

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



**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARRETERA  
CAÑETE YAUYOS CHUPACA CON VIGA BENKELMAN  
MÉTODO MATEMÁTICO TRAMO km 69+000 - km 74+000**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**CARLOS ROLANDO LEGUA PÉREZ**

**Lima- Perú**

**2009**

## ÍNDICE

RESUMEN.....	3
LISTA DE CUADROS.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9
<b>CAPÍTULO I.- GENERALIDADES.....</b>	<b>10</b>
1.1. ANTECEDENTES.....	10
1.2. IDENTIFICACIÓN.....	10
1.3. TRAMO EVALUADO km 69+000 – km 74+000.....	14
<b>CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>18</b>
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.....	18
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
<b>CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
3.1 VIGA BENKELMAN.....	22
3.2 CARACTERIZACIÓN del MATERIAL.....	25
3.2.1 Definiciones previas.....	25
3.2.2 Modelo Básico.....	27
3.2.3 Modelo de Maxwell.....	27
3.2.4 Modelo de Kelvin.....	28
3.2.5 Modelo de Burgers.....	28
3.2.6 Modelo Generalizado.....	28

<b>3.3</b>	<b>MODELOS PARA DETERMINAR ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....</b>	<b>28</b>
3.3.1	Modelo de Boussinesq.....	28
3.3.2	Modelo de Hogg.....	29
3.3.3	Modelo de Westergaard.....	31
3.3.4	Modelos bicapas.....	31
3.3.5	Modelos multicapas.....	32
<b>3.4</b>	<b>MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS.....</b>	<b>32</b>
3.4.1	Fórmula de Boussinesq.....	32
3.4.2	Fórmula de Westergaard.....	33
3.4.3	Fórmula de Palmer y Baber generalizada.....	33
3.4.4	Fórmula de Odemark.....	34
3.4.5	Método de Elementos Finitos.....	35
	<b>CAPÍTULO IV.- APLICACIÓN TRAMO km 69+000 – km 74+000.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>APLICACIÓN CON SOFTWARE QUE PROCESA DATOS DE CAMPO CON EL MODELO DE HOGG.....</b>	<b>39</b>
	<b>CAPÍTULO V.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES.....	54
	BIBLIOGRAFÍA.....	56
	ANEXOS.....	56

## RESUMEN

El deterioro de una carretera se inicia desde su puesta en servicio. El pavimento, las obras de arte y todos los componentes de la vía comienzan a dañarse, por lo que es necesario formular un plan que contemple las acciones de mantenimiento que conlleven a preservar los niveles óptimos de servicio a través de intervenciones oportunas. Es por ello que en el marco de un plan de conservación vial para mantener en buen estado los diferentes elementos que constituyen la vía y garantizar que el transporte terrestre sea cómodo, seguro y económico, es necesario realizar, entre otras, la evaluación estructural del pavimento.

La filosofía del mantenimiento busca minimizar la rehabilitación completa de algún tramo de la carretera, tratando de aprovechar la capacidad remanente de soporte estructural del pavimento y sobre dicha estructura recapear, reforzar o aplicar cualquier otro tratamiento que permita mantener la capacidad estructural del pavimento.

La conservación vial da al usuario confort y seguridad, lo cual se logra con un monitoreo constante que consiste en el relevo, procesamiento y análisis de datos de campo con los cuales se podrán establecer las curvas de deterioro que permitan programar el mantenimiento de la vía, reduciendo costos de operación de los vehículos y evitando el deterioro prematuro de la carretera. Debido a los elevados costos de inversión para la construcción de carreteras y a los escasos recursos con los que cuenta el Estado Peruano, es fundamental establecer parámetros y procedimientos adecuados para la conservación de carreteras y evitar su prematuro deterioro.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.01 Sectores de la carretera.....	16
Cuadro N° 1.02 Tránsito de vehículos.....	17
Cuadro N° 1.03 Tratamiento superficial por tramos.....	17
Cuadro N° 4.01. Datos tomados en campo.....	38
Cuadro N° 5.01 $L_0$ promedio para $r=25$ cm en función de $D_r/D_0$ y diferentes valores de $h/L_0$ .....	48
Cuadro N° 5.02 $L_0$ promedio para $r=40$ cm en función de $D_r/D_0$ y diferentes valores de $h/L_0$ .....	48
Cuadro N° 5.03 $L_0$ promedio para $r=70$ cm en función de $D_r/D_0$ y diferentes valores de $h/L_0$ .....	48
Cuadro N° 5.04 Resumen $r$ y $D_r/D_0$ y $L_0$ promedio.....	48
Cuadro N° 5.05 Resumen de $L_0$ y $r$ .....	49
Cuadro N° 5.06 D campo vs D teórico progresiva 71+500.....	49
Cuadro N° 5.07 D campo vs D teórico progresiva 71+600.....	49
Cuadro N° 5.08 D campo vs D teórico progresiva 71+700.....	50
Cuadro N° 5.09 D campo vs D teórico progresiva 71+800.....	51
Cuadro N° 5.10 D campo vs D teórico progresiva 71+900.....	51

**LISTA DE FIGURAS**

Figura N° 1.1 Ubicación del proyecto.....	10
Figura N° 1.2 Mapa Geológico Regional.....	15
Figura N° 2.1 Viga Benkelman.....	19
Figura N° 2.2 Equipo Dynaflec.....	19
Figura N° 2.3. Road Rater.....	20
Figura N° 2.4 Equipo RDD .....	20
Figura N° 2.5 Equipo FWD en prueba.....	21
Figura N° 2.6 Equipo KUAB FWD.....	21
Figura N° 3.1. Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman...	22
Figura N° 3.2. Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con Viga Benkelman. ....	23
Figura N° 3.3. Proceso de medición con la Viga Benkelman.....	24
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.....	31
Figura N° 3.7 Modelo de Westergaard.....	31
Figura N° 3.8 Modelo multicapas. ....	32
Figura N° 3.9 Representación de un masivo semiinfinito. ....	32
Figura N° 3.10 Multicapa propuesto con la fórmula de Palmer y Barber generalizada.....	34
Figura N° 3.11 Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark.....	34
Figura N° 3.12 Modelo de elementos finitos.....	35
Figura 4.1 Diagrama de la medición de deflexiones usando la Viga Benkelman	39
Figura 4.2 Nomograma $D_r/D_0$ vs $r$ para $h/L_0=5$ .....	42
Figura 4.3 Nomograma $D_r/D_0$ vs $r$ para $h/L_0=10$ .....	42
Figura 4.4 Nomograma $D_r/D_0$ vs $r$ para $h/L_0=15$ .....	43
Figura 4.5 Nomograma $D_r/D_0$ vs $r$ para $h/L_0=20$ .....	43
Figura 4.6 Nomograma $L_0$ vs $D_{25} / D_0$ vs $D_0 \times E_0$ para $r= 25\text{cm}$ .....	44
Figura 4.7 Nomograma $L_0$ vs $D_{25} / D_0$ vs $D_0 \times E_0$ para $r= 40\text{cm}$ .....	45
Figura 4.8 Nomograma $L_0$ vs $D_{25} / D_0$ vs $D_0 \times E_0$ para $r= 70\text{cm}$ .....	46

Figura 4.9 Nomograma $L_0$ vs $D_{25} / D_0$ vs $D_0 \times E_0$ para $r= 100\text{cm}$ .....	47
Figura 5.1 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+500.....	49
Figura 5.2 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+600.....	50
Figura 5.3 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+700.....	50
Figura 5.4 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+800.....	51
Figura 5.5 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+900.....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

### SIGLAS

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>AYESA</b>	Asociación Aguas y estructuras
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CBR</b>	California Bearing Ratio
<b>Dv</b>	Desviación
<b>FWD</b>	Falling Weight Deflectometer
<b>MTC</b>	Ministerio de Transportes y Comunicaciones Módulo Resiliente
<b>PERT</b>	Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes
<b>PROMCEPRI</b>	Promoción de Concesiones Privadas
<b>RDD</b>	El Deflectómetro dinámico del balanceo
<b>SUCS</b>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<b>WASHO</b>	Western Association of State Highway Organizations

### SÍMBOLOS

<b>a</b>	Radio de la huella de la llanta.
<b>D<sub>0</sub></b>	Deflexión máxima
<b>D<sub>r</sub></b>	Deflexión a una distancia r
<b>D<sub>t</sub></b>	Deflexión teórica
<b>D<sub>c</sub></b>	Deflexión de Campo
<b>D<sub>(z=0,r)</sub></b>	Deflexión a una distancia r y a una profundidad 0
<b>E</b>	Módulo de elasticidad de un material cualquiera
<b>E*</b>	Módulo de elasticidad del Pavimento Módulo de elasticidad de la Subrasante o Módulo de elasticidad del modelo de Maxwell
<b>E<sub>i</sub></b>	Módulo de elasticidad del modelo de Kelvin
<b>E<sub>s</sub></b>	Módulo de elasticidad del masivo semi infinito de Boussinesq
<b>E<sub>1</sub></b>	Módulo de elasticidad de la capa 1
<b>E<sub>2</sub></b>	Módulo de elasticidad de la capa 2
<b>E<sub>3</sub></b>	Módulo de elasticidad de la capa 3
<b>h</b>	Espesor de Pavimento y capa de la subrasante

$h_2$	Espesor de capa subrasante
$h_1$	Espesor de Pavimento
$i$	Numero entero mayor igual que cero
$J_0$	Función de Bessel de primera especie y orden 0
$J_1$	Función de Bessel de primera especie y orden 1
$K_1$	Coficiente no lineal del material granular
$K_2$	Exponente no lineal del material granular
$L_0$	Longitud Característica
$m$	Variable de integración
$P$	Carga
$q_0$	Presión de Inflado
$r$	Distancia a la que se mide la deflexión $D_r$
$\mu$	Ratio de Poisson
$\mu_0$	Ratio de Poisson de la capa subarasante
$\mu_1$	Ratio de Poisson del Pavimento
$T_0$	Tiempo de retardo del modelo de Maxwell
$t$	Tiempo
$W_{18}$	Número estimado de ejes simples equivalentes a 8.2t.
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_0$	Esfuerzo inicial del modelo Maxwell
$\epsilon$	Deformación unitaria
$\delta$	Desplazamiento vertical unitario
$\lambda$	Viscosidad
$\lambda_0$	Viscosidad del modelo de Maxwell
$\lambda_1$	Viscosidad del modelo de Kelvin
$\theta$	Primer esfuerzo Invariante
$\rho$	Presión vertical
$\nabla$	Operador nabla

## INTRODUCCIÓN

En el presente Informe se realiza el desarrollo de diversos nomogramas a partir del modelo de Hogg utilizando el programa MATLAB para el desarrollo numérico y con estos se efectúa el análisis del comportamiento estructural del pavimento de la carretera Cañete – Yauyos – Chupaca del tramo km 69+000 – km 74+000. La evaluación estructural del pavimento se ha llevado a cabo mediante Ensayos No Destructivos (END), empleando la medición de deflexiones utilizando la Viga Benkelman, la cual permite medir las deformaciones elásticas del pavimento flexible bajo la acción de una carga estándar de manera sencilla, práctica y económica. El procesamiento de las deflexiones medidas en campo y el análisis de los resultados se trabajaron con el modelo de Hogg; con el cual se determinaron las deformaciones teóricas del suelo y el módulo elástico de la subrasante.

El informe está dividido en cinco capítulos y una sección de anexos.

En el primer capítulo se desarrollan los antecedentes del proyecto, desde el inicio del trazo hasta el cambio de estándar de la vía; asimismo, se esbozan las principales características del tramo en estudio.

En el segundo capítulo se desarrolló el estado del arte de los sistemas de análisis y de los ensayos no destructivos de pavimentos.

En el tercer capítulo se describe como se caracteriza el material, se comentan modelos para determinar esfuerzos y deformaciones, así como métodos de solución de pavimentos.

En el cuarto capítulo se describe el procedimiento de campo de la viga Benkelman y la aplicación del software para el procesamiento de los datos obtenidos en campo.

En el quinto capítulo se analizan e interpretan los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO I - GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

#### Nombre del Proyecto

“REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA LUNAHUANÁ – DV. YAUYOS – CHUPACA”.

#### Ubicación

La carretera Cañete - Lunahuaná - Zúñiga - Chupaca forma parte de la Ruta N° PE-24 de la Red Vial Nacional, está ubicada al oeste del centro del país y conecta a las regiones de Lima y Junín con sus diversas capitales provinciales, distritales y centros poblados localizados en el área de influencia directa de la vía. Su altitud varía desde los 710 hasta los 4600 msnm.

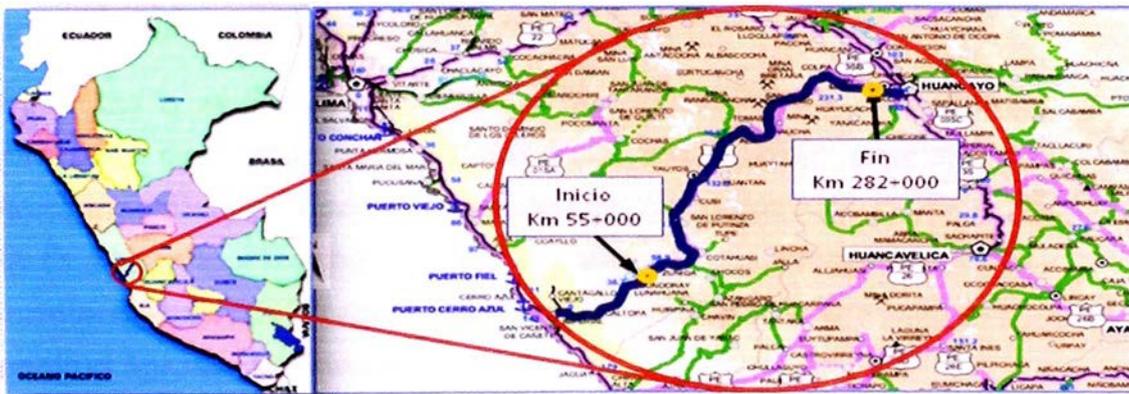


Figura N° 1.1 Ubicación del proyecto  
Fuente: [www.mtc.gob.pe](http://www.mtc.gob.pe)

### 1.2 IDENTIFICACIÓN

#### Diagnóstico de la situación inicial

##### Antecedentes

La carretera en estudio se encuentra ubicada en las provincias de Cañete y Yauyos en el departamento de Lima y Concepción en el departamento de Junín.

Dicha carretera de penetración fue proyectada y ejecutada por etapas durante el gobierno de Sr. Augusto B. Leguía entre los años de 1920 y 1930, en cumplimiento de la Ley de la Conscripción Vial Territorial del Perú.

Durante el gobierno de Dr. Manuel Prado Ugarteche, entre los años 1940 y 1944, se avanzaron los trabajos de la carretera desde Cañete, llegando hasta Yauyos

en abril de 1944, siendo inaugurada por el propio presidente en junio del mismo año.

En febrero de 1956 el experimentado contratista en carreteras Sr. Lesmer Málaga se hace cargo del corte del cañón de Uchco.

En mayo de 1957 se cumplen varios puntos más de las metas, entre las cuales se encuentra el puente Uchco, llegando hasta el pueblo de Alis y concluyendo con el trazo de la carretera, quedando de esta manera integrada la costa con la sierra.

En 1958 se realizaron los trabajos de mantenimiento a la vía por las empresas Cementos Lima y ARPL Tecnología Industrial.

En 1998 la Comisión de Promoción de Concesiones Privadas (PROMCEPRI) adjudicó la buena Pro al Consorcio "Asociación Aguas y Estructuras (AYESA) – ALPHA CONSULT SA" para realizar el servicio de consultoría a nivel de estudio definitivo de la carretera Lunahuaná - Huancayo.

En el 2003 el Proyecto Especial Rehabilitación de Transportes (PERT) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) encargó al consultor Ing. Floriano Palacios León, (Contrato de Estudios N° 0412-2003-MTC/20 del 28.11.2003) la formulación del estudio de pre inversión a nivel perfil de la carretera Ruta 22, Tramo: Lunahuaná – Yauyos – Chupaca de 271.73 km de longitud aproximadamente.

Con el Informe N° 838-2004-MTC/09.02 de 07 de septiembre de 2004, el Director de Inversiones de la Oficina General de Planificación y Presupuesto del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, en su función de OPI MTC aprobó el estudio de preinversión a nivel perfil del "Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lunahuaná-Dv Yauyos-Chupaca" identificado con Código SNIP N° 9895 y autorizó la formulación del siguiente nivel de estudios.

Con oficio N° 513-2004-MTC/09.02 de 16 septiembre de 2004, el Director General de la OPI MTC solicitó al Director General de Programación Multianual del Ministerio de Economía y Finanzas la exoneración del estudio de prefactibilidad y que se autorice la formulación del estudio de Factibilidad del precitado proyecto, en virtud que a el perfil identificó claramente la alternativa seleccionada.

El Programa “Proyecto Perú” fue creado por Resolución Ministerial N° 223-2007-MTC-02 y modificado por Resolución Ministerial N°408-2007-MTC/02 es parte del Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional (PROVIAS NACIONAL) con la finalidad de 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.

En el marco del precitado programa, PROVIAS NACIONAL suscribió el contrato de Servicios N° 288–2007 MTC/20 el 27 de diciembre del 2007, con el Consorcio Gestión de Carreteras por un período de cinco años, a fin que brinde el servicio de conservación vial por niveles de servicio de la carretera: Cañete – Lunahuaná – Pacarán - Chupaca y rehabilitación del tramo: Zúñiga – Dv. Yauyos – Ronchas.

Con el objetivo de mejorar los niveles de serviciabilidad y transitabilidad de las carreteras de bajo volumen de tránsito de la red vial nacional, el MTC a través de PROVIAS NACIONAL suscribió un convenio de cooperación interinstitucional con la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en agosto del 2008 por un periodo de cinco años, denominado: “Acompañamiento y Monitoreo de los Trabajos del Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio, del Corredor Vial N° 13: Cañete – Lunahuaná – Pacarán – Chupaca, (Rehabilitación del tramo: Zúñiga – desvío Yauyos - Ronchas)”.

La carretera Cañete-Yauyos-Huancayo se proyecta como una ruta alterna, la cual ayudará a aligerar el tránsito vehicular de carga y pasajeros de la Carretera Central, disminuyendo el tiempo de viaje entre Lima (Cañete) y Huancayo permitiendo el tránsito continuo de vehículos durante la temporada de máximas avenidas.

### **Aspectos Demográficos**

La población directamente beneficiada por el proyecto se estima en 307,705 habitantes, ubicados en las provincias de Cañete y Yauyos del departamento de Lima y Concepción, Chupaca y Huancayo del departamento de Junín.

## **Aspectos Socioeconómicos**

### **Actividad Económica**

La población del área de influencia del proyecto, tiene como base económica principal la explotación de la actividad agropecuaria (de autoconsumo, principalmente), cuyas formas de producción son básicamente “tradicionales” en relación a los sistemas de producción mecanizados y agroquímicos que se practican en los grandes complejos agroindustriales de la costa.

En segundo término, de manera limitada y complementaria, la población del área de influencia del proyecto se dedica a actividades de servicios, comercio y turismo (Lunahuaná). En los distritos de Alis, Tomas y Laraos, la actividad minera tiene mayor relevancia. La economía de la zona de influencia del proyecto, presenta un débil crecimiento con tendencia al estancamiento, donde los niveles de producción y productividad expresan bajos rendimientos.

### **Sistema de Transporte**

La Infraestructura del sistema de transporte está enmarcada por la ruta nacional 24: Cañete – Lunahuaná – Yauyos – Chupaca, la que antes de la ejecución del cambio de estándar se encontraba en afirmado desde la salida de Lunahuaná hasta el empalme con la ruta longitudinal de la Sierra. El tramo desde el empalme con la Panamericana Sur (Cañete) hasta Lunahuaná se encontraba a nivel de asfaltado con diferentes estados de conservación desde regular a malo. En esta ruta se encuentra ubicada la estación de peaje Lunahuaná en el km 12+400.

## **Aspectos Geográficos**

### **Geografía e Hidrología**

Políticamente la cuenca del río Cañete forma parte de las provincias de Cañete y Yauyos, pertenecientes ambas al departamento de Lima y tiene una extensión aproximada de 6192 km<sup>2</sup>, de los cuales el 78.4% (4856 km<sup>2</sup>) corresponde a la cuenca húmeda.

La longitud del río Cañete, entre su nacimiento y desembocadura, es de aproximadamente 220 km, presentando una pendiente promedio de 2%; sin

embargo, presenta sectores en donde la pendiente es mucho más pronunciada, especialmente en la parte alta, llegando hasta 8% en el tramo comprendido entre la localidad de Huancaya y la desembocadura del río Alis.

Las zonas generalmente afectadas por las lluvias están localizadas en las alturas de Matucana, Huarochirí, Oyón y Lunahuaná. En general todas las cuencas hidrográficas de Lima aumentan su caudal, poniendo en peligro a las poblaciones y originan desabastecimiento por el bloqueo de carreteras.

### **Clima y Meteorología**

La zona presenta un clima variado entre templado - frío y sub húmedo. La temperatura media anual fluctúa entre 6 y 12°C y las temperaturas medias mensuales no difieren más de 2°C de la media anual. Las temperaturas medias diarias tampoco difieren significativamente respecto a la temperatura media mensual, se mantienen más o menos uniformes durante las cuatro estaciones del año. Solo durante fines de otoño y durante todo el invierno las temperaturas mínimas fluctúan entre -10° C y 0° C.

El promedio de las precipitaciones pluviales totales por año varían entre 300 y 500 mm las cuales se distribuyen durante los doce meses del año, de acuerdo a las estaciones, siendo el verano la estación mas lluviosa y donde se concentran del 60 al 70% del volumen total anual; en otoño disminuye hasta el 8 a 12%, en invierno las lluvias representan del 12 al 15% del total y finalmente en primavera, se reinicia el período de lluvias, principalmente a partir de octubre, acumulando durante esta estación 20 a 25% del total anual.

## **1.3 TRAMO EVALUADO km 69+000 – km 74+000**

### **Aspectos Geológicos**

#### **Orientación del Estudio**

Está orientado a la caracterización y comportamiento preliminar de las formaciones rocosas por las cuales atraviesa el eje proyectado de la vía, con la finalidad de identificar los posibles riesgos geológicos que pueden afectar a la vía.

De manera general, de acuerdo al estudio geológico, definitivo la zona de Lunahuaná-Tinco Yauricocha se considera de vulnerabilidad media a alta ante los riesgos geológicos.

La zona de estudio, entre las progresivas 69+000 al 74+000, se ubica en el cuadrángulo 26-I Tupe.

### Geología del Área de Estudio

De acuerdo al Mapa Geológico del Cuadrángulo de Tupe, las formaciones geológicas expuestas entre las progresivas 69+000 al 74+000 son las siguientes:

- Unidad de Tupe, identificado como T-gdt-tu, es una roca intrusiva perteneciente al batolito de la costa cuya conformación geológica es granodiorita y tonalita.
- Formación Tantara, identificada como Ti-t, perteneciente al Cenozoico Terciario de la serie del Eoceno.
- Depósitos Aluviales, que forman el lecho del río, pertenecen a la era Cenozoica Cuaternaria de la serie del Pleistoceno.

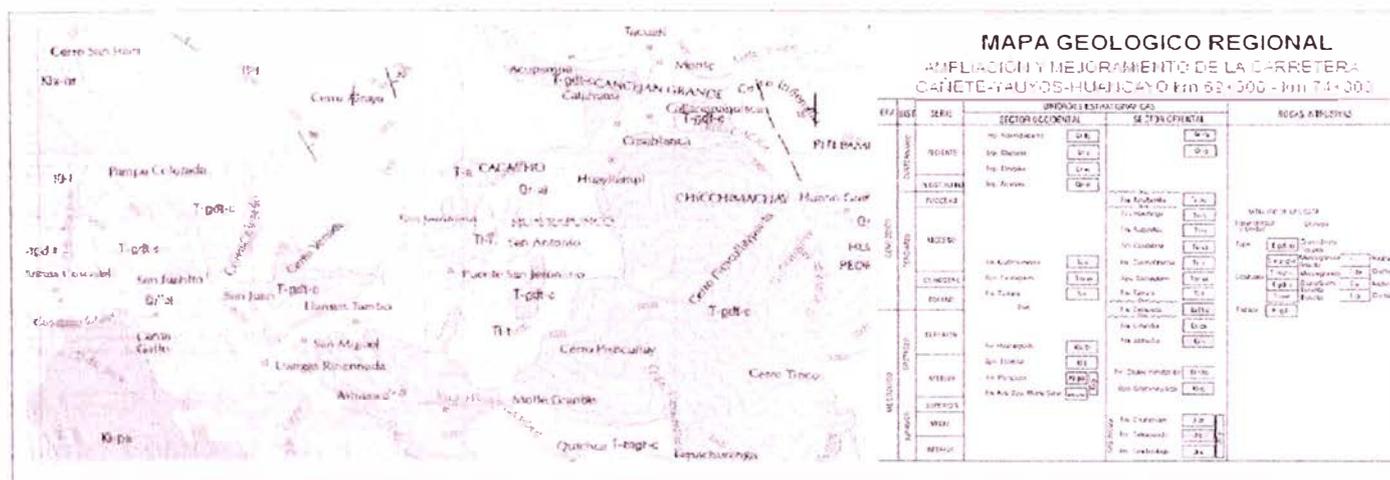


Figura N° 1.2 Mapa Geológico Regional  
 Fuente: www.ingemmet.gob.pe/

Los factores geológico estructurales, geomorfológicos e hidrológicos juegan un rol importante en el comportamiento geodinámico de la cuenca del río Cañete, se han podido detectar eventos como deslizamientos, derrumbes, erosión fluvial, huaycos, erosión de laderas, entre otros que han modificado y modifican el

relieve de la cuenca. Sin embargo en la zona de estudio no existen tramos con problemas de huaycos en estación lluviosa, ni con problemas de taludes inestables, de acuerdo al estudio realizado por el Consorcio Gestión de Carreteras.

**Aspectos Geotécnicos**

Los estudios realizados por el Consorcio Gestión de Carreteras correspondientes a los suelos y materiales de construcción, encontraron que del km 57+000 al km 130+000 el material predominante es arena y grava limosa, que en el sistema SUCS clasifica como GC-GM y en el sistema AASHTO es variable entre A-1-b(0) y A-2-4(0) con presencia de bolonerías en poca proporción en la capa superior, mientras que a partir de 0.40 de profundidad aumenta su presencia a 50% y entre el Km 130+000 al km 258+000 se encuentra con suelos del tipo Arenas y gravas limosas y arcillosas clasificado en el sistema SUCS como GC, GC-GM, SC, SC-SM y en el AASHTO, A-2-4(0).

Los estudios de suelos se realizaron a 1.5m de profundidad y teniendo valores de CBR tales como se muestran en el presente cuadro.

SECTOR		CBR (%)	M <sub>R</sub> (psi)
Sector I: Zúñiga - Dv. Yauyos – Alis	57+450 – 130+000	20	13 201
	130+000 – 163+100	18	12 745
Sector II: Alis - San José de Quero	163+100 – 220+000	18	12 745
	220+000 – 229+300	5	7 500
Sector III: San José de Quero - Ronchas	229+300 – 240+000	5	7 500
	240+000 – 248+000	15	11 956
	248+000 – 255+185	4	6 000

**Cuadro N° 1.01 Sectores de la carretera**  
**Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras CGC.**

**Tráfico Vehicular**

La información del estudio de tráfico corresponde al realizado por el Consorcio encargado del mantenimiento, a continuación se presenta el cuadro resumen.

Tipo Vehículo	Lunahuaná		Pacarán		Zúñiga		Dv. Yauyos		Ronchas	
	Veh	%	Veh	%	Veh	%	Veh	%	Veh	%
Automóvil	79	19%	127	30%	3	6%	186	54%	310	68%
Cmta. Pick Up	131	31%	96	23%	18	34%	31	9%	26	6%
Cmta. Rural	120	29%	105	25%	4	8%	37	11%	33	7%
Micro	12	3%	17	4%	0	0%	5	1%	5	1%
Ómnibus ≥ 2 ejes	10	2%	8	2%	8	15%	8	2%	9	2%
Camión ≥ 2 ejes	49	12%	46	11%	20	38%	44	13%	41	9%
Semitrailer	16	4%	19	5%	0	0%	36	10%	30	7%
<b>TOTAL</b>	<b>417</b>	<b>100%</b>	<b>418</b>	<b>100%</b>	<b>53</b>	<b>100%</b>	<b>347</b>	<b>100%</b>	<b>454</b>	<b>100%</b>

Cuadro N° 1.02 Tránsito de vehículos

Fuente: Consorcio Gestión de Carreteras CGC. Abril, 2008

De acuerdo a los estudios de tráfico se aplicaron las siguientes estructuras del pavimento para cada tramo.

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

Cuadro N° 1.03 Tratamiento superficial por tramos

Fuente: Gestión de Carreteras CGC. Abril, 2008

## CAPÍTULO II- ESTADO DEL ARTE

### 2.1 SISTEMAS DE ANÁLISIS

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

#### 2.1.1 Sistemas elásticos de capas

La teoría de capas elásticas se desarrolla por la necesidad de predecir la respuesta estructural del pavimento por acción de 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 conocido que los materiales granulares y la subrasante de los suelos tienen comportamientos no lineales, con módulos de elasticidad que varían con los niveles de presión. El módulo de elasticidad representado por el de resiliencia obtenido a partir de un ensayo triaxiales:

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

#### 2.1.3 Sistemas lineales Viscoelásticos

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

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

## 2.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

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

### 2.2.1 Viga Benkelman

Es un instrumento manual que consta de 02 brazos, uno que va en contacto con el terreno y el otro que sirve de pivote donde se realizan las mediciones producidas por una carga estática normalizada. 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) el cual se aplica al pavimento con un par de ruedas de acero rígidas. Un generador dinámico se utiliza para producir una fuerza de hasta 4.45 kN. Para más detalle revisar (HUANG, Yang H. "Pavement analysis and design")



**Figura N° 2.2 Equipo Dynaflec**

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

### 2.2.3 Road Rater

Existen varios modelos, los cuales varían fundamentalmente en la magnitud de las cargas estáticas y dinámicas; emplea cuatro sensores para medir la deflexión base. El dispositivo se traslada al lugar de la prueba, donde se coloca la placa de carga y los sensores de deflexión los cuales se colocan sobre el pavimento; una vez finalizada la prueba, la placa y los sensores se levantan del pavimento y el dispositivo está listo para ser trasladado al siguiente punto de prueba.

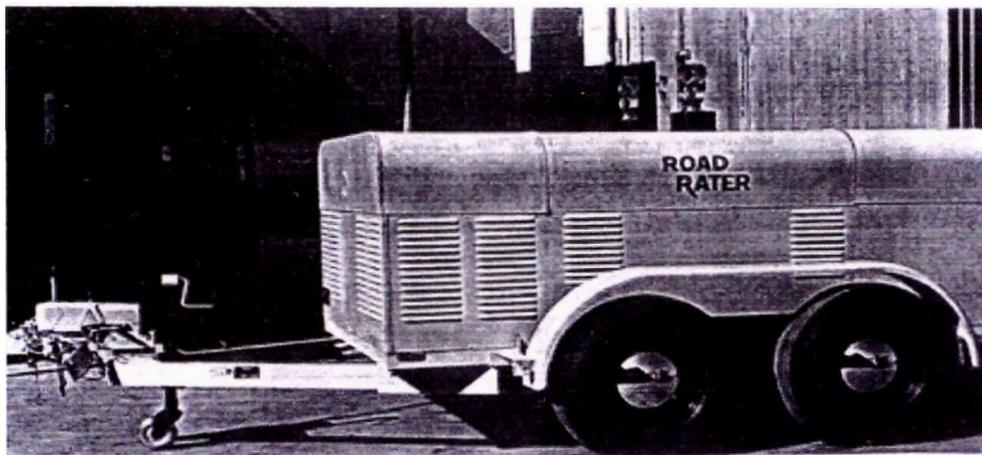


Figura N° 2.3. Road Rater

### 2.2.4 RDD

El deflectómetro dinámico de balanceo (RDD) es una 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 Falling-weight deflectometer (FWD) empleado frecuentemente en los Estados Unidos es el sistema Dynatest modelo 8000. La fuerza de impulso es creada soltando un peso sobre una placa que va a apoyada en el pavimento. Este instrumento permite medir las deflexiones del pavimento producidas por una carga senoidal que impacta sobre 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](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, para detectar la rigidez adecuada de la subrasante, a partir de los desplazamientos verticales de la misma.



**Figura N° 2.6 Equipo KUAB - FWD**

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

### CAPÍTULO III- MARCO TEÓRICO

Con la finalidad de obtener las propiedades de la carpeta de rodadura, se miden las deflexiones con la viga Benkelman y 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

Es un deflectógrafo que funciona mediante el principio de palanca. Dicho instrumento es completamente mecánico y de diseño simple, según se esquematiza en la Figura 3.1 (a). La viga consta principalmente de dos partes: un brazo fijo y un brazo móvil que gira sobre un pivote.

Para la toma de medidas de las deflexiones se debe tener presente que el extremo del brazo móvil (D), se desplaza verticalmente debido al movimiento del vehículo. Este desplazamiento es registrado por el extensómetro.

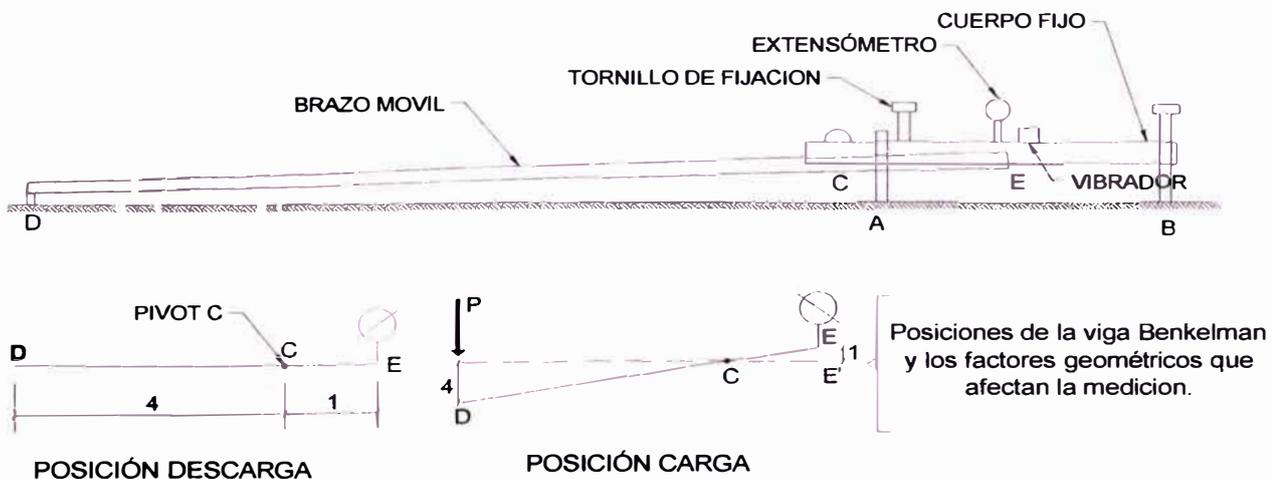


Figura N° 3.1. Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman

#### Metodología de medición de deflexiones con Viga Benkelman

La carga aplicada al pavimento para la realización de ensayos de deflexiones ha sido estandarizada a 8200 kg. Previo a la realización de los ensayos deberá verificarse que se cumpla esta condición; asimismo, deberá verificarse que la presión de las llantas sea la requerida. Una vez ubicado el lugar donde se

realizará el ensayo, usualmente los puntos de medición se localizan a la mitad exterior de un carril, se coloca el par de llantas a usarse sobre el punto, de manera tal que este coincida aproximadamente con el eje vertical del centro de gravedad del conjunto (ver figura 3.2). Situados los neumáticos en se inserta entre ellos el extremo del brazo móvil de la viga, colocándolo 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.

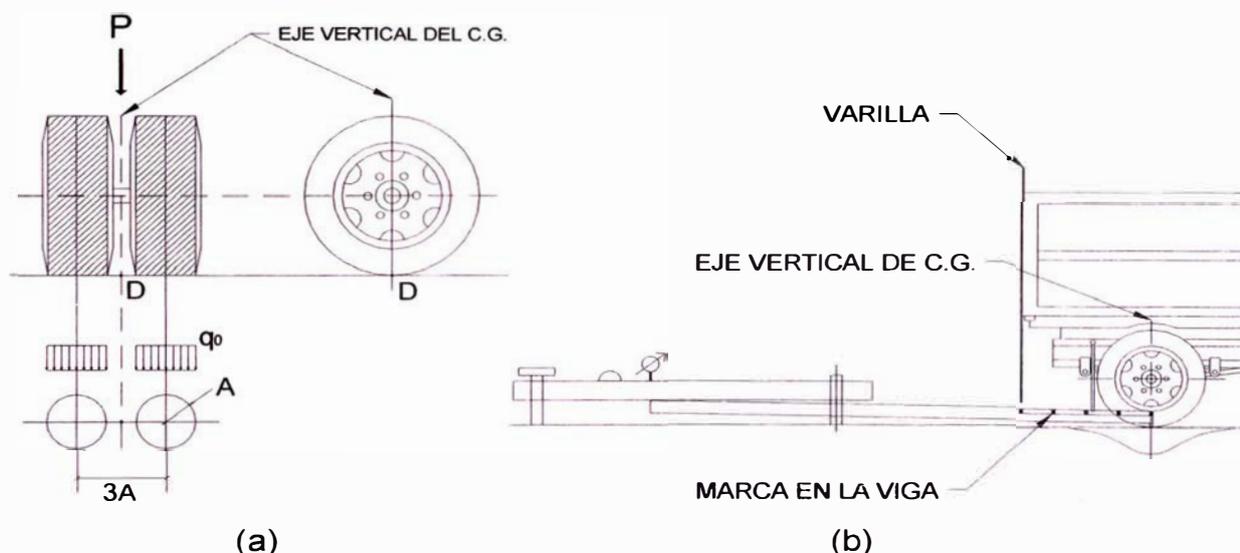
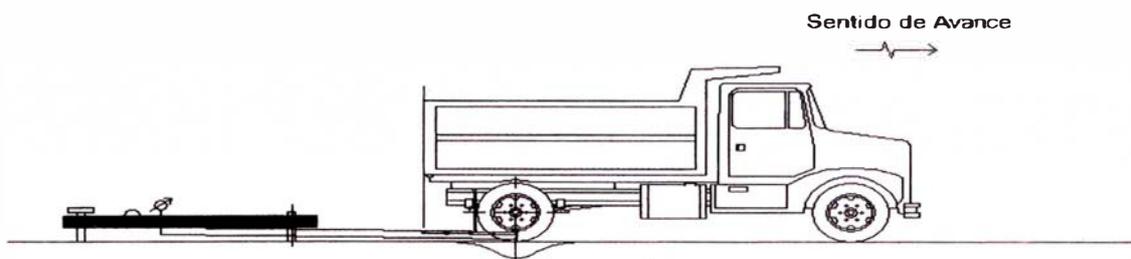


Figura N° 3.2. Configuración geométrica del sistema de carga en ensayos con Viga Benkelman.

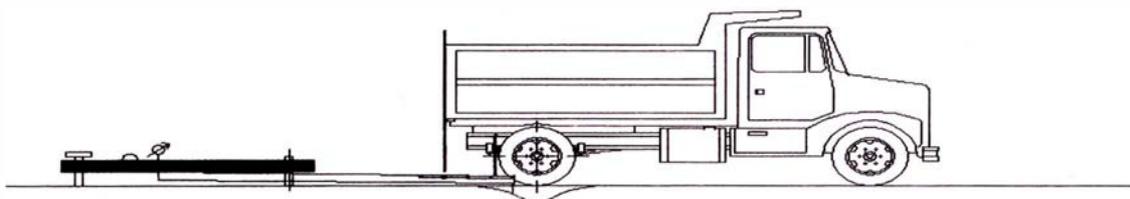
Para la metodología de análisis se requiere de por lo menos tres lecturas, sin embargo, se pueden obtener más lecturas con fines de verificación, lo cual es recomendable si se desea tener una idea gráfica del tipo de curva de deflexión que se produce.

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 y tercera marca adicional se realiza a una distancia de 40 y 70 cm.

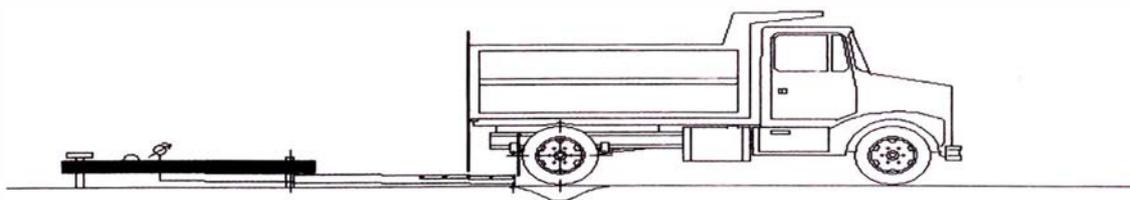
Una vez instalada la viga en el punto de medición, haciendo coincidir con la varilla vertical y la marca inicial [ver FIGURA 3.3 (a)], se verifica que ésta se encuentre alineada longitudinalmente con la dirección del movimiento del camión. Se activará el vibrador y se pondrá el dial del extensómetro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



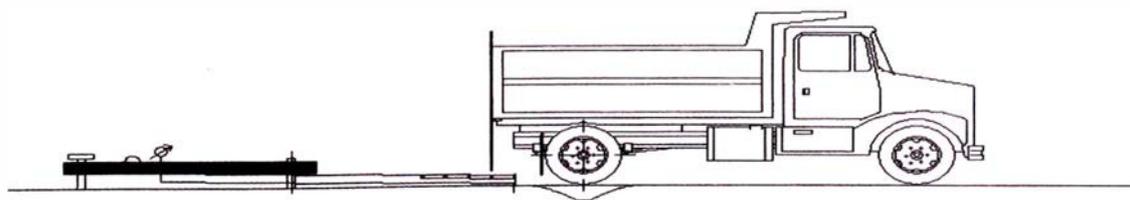
**a) Posición Inicial ( $D_0$ =Deflexión Inicial)**



**b) Posición a 25cm ( $D_{25}$ ).**



**c) Posición a 40cm ( $D_{40}$ ).**



**d) Posición a 70cm ( $D_{70}$ ).**

Figura N° 3.3. Esquematación del proceso de medición con la Viga Benkelman.

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

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

### **Equipo requerido**

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

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

## **3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL**

### **3.2.1 Definiciones previas**

#### **Módulo Resiliente**

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

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

Donde:

$\sigma_d$ : Es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en un ensayo no confinado.

$\epsilon_r$ : Deformación Recuperable

#### **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**

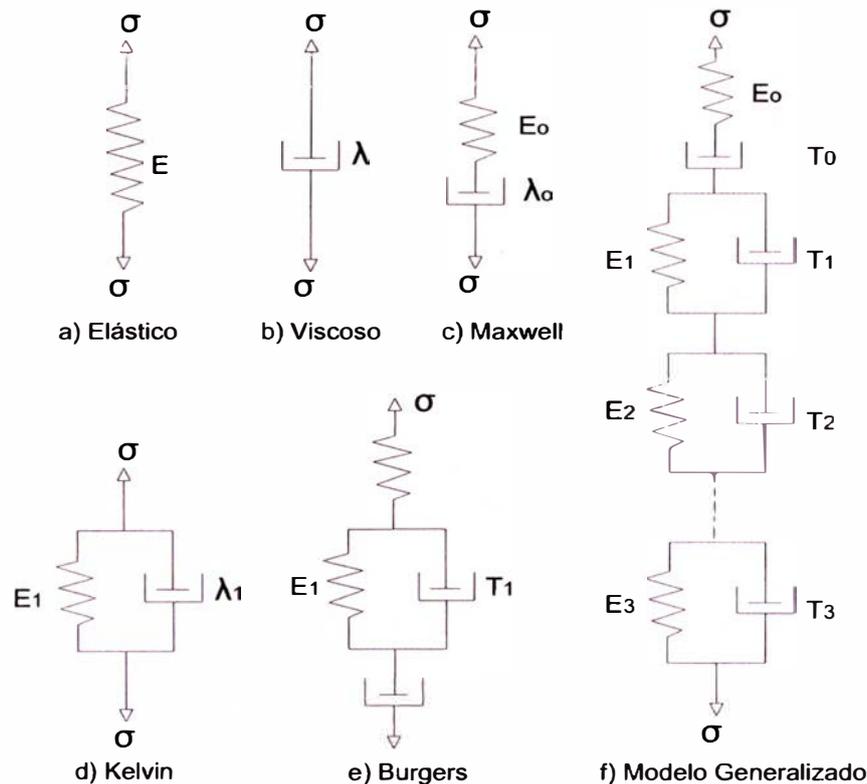
El número CBR, o simplemente CBR, se obtiene de la relación de la carga unitaria (psi) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración de un pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida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

### **Coefficiente de expansión térmica**

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

### **Modelos Matemáticos**

Se cuenta con varios modelos mecánicos para caracterizar al material. Los modelos mecánicos se forman de dos elementos básicos un resorte y un amortiguador hidráulico, como se muestra a continuación:



**Figura N° 3.4 Modelos Mecánicos para materiales viscoelásticos**

### 3.2.2 Modelo Básico

Un material elástico es caracterizado por un resorte, según lo indicado en Figura 3.4 (a), el cual cumple con la ley de Hooke según la cual 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 cumple 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 un resorte y un amortiguador hidráulico en serie, tal como se 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 la combinación de un resorte y un amortiguador hidráulico en paralelo, según lo indicado en la figura 3.4 (d), los cuales tienen la misma deformación.

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

### 3.2.5 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 el cual 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 este modelo es posible determinar el desplazamiento o deflexión de un punto debido a cargas distribuidas verticales sobre el pavimento, generadas por dos llantas cuya área de contacto son dos circunferencias de radio "a".

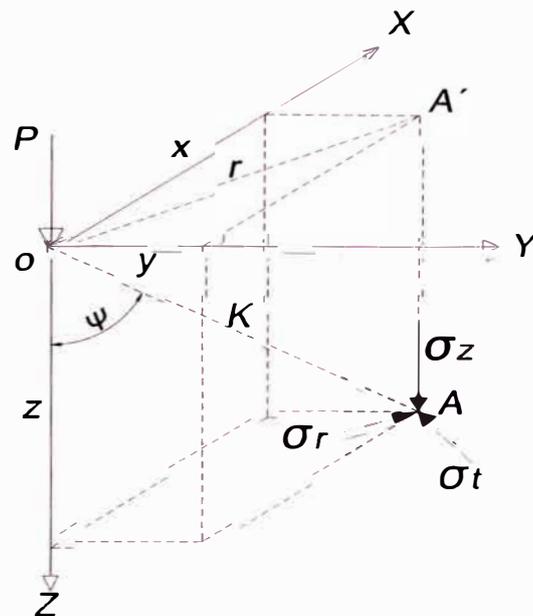


Figura N° 3.5 Esfuerzos provocados en un punto de una masa de suelo por una carga concentrada

En el problema de Boussinesq se plantean las siguientes expresiones para la determinación de los esfuerzos en el punto A:

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

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

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

### 3.3.2 Modelo de Hogg

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

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

- 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:

$$D \cdot \nabla^2 \delta = \rho$$

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

D = rigidez de la placa.

$\delta$  = desplazamiento vertical de la fibra neutra.

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

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

Al aplicar la transformada de Hankel a la ecuación 3.17, para  $z=0$  tiene como solución:

$$D(0,r) = \frac{(1 + \mu_o)(3 - 4\mu_o) p \cdot a}{2(1 - \mu_o) E_o} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{mr}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{ma}{L_0}\right)}{m^4 + m\phi\left(\frac{mh}{L_0}\right)} dm \quad (3.11)$$

Donde:

$$\phi_{(m)} = \frac{\text{Senhm} \times \text{Coshm} + \frac{m}{3 - 4\mu_o}}{\text{Senh}^2 m - \frac{m^2}{(3 - 4\mu_o)^2}} \quad (3.12)$$

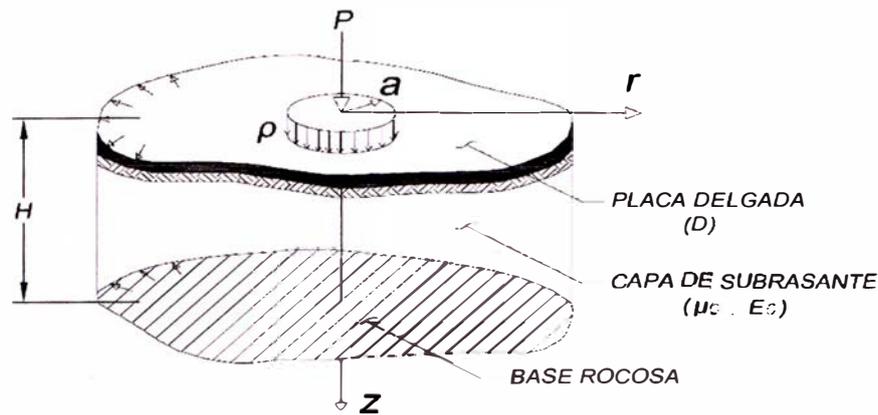


Figura N° 3.6 Modelo de Hogg

### 3.3.3 Modelo de Westergaard

A partir 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 “ $\delta$ ” es proporcional a la presión vertical “ $v$ ” en ese punto.

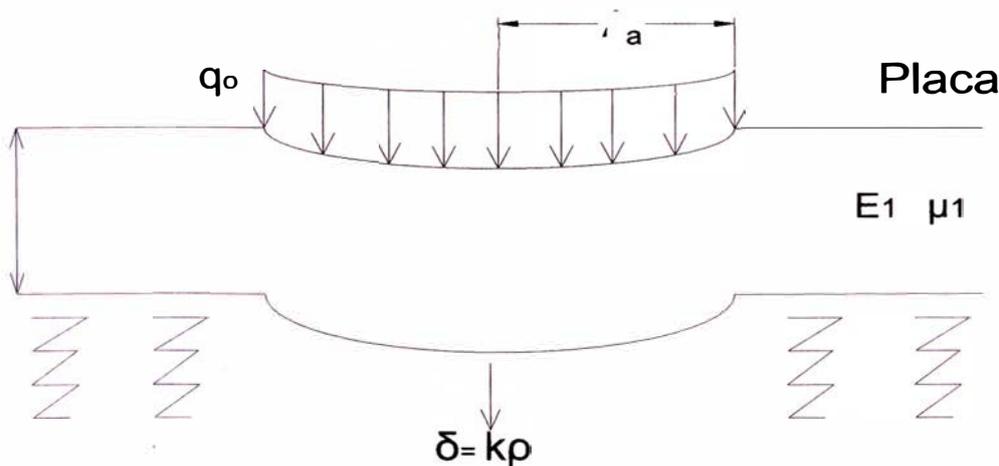


Figura N° 3.7 Modelo de Westergaard

### 3.3.4 Modelos bicapas

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

### 3.3.5 Modelos multicapas (Burmister, 1943)

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

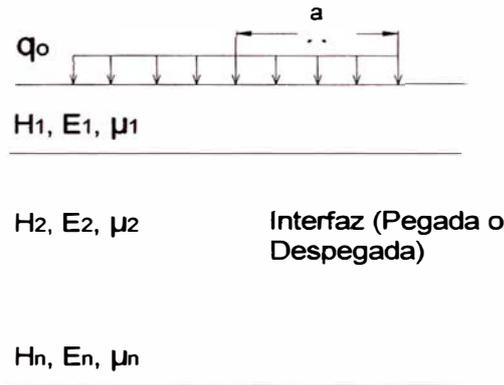


Figura N° 3.8 Modelo multicapas.

## 3.4 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PAVIMENTOS

### 3.4.1 Fórmulas de Boussinesq

El masivo semi-infinito de Boussinesq se supone lineal, isotrópico, elástico, con módulo de Young  $E_s$  y de coeficiente de Poisson  $\mu$ .

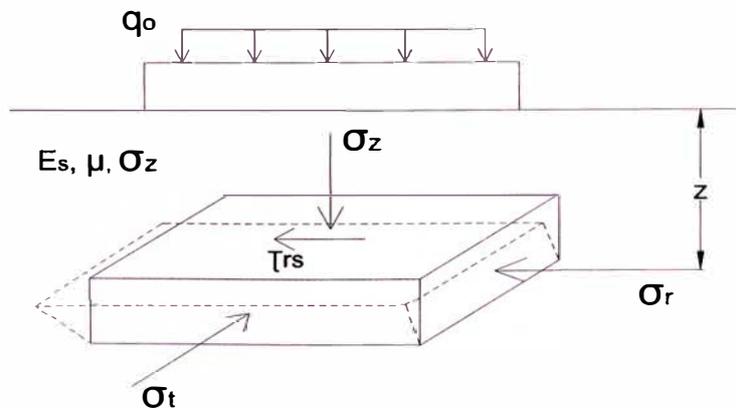


Figura N° 3.9 Representación de un masivo semi-infinito.

La fórmula de Boussinesq para hallar el desplazamiento de un punto en el suelo provocado por una carga puntual es:

$$\delta = \frac{P}{2\pi E_s} (1 + \mu) \left[ 2(1 - \mu) + \left( \frac{z}{K} \right)^2 \right] \frac{1}{K} \quad (3.13)$$

### 3.4.2 Fórmula de Westergaard

La carga  $P$  se aplica sobre un área elíptica. El pavimento es una placa homogénea, isotropita y elástica con módulo de Young  $E$  y coeficiente de Poisson  $\mu$ , su espesor  $h$  es constante.

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

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (3.14)$$

Donde  $k$  es el módulo de reacción.

### 3.4.3 Fórmula de Palmer y Barber generalizada

La carga sobre la calzada se esquematiza por una presión unitaria  $q$ , aplicada sobre un área circular de radio  $a$ .

El pavimento está compuesto por  $n-1$  capas horizontales de espesor  $h_i$  de módulo de Young  $E_i$  y de coeficiente de Poisson  $\mu_i$  igual a:

$$\hat{E} = E_1 \left[ \frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (3.15)$$

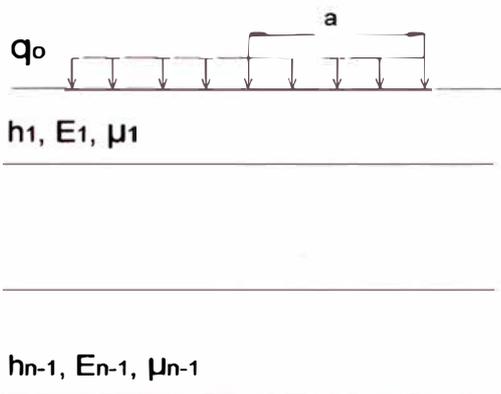


Figura N° 3.10 Multicapa propuesto con la fórmula de Palmer y Barber generalizada.

La ecuación 3.15 es 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 el pavimento se esquematiza por una presión uniforme  $q$  aplicada sobre un área circular de radio  $a$ .

El pavimento está compuesta por  $n-1$  capas horizontales de espesor  $h_i$ , módulo de Young  $E_i$  y de coeficiente de Poisson  $\mu_i$ , la caracterización de la base es un masivo semi-infinito de características mecánicas  $E_n$  y  $h_n = \infty$

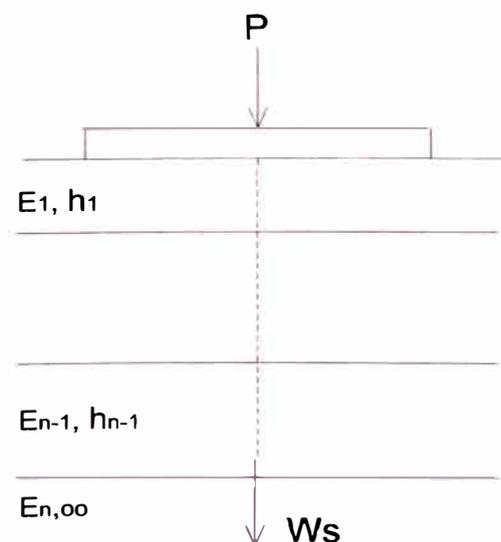


Figura N° 3.11 Multicapa propuesto con la fórmula de Odemark

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.16)$$

### 3.4.5 Método 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 cumplen 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.

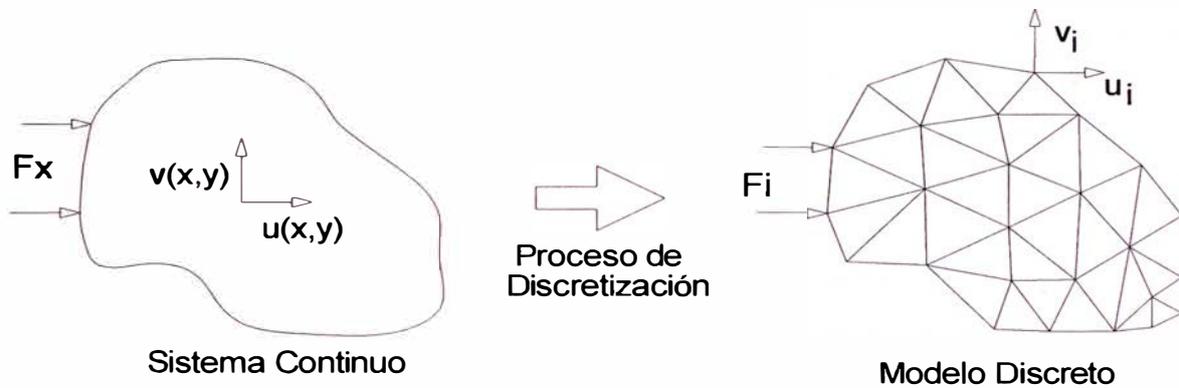


Figura N° 3.12 Modelo de elementos finitos

## CAPÍTULO IV - APLICACIÓN TRAMO km 69+000 – km 74+000

### 4.1 APLICACIÓN DE LA VIGA BENKELMAN.

La deflectometría consiste en el estudio de las deformaciones verticales de la superficie de la calzada debido a la acción de una carga estándar de 8.2 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 71+900 en forma decreciente terminando en el 71+500 km.
- Se utilizó la viga Benkelman de brazo simple con relación de brazo de 4:1 y con un dial de precisión de 0.02 mm.
- Se utilizó un camión eje posterior simple que transmitía una carga de 8.2 t controladas con una balaza electrónica.
- La presión de inflado de las llantas fue de 80 psi.
- Se registró la temperatura de la carpeta asfáltica con termómetro digital de precisión.
- Se midió el espesor de la carpeta asfáltica en cada punto.
- Se registró la lectura de las deflexiones.

#### Procedimiento de medición.

Las medidas de las deflexiones en campo se basaron 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 guía para saber en qué momento el camión pasa por los puntos previstos para el estudio.
- Se marcarán en la viga previamente con cinta adhesiva los puntos previstos que son materia de estudio, en este caso se ubicaron a 0, 25, 40 y 70 cm respectivamente.

- La rueda dual externa del camión deberá ser colocada sobre el punto seleccionado quedando este 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 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 se ajusta la base por medio del tornillo trasero de tal forma 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/min o menos.
- Establecida la lectura inicial en cero, un operador ordena 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.
- Al escuchar las indicaciones los lectores dirán en voz fuerte y clara las medidas indicadas por el extensómetro, mientras que otro operador las anotará; esto se hace con el fin que no se presente problema alguno en la toma de medidas.
- 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.
- Se anota la medida del ahuellamiento en el punto de ensayo y se realizan anotaciones y registros fotograficos generales de las fallas superficiales aledañas.

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 las 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 indican las medidas por cada sub tramo de 100m.

Estaca (km)	Lecturas de Campo ( $10^{-3}$ mm)				RESULTADOS DEFLECTOMÉTRICOS			
					Deflexiones( $\times 10^{-2}$ mm)			
	L <sub>25</sub>	L <sub>40</sub>	L <sub>70</sub>	L <sub>max</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>40</sub>	D <sub>70</sub>
71+500	6	8	10	12	48	24	16	8
71+600	8	14	16	18	72	40	16	8
71+700	8	12	16	22	88	56	40	24
71+800	6	8	10	12	48	24	16	8
71+900	8	14	18	20	80	48	24	8

**Cuadro N° 4.01 Datos tomados en campo**  
 (Fuente: Elaboración Propia)

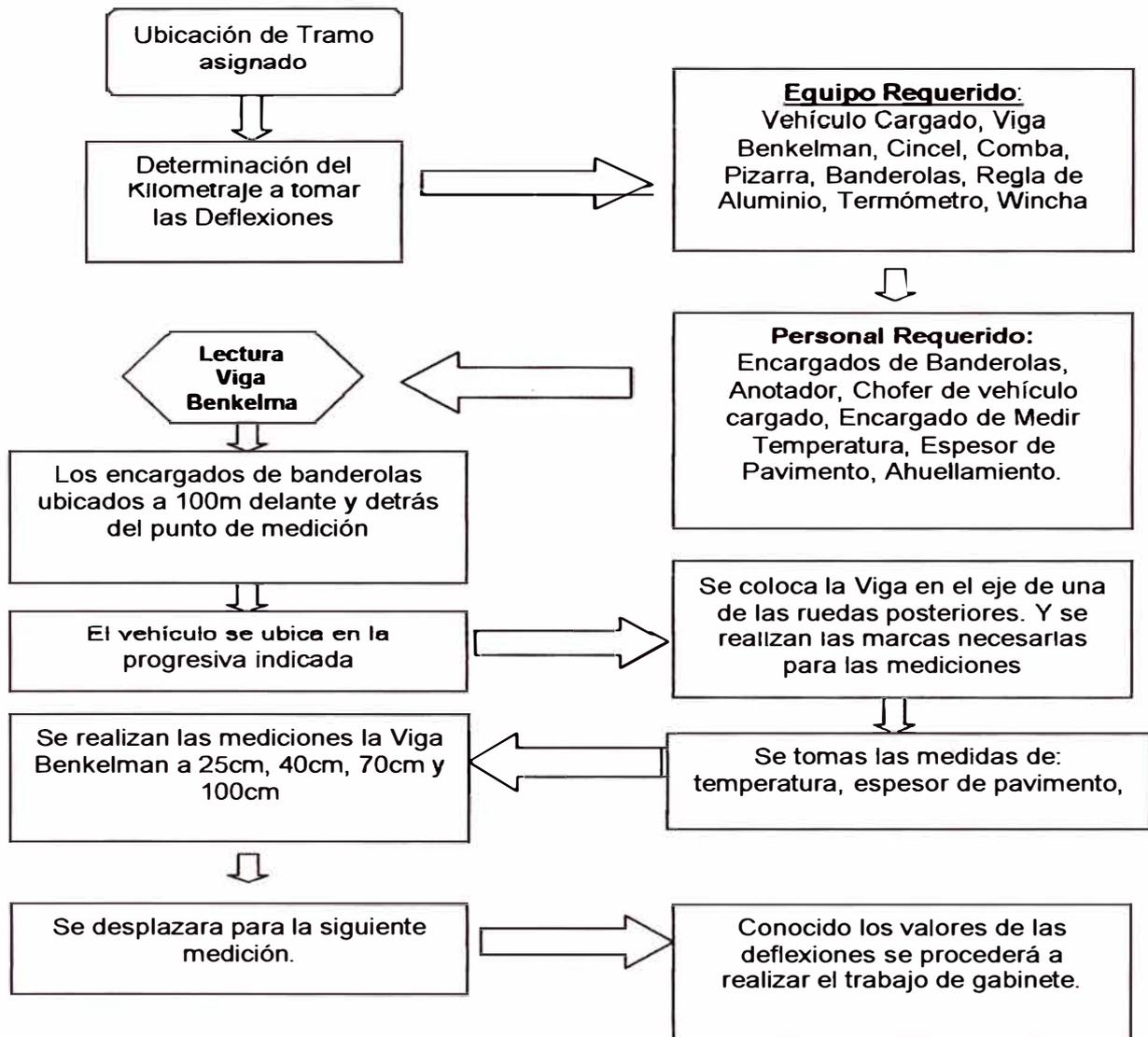


Figura 4.1 Diagrama de la medición de deflexiones usando la Viga Benkelman

## 4.2 APLICACIÓN CON SOFTWARE QUE PROCESA DATOS DE CAMPO CON EL MODELO DE HOGG

Para la aplicación de la teoría definiremos 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 cargado con 8.2 t y la presión de inflado es de 80psi. En el modelo de carga (ver figura 3.2) 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:

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

$a$  = Radio de la huella circular de contacto

$P$  = Carga sobre una llanta

$\rho$  = Presión de Inflado

### Cálculo de $r$

Es la distancia del centro geométrico de la llanta doble en dirección longitudinal.

### Cálculo del módulo de elasticidad de la Subrasante ( $E_0$ )

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

### Desarrollo de nomogramas

El modelo de Hogg propone que:

$$D_{(z=0,r)} = \frac{((1 + \mu_0) \cdot (3 - 4) \cdot p \cdot a)}{2 \cdot (1 - \mu_0) \cdot E_0} \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{m \cdot r}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{L_0}\right)}{m^4 + m \cdot \phi\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right)} dm \quad (4.2)$$

Donde:

$$\phi\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right) = \frac{\sinh\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right) \cdot \cosh\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right) + \frac{m \cdot h}{L_0 \cdot (3 - 4 \cdot \mu_0)}}{\sinh^2\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right) - \frac{(m \cdot h)^2}{(L_0 \cdot (3 - 4 \cdot \mu_0))^2}} \quad (4.3)$$

Si  $D(z=0,0)/D(0,r)$ :

$$\frac{D_{(z=0,r)}}{D_{(z=0,r=0)}} = \frac{\left( \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{m \cdot r}{L_0}\right) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{L_0}\right)}{m^4 + m \cdot \phi\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right)} dm \right)}{\left( \int_0^{\infty} \frac{J_0(0) \cdot J_1\left(\frac{m \cdot a}{L_0}\right)}{m^4 + m \cdot \phi\left(\frac{m \cdot h}{L_0}\right)} dm \right)} \quad (4.4)$$

Con el propósito de construir los nomogramas que permitan correlacionar el cociente de las deformaciones respecto a distintas posiciones de carga del camión (r), se han considerado los siguientes parámetros:

$$h/L_0 = [5 \ 10 \ 15 \ 20]$$

$$A = 11.5 \text{ cm}$$

$$L_0 = [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110]$$

Bajo los cuales se obtienen los siguientes nomogramas:

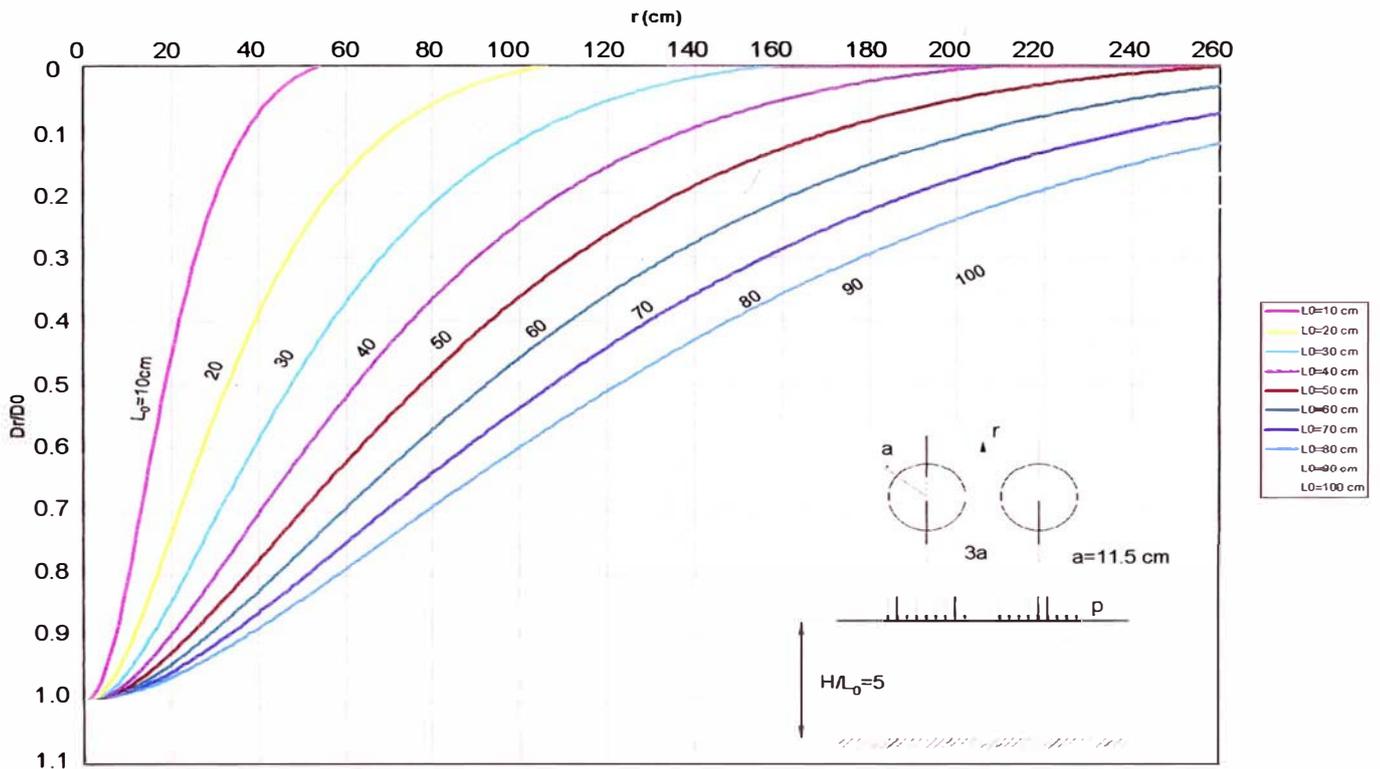


Figura 4.2 Nomograma  $D_r/D_0$  vs  $r$  para  $h/L_0=5$

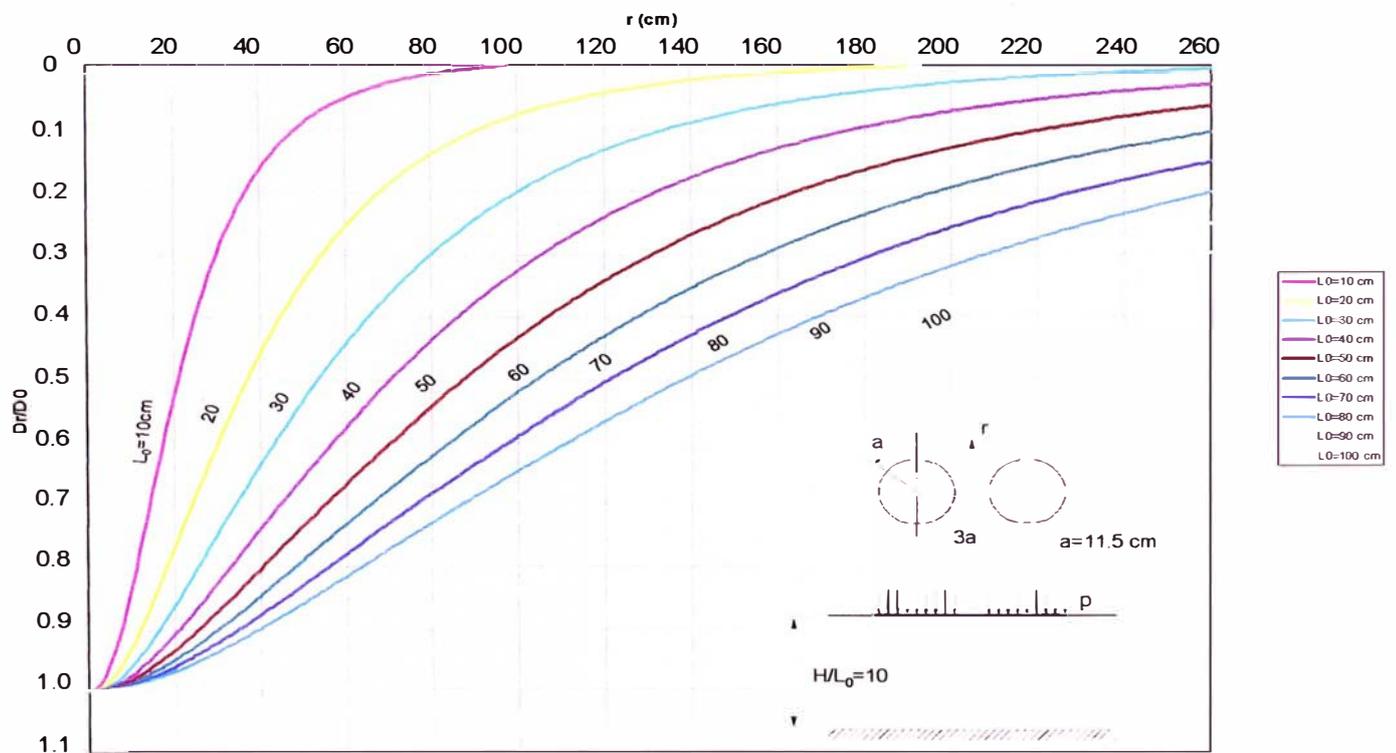


Figura 4.3 Nomograma  $D_r/D_0$  vs  $r$  para  $h/L_0=10$

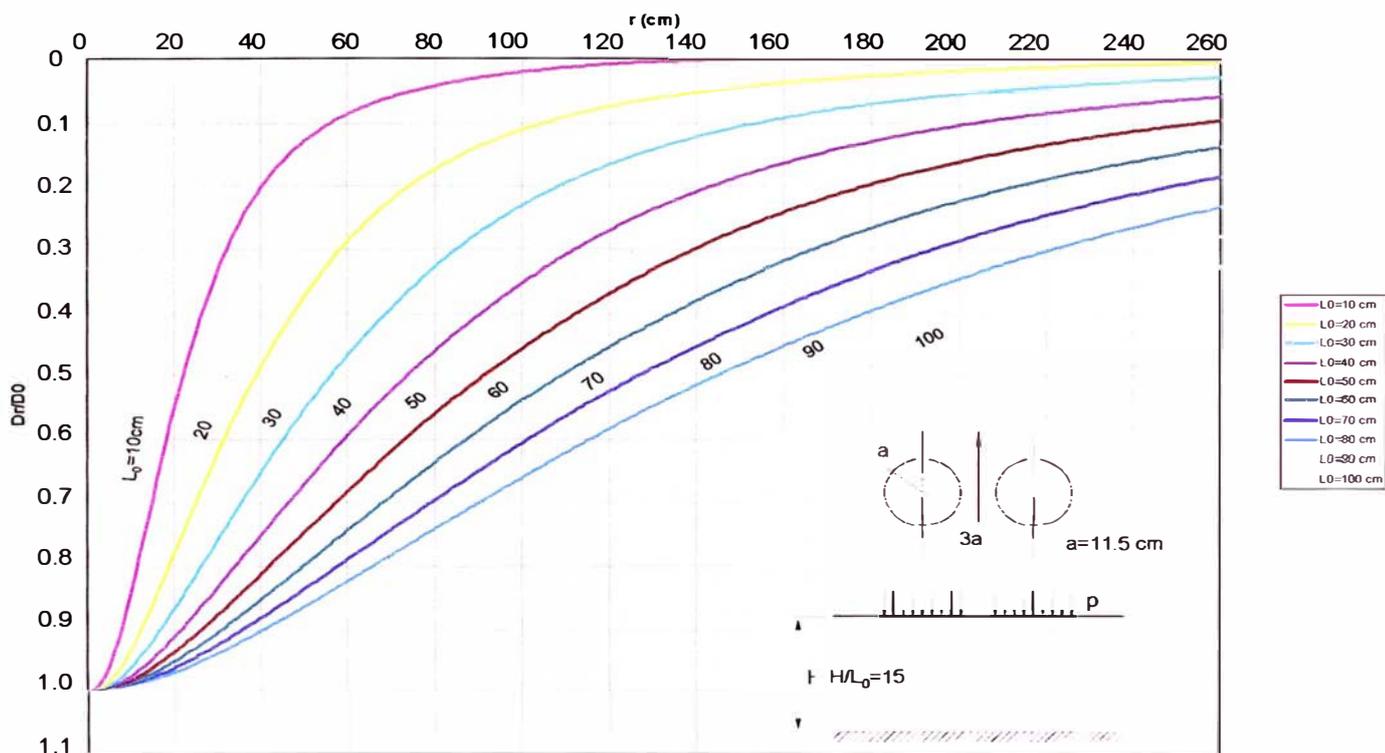


Figura 4.4 Nomograma  $D_r/D_0$  vs  $r$  para  $h/L_0=15$

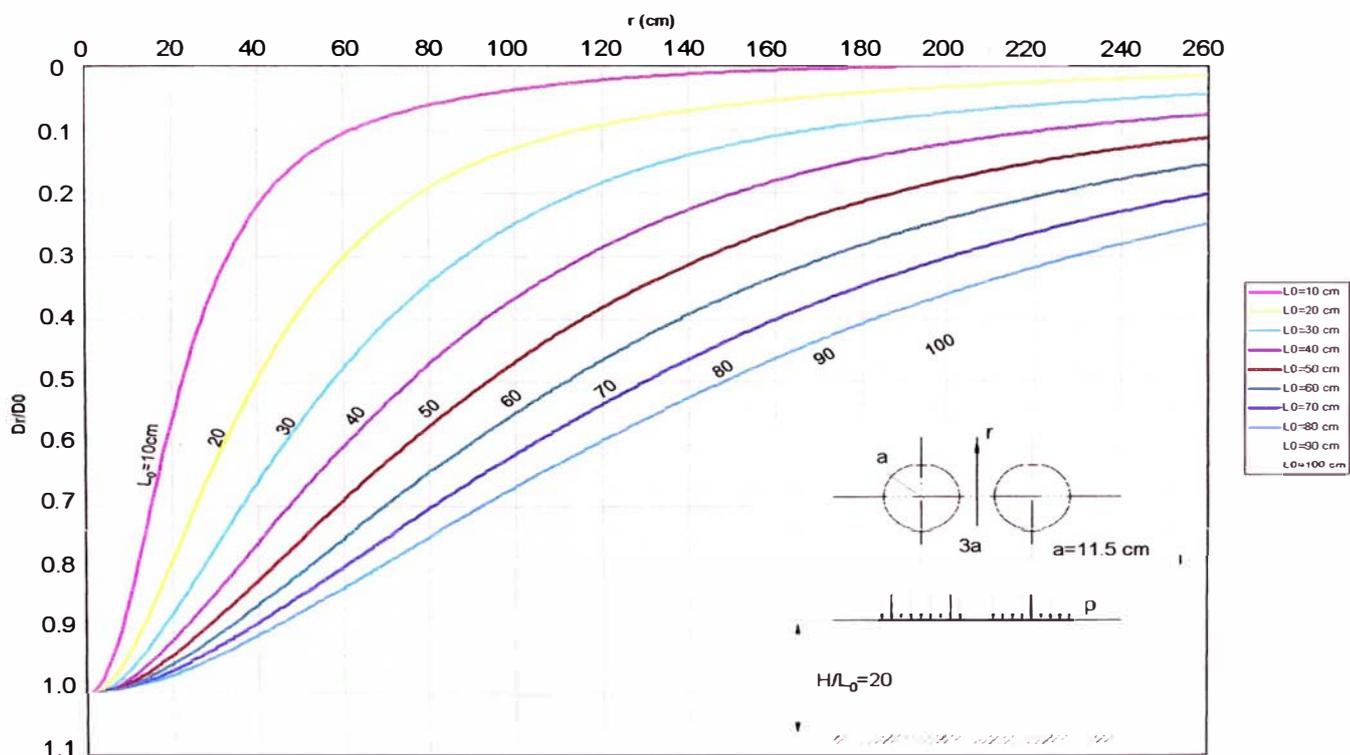


Figura 4.5 Nomograma  $D_r/D_0$  vs  $r$  para  $h/L_0=20$

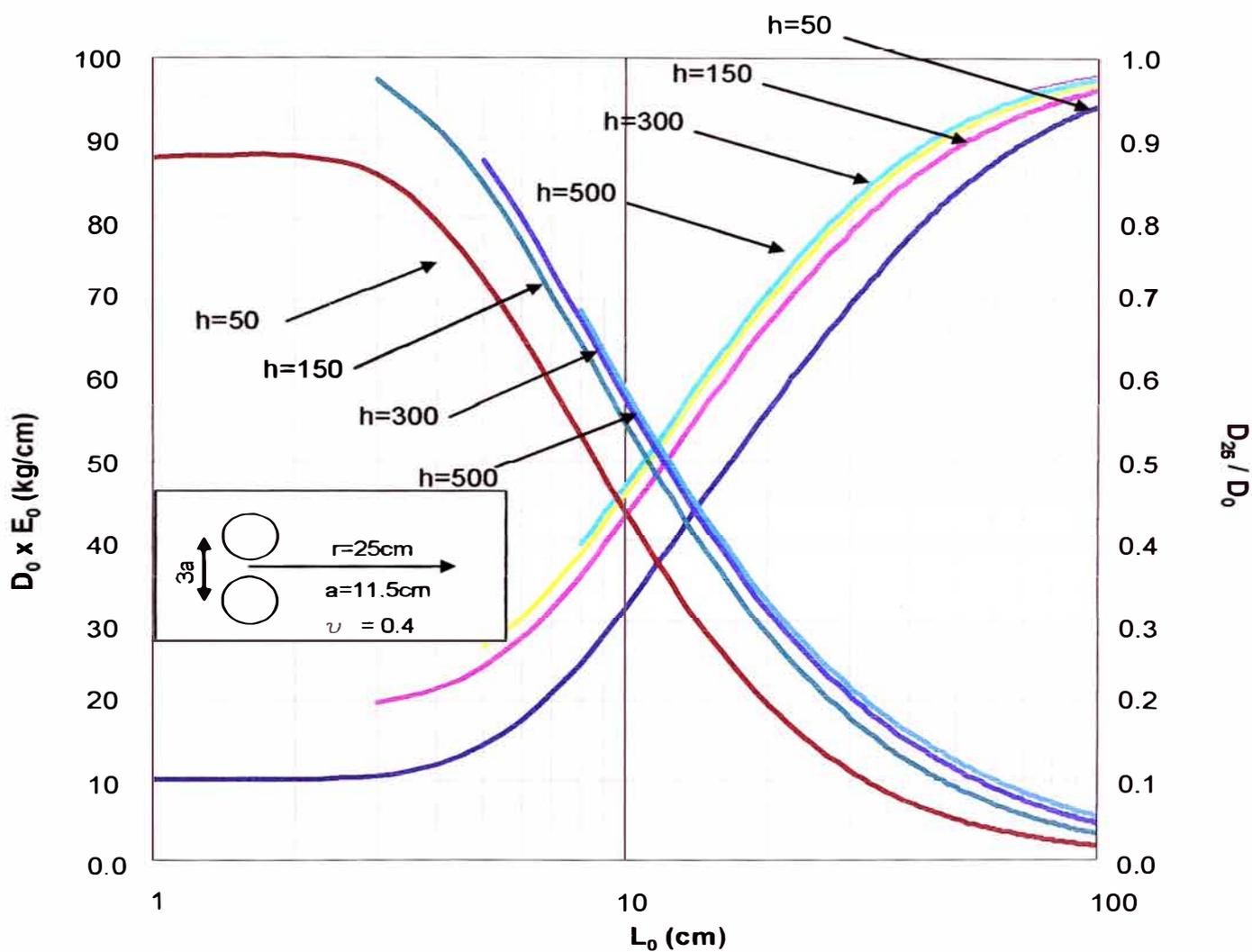


Figura 4.6 Nomograma  $L_0$  vs  $D_{25} / D_0$  vs  $D_0 \times E_0$  para  $r = 25\text{cm}$

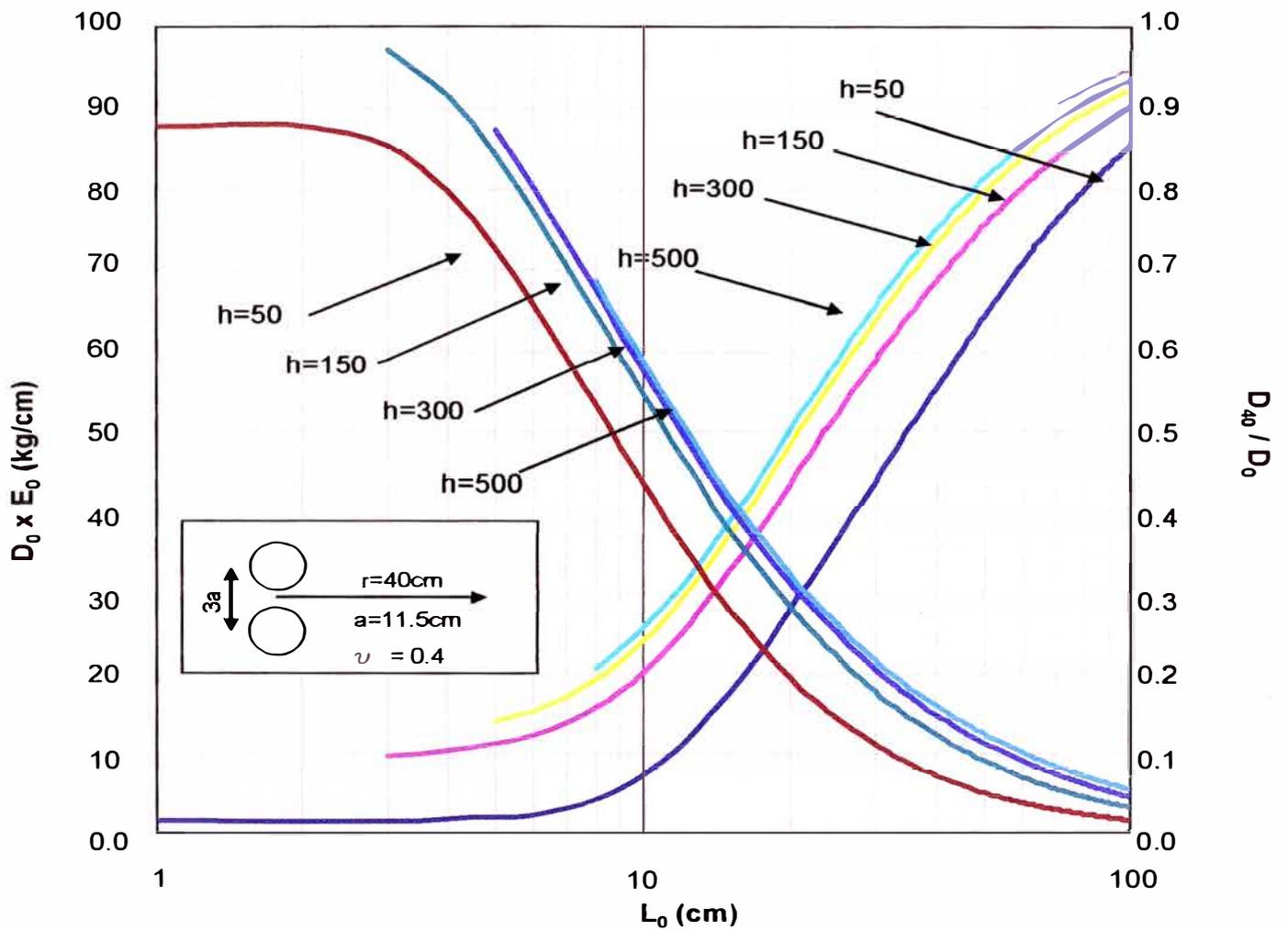


Figura 4.7 Nomograma  $L_0$  vs  $D_{25} / D_0$  vs  $D_0 \times E_0$  para  $r = 40\text{cm}$

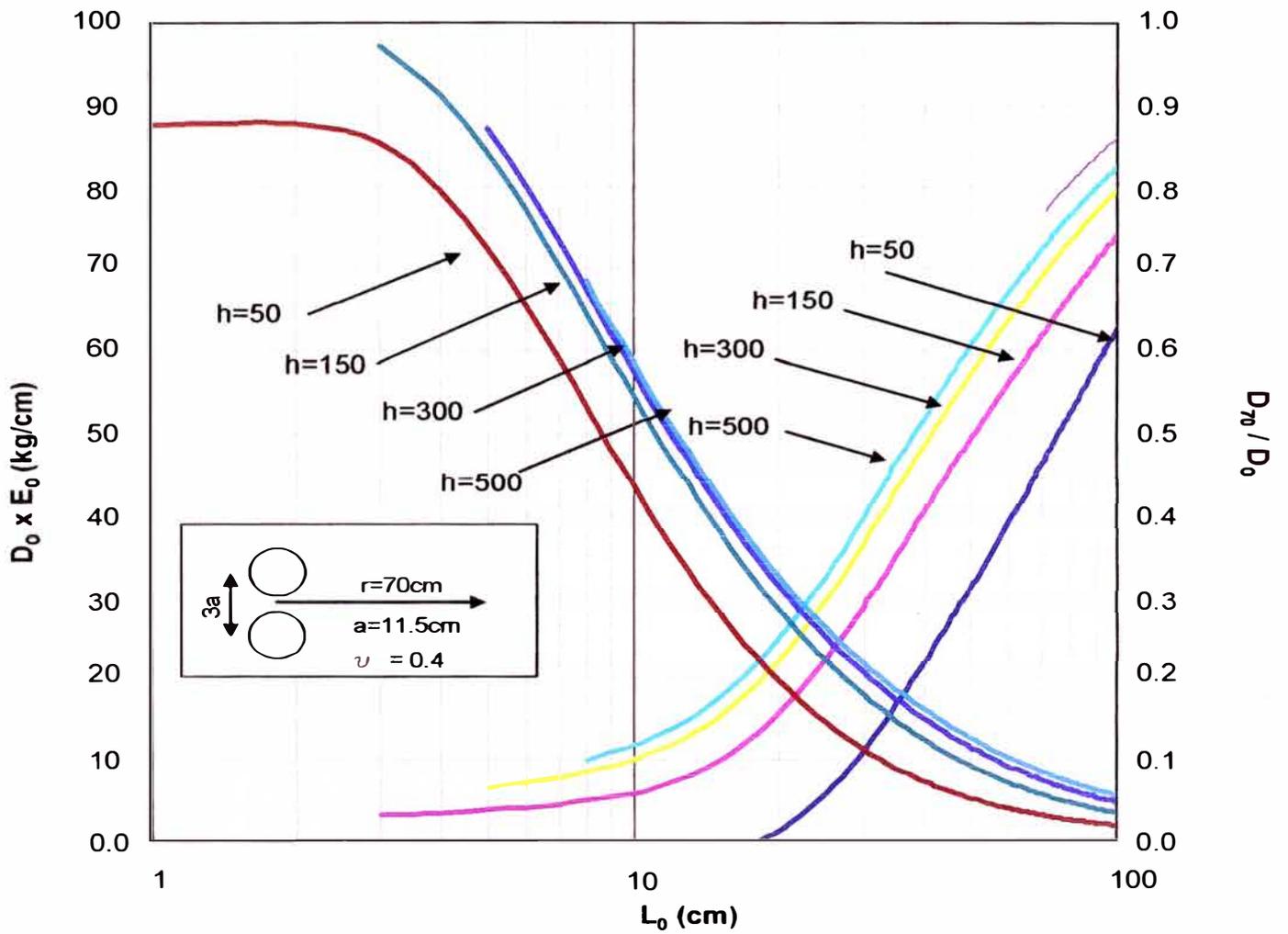


Figura 4.8 Nomograma  $L_0$  vs  $D_{25} / D_0$  vs  $D_0 \times E_0$  para  $r = 70\text{cm}$

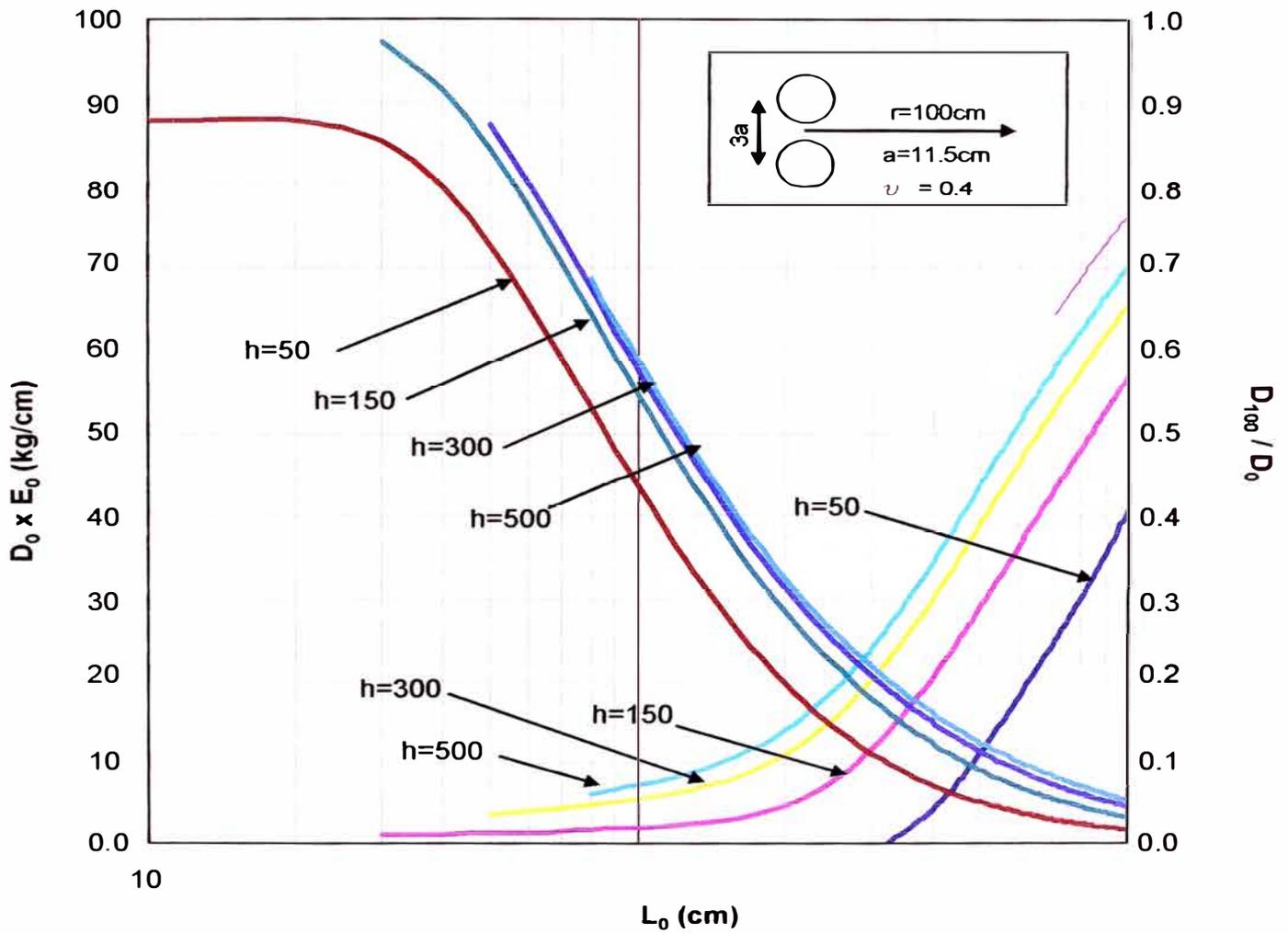


Figura 4.9 Nomograma  $L_0$  vs  $D_{25} / D_0$  vs  $D_0 \times E_0$  para  $r = 100$ cm

## CAPÍTULO V - ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Debido a que no se cuenta con la relación  $h/L_0$  se tomarán diferentes valores, los cuales son 5, 10, 15 y 20.

$r = 25 \text{ cm}$	71+500	71+600	71+700	71+800	71+900
$D_r/D_0 =$	<b>0.5</b>	<b>0.555</b>	<b>0.636</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>
$h/L_0 = 5$	14.766	22.891	19.938	14.766	19.766
$h/L_0 = 10$	12.422	16.328	17.688	12.422	18.203
$h/L_0 = 15$	11.641	14.297	16.938	11.641	15.234
$h/L_0 = 20$	11.641	13.672	16.563	11.641	14.922
<b>PROMEDIO <math>L_0</math></b>	<b>12.6</b>	<b>16.8</b>	<b>17.8</b>	<b>12.6</b>	<b>17.0</b>

Cuadro N° 5.01  $L_0$  promedio para  $r=25 \text{ cm}$  en función de  $D_r/D_0$  y diferentes valores de  $h/L_0$

Fuente: Elaboración propia

$r = 40 \text{ cm}$	71+500	71+600	71+700	71+800	71+900
$D_r/D_0 =$	<b>0.333</b>	<b>0.222</b>	<b>0.454</b>	<b>0.333</b>	<b>0.3</b>
$h/L_0 = 5$	17.9	14.8	21.8	17.9	16.8
$h/L_0 = 10$	15.5	11.6	19.9	15.5	14.1
$h/L_0 = 15$	14.0	10.6	18.8	14.0	13.2
$h/L_0 = 20$	14.0	10.2	18.1	14.0	12.6
<b>PROMEDIO <math>L_0</math></b>	<b>15.4</b>	<b>11.8</b>	<b>19.7</b>	<b>15.4</b>	<b>14.2</b>

Cuadro N° 5.02  $L_0$  promedio para  $r=40 \text{ cm}$  en función de  $D_r/D_0$  y diferentes valores de  $h/L_0$

Fuente: Elaboración propia

$r = 70$	71+500	71+600	71+700	71+800	71+900
$D_r/D_0 =$	<b>0.167</b>	<b>0.111</b>	<b>0.272</b>	<b>0.166</b>	<b>0.1</b>
$h/L_0 = 5$	23.4	20.3	29.1	23.4	19.9
$h/L_0 = 10$	18.7	15.8	24.6	18.7	15.1
$h/L_0 = 15$	17.1	13.6	24.6	17.1	12.9
$h/L_0 = 20$	15.5	12.4	24.6	15.5	11.6
<b>PROMEDIO <math>L_0</math></b>	<b>18.7</b>	<b>15.5</b>	<b>25.7</b>	<b>18.7</b>	<b>14.9</b>

Cuadro N° 5.03  $L_0$  promedio para  $r=70 \text{ cm}$  en función de  $D_r/D_0$  y diferentes valores de  $h/L_0$

Fuente: Elaboración propia

A continuación se toman los valores más cercanos del  $D_r/D_0$  al 0.5, lo cual se toman los siguientes valores:

Progresiva	71+500	71+600	71+700	71+800	71+900
$r =$	25	25	40	25	25
$D_r/D_0 =$	0.5	0.555	0.454	0.5	0.6
<b>PROM TOTAL <math>L_0</math></b>	<b>12.62</b>	<b>16.80</b>	<b>19.66</b>	<b>12.62</b>	<b>17.03</b>

Cuadro N° 5.04 Resumen de  $r$  y  $D_r/D_0$  y  $L_0$  promedio

Fuente: Elaboración propia

Por lo cual se obtienen los siguientes valores:

$L_0$ (cm)	$r$ (cm)
12.422	25.00
16.328	25.00
19.938	40.00
12.422	25.00
18.203	25.00

Cuadro N° 5.05 Resumen de  $L_0$  y  $r$

Fuente: Elaboración propia

Analizando las deflexiones de las medidas en campo versus las teóricas y hallando el  $E_0$  tenemos:

### Progresiva 71 + 500

$E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	920.0229	$L_0$	12.422		
Distancia (cm)	0	25	40	70	100
$D_c$ (mm)	0.048	0.024	0.016	0.008	0
$D_t$ (mm)	0.048	0.023703	0.011736	0.002771	0

Cuadro N° 5.06 D campo vs D teórico progresiva 71+500

Fuente: Elaboración propia

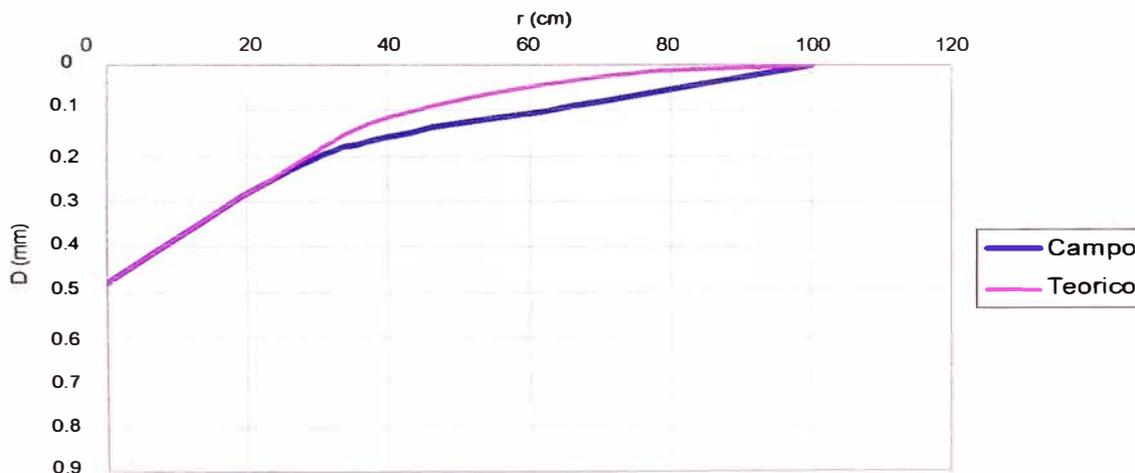


Figura 5.1 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+500

### Progresiva 71 + 600

$E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	492.7189	$L_0$	16.328		
Distancia (cm)	0	25	40	70	100
$D_c$ (mm)	0.072	0.04	0.016	0.008	0
$D_t$ (mm)	0.072	0.043771	0.026219	0.008684	0

Cuadro N° 5.07 D campo vs D teórico progresiva 71+600

Fuente: Elaboración propia

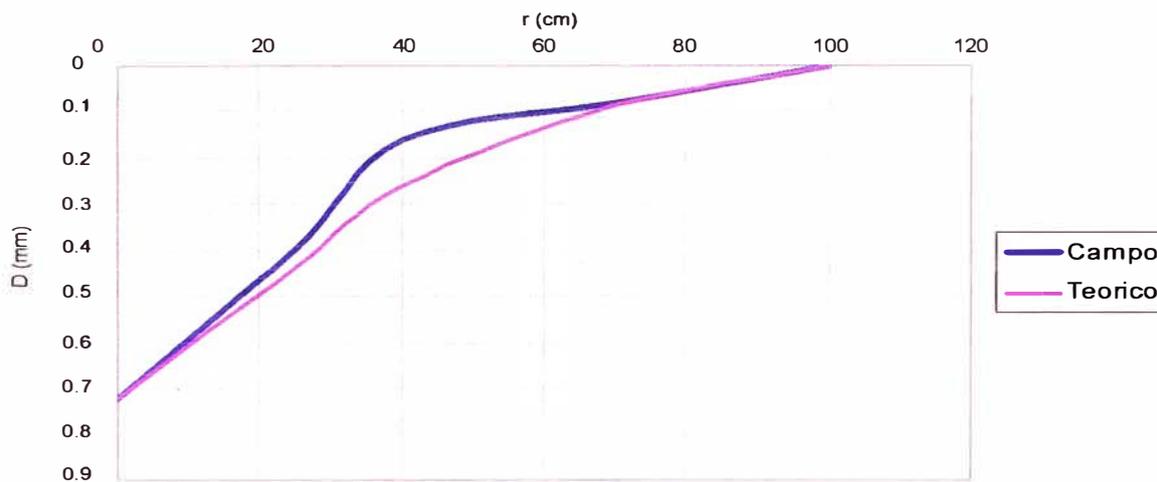


Figura 5.2 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+600

**Progresiva 71 + 700**

$E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	339.63	$L_0$	19.938		
Distancia (cm)	0	25	40	70	100
$D_c$ (mm)	0.088	0.056	0.04	0.024	0
$D_t$ (mm)	0.088	0.060089	0.040226	0.016418	0

Cuadro N° 5.08 D campo vs D teórico progresiva 71+700

Fuente: Elaboración propia

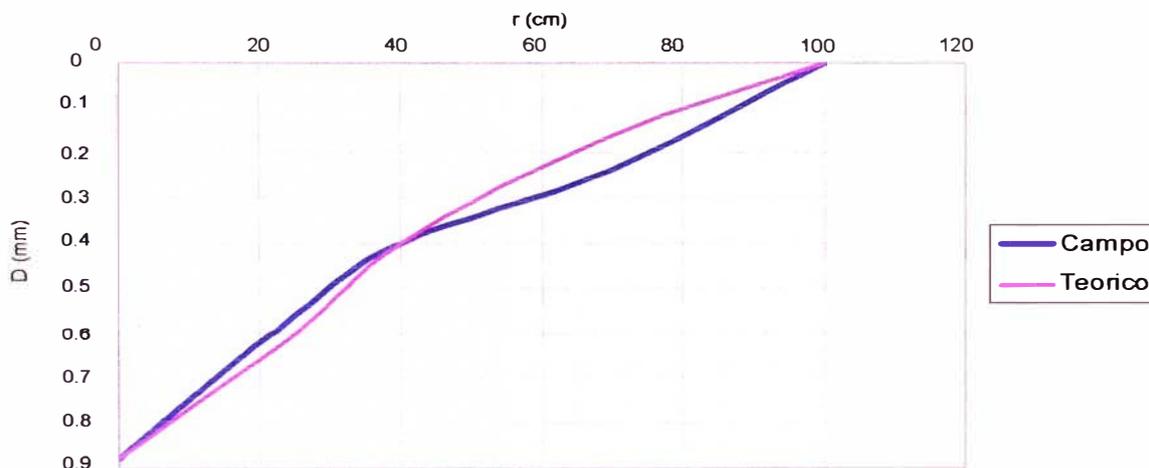


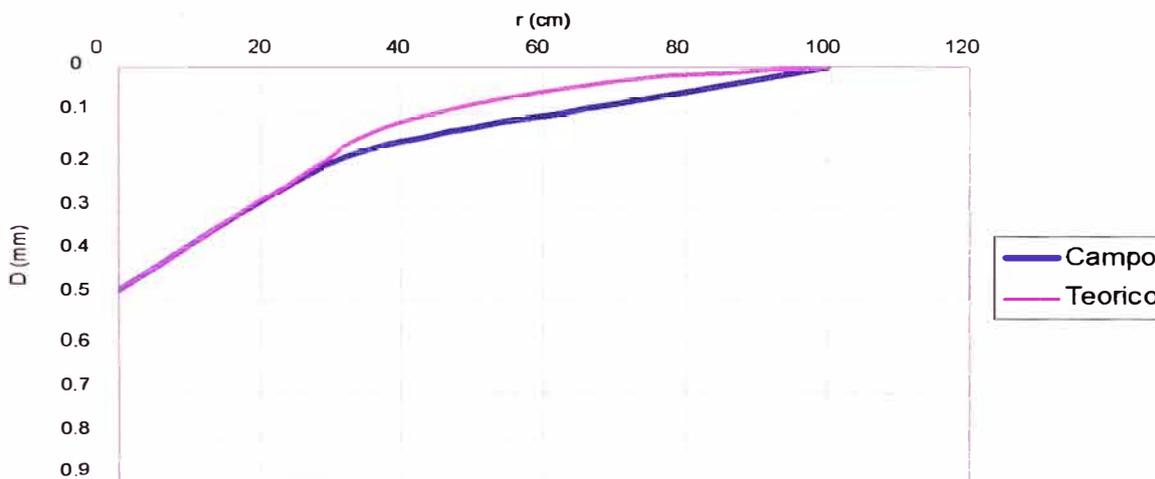
Figura 5.3 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+700

### Progresiva 71 + 800

$E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	920.0229	$L_0$	12.422		
Distancia (cm)	0	25	40	70	100
$D_c$ (mm)	0.048	0.024	0.016	0.008	0
$D_t$ (mm)	0.048	0.023703	0.011736	0.002771	0

**Cuadro N° 5.09 D campo vs D teórico progresiva 71+800**

Fuente: Elaboración propia



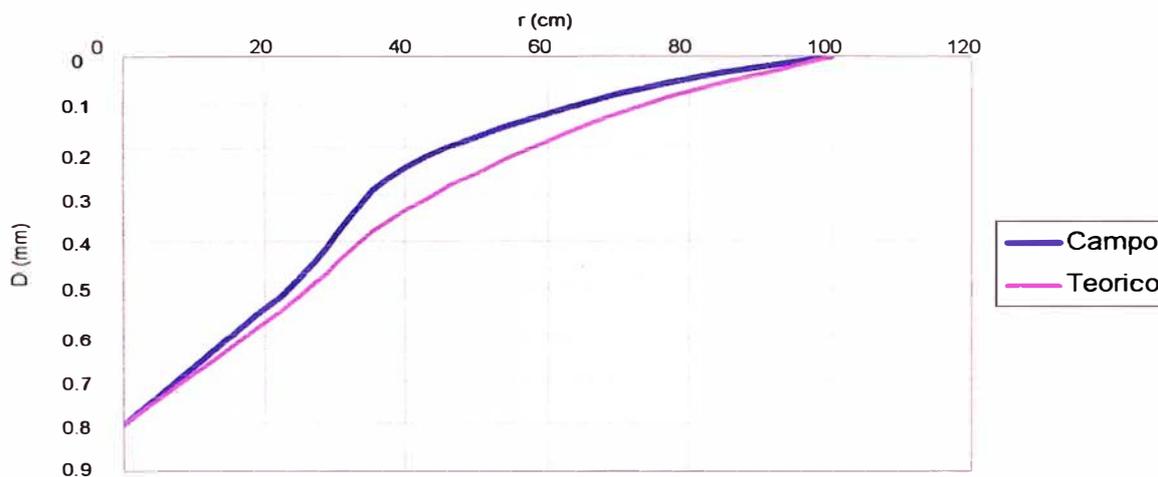
**Figura 5.4 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+800**

### Progresiva 71 + 900

$E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	404.3576	$L_0$	18.203		
Distancia (cm)	0	25	40	70	100
$D_c$ (mm)	0.08	0.048	0.024	0.008	0
$D_t$ (mm)	0.08	0.051983	0.033172	0.012352	0

**Cuadro N° 5.10 D campo vs D teórico progresiva 71+900**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.5 Curva de campo vs curva teórica progresiva 71+900**

De acuerdo al análisis de los datos, se puede inferir que debido a que no se conoce la relación de  $h/L_0$  se han considerado los valores: 5, 10, 15 y 20 para los valores de  $D_r/D_0$  observándose que el promedio de los diferentes son bastantes cercanos al valor  $h/L_0=10$ , razón por la cual con fines prácticos podrá utilizarse dicho valor.

## CONCLUSIONES

- No es posible evaluar estructuralmente el tramo en estudio debido a que los datos de campo son insuficientes, poco confiables, representan solamente un tramo continuo de 500m y fueron tomados por personal sin la experiencia adecuada.
- De acuerdo a lo obtenido en los cuadros N° 5.01; 5.02 y 5.03, se concluye que se puede utilizar  $h/L_0=10$ , debido a que es el promedio de los valores obtenidos para diferentes valores de  $h/L_0$ . Asimismo podemos concluir que conforme la relación  $h/L_0$  aumenta, las variaciones relativas entre los valores obtenidos disminuyen.
- Para el uso de nomogramas basados en el Modelo de Hogg a fin de hallar las deflexiones y  $E_0$  del pavimento se deberá considerar el área de contacto de la carga, el pesaje exacto de la carga y el cociente de Poisson del material.
- Los valores de  $L_0$  del Modelo Simplificado de Hogg y el propuesto coinciden, sin embargo, los valores de  $E_0$  del modelo son bajos.

## RECOMENDACIONES

- Las mediciones de campo deberán ser tomadas por personal calificado y con la experiencia adecuada en la materia. Asimismo, con la finalidad de evaluar estructuralmente el tramo de la carretera, deberá tomarse mediciones por lo menos cada 100m a lo largo del mismo.
- Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en el presente Informe de Suficiencia, se deberán preparar nomogramas para cada una de las condiciones específicas tales como: el área de contacto de la carga, el pesaje exacto de la carga, el cociente de Poisson del material.

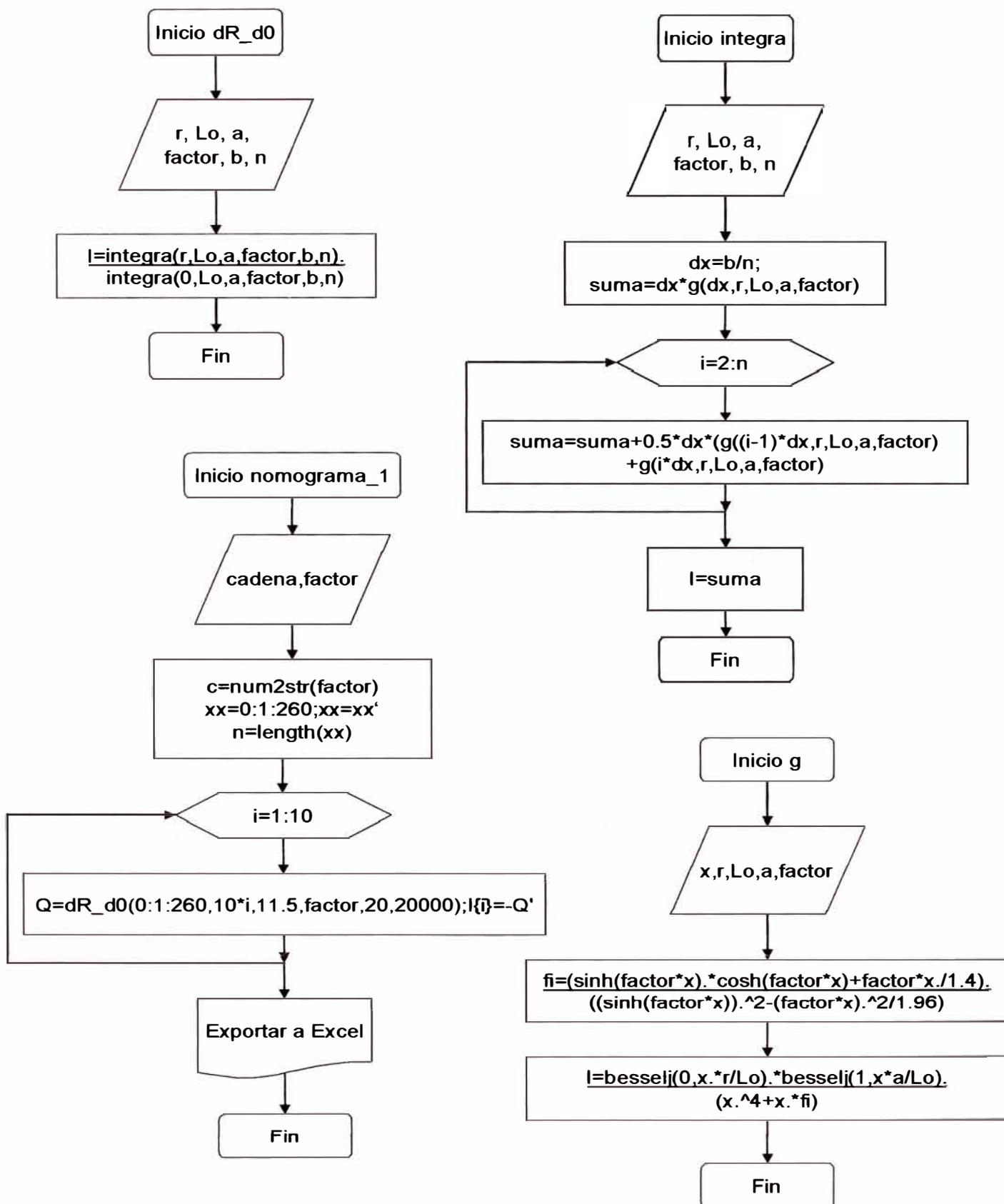
## BIBLIOGRAFÍA

1. DASHKÓ 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., YACOB TRAMER E. “Stresses under footing in multilayered soils: a comparative study”, University of Toronto, Canada, 2007.
3. HOFFMAN, MARIO S. - LOUIS BERGER INTERNACIONAL INC., PABLO M. DEL AGUILA, Lagesa Ingenieros Consultores. “Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos Basados en La Interpretación de Curvas de Deflexiones (Ensayos No Destructivos)” Octubre, 1985.
4. HUANG, YANG H. “Pavement Analysis and Design”, Prentice Hall. United States of America, 1993.
5. REYES, FREDY L. “Diseño de Pavimentos por Métodos Racionales”. Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá, 1999.
6. TIMOSHENKO S., WOINOWOSKY-KRIEGER S. “Teoría de Placas y Láminas”, URMO SA, España, 1975.

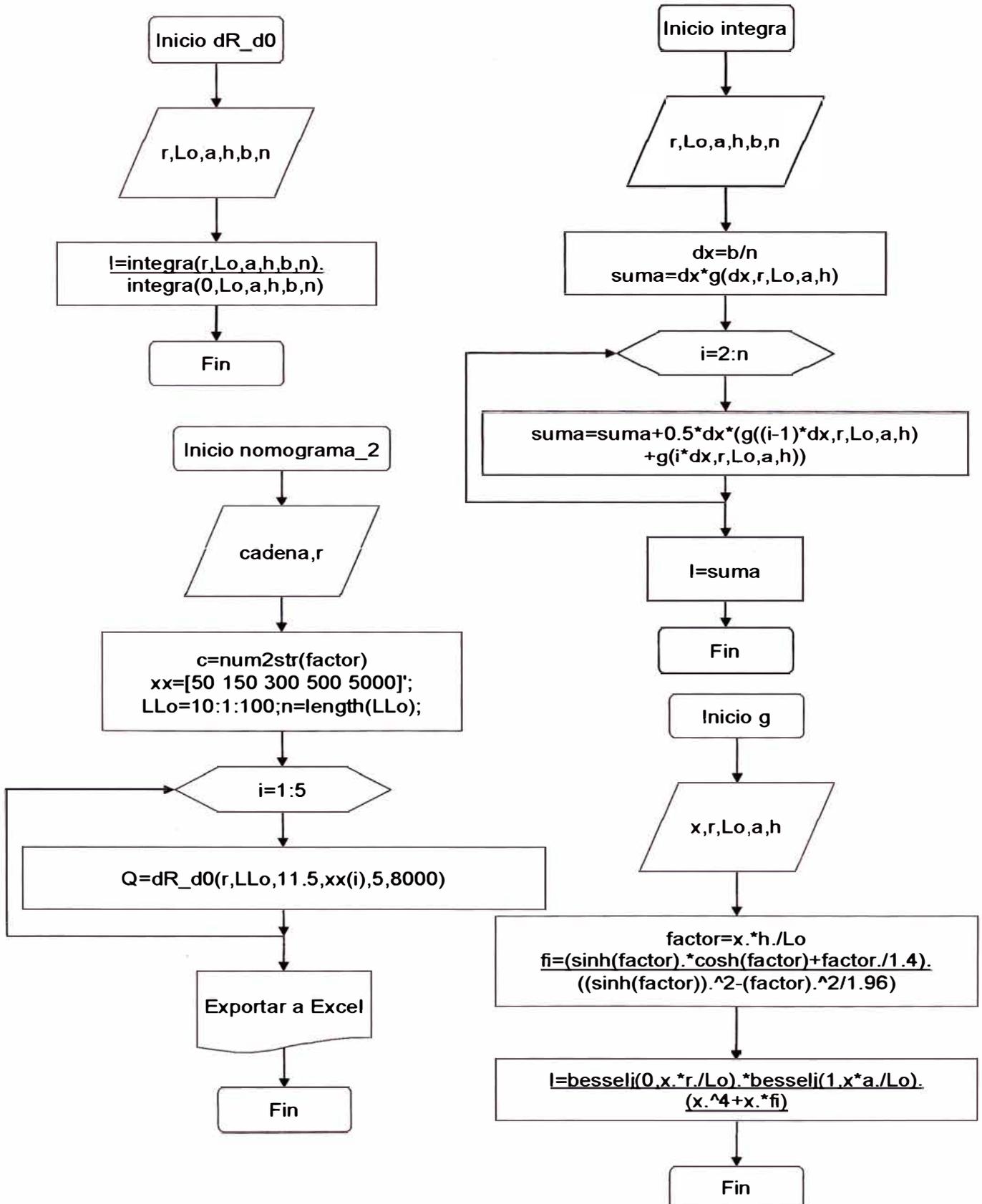
## ANEXOS

- ANEXO N° 01** Diagramas de flujo para Construcción de Nomogramas  
 $r$  vs  $D_r/D_0$
- ANEXO N° 02** Diagramas de flujo para Construcción de Nomogramas  
 $L_0$  vs  $D_r/D_0$
- ANEXO N° 03** Diagramas de flujo para Construcción de Nomogramas  
 $L_0$  vs  $D_0 \times E_0$

**ANEXO N° 01 – DIAGRAMAS DE FLUJO PARA CONSTRUCCIÓN DE  
NOMOGRAMAS N° 01  $r$  vs  $D_r/D_0$**



**ANEXO N° 02 – DIAGRAMAS DE FLUJO PARA CONSTRUCCIÓN DE  
NOMOGRAMAS N° 02  $L_0$  vs  $D_r/D_0$**



**ANEXO N° 03 – DIAGRAMAS DE FLUJO PARA CONSTRUCCIÓN DE  
NOMOGRAMAS N° 02  $L_0$  vs  $D_0 \times E_0$**

