

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA
CAÑETE – YAUYOS – CHUPACA
CON VIGA BENKELMAN MÉTODO MATEMÁTICO
TRAMO km. 99 + 000 - km. 104 + 000**

INFORME DE SUFICIENCIA

***Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL***

JORGE LUIS REATEGUI RIOS

Lima – Perú

2009

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
RESUMEN.....	3
LISTA DE CUADROS.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO I	
GENERALIDADES.....	11
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Tramo Evaluado Km. 64+000 – Km. 69+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.....	21
2.2.5 FWD.....	21
2.2.6 KUAB – FWD.....	22
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.....	28
3.3.2 Modelo de Hogg.....	30
3.3.3 Modelo de Westergaard.....	33
3.3.4 Modelos bicapas.....	33
3.3.5 Modelos multicapas.....	33
3.4 Métodos de Solución de Pavimentos.....	33
3.4.1 Fórmula de Boussinesq.....	33
3.4.2 Fórmula de Westergaard.....	34
3.4.3 Fórmula de Palmer y Baber.....	34
3.4.4 Fórmula de Odemark.....	35
3.4.5 Método de Elementos Finitos.....	36

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN AL TRAMO KM. 64+000 – KM. 69+000.....	37
4.1. Aplicación de la Viga Benkelman.....	37
4.2. Aplicación con el Método de Hogg.....	39

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	45
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS.....	53

RESUMEN

El presente informe de suficiencia se desarrolló con la finalidad de aportar datos estándares de deflexiones en el monitoreo de los trabajos de mantenimiento y conservación de carreteras, respecto al comportamiento en el tiempo de la superficie de rodadura, para el tramo ubicado entre las progresivas Km. 99+000 al Km.104+000 de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca.

Provías Nacional viene invirtiendo en soluciones de bajo costo para mejorar la transitabilidad e incentivar el aumento de la demanda de tráfico en la Carretera Cañete – Yauyos - Chupaca; es importante que se realicen mediciones de deflexiones mediante la Viga Benkelman que permita medir las condiciones de serviciabilidad y seguimiento durante la vida útil de la vía, más aún cuando se carecen de valores estándar de deflexiones para este tipo de solución básica que se viene implementando.

La Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, tramo Km. 99+000 al Km. 104+000 se caracteriza por presentar una condición de transitabilidad regular, en general debido a los anchos de plataforma que varían entre 3.5 a 5.0 m.

Con las deflexiones obtenidas de campo se empleará un modelo matemático y mediante el uso de programas de cómputo se determinará los valores de L_0 , E_0 y CBR, que conllevará al estado en que se encuentra el tramo asignado.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1 Datos de Salida de Campo.....	38
Cuadro 5.1 Deflexiones corregidas por relación de Brazo 4:1.....	45
Cuadro 5.2 Determinación de R y DR/D _o	46
Cuadro 5.3 Deflexiones Teóricas vs Deflexiones de Campo.....	48
Cuadro 5.4 Valores de L ₀ , E ₀ y CBR Obtenidos de las iteraciones.....	49
Cuadro 5.5 Rangos de valores de CBR.....	49

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I:

Figura N° 1.01: Mapa de Ubicación del Corredor Vial N°13.....	12
Figura N° 1.02: Plano Clave del Corredor Vial N°13.....	13
Figura N° 1.03: Perfil estratigráfico de Tramo asignado 99+000 al 104+000.....	17
Figura N° 1.04: Tramo a realizar la evaluación estructural.....	17

Capítulo II:

Figura N° 2.01: Deflectógrafo Viga Benkelman.....	19
Figura N° 2.02: Equipo Dynaflec Transportado.....	20
Figura N° 2.03: Equipo Road Rater.....	20
Figura N° 2.04: Equipo RDD	21
Figura N° 2.05: Equipo FWD en prueba.....	21
Figura N° 2.06: Equipo KUAB FWD.....	22

Capítulo III:

Figura N° 3.01: Esquema de la Viga Benkelman.....	23
Figura N° 3.02: Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.....	24
Figura N° 3.03: Esquemmatización del proceso de medición de la Viga Benkelman.....	25
Figura N° 3.04: Modelos Mecánicos para materiales Viscoelásticos.....	27
Figura N° 3.05: Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada.....	28
Figura N° 3.06: Modelo de Hogg.....	32
Figura N° 3.07: Modelos Westergaard.....	32
Figura N° 3.08: Modelo multicapas.....	33
Figura N° 3.09: Representación de un masivo semi-infinito.....	33
Figura N° 3.10: Multicapa propuesto con la formula de Palmer y Barber generalizada.....	34

Figura N° 3.11: Multicapa propuesto con la formula de Odemark.....35
Figura N° 3.12: Modelo de elementos finitos.....36

Capítulo IV:

Figura N° 4.01: Trabajo de Salida de Campo – Medición de Deflexiones con Viga Benkelman.....37
Figura N° 4.02: Procedimiento de Medición de Deflexiones con Viga Benkelman.....38
Figura N° 4.03: Diagrama de Flujo Programa Ploteador.....40
Figura N° 4.04: Diagrama de Flujo Programa Integra.....40
Figura N° 4.05: Diagrama de Flujo Programa “F”.....41
Figura N° 4.06: Diagrama de Flujo Bisección.....42
Figura N° 4.07: Diagrama de Flujo E_043
Figura N° 4.08: Diagrama de Flujo Cálculo Deflexiones Teóricas.....44

Capítulo V:

Figura N° 5.09: Gráfica $f(L_0)$ vs Cálculo de L_047
Figura N° 5.10: Gráfica de Deflexiones teóricas vs Deflexiones de Campo (Progresiva 100+500).....48

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials.
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation.
A.S.T.M.	American Society for Testing and Materials.
AYESA	Asociación Aguas y estructuras.
CBR	California Bearing Ratio
CONREVIAl	Consortio de Rehabilitación Vial.
D_v	División.
FE	Factor equivalente.
FEM	Métodos de Elementos Finitos.
FWD	Falling Weight Deflectometer.
IMD	Índice Medio Diario.
LVDT	Transformador Diferencial Variable Lineal.
M.D.S.	Máxima Densidad Seca.
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones.
N.T.P.	Norma Técnica Peruana.
O.C.H.	Óptimo Contenido de Humedad.
PERT	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes.
PROMCEPRI	Promoción de Concesiones Privadas.
RDD	El Deflectometer dinámico del balanceo.
S.U.C.S.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
TSB	Tratamiento Superficial Bicapa.
WASHO	Western Association of State Highways Officials.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	:	Área.
R	:	Radio desde el CG de las llantas hasta donde se mide D_c .
D_t	:	Deflexión teórica.
D_c	:	Deflexión de Campo.
D_r	:	Deflexión a una distancia "r" y profundidad 0.
E	:	Módulo de Young.
E_s	:	Módulo de elasticidad del masivo semi-infinito.
E^*	:	Módulo de elasticidad del Pavimento.
E_0	:	Módulo de elasticidad de la Subrasante.
F	:	Fuerza.
KN	:	Kilo Newton.
L	:	Longitud.
MPa	:	Mega Páscales.
M_r	:	Módulo Resiliente .
Msnm	:	Metros sobre nivel del mar.
P	:	Carga.
SC-SM.	:	Arena arcillosa y limosa.
q_0	:	Presión Uniforme.
σ	:	Esfuerzo .
ϵ	:	Alargamiento unitaria.
δ	:	Desplazamiento.
μ	:	Coeficiente de Poisson.
λ	:	Viscosidad.
t	:	Tiempo.
J_0	:	Funciones de Bessel de primera especie y orden 0.
J_i	:	Funciones de Bessel de primera especie y orden i.
σ_d	:	Es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en un ensayo no confinado (kg/cm^2).
∇	:	Operador Nabla.
ϵ_r	:	Deformada Recuperable.

INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, como parte del Curso de Titulación del presente año 2009 ha programó el Proyecto de Diseño no Tradicional para Pavimentos de Bajo Volumen de Tránsito, enmarcado en el Convenio UNI-MTC para los trabajos de Monitoreo de la Carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, tramo Km. 99+000 al Km. 104+000, cuyo objetivo es identificar, evaluar, analizar y dar soluciones a los problemas de ingeniería que se presenten.

Evaluar las condiciones estructurales del pavimento, mediante la medición de deflexiones con el Deflectógrafo conocido como “Viga Benkelman”, y la aplicación de un método matemático para estimar esfuerzos y deformaciones del mismo. Comparar las deflexiones obtenidas en campo con las deflexiones estimadas con un modelo matemático. Dar un alcance teórico de la Teoría Multicapa como predecesora de los modelos matemáticos para la evaluación estructural de pavimentos. Determinar criterios de falla del pavimento.

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

Capítulo 1: *Generalidades*.- Este capítulo abarca los detalles de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca, así como: sus antecedentes y la situación actual de la misma. Luego procederemos a la identificación del sub tramo asignado para la evaluación estructural del mismo.

Capítulo 2: *Estado del Arte*.- En este capítulo se desarrollan conceptos básicos de sistemas de análisis de suelos, así como también los diversos tipos de ensayos no destructivos.

Capítulo 3: *Marco Teórico*.- En este capítulo se presenta el procedimiento para realizar la medición de deflexiones mediante el uso de la Viga Benkelman, así

como una descripción de los modelos de análisis para los suelos y finalmente modelos matemáticos para determinar esfuerzos y deformaciones de los suelos.

Capítulo 4: *Aplicación al Tramo Km.99+000 al Km.104+000.*- En este capítulo se presenta la aplicación de la Viga Benkelman al tramo asignado, así como la aplicación del modelo matemático para determinar los parámetros (L_0 y E_0).

Capítulo 5: *Análisis de Resultados.*- En este capítulo se analizarán los valores obtenidos como resultado de la evaluación desarrollada en el capítulo IV, los cuales permitirán llegar conclusiones y recomendaciones en relación al estado de la vía.

CAPITULO I.- GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

La Carretera Cañete – Lunahuaná – Pacarán – Zúñiga - Dv. Yauyos – Roncha - Chupaca, con una longitud de 281.73Km se encuentra entre los departamentos de Lima y Junín, abarcando las provincias de Cañete, Yauyos y Chupaca.

La construcción de dicha carretera se inició por tramos desde el año 1920 durante el gobierno de Sr. Augusto B. Leguía, prosiguiendo los trabajos hasta el año 1930. Posteriormente, durante el gobierno de Manuel Prado Ugarteche se desarrolla la carretera desde Cañete hasta Yauyos. Los trabajos en ese tramo se iniciaron en el año 1940, inaugurándose en el año 1944. En el año 1954 a través del Ministerio de Fomento se retoma la construcción en el tramo faltante entre Yauyos y Tomas, culminándose esos trabajos en el año 1957.

Durante mucho tiempo en esta vía no se realizaron trabajos de mantenimiento ni rehabilitación, presentándose problemas de transitabilidad y funcionalidad como vía alterna a la Carretera Central. En respuesta a este problema en el año 2003, el Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) bajo la dirección de PROVIAS NACIONAL encargó la elaboración del Estudio de Pre inversión a Nivel de Perfil de la Carretera Ruta 22, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca al consultor Ing. Floriano Palacios León con contrato de Estudio N°0412-2003-MTC/20 del 28.11.2003 obteniéndose la aprobación el 22.11.2004. Posteriormente con oficio N° 1411-2004-EF/68.01 se autoriza la elaboración del Estudio de Factibilidad del Proyecto Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera a cargo del Consultor AYESA – ALPHA CONSULT en el año 2005.

En el año 2007 la Carretera Cañete – Dv. Yauyos – Chupaca se inserta en el “Proyecto Perú” que es un programa bajo responsabilidad de PROVIAS NACIONAL creado mediante Resolución Ministerial N°223-2007-MTC-02, el cual está diseñado para mejorar las vías de integración de corredores económicos,

con el fin de elevar el nivel de competitividad de las zonas rurales en la Red Vial Nacional, Departamental y Vecinal. Éste programa aspira establecer un sistema de contratación de las actividades de 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.



Figura N° 1.01: Mapa de Ubicación del Corredor Vial N°13

Fuente: Provias Nacional

Con fecha 27 de Diciembre de 2007 se realiza la firma del contrato N°288-2007-MTC/20, donde el CONSORCIO GESTION DE CARRETERAS, asume las obligaciones de Contratista Conservador para realizar el Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Cañete–Lunahuaná-Pacarán-Chupaca y Rehabilitación del Tramo Zúñiga-Dv. Yauyos - Ronchas. Dicha conservación se viene realizando mediante el mejoramiento de la vía a nivel de solución básica consistente en la colocación de un Tratamiento Superficial Monocapa sobre una base estabilizada.

Debido a que la actual capacidad vehicular de la Carretera Central está siendo sobrepasada, esta carretera se proyecta como ruta alterna, con lo que se aligerará el tránsito vehicular y disminuirá el tiempo de viaje entre Lima (Cañete) y Huancayo, además de establecer la integración entre las localidades que atraviesa la carretera tales como: San Vicente de Cañete, Capillucas, Calachota, Tinco Huantan, Llapay, Alis, Tomas, Tinco Yauricocha, San Jose de Quero, Collpa, Roncha y Chupaca.

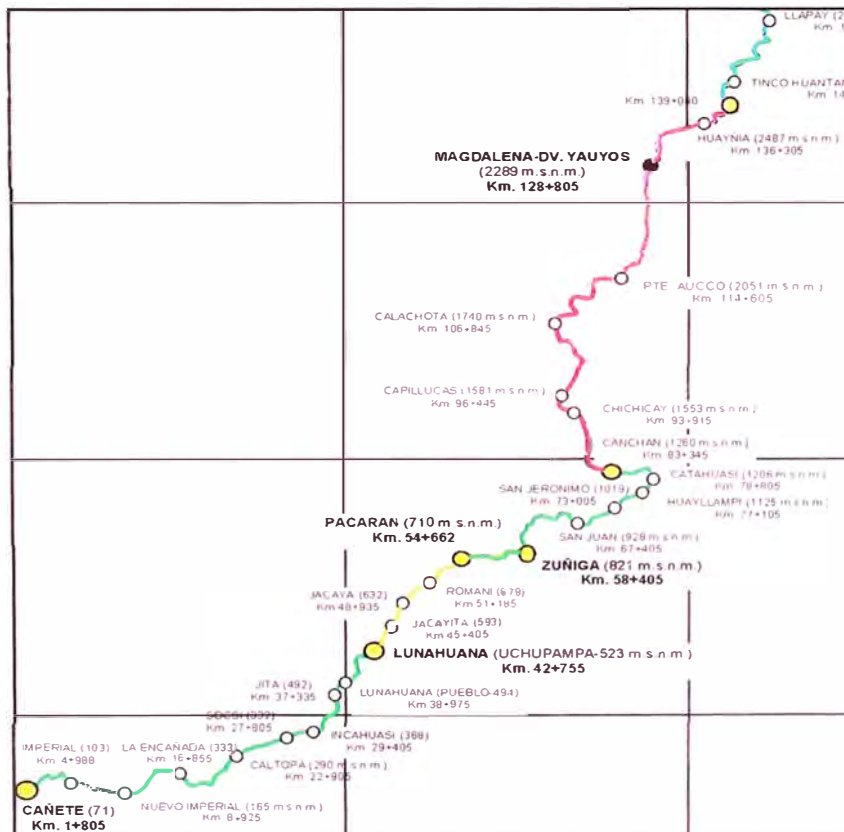


Figura N° 1.02: Plano Clave del Corredor Vial N°13 (Fuente: Provías Nacional)

CARACTERÍSTICAS

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

Lugar de inicio: CAÑETE, Km. 1+805.

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

Longitud: 271.73 Km.

Corredor Vial N°13.

Ruta Nacional: 024.

Carretera de 3er Orden.

Tramo evaluado por el Curso de Titulación:

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

Descripción de la zona de estudio

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

Clima

El tramo de carretera evaluado para el presente informe corresponde a la región Yunga, según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal (expuesta en su obra "Geografía del Perú"). Para lo cual corresponde las siguientes temperaturas típicas:

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

ESTADO SITUACIONAL

a) 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.

b) 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.

c) 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, etc) hacia otros países, considerando que en la actualidad el Perú viene participando en tratados de libre comercio.

d) 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.

e) 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 Zúñiga a Catahuasi (59+000 – 79+000).
- Tratamiento Superficial Monocapa de Catahuasi a Calachota (79+000 – 104+000).

1.2 Tramo Evaluado Km.99+000 – 104+000

Este comprendido entre las localidades de Capillucas y Calachota, se desarrolla en la margen izquierda del Río Cañete, siguiendo un corte a media ladera y desarrollándose sobre una topografía del tipo accidentada. Con una altitud promedio de 1660 msnm. y con temperaturas que van desde los 16°C, hasta los 27°C, la temporada de lluvias es de diciembre a marzo y tiene precipitaciones que oscilan entre los 100 a 150 mm anuales. Los procesos geodinámicos existentes son esporádicos.

La sección de la plataforma es variable entre 3.5 m. y 6 m. sin cunetas laterales. En algunos tramos críticos el ancho de la vía es de 3.0 m. a 3.50 m., pero en longitudes menores de 100m. La solución aplicada en su mayoría para el tramo evaluado es tratamiento superficial monocapa, solo en el tramo 100+500 al 101+450 se ha aplicado slurry sobre la monocapa existente. El Valor de CBR de diseño es 20, sus Ejes Proyectos: 8.4E+04(EAL 2009-2013). El contratista es Consorcio Gestión de Carreteras y el Supervisor es la Unidad Zonal de Lima de PROVIAS NACIONAL

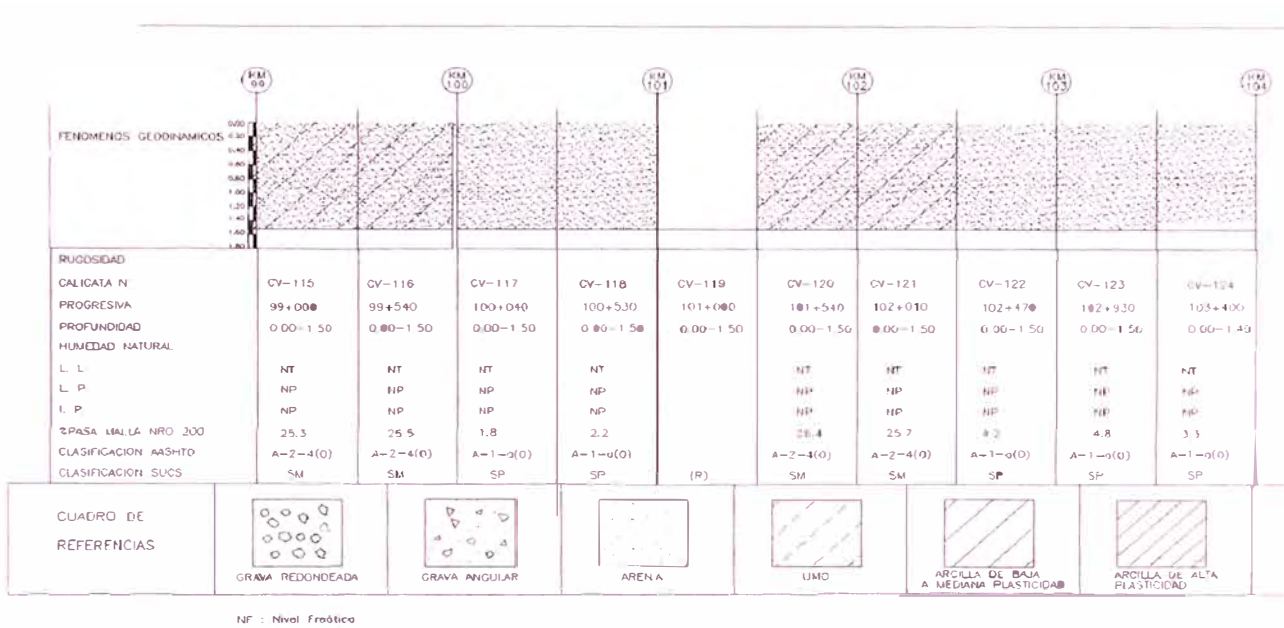


Figura N° 1.03: Perfil estratigráfico de Tramo asignado 99+000 al 104+000

(Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras)



Figura N° 1.04: Tramo a realizar la evaluación estructural

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 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 Nº 2.01 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° 2.02 Equipo Dynaflec 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.

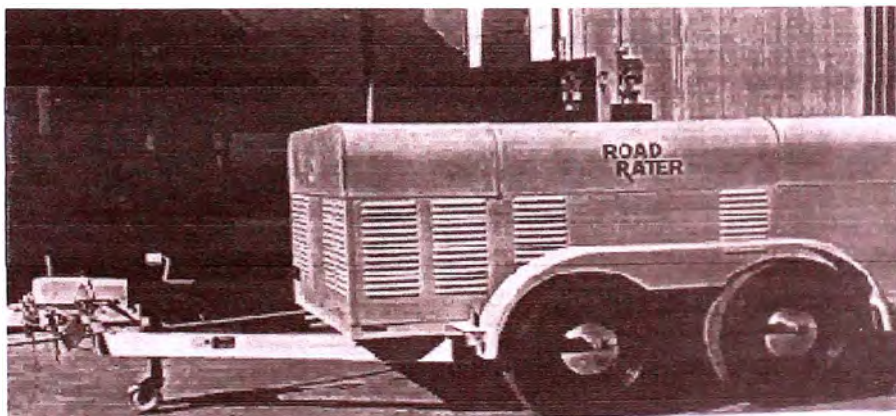


Figura N° 2.03. ROAD RATER

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° 2.04 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° 2.05 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° 2.06 Equipo KUAB - FWD

(Fuente: Internet,

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

CAPITULO III.- MARCO TEÓRICO

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

3.1 Viga Benkelman

El deflectómetro Benkelman funciona mediante el principio de palanca, es un instrumento completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la figura N° 3.01(a). A su vez la viga consta principalmente de dos partes. Un brazo móvil y un brazo fijo que giran sobre un pivote.

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

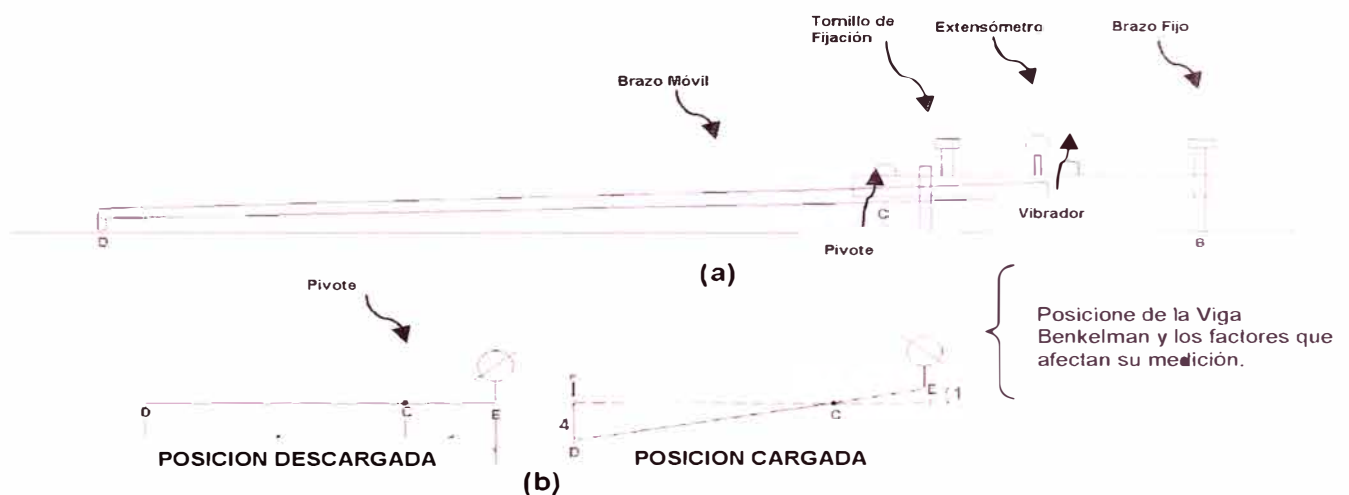


Figura N° 3.01 Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

METODOLOGIA DE MEDICION DE DEFLEXIONES CON VIGA BENKELMAN

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada 8200 kg. Previamente a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición, así como que la presión de las llantas

sea la requerida. Una vez localizado el lugar donde se realizará el ensayo (usualmente los puntos de medición se localizan en la mitad exterior de un carril), se coloca la llanta a usarse sobre el punto de manera tal que éste coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura N° 3.02 (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 N°3.02 (b)), se hace coincidir (las marcas de la viga con la varilla).

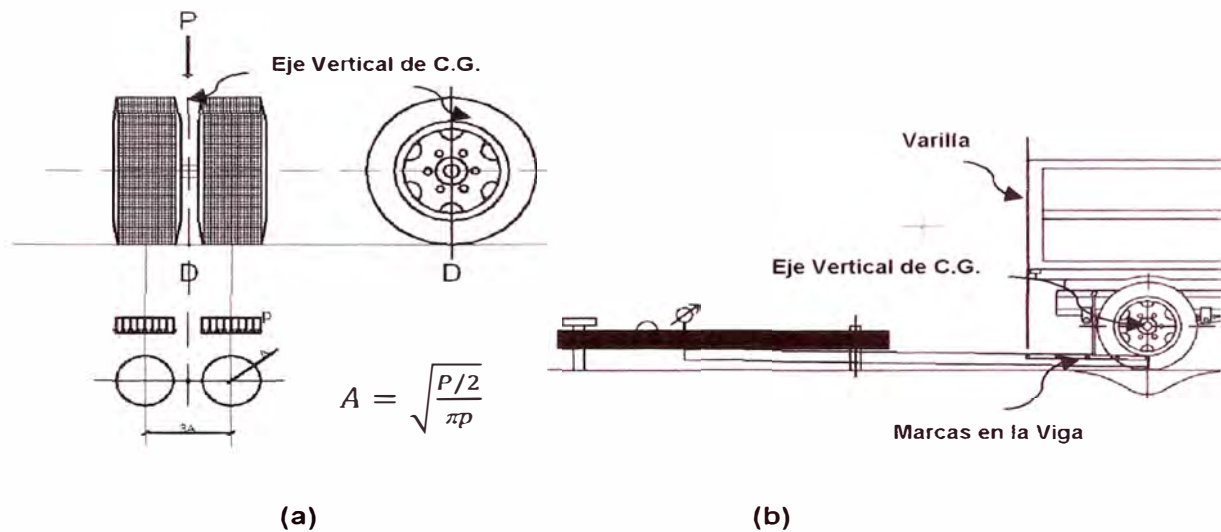


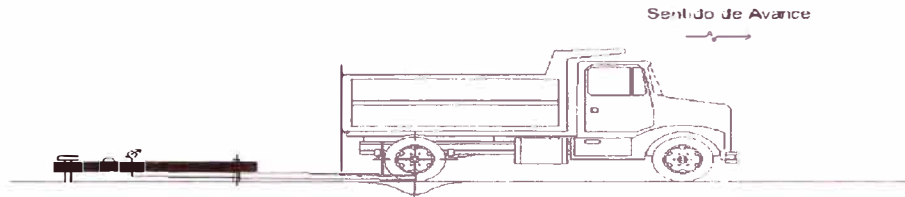
Figura N° 3.02. Configuración geométrica del sistema de carga en Ensayos de Viga Benkelman.

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

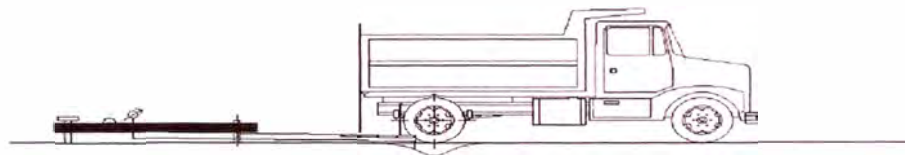
Como norma se realiza la primera marca adicional a una distancia tal que la deflexión que se obtenga en ese punto sea la mitad de la deflexión máxima. La segunda marca adicional se realiza al doble de la distancia de la primera marca adicional.

Una vez instalada la viga en el punto de medición haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial (ver figura N° 3.03 (a)), se verifica que ésta se

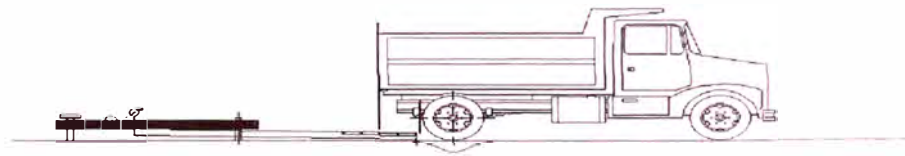
encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se pondrá el dial del extensómetro en cero, se activará el vibrador y mientras el camión se desplaza muy lentamente se procederá a tomar lecturas conforme la varilla vertical vaya coincidiendo con las marcas (figuras N°3.03 (b) y N° 3.03 (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 5.00m.), se efectuará una lectura más.



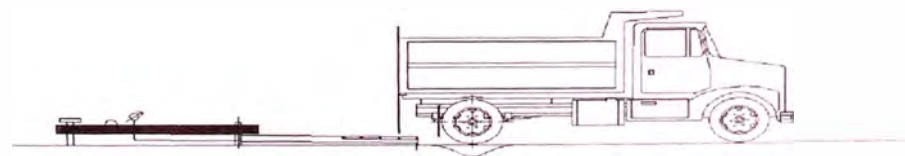
(a) Posición Inicial (D_0 =Deflexión Inicial)



(b) Posición a 25cm (D_{25}).



(c) Posición a 50cm (D_{50}).



(d) Posición a 100cm (D_{100}).

Figura N° 3.03 Esquematación del proceso de medición de la Viga Benkelman

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

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

EQUIPO REQUERIDO

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

- a) Deflectómetro Viga Benkelman, con relación de brazos 1:4
- b) Extensómetro con dial indicador de divisiones cada 0.01 mm
- c) Camión cargado, cuyo eje tenga un peso de 18000 libras y un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi.
- d) Vehículo auxiliar para transportar al personal y equipo (camioneta).
- e) Balanza portátil para pesaje del camión, con capacidad de 10 toneladas.
- f) Accesorios de medición como: Cinta métrica de 3 m, plumones de punta gruesa, plomada, destornillador, alicates, hojas de campo, lápices, señales de seguridad, termómetro, cincel, martillo, varilla de metal o madera de 2m, alambre de amarre.

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

Modulo resilente (Mr)

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

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.01)$$

Relación 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.

Modulo de elasticidad (E)

Está asociado directamente con los cambios de longitud que experimenta el pavimento. Cuando está sometido a la acción de esfuerzos de tracción o de compresión.

Peso unitario

Es el peso por unidad de volumen

CBR

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (PSI) 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 grado de temperatura. También llamado dilatabilidad.

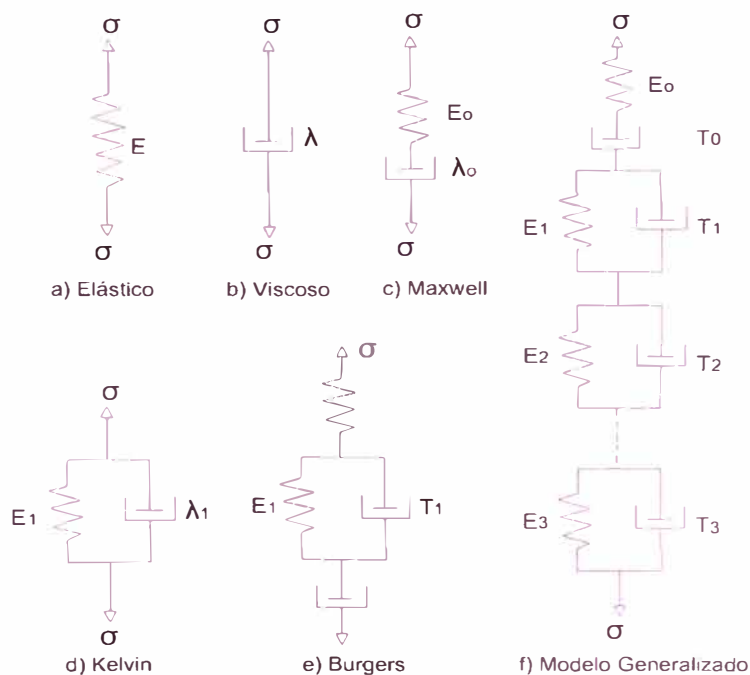


Figura N° 3.04: Modelos Mecánicos para materiales Viscoelásticos

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 en la figura N°3.04.

3.2.2 Modelo Básico

Un material elástico se caracteriza por un resorte, según lo indicado en Figura N° 3.04 (a), y obedece la ley de Hooke, y la tensión es proporcional a la deformación:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.02)$$

Un material viscoso es representado por un amortiguador hidráulico, según lo indicado en figura N° 3.04 (b), y obedece la ley de Newton, según la cual la tensión es proporcional a la variación de la deformación en el tiempo.

$$\sigma = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.03)$$

3.2.3 Modelo de Maxwell

Es la combinación de resorte y de amortiguador hidráulico en serie, tal como indica en la figura N° 3.04(c).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma t}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \quad (3.04)$$

3.2.4 Modelo de Kelvin

Es una combinación de resorte y amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la figura N° 3.04 (d). El resorte y el amortiguador hidráulico tienen la misma deformación. Se usó el subíndice 1 para indicar un modelo de Kelvin.

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.05)$$

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 N° 3.04 (e).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1} \right) \right] \tag{3.06}$$

3.2.6 Modelo Generalizado

La figura N° 3.05 (f) muestra un modelo generalizado que se pueda utilizar para caracterizar cualquier material viscoelásticos.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_i} \right) \right] \tag{3.07}$$

3.3 Modelos para determinar Esfuerzos y Deformaciones

3.3.1 Modelo de Boussinesq

Con el modelo de Boussinesq se puede determinar el desplazamiento o deflexión de un punto debido a cargas distribuidas verticales sobre el pavimento, generadas por dos llantas cuya área de contacto son dos circunferencias de radio “A”, como se muestra en la figura N° 3.05.

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

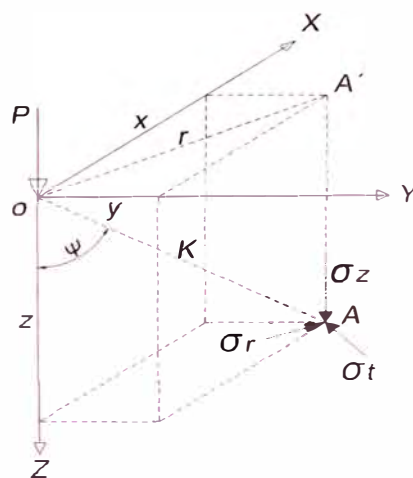


Figura N° 3.05 Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada

De la figura los N° 3.05 esfuerzos en el punto "A" pueden escribirse:

Esfuerzo Vertical:

$$\sigma_z = \frac{3P \cos^5 \Psi}{2\pi z^2} \quad (3.08)$$

Esfuerzo Radial:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi z^2} \left[3 + \cos^2 \Psi \sin^2 \Psi - (1 - 2\mu) \frac{\cos^2 \Psi}{1 + \cos \Psi} \right] \quad (3.09)$$

Esfuerzo Tangencial:

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

3.3.2 Modelo de Hogg

Este modelo caracteriza al pavimento 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:

$$D \cdot \nabla^2 \delta = \rho \tag{3.11}$$

Donde:
$$D_{ng} = \frac{E^* h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} \tag{3.12}$$

D_{ng} = 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 3.11 para $z=0$ tiene como solución:

$$D_{(R)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o) p \cdot a}{2(1 - \mu_o) E_o} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_o}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_o}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_o}\right)} dm \tag{3.12}$$

Donde:

$$\phi(m) = \frac{\text{Senhm} \cdot \text{Coshm} + \frac{m}{3 - 4\mu_o}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_o)^2}} \tag{3.13}$$

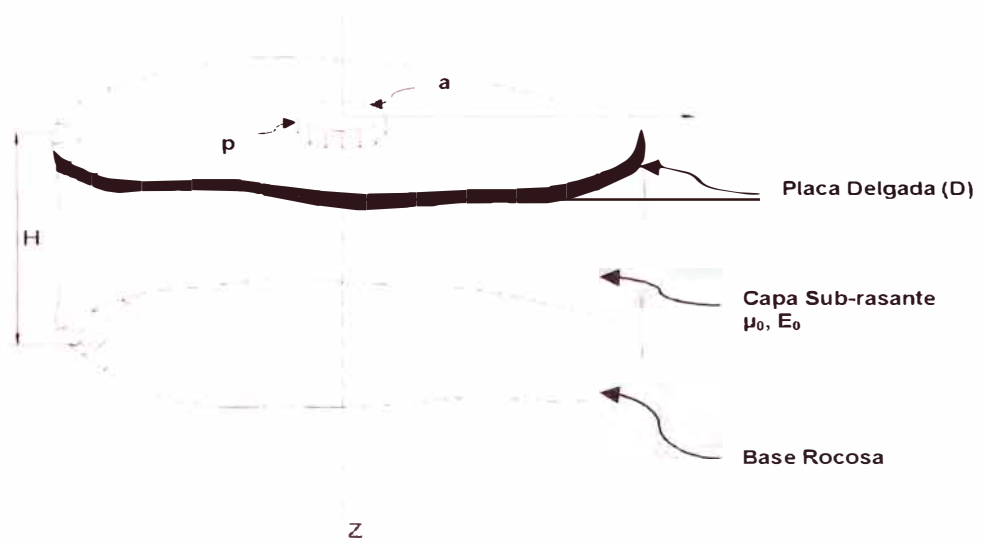


Figura N° 3.06 Modelo de Hogg

3.3.3 Modelo de Westergaard

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

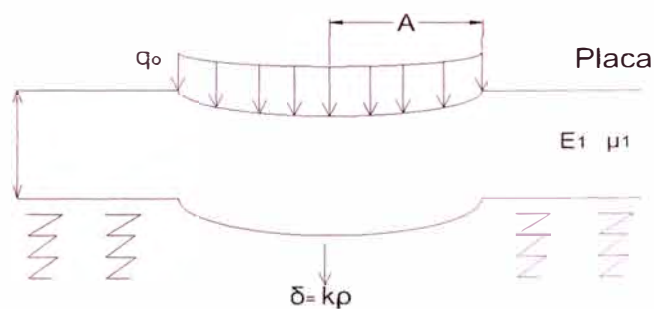


Figura 3.07 Modelo de Westergaard

$$D_{rig} = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (3.14)$$

3.3.4 Modelos bicapas

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

3.3.5 Modelos multicapas (Burmister, 1943)

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

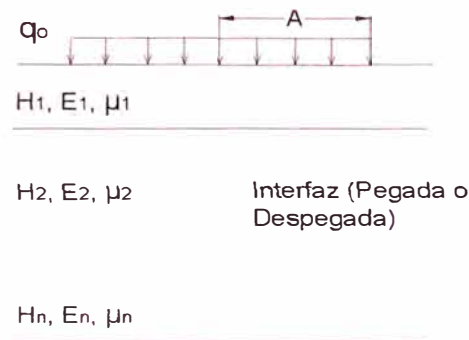


Figura N° 3.08 Modelo multicapas.

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 .

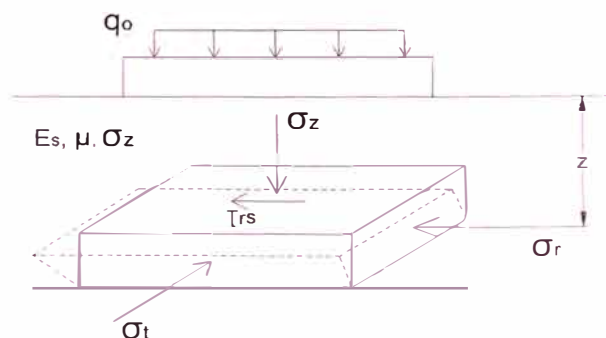


Figura 3.09 Representación de un masivo semi-infinito.

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

$$\delta = \frac{P}{\pi E_s} (1 + \mu^2) \frac{1}{K} \quad (3.15)$$

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

3.4.2 Formula 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 coeficiente de Poisson μ y su espesor h es constante.

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

$$D_{rig} = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (3.16)$$

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, aplicada sobre un área circular de radio "a".

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

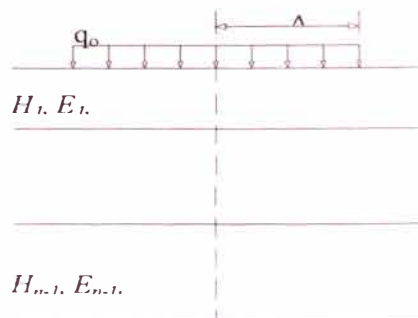


Figura N° 3.10 Multicapa propuesta con la fórmula de Palmer y Baber generalizada.

$$E_s = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (3.17)$$

La ecuación 3.16 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 aplicada sobre un área circular de radio a .

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

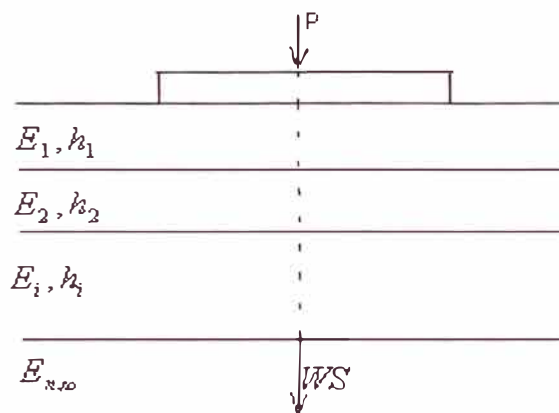


Figura N° 3.11 Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.18)$$

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 MICHIPAVE y EVERSTRESS FE que ayudan a resolver este problema.

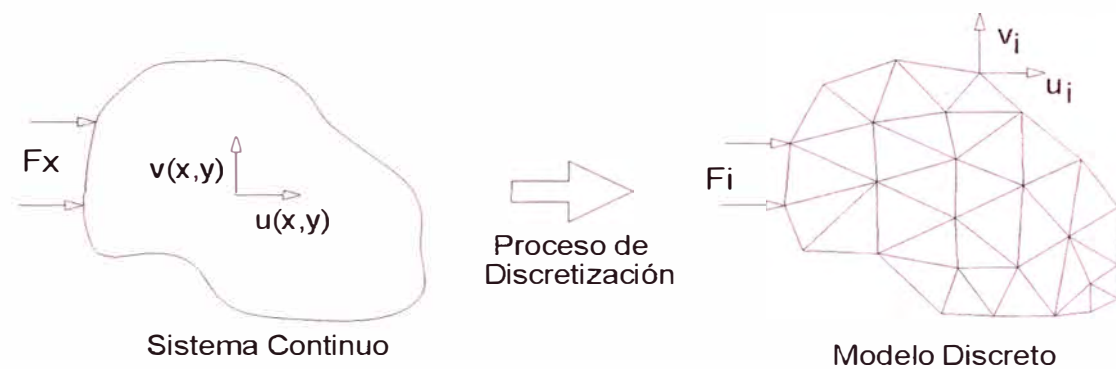


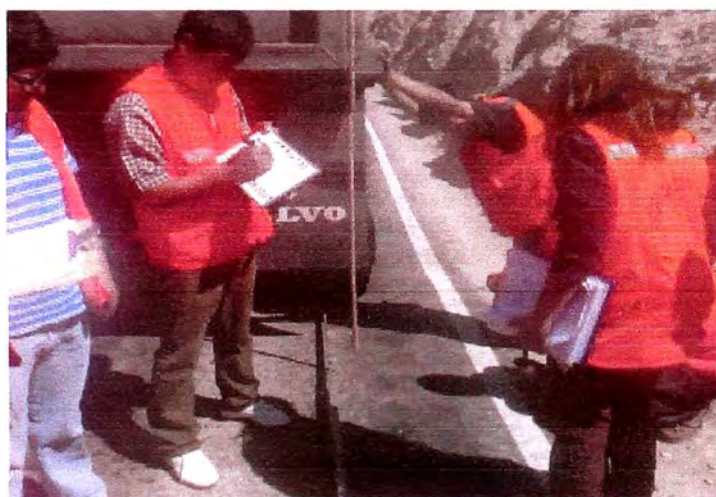
Figura N° 3.12. Modelo de Elementos Finitos

CAPITULO IV.- APLICACIÓN AL TRAMO KM. 99+000 – KM. 104+000

4.1 Aplicación de la Viga Benkelman.

Este el sub tramo asignado se desarrollo el trabajo de campo, el día sábado 03 de Octubre del presente año, y se realizó la lectura de 06 estaciones de evaluación, debidamente marcados para su fácil ubicación.

Para el desarrollo de la presente evaluación se organizó al personal asistente en diversas tareas según las indicaciones de las normas correspondiente (jaloneros, medidores de temperatura, medidores de ahuellamiento, veedores de lectura de extensómetro, entre otros) y las recomendaciones impartidas por parte de los ingenieros encargados del desarrollo del trabajo de campo. Así como también de se hizo necesario de los recursos e instrumentos para la toma de datos, como son: Volquete carga según la norma estándar, termómetro, comba, jalones, banderolas, Viga Benkelman, regla de aluminio, pizarra, almohadas para lectura de extensómetro, entre los más principales. Como se puede ver en las fotografías 4.01(a) y 4.01 (b), así como se muestra en la secuencia de la figura 4.02. En el anexo 01 se presenta mayores detalles de la salida de campo.



(a)



(b)

Figura N° 4.01 Trabajo de Salida de Campo – Medición de Deflexiones con Viga Benkelman.

A partir de las mediciones se tiene el cuadro Nro. 01 con los datos obtenidos del trabajo de campo.

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ pulg)				Espesor (m)
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}	
100+500	0.32	0.40	0.56	0.64	0.006
100+600	0.48	0.56	0.80	0.88	0.007
100+700	0.32	0.40	0.48	0.48	0.010
100+800	0.48	0.56	1.28	1.76	0.007
100+900	0.48	0.80	0.96	1.12	0.008
101+000	0.32	0.80	1.12	1.20	0.010

Cuadro 4.1 Datos de Salida de Campo

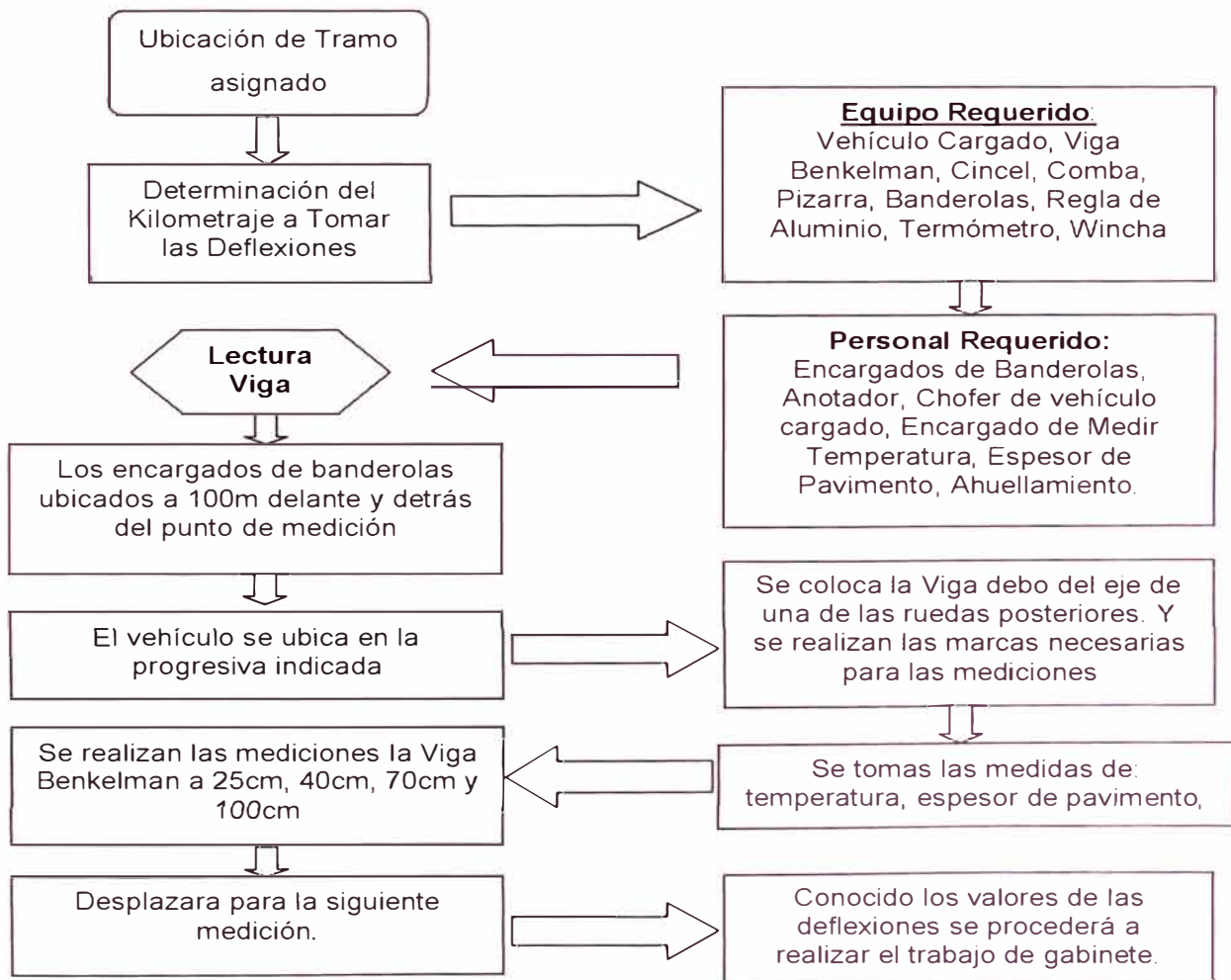


Figura N° 4.02 Procedimiento de Medición de Deflexiones con Viga Benkelman.

4.2 Aplicación de Modelo de Hogg

A fin de desarrollar el modelo matemático de Hogg, se aplicará fórmulas ya mencionadas anteriormente con programas elaborados y se estimará los valores requeridos.

$$D_{(R)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p.a}{2(1 - \mu_o)E_0} \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (3.12)$$

Para r=0

$$D_{(0)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p.a}{2(1 - \mu_o)E_0} \int_0^{\infty} \frac{J_0(0) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (4.01)$$

Por lo tanto al dividir Ecuación 3.12 y 4.01

$$\frac{D_{(R)}}{D_{(0)}} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm}{\int_0^{\infty} \frac{J_0(0) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm} = H(L_0)$$

$$H(L_0) - \frac{D_{(R)}}{D_{(0)}} = 0 \quad (4.02)$$

$$f(L_0) = H(L_0) - \frac{D_{(R)}}{D_{(0)}} \quad (4.03)$$

$$\phi(m) = \frac{\text{Senhm} \cdot \text{Coshm} + \frac{m}{3 - 4\mu}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu)^2}} \quad (3.13)$$

Determinar L_0 .

Graficaremos la Ecuación 4.03, asumiendo diversos valores de L_0 , y luego verificaremos entre que valores de L_0 la función $f(L_0)$ es cero.

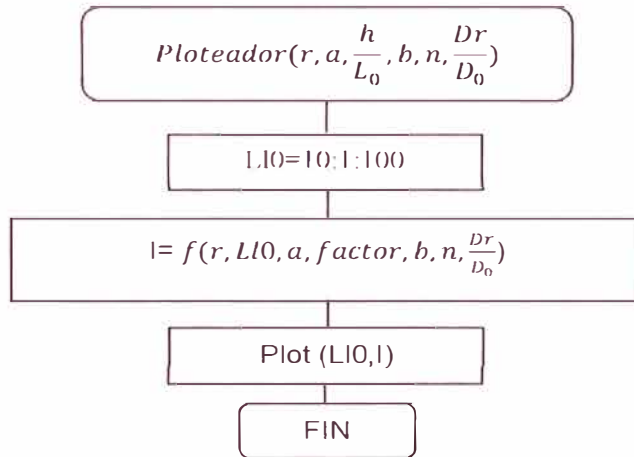


Figura N° 4.03 Diagrama de Flujo Programa Ploteador

Diagrama de flujo de la Función “Integra”:

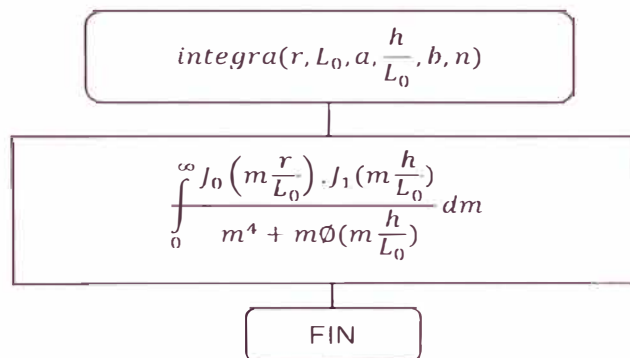


Figura N° 4.04 Diagrama de Flujo Programa Integra

Diagrama de flujo de Fórmula de Bisección. El cual permitirá aproximarnos a la solución de L_0 mediante bisección.

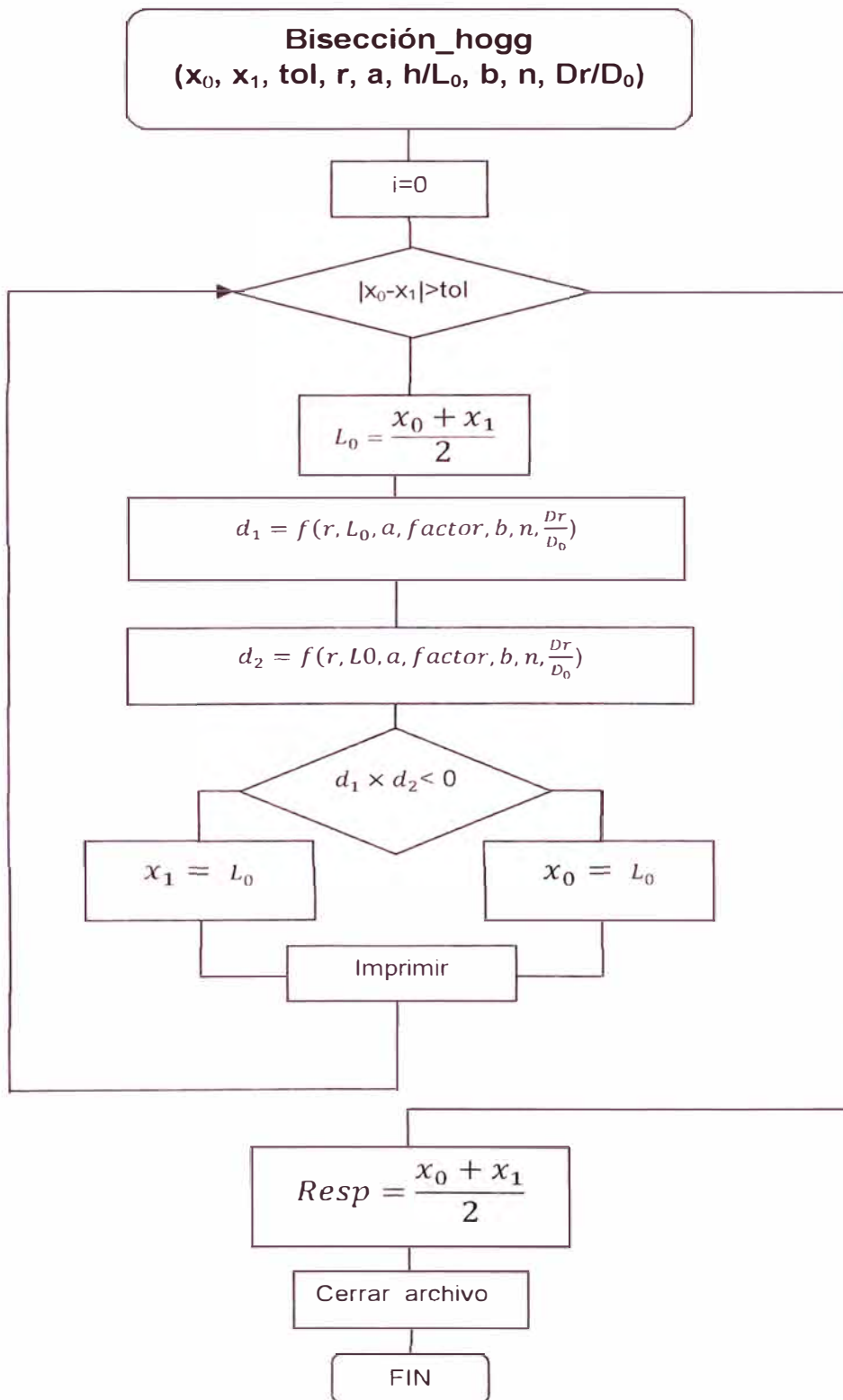


Figura N° 4.06 Diagrama de Flujo Bisección

Diagrama de flujo de la Función "f":

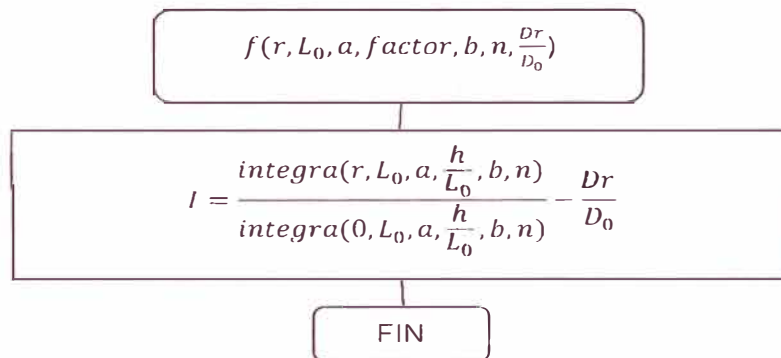


Figura N° 4.05 Diagrama de Flujo Programa "f"

Determinar E₀:

De la ecuación 3.12

$$D_{(R)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p \cdot a}{2(1 - \mu_o)E_0} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (3.3.2c)$$

Despejando E₀ y para r=0

$$E_0 = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p \cdot a}{2(1 - \mu_o)D_{(R)}} \int_0^\infty \frac{J_0(0) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (4.04)$$

Diagrama de flujo de E_0 :

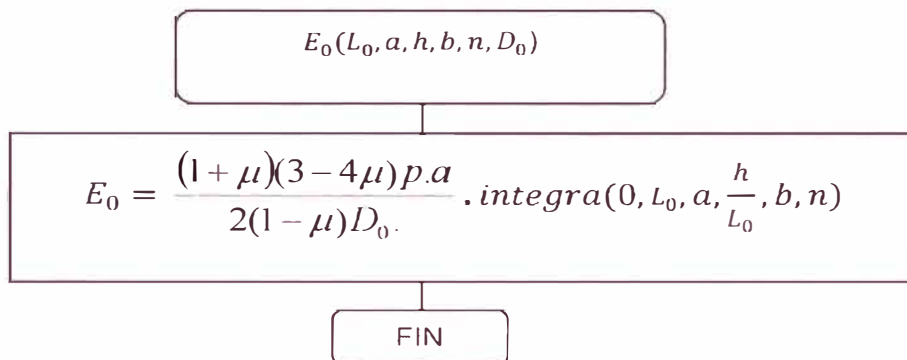


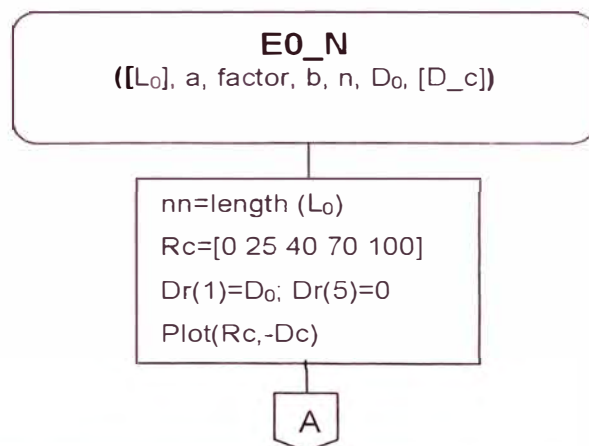
Figura N° 4.07 Diagrama de Flujo E_0

Una vez conocido el valor de E_0 , procederemos a calcular los valores de las deflexiones para $r=25\text{cm}$, 40cm , 70cm y 100cm , reemplazando en la ecuación 3.12.

Para $r=25, 40, 70$

$$D_{(r)} = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o)p \cdot a}{2(1 - \mu_o)E_0} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm$$

Diagrama de flujo para determinar los valores E_0 y las deflexiones teóricas que tengan la menor variación estándar con las deflexiones obtenidas en campo.



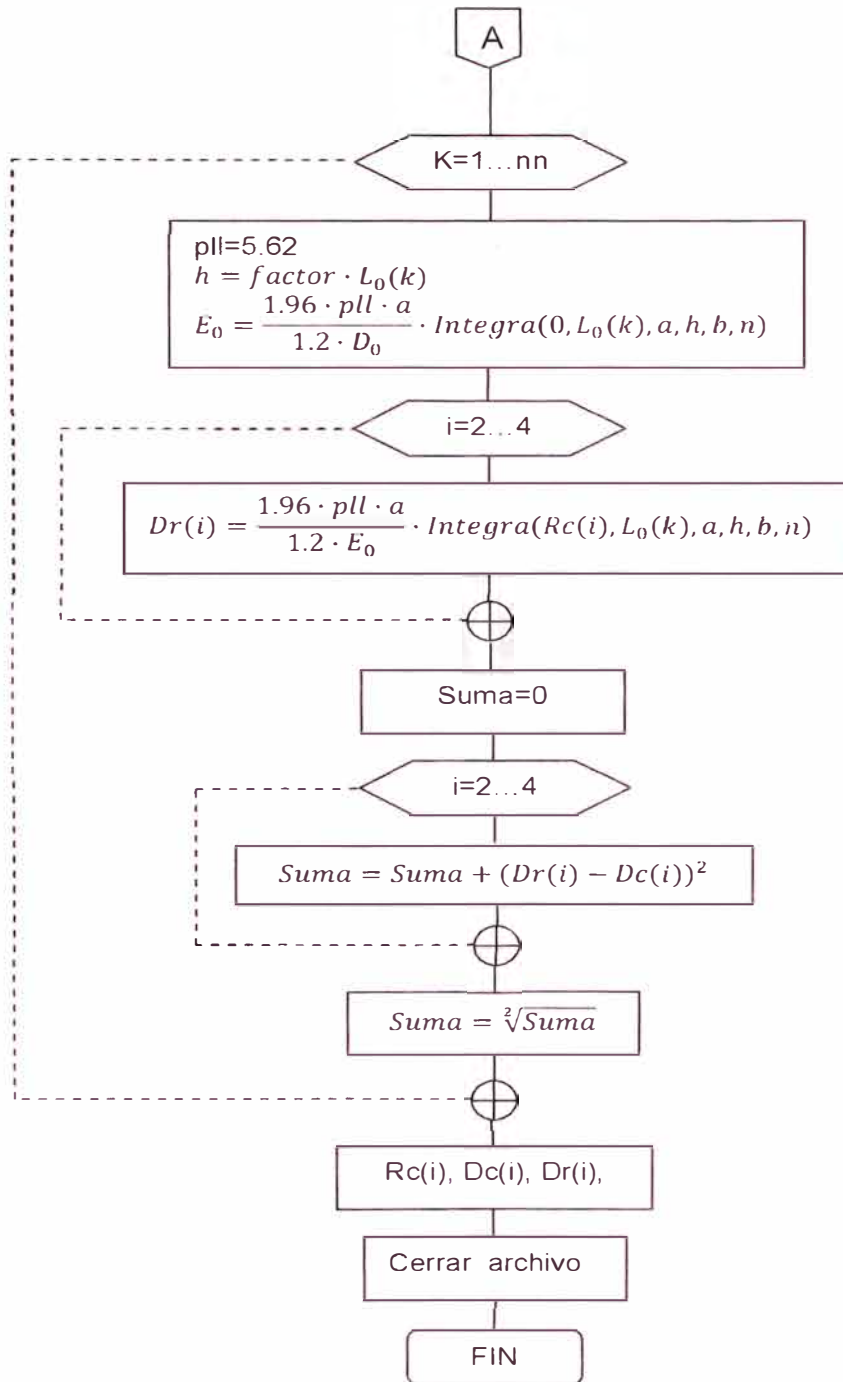


Figura N° 4.08 Diagrama de Flujo Cálculo Deflexiones Teóricas

CAPITULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Determinación de las Deflexiones.

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 100+500, se tiene que la deflexión máxima es 16×10^{-2} mm, la deflexión inicial (D_0) es cero y la deflexión a 25cm (D_{25}) es 6.00×10^{-2} mm.

$$\begin{aligned} D_0 &= (16.00 - 0.00) &= 16.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{25} &= (16.00 - 8.00) &= 8.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{40} &= (16.00 - 10.00) &= 6.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{70} &= (16.00 - 14.00) &= 2.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \end{aligned}$$

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.

Para el tramo en estudio en la Progresiva 100+500 se tiene:

$$\begin{aligned} D_0 &= (16.00) \times 4 = 64.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{25} &= (8.00) \times 4 = 32.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{40} &= (6.00) \times 4 = 24.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \\ D_{70} &= (2.00) \times 4 = 8.00 \times 10^{-2} \text{ mm} \end{aligned}$$

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10^{-3} mm)				RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
					Deflexiones($\times 10^{-2}$ mm)			
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{máx}	D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀
100+500	8	10	14	16	64	32	24	8
100+600	12	14	20	22	88	40	32	8
100+700	8	10	12	14.1	56	24	16	8
100+800	12	14	32	44	176	128	120	48
100+900	12	20	24	28	112	64	32	16
101+000	8	20	28	30	120	88	40	8

Cuadro 5.1 Deflexiones corregidas por relación de Brazo 4:1.

Determinación de R.

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ⁻³ mm)				RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS					
					Deflexiones(x10 ⁻² mm)				R	DR/D ₀
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{max}	D ₀	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀		
100+500	8	10	14	16	64	32	24	8	40	0.375
100+600	12	14	20	22	88	40	32	8	40	0.364
100+700	8	10	12	14.1	56	24	16	8	70	0.291
100+800	12	14	32	44	176	128	120	48	40	0.682
100+900	12	20	24	28	112	64	32	16	25	0.571
101+000	8	20	28	30	120	88	40	8	25	0.733

Cuadro 5.2 Determinación de R y DR/D₀

Determinación de L₀

Para determinar L₀, se graficará la ecuación 4.03 y se observará los valores de L₀ es que f(L₀) se hace "0", una vez determinados dichos valores de frontera, procederemos a determinar el valor exacto de L₀, mediante el desarrollo de una bisección y de esta manera determinar el valor de L₀.

Paso 01:

Ploteo de la curva de f(L₀) de la ecuación 4.03., para lo cual utilizaremos un programa desarrollado en Matlab 7.8.0

Ploteador (r, a, factor, b, n, dato_c)

Donde:

r=radio (donde DR/D₀≈0.50) a=radio de huella factor=h/L₀=10
 b= longitud a dividir n= número divisiones dato_c=DR/D₀

Por lo tanto al reemplazar los valores en el programa, para la progresiva 100+500, se tiene:

Ploteador (40,10.771, 10, 20, 2000,0.375) tenemos:

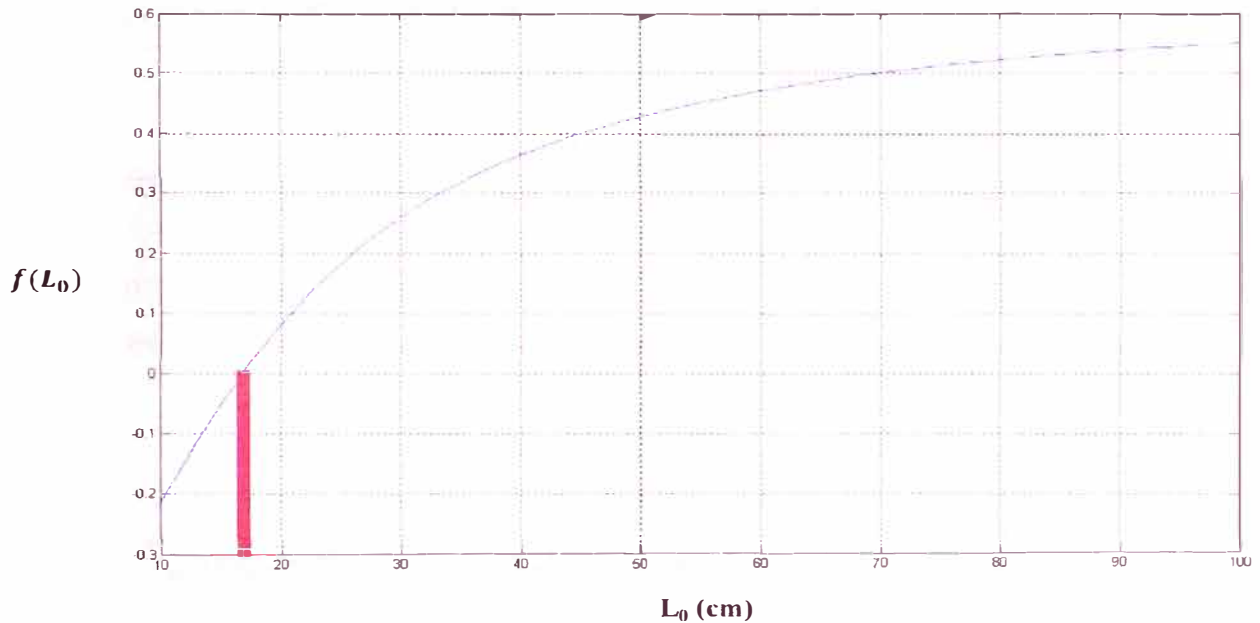


Figura 5.01 Gráfica $f(L_0)$ vs Cálculo de L_0

De la Figura 5.01, se observa que para $f(L_0)$ sea 0, el valor de L_0 está entre 10 y 20.

Paso 02:

Determinación de L_0 mediante programa de bisección.

biseccion_hogg($x_0, x_1, tol, r, a, factor, b, n, dato_c$)

Donde:

- | | | |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------|
| X_0 = Límite L_0 inferior | X_1 =Límite L_0 superior | tol= tolerancia (0.01) |
| a=radio de huella | factor= $h/L_0=10$ | b=longitud a dividir |
| n=número divisiones | dato_c=DR/D0 | |

biseccion_hogg(10,20,0.01,40,10.771,10,20,2000,0.375), tenemos:

$L_0 = 16.8457\text{cm}$

Determinación de E_0

Determinaremos el E_0 a partir de la ecuación 4.04, reemplazando los valores tenemos:

$E_0=479.194 \text{ Kg/cm}^2$

Sin embargo para determinar el valor de L_0 , debemos iterar a fin de tener deflexiones más próximas a los valores tomados en campo.

Para lo cual se utilizará el programa E0_N ([10 12 14 16.84 20], 10.771, 10, 20, 2000, 0.064, [0.064 0.032 0.024 0.008 0])

E0	L_0 (cm)	R (cm)	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-0.064	-0.032	-0.024	-0.008	0.000	
723.318	10.00	$L_0= 10.00$	-0.064	-0.025	-0.010	-0.002	0.000	1.66%
632.085	12.00	$L_0= 12.00$	-0.064	-0.030	-0.015	-0.003	0.000	1.08%
559.324	14.00	$L_0= 14.00$	-0.064	-0.034	-0.019	-0.005	0.000	0.66%
479.194	16.84	$L_0= 16.84$	-0.064	-0.039	-0.024	-0.008	0.000	0.74%
412.313	20.00	$L_0= 20.00$	-0.064	-0.044	-0.029	-0.012	0.000	1.32%

Cuadro 5.3 Deflexiones teóricas vs Deflexiones de Campo

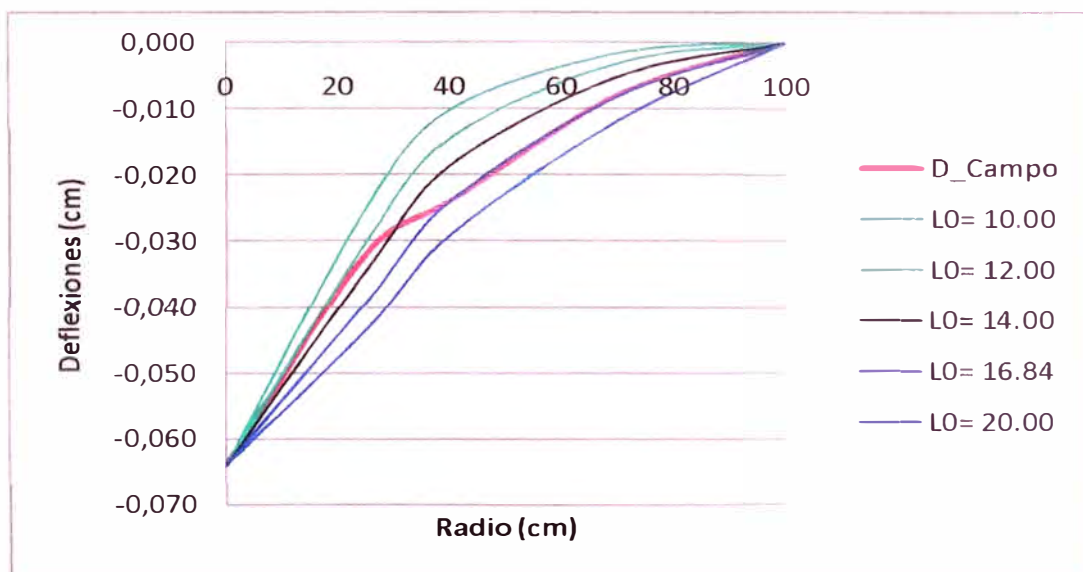


Figura 5.02 Gráfica de Deflexiones teóricas vs Deflexiones de Campo (Progresiva 100+500)

Del cuadro 5.3 y la figura 5.02 se observa que para un $L_0=14.00$ la desviación estándar de las deflexiones teóricas contra las medidas del campo son del orden de 0.66%, con lo cual es el valor más acertado para las deflexiones obtenidas en campo.

De la misma manera se procede a realizar los cálculos de las siguientes puntos de medición.

Estaca (km)	RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS				R	DR/D0	L ₀ (inicial)	L ₀	E ₀	CBR
	Deflexiones(x10 ⁻² mm)									
	D0	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀						
100+500	64	32	24	8	40	0.375	16.84	14.00	559.32	5.59
100+600	88	40	32	8	40	0.364	16.46	14.00	406.11	4.06
100+700	56	24	16	8	70	0.291	25.73	12.00	721.22	7.21
100+800	176	128	120	48	40	0.682	34.01	27.00	113.87	1.14
100+900	112	64	32	16	25	0.571	15.11	15.11	299.63	3.00
101+000	120	88	40	8	25	0.733	23.43	17.00	253.08	2.53

Cuadro 5.4 Valores de L₀, E₀ y CBR Obtenidos de las iteraciones.

Interpretación de Resultados

De acuerdo al resultado en el cuadro N° 5.3, se puede apreciar la clasificación del estado actual del pavimento, según el rango establecido por el MTC, y por ende se puede interpretar lo siguiente:

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 5.5 Rangos de valores de CBR

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

Los valores de CBR del tramo en estudio se pueden considerar entre pobre y muy pobres.

CONCLUSIONES

- El método de evaluación estructural de ensayos no destructivos, tiene mayores ventajas, debido al ahorro de tiempo para la toma de mediciones.
- La Viga Benkelman es el instrumento de medición de deflexiones más difundido de nuestro país debido a su bajo costo de adquisición en comparación con otros instrumentos como el FWD.
- Los programas desarrollados en el presente informe para determinar la longitud característica (L_0) y el módulo de Elasticidad de la sub-rasante (E_0), mediante iteraciones automatizan el procesamiento de datos y ayudan a aproximar los cálculos al modelo matemático empleado.
- Los valores de CBR obtenidos con el modelo desarrollado indica que la subrasante es pobre y muy pobre.
- El número de puntos tomados por tramo asignado, así como el número de deflexiones por punto son insuficientes para concluir si el modelo matemático desarrollado se aproxima a la realidad.

RECOMENDACIONES

- Debido a que esta carretera conecta Lima con Huancayo, se presenta como alternativa a la Carretera Central, por consiguiente se estima que el tráfico aumente considerablemente en pocos años, por lo tanto se recomienda hacer un seguimiento de la capacidad estructural del pavimento.
- Debido al inadecuado sistema de drenaje que presenta la carretera se recomienda implementar este cuanto antes, para evitar que la capacidad estructural del pavimento y la superficie de rodadura sufra deterioro a futuro.
- Para el desarrollo del método matemático del presente informe se requiere tener como dato más de 04 deflexiones en cada punto, así como también tomar más de 06 puntos por cada kilómetro, con la finalidad de tener mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1. DASHO R.E., A.A. Kagán “Mecánica de Suelos en la Práctica de la Geología Aplicada a la Ingeniería”, MIR. RUSIA 1980.
 2. HAZZARD, James F. and Yacoub Tramer E. “Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study”, University of Toronto, Canadá, 2007.
 3. HOFFMAN, Mario S. - Louis Berger Internacional Inc., Pablo m. Del Aguila, B.Sc. Lagesa Ingenieros Consultores. “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en La Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos)” Octubre, 1985
 4. HUANG, Yang H. “Pavement analysis and design”, Prentice Hall. United States of America, 1993.
 5. REYES, Fredy L. “Diseño de pavimentos por métodos racionales”. Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá, 1999.
- TIMOSHENKO S., Woinowosky-Krieger S. “Teoría de placas y láminas”, URMO, SA

ANEXOS

ANEXO 01. APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN

La deflectometría consistió en el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de la calzada debido a la acción de una carga estándar de 8.2 ton. Aplicada a al pavimento a través de un camión con movimiento lento. Durante la evaluación de campo se cumplió con las siguientes pautas:

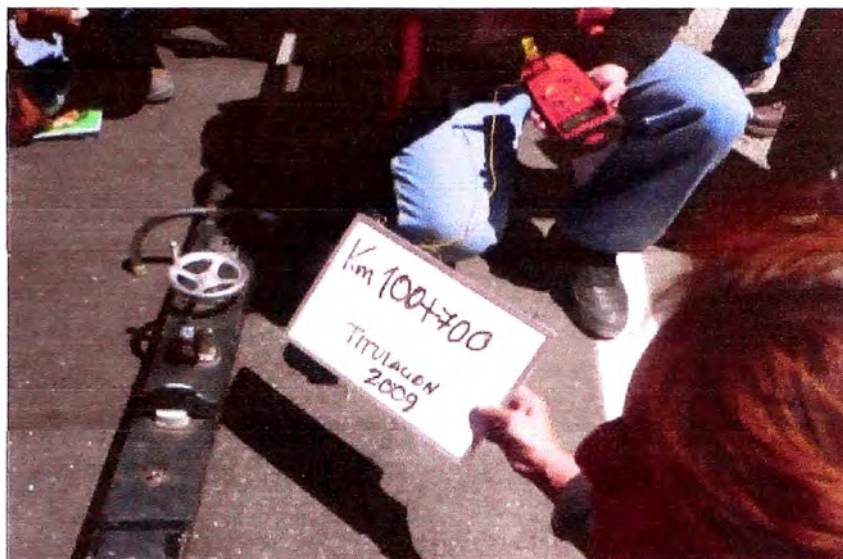
- Se hicieron las medidas desde el km 101+000 en forma decreciente terminado en el 100+500 km.
- Se utilizó la viga Benkelman de brazo simple.
- Se utilizó un camión de un solo eje posterior, que transmitía una carga de 8.2 toneladas controladas por una balanza electrónica adecuada.
- La presión de inflado de las llantas fue de 5.6 libras.
- 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 hechas durante el ensayo de campo se basó en el siguiente procedimiento:

- Se deben marcar con anticipación los puntos de medición en el pavimento a ser ensayado de manera que permita agilizar el proceso.
- Antes de empezar a medir se colocará en la parte trasera del camión una regla de metal que sirva de plomada para saber en qué momento el camión pasa por los puntos previstos materia del estudio.
- Se marcarán en la viga previamente con papel adhesivo los punto previstos que son materia de estudio, en nuestro caso se ubicaron a 0, 25, 40, 70 y máx. cm. respectivamente empezando en la punta final de la viga.
- La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado quedando éste ubicado entre ambas llantas. Como se muestra en la Fotografía 01.

- 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.



Fotografía 01. Colocación de Viga Benkelman en Punto de Medición.

- 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/minuta 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. (Fotografía 02)



Fotografía 02. Indicaciones para Vehículo.

- 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. (Fotografía 03)



Fotografía 03. Medición de Deflexiones.

- Se procede a la medición de la temperatura que presenta el asfalto en el punto en medición. Se toma una pequeña muestra del espesor del pavimento haciendo una pequeña incisión en el costado del pavimento más cercano al punto de toma. (Fotografía 04 y Fotografía 05)



Fotografía 04. Medición de Temperatura.



Fotografía 05. Medición de Espesor de Capa.

- 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.

- 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; el operador, la viga (en forma cuidadosa y los lectores también deberán dirigirse al otro punto o ser trasladados pero con la ayuda de otro vehículo si se cuenta con los recursos.

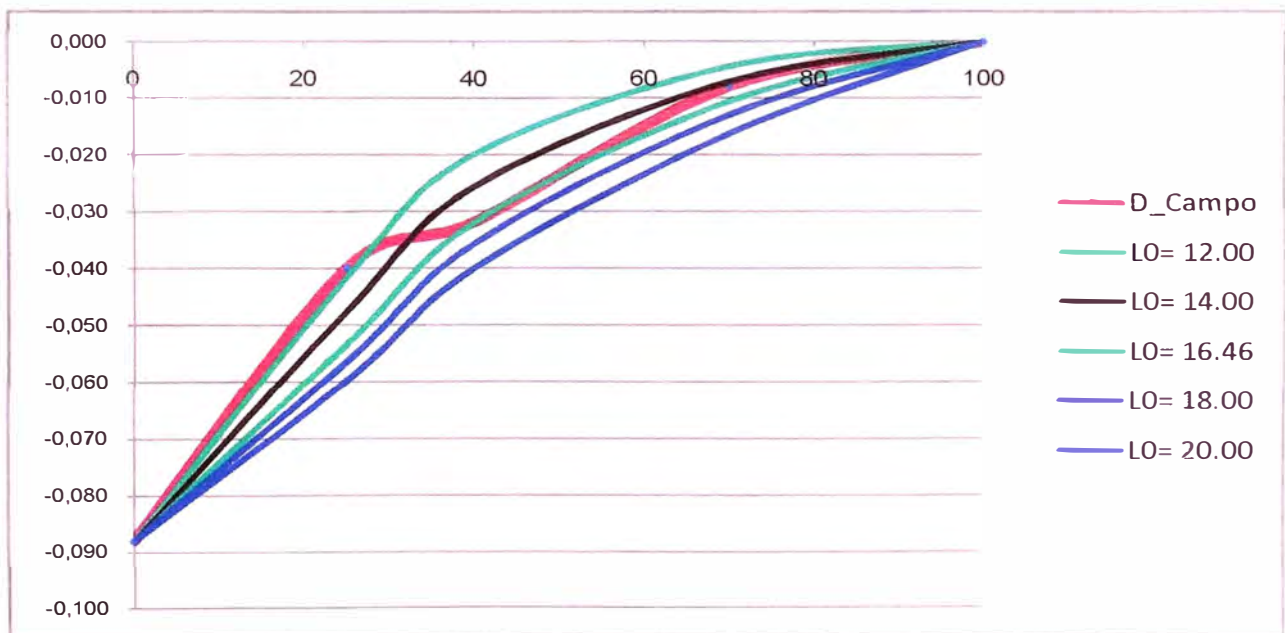
Todo el proceso deberá ser supervisado por un ingeniero de campo experimentado quien verificara los valores que se vayan obteniendo así como las anotaciones de fallas, tipo de material, superficie, ahuellamiento entre otras características.

ANEXO 02. CALCULO DE L_0 y E_0

Progresiva 100+600

Iteración de E_0 , a partir de valores de L_0 . Se escoge la que tiene menor desviación estándar.

E_0	L_0	R	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-	-	-	-	0.000	
			0.088	0.040	0.032	0.008	0.000	
458.959	12.00	L0= 12.00	0.088	0.041	0.020	0.004	0.000	1.27%
406.114	14.00	L0= 14.00	0.088	0.047	0.026	0.007	0.000	0.98%
354.782	16.46	L0= 16.46	0.088	0.053	0.032	0.011	0.000	1.36%
328.452	18.00	L0= 18.00	0.088	0.056	0.036	0.013	0.000	1.76%
299.356	20.00	L0= 20.00	0.088	0.060	0.040	0.016	0.000	2.30%

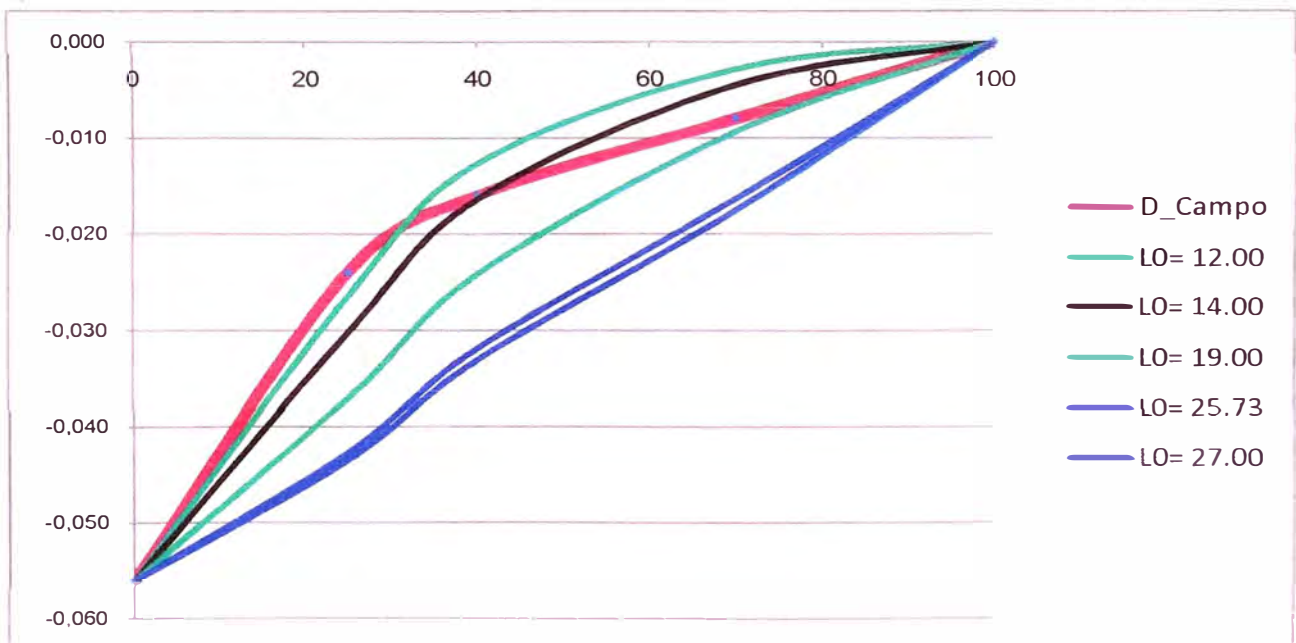


Gráfica de deflexiones teóricas vs deflexiones de campo.

Progresiva 100+700

Iteración de E_0 , a partir de valores de L_0 . Se escoge la que tiene menor desviación estándar.

E_0	L_0	R	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-	-	-	-	0.000	
721.221	12.00	L0= 12.00	0.056	0.024	0.016	0.008	0.000	0.66%
638.179	14.00	L0= 14.00	0.056	0.030	0.016	0.004	0.000	0.71%
492.267	19.00	L0= 19.00	0.056	0.037	0.024	0.009	0.000	1.54%
374.230	25.73	L0= 25.73	0.056	0.043	0.032	0.016	0.000	2.59%
357.882	27.00	L0= 27.00	0.056	0.043	0.033	0.018	0.000	2.75%

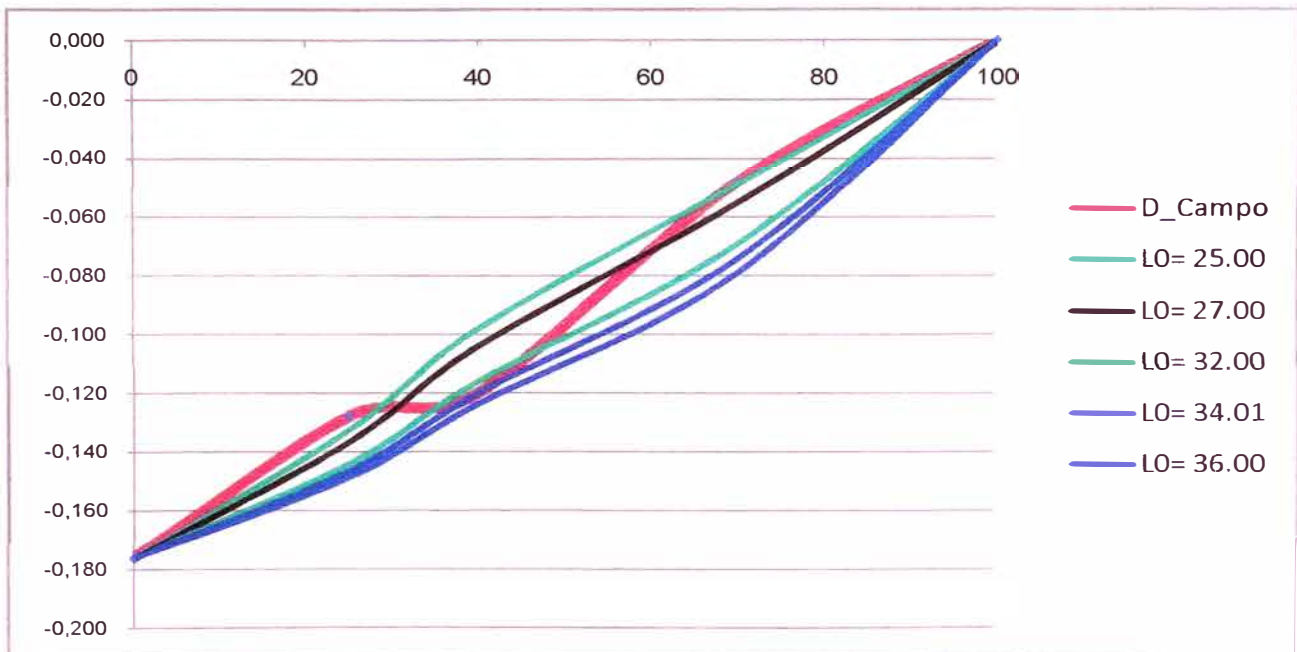


Gráfica de deflexiones teóricas vs deflexiones de campo.

Progresiva 100+800

Iteración de E_0 , a partir de valores de L_0 . Se escoge la que tiene menor desviación estándar.

E_0	L_0	R	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-	-	-	-	-	
			0.176	0.128	0.120	0.048	0.000	
122.278	25.00	L0= 25.00	0.176	0.133	0.098	0.049	0.000	2.25%
113.872	27.00	L0= 27.00	0.176	0.136	0.104	0.055	0.000	1.95%
97.095	32.00	L0= 32.00	0.176	0.144	0.116	0.069	0.000	2.70%
91.645	34.01	L0= 34.01	0.176	0.147	0.120	0.074	0.000	3.23%
86.812	36.00	L0= 36.00	0.176	0.149	0.124	0.079	0.000	3.77%

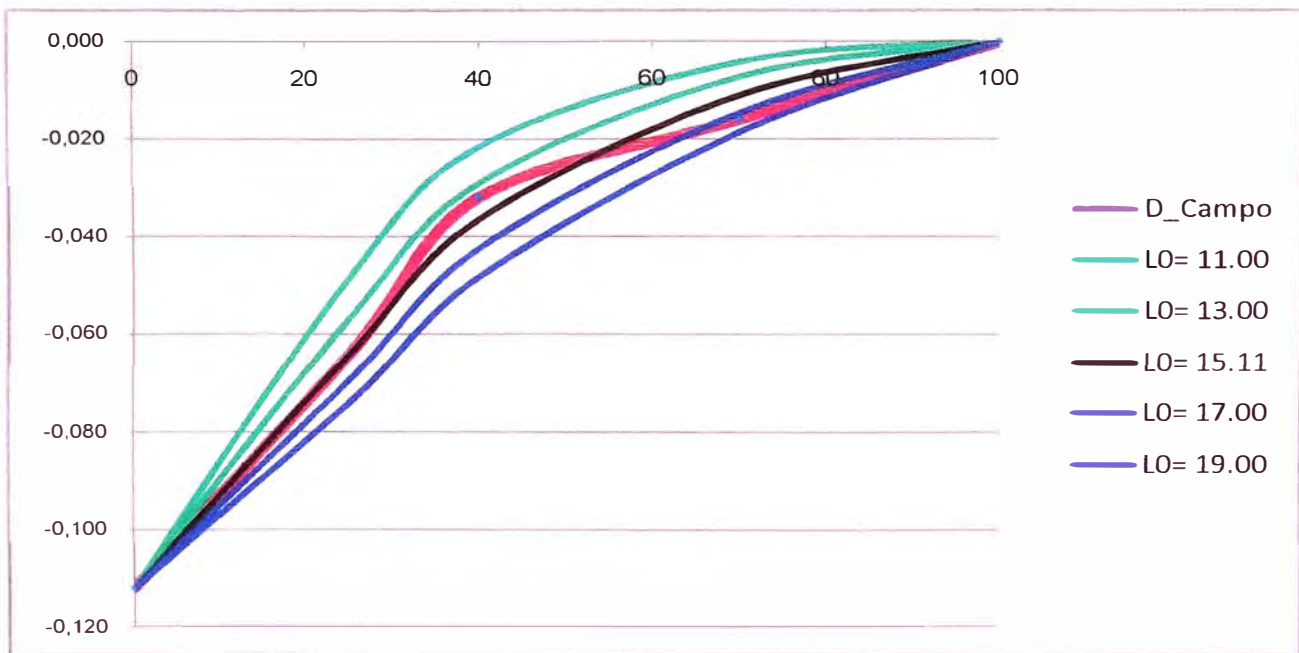


Gráfica de deflexiones teóricas vs deflexiones de campo.

Progresiva 100+900

Iteración de E_0 , a partir de valores de L_0 . Se escoge la que tiene menor desviación estándar.

E_0	L_0	R	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-	-	-	-	0.000	
385.145	11.00	L0= 11.00	0.112	0.064	0.032	0.016	0.000	2.21%
338.706	13.00	L0= 13.00	0.112	0.057	0.029	0.007	0.000	1.17%
299.630	15.11	L0= 15.11	0.112	0.064	0.036	0.011	0.000	0.66%
271.156	17.00	L0= 17.00	0.112	0.069	0.042	0.015	0.000	1.18%
246.133	19.00	L0= 19.00	0.112	0.074	0.048	0.019	0.000	1.93%

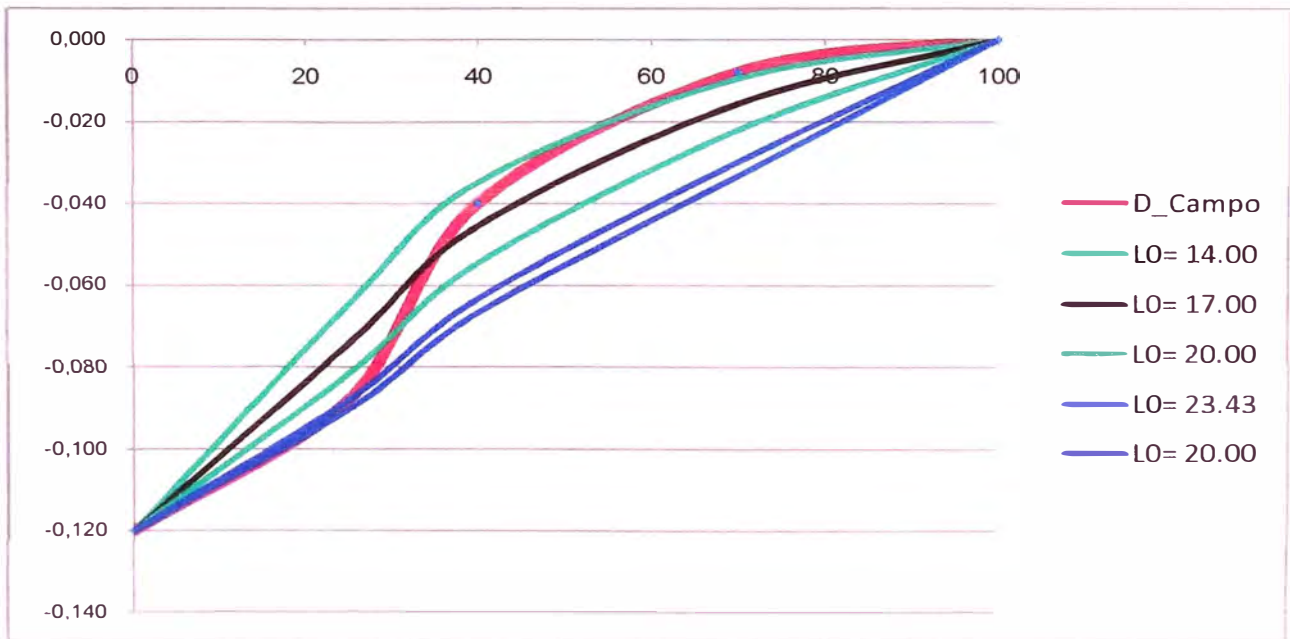


Gráfica de deflexiones teóricas vs deflexiones de campo.

Progresiva 101+000

Iteración de E_0 , a partir de valores de L_0 . Se escoge la que tiene menor desviación estándar.

E_0	L_0	R	0	25	40	70	100	D_Estandar
		D_Campo	-	-	-	-	-	
			0.120	0.088	0.040	0.008	0.000	
297.817	14.00	L0= 14.00	0.120	0.065	0.035	0.010	0.000	2.40%
253.079	17.00	L0= 17.00	0.120	0.074	0.045	0.016	0.000	1.67%
219.528	20.00	L0= 20.00	0.120	0.082	0.055	0.022	0.000	2.14%
190.332	23.43	L0= 23.43	0.120	0.088	0.063	0.030	0.000	3.21%
179.341	20.00	L0= 20.00	0.120	0.090	0.067	0.033	0.000	3.70%



Gráfica de deflexiones teóricas vs deflexiones de campo.

ANEXO 03. CUADRO DE HOGG, METODO ITERATIVO

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO
 CARRETERA CAÑETE -YAUYOS- CHUPACA , NOVENO TRAMO KM 99+000 HASTA KM 104+000**

RESULTADOS MODELO DE HOGG

Datos Generales:

A (radio de huella) 10.771
 HC (espesor del pavimento) 17
 Carga de Ensayo (1 llanta) 2050 200 kg/4)
 Presion de Infiado (kg/cm2) 5.6245
 Presion de Infiado (lb/pulg2) 80
 N 10
 H/A 10

$$R = \frac{(A^2 C - B)}{(A(D_0/D_R - 1))^2 C} \quad \frac{(Y^2 R^5 + ((Y^2 R^5)^2 - 4^2 A^2 X^2 R^5)^{1/2})/2}{1 - M(A/L_0 - 0.10)} \quad \frac{(K^2)^2 P^2 S_0 / S}{(L_0^2 D_0)}$$

Estaca (km)	Lecturas de Campo (10 ² mm)				RESULTADOS DEFLECTOMETRICOS								PARAMETROS DEL MODELO DE HOGG						
	L ₂₅	L ₄₀	L ₇₀	L _{m(Δ)}	Deflexiones (x10 ² mm)				u	R	DR/D0	R5 cm	L0 cm	S0/S	E0 kg/cm2	E* kg/cm2	E* / E0	L0 cm	
					D0	D ₂₅	D ₄₀	D ₇₀											
100+500	8	10	14	16	64	32	24	8	0.4	40	0.375	30.8	14.0	0.68	856.10	1.049.88	1.23	16.84	
100+600	12	14	20	22	88	40	32	8	0.4	40	0.364	30.1	13.5	0.67	632.11	667.50	1.06	16.46	
100+700	8	10	12	14.1	56	24	16	8	0.4	70	0.291	45.5	23.4	0.83	708.60	7.754.74	10.93	25.73	
100+800	12	14	32	44	176	128	120	48	0.4	40	0.682	60.7	32.7	0.89	174.75	6.002.53	34.35	34.01	
100+500	12	20	24	28	112	64	32	16	0.4	25	0.571	29.3	12.9	0.65	505.92	443.63	0.88	15.11	
101+000	8	20	28	30	120	88	40	8	0.4	25	0.733	43.5	22.1	0.81	348.75	3.103.06	8.95	23.43	