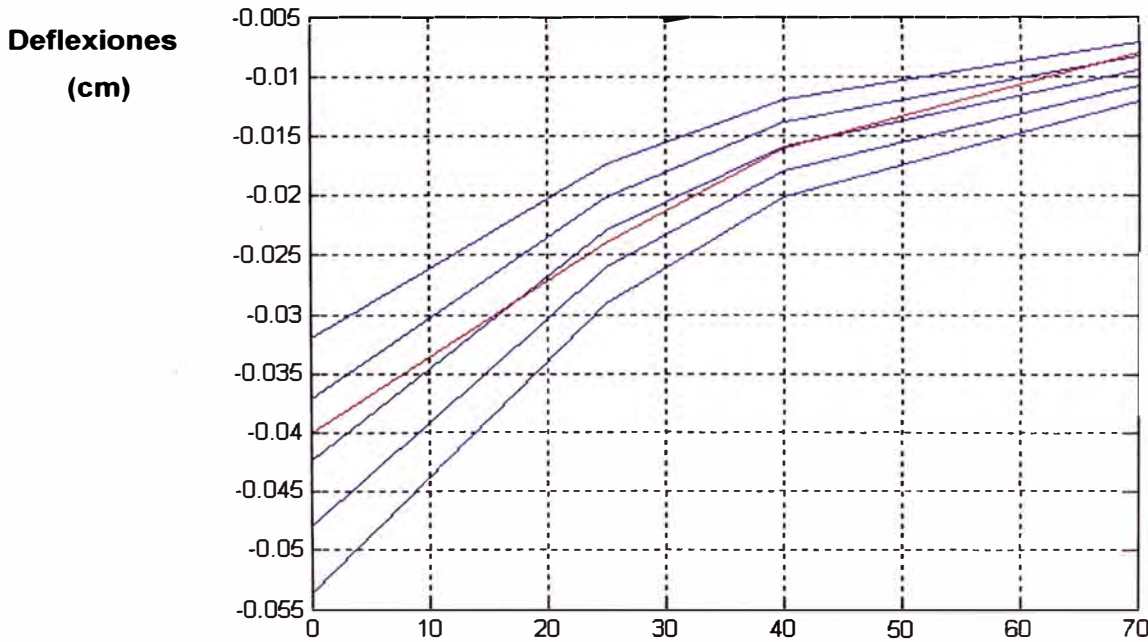


Cumple: R= 30 cm

$E_s=1013 \text{ Kg/cm}^2$

R (cm)

PARA EL TRAMO 84+700



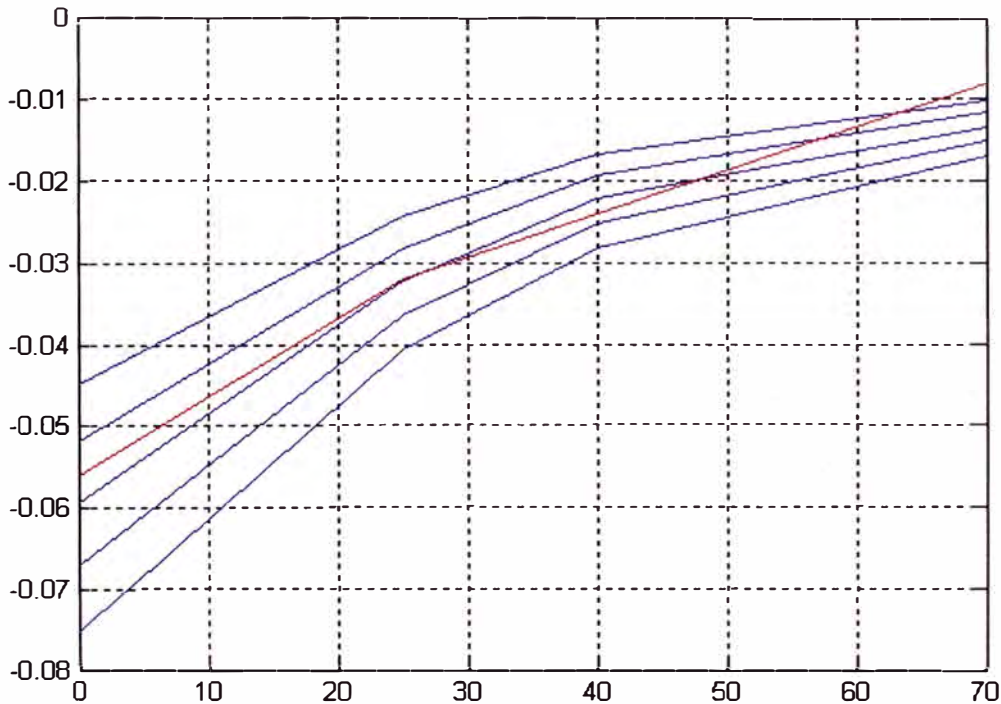
Cumple: R= 30 cm

$E_s= 1824 \text{ kg/cm}^2$

R (cm)

PARA EL TRAMO 84+800

**Deflexiones
(cm)**

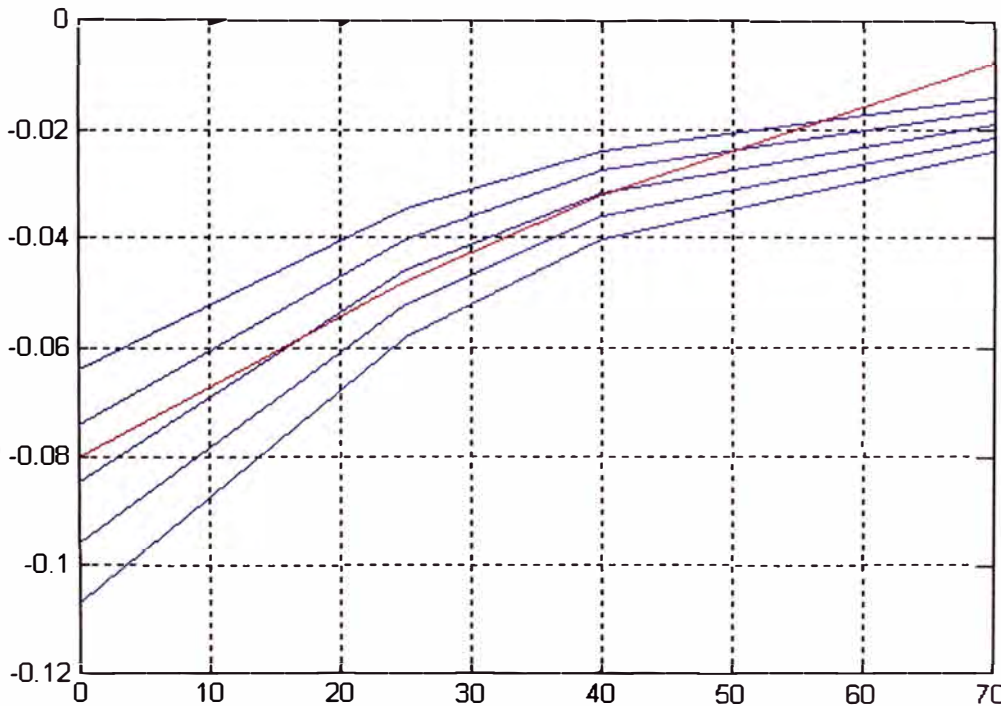


Cumple: $R = 25\text{cm}$
 $E_s = 1490.0 \text{ kg/cm}^2$

R (cm)

PARA EL TRAMO 84+900

**Deflexiones
(cm)**

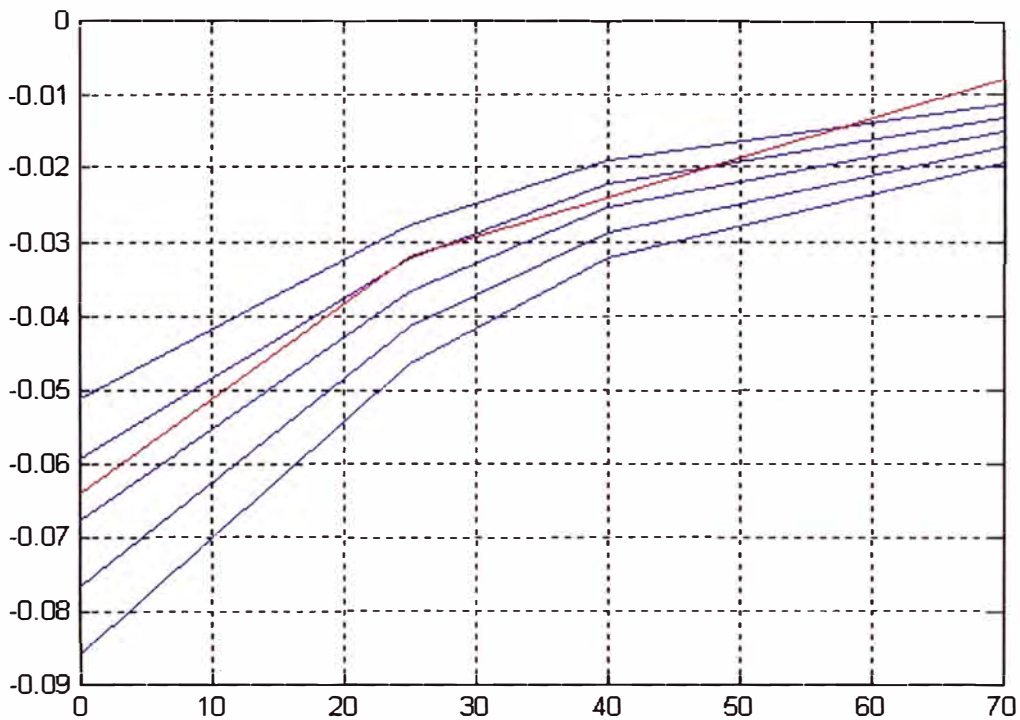


Cumple: $R = 30\text{cm}$
 $E_s = 912 \text{ kg/cm}^2$

R (cm)

PARA EL TRAMO 85+000

Deflexiones
(cm)



Cumple:

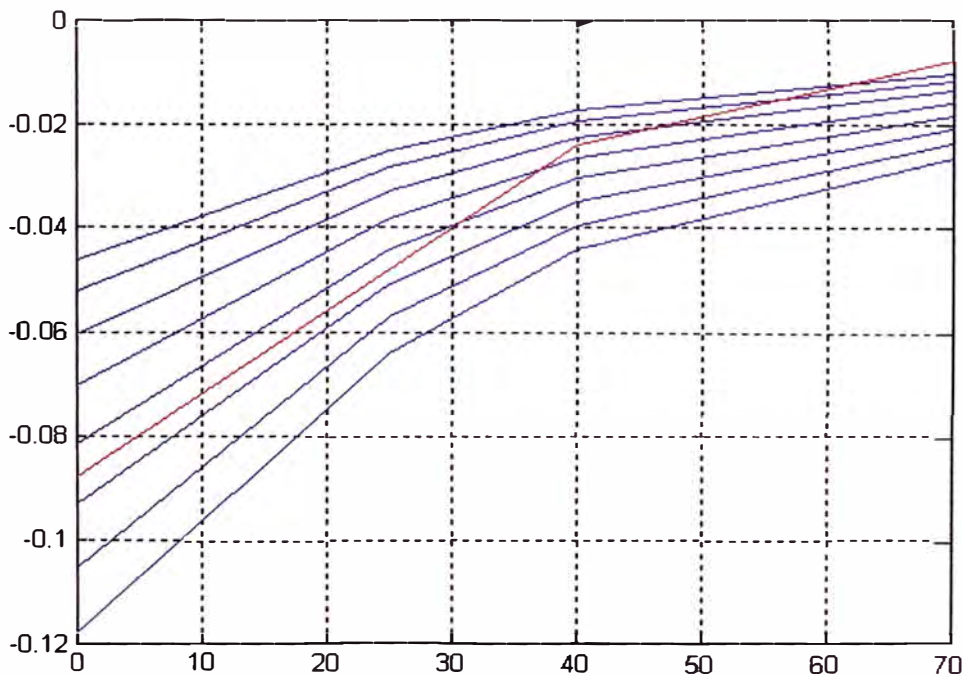
R = 25cm

$E_s = 1304 \text{ kg/cm}^2$

R (cm)

PARA EL TRAMO 91+100

Deflexiones
(cm)



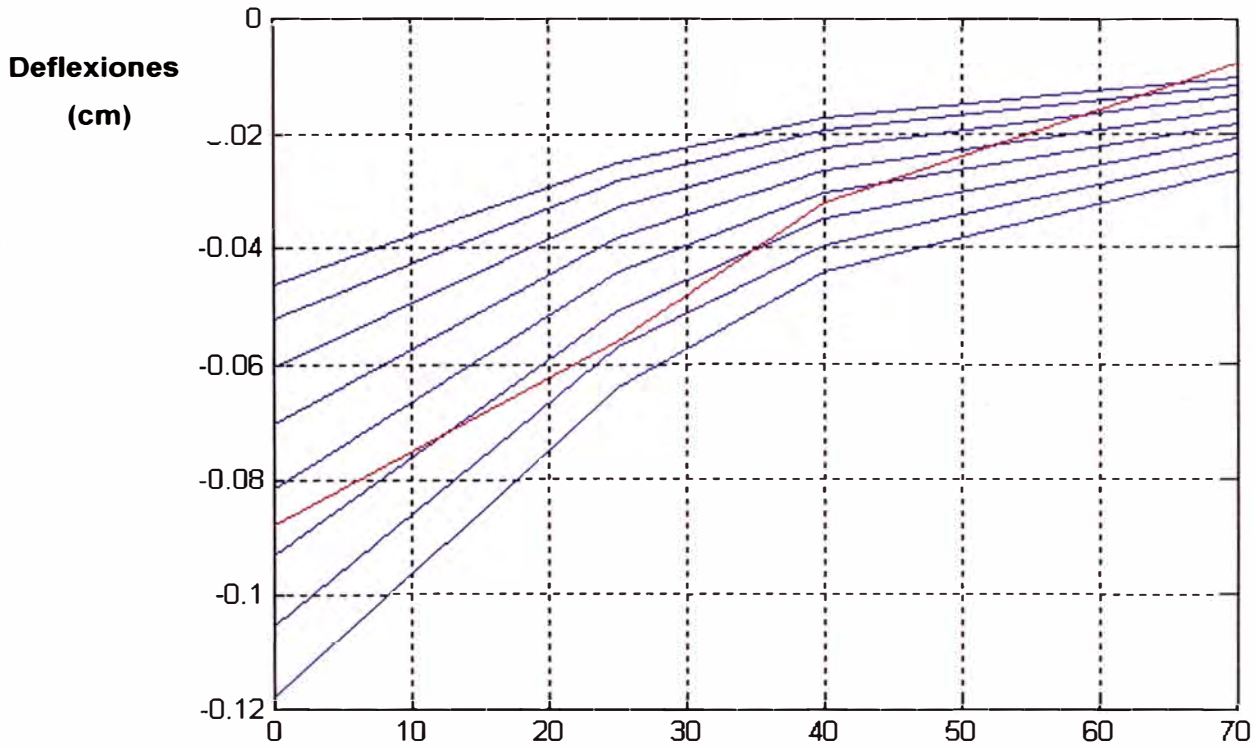
Cumple:

R = 30cm

$E_s = 949 \text{ kg/cm}^2$

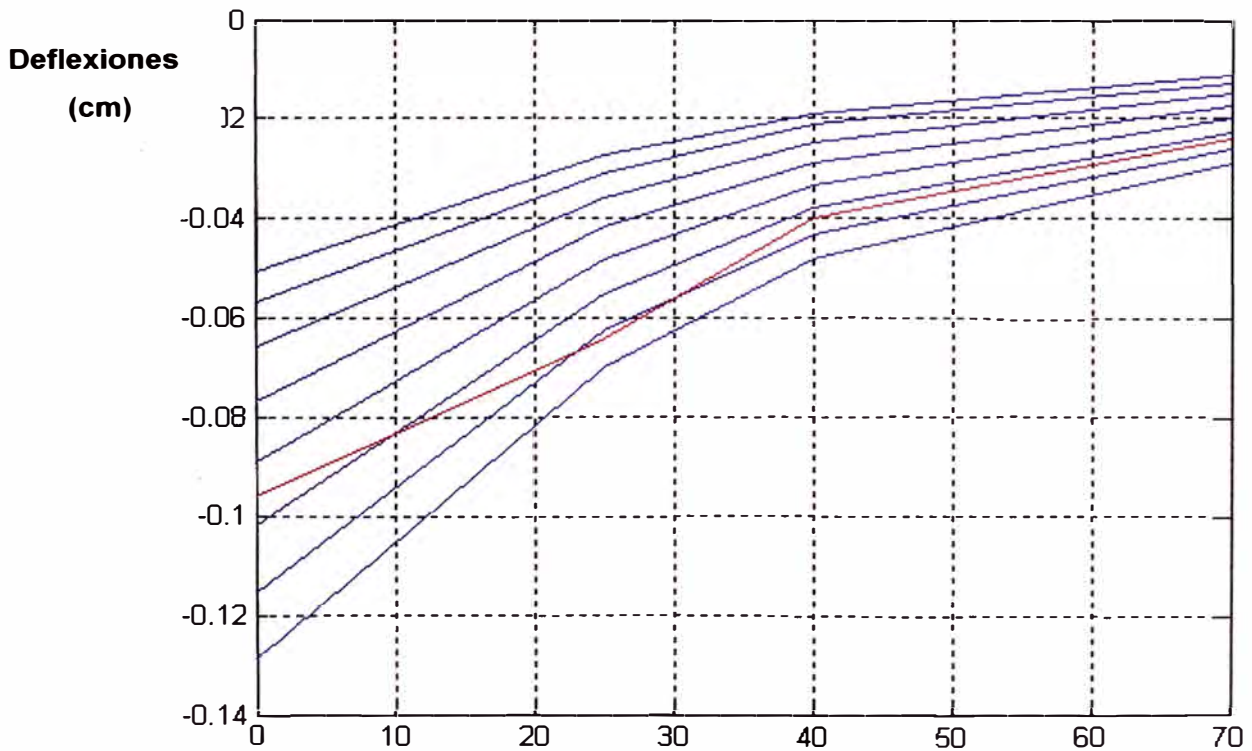
R (cm)

PARA EL TRAMO 91+200



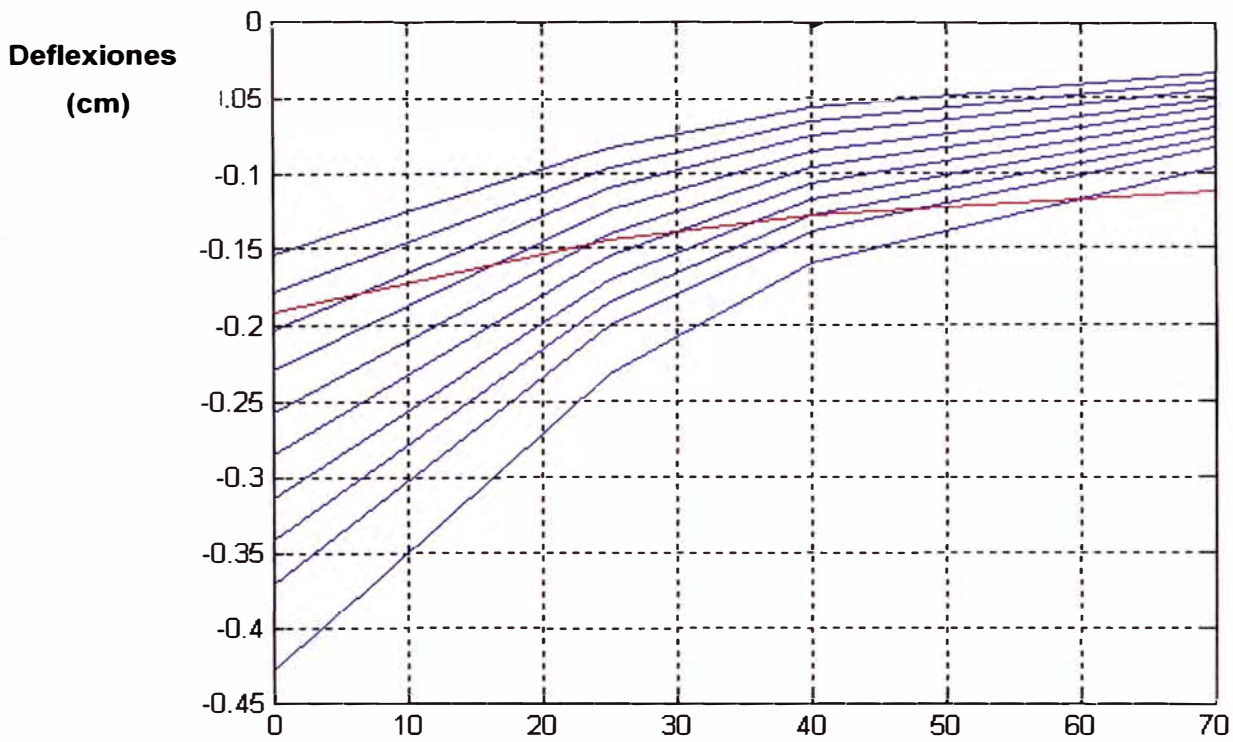
Cumple: $R = 30\text{cm}$
 $E_s = 829\text{ kg/cm}^2$ **R (cm)**

PARA EL TRAMO 91+300



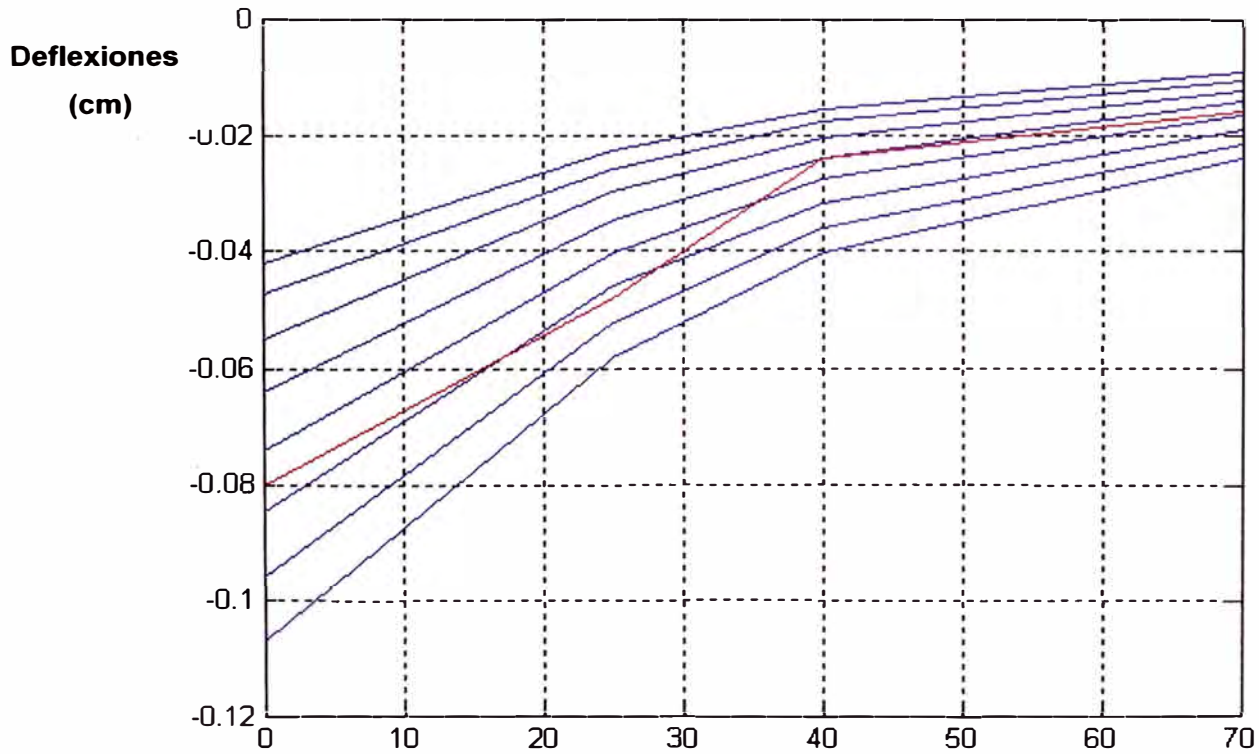
Cumple: $R = 30\text{cm}$
 $E_s = 760\text{ kg/cm}^2$ **R (cm)**

PARA EL TRAMO 91+400



Cumple: $R = 35\text{cm}$
 $E_s = 336\text{ kg/cm}^2$ **R (cm)**

PARA EL TRAMO 91+500



Cumple: $R = 30\text{cm}$
 $E_s = 912\text{ kg/cm}^2$ **R (cm)**

ANEXO 4

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO
CARRETERA CAÑETE -YAUYOS- CHUPACA KM 84+600 - KM 85+000**

Datos Generales :

A (radio)	10.78	cm
HC (cm) Espesor de Pavimento	17	cm
Carga de Ensayo (Kg)	2050	kg
Presión de Inflado (kg/cm2)	5.62	kg/cm2
Coefficiente de Poisson u	0.4	
N	10	
H/Lo	10	

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				Espesor (m)	Temperat. (°C)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				PARAMETROS DEL MODELO DE HOGG							
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}			Deflexiones(x10 ⁻² mm)				R	D _R /D ₀	R _s (cm)	L ₀ (cm)	S ₀ /S	E ₀ (kg/cm ²)	E* (kg/cm ²)	E* / E ₀
							D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀								
84+600	6	12	14	18	0.01	54.0	72	48	24	16	25	0.667	36.6	17.7	0.76	670	2,437	3.64
84+700	4	6	8	10	0.01	56.0	40	24	16	8	40	0.400	32.4	15.1	0.71	1,322	2,270	1.72
84+800	6	8	12	14	0.01	57.0	56	32	24	8	25	0.571	29.3	12.9	0.65	1,011	888	0.88
84+900	8	12	18	20	0.01	60.0	80	48	32	8	40	0.400	32.4	15.1	0.71	661	1,135	1.72
85+000	8	10	14	16	0.01	61.0	64	32	24	8	70	0.125	30.3	13.6	0.67	867	937	1.08

ANEXO 5

PLANO CLAVE

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

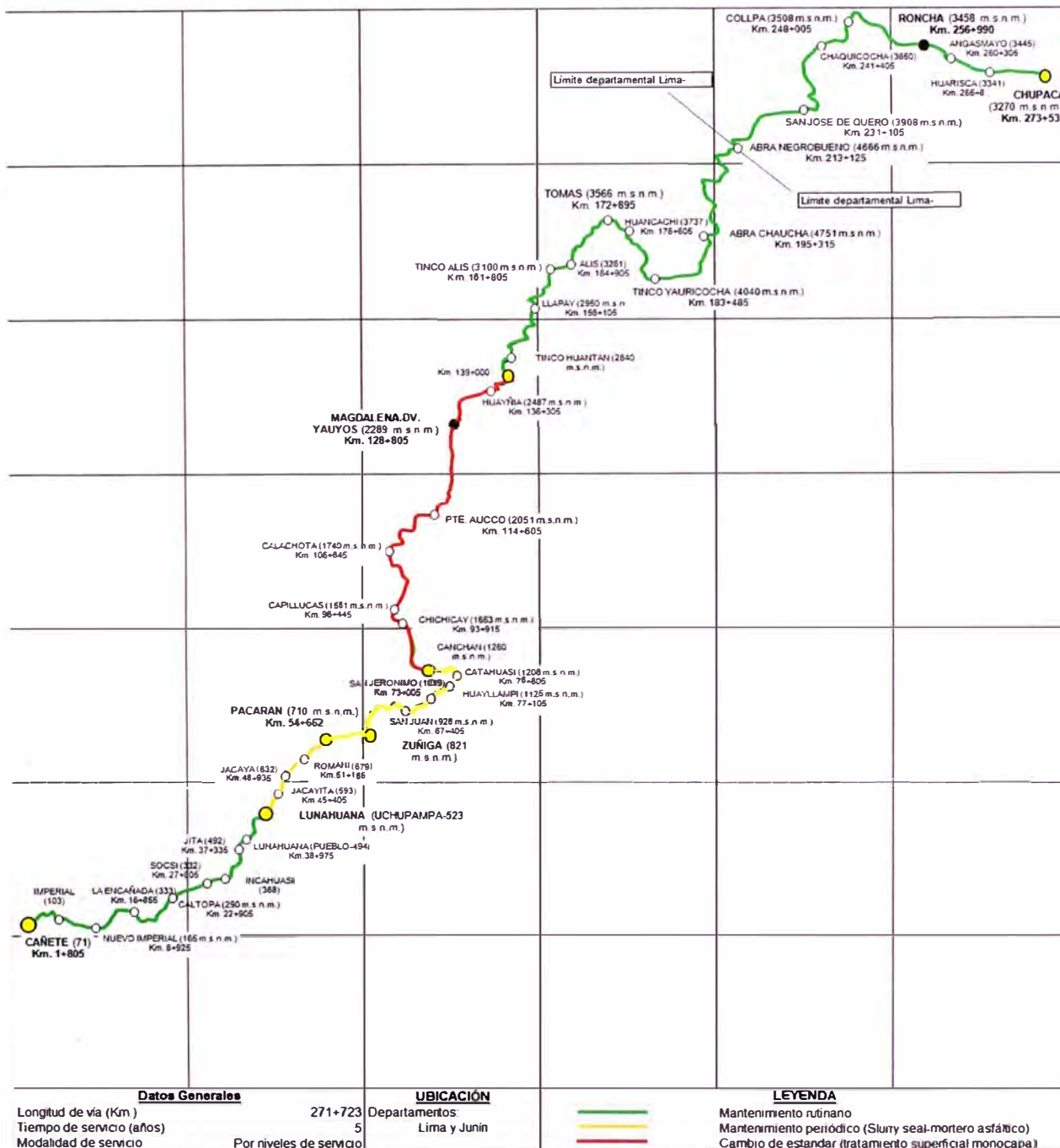


FIGURA N° 1.2. PLANO CLAVE DE LA RUTA 22

(Fuente: MTC - Provias Nacional – Proyecto Perú)

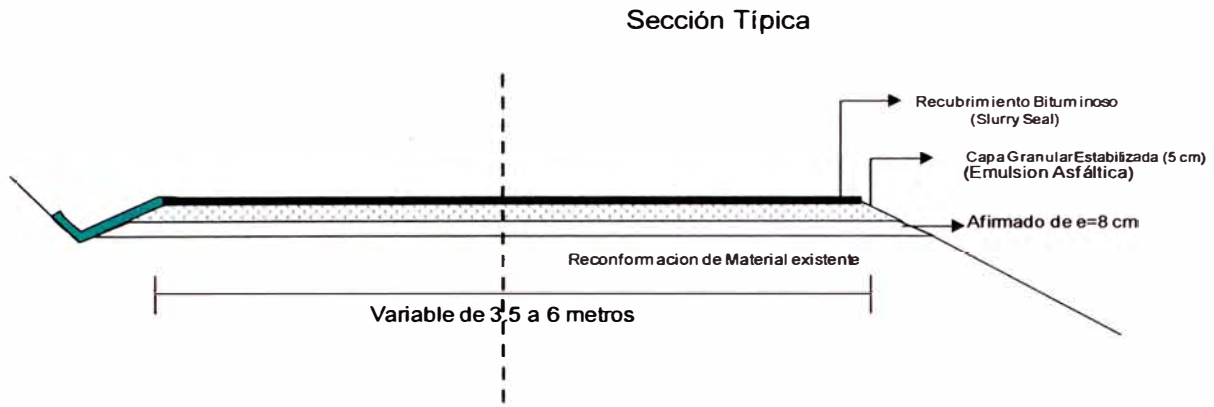


FIGURA 1.3 SECCIÓN TÍPICA DE ZÚÑIGA A CATAHUASI.

Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras

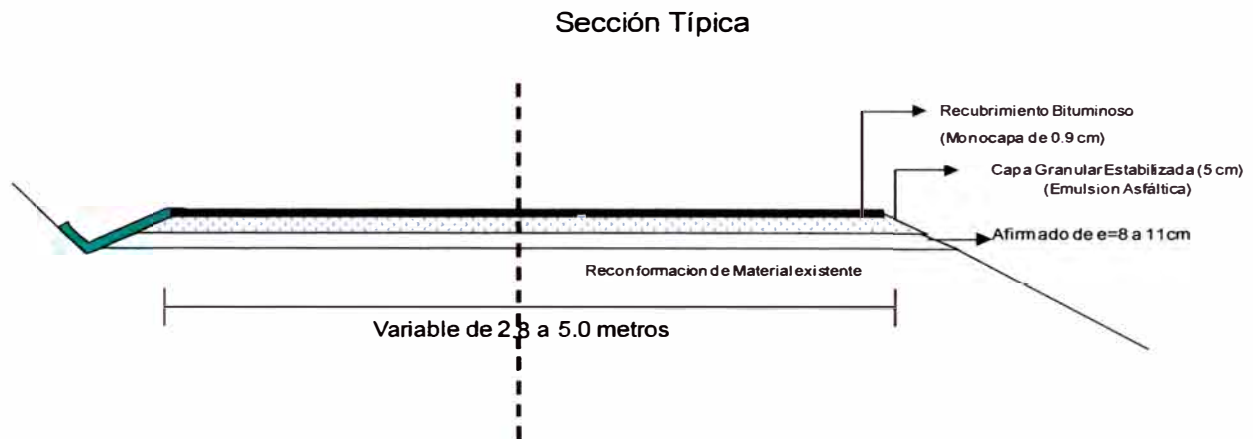


FIGURA 1.4 SECCIÓN TÍPICA DE CATAHUASI A CALACHOTA.

Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras



FIGURA Nº 4.1 UBICACIÓN DEL EJE POSTERIOR DEL VOLQUETE EN EL PUNTO MARCADO.



Figura N° 4.2 LECTURA DE LAS DEFLEXIONES CON DIAL.



FIGURA N° 4.3 TOMA DE TEMPERATURA AL PAVIMENTO.



Figura N° 4.4 MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA CARPETA.



FIGURA N° 4.5 MEDICIÓN DEL AHUELLAMIENTO