

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DEL VALOR SOPORTE DE CAPAS GRANULARES A  
PARTIR DE LA DEFLECTOMETRÍA.  
(MEDIANTE LA VIGA BENKELMAN)**

**Por:**

**MARTÍNEZ LENZ DIEGO ARMANDO**

JULIO DE 2013  
TARIJA-BOLIVIA

**DEDICATORIAS:**

A Dios y a mi familia, especialmente a mi hermana por su amor y apoyo en esta etapa de mi vida.

### **AGRADECIMIENTOS:**

El autor agradece en forma especial al Ing. Jhonny Mario Orgaz Fernández y al Ing. Mabel Zambrana por su valiosa asesoría y orientación durante su desarrollo.

A cuantos fueran partícipes en las diversas etapas de este trabajo, su colaboración ha sido de gran valor para mí.

**PENSAMIENTO:**

“Aprender es descubrir lo que ya sabes.  
Actuar es demostrar que lo sabes. Enseñar es  
recordarles a los demás que saben tanto como  
tú”

*RICHARD BACH*

# ÍNDICE

## Página

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes .....	1
2. Generalidades.....	2
3. Objetivo del proyecto.....	2
3.1 Objetivo general.....	2
3.2 Objetivos Específicos.....	3
4. Alcance.....	4

### CAPÍTULO II ASPECTOS GENERALES DE LOS MATERIALES

1. Características de los suelos.....	5
1.1 Propiedades físicas.....	6
1.2 Estudios físico-mecánicos.....	7
1.3 Caracterización de los materiales.....	7
1.3.1 Granulometría.....	7
1.3.2 Consistencia.....	11
1.3.2.1 Límites de Atterberg.....	13
1.3.3 Equivalente de arena.....	14
1.3.4 Clasificación de suelos.....	16
1.3.4.1 Clasificación general de Casagrande modificada.....	16
1.3.4.2 Clasificaciones específicas de carreteras (Clasificación AASHTO).....	20
1.4 Resistencia y deformabilidad de suelos.....	22
1.4.1 Compactación.....	22
1.4.1.1. Influencia de la humedad.....	22
1.4.1.2. Influencia de la energía de compactación.....	23
1.4.1.3. Influencia del tipo de suelo.....	24
1.4.2. Resistencia del suelo.....	25

1.4.2.1 Capacidad portante.....	25
1.5. Características de las capas de un pavimento.....	27
1.5.1. Capa Subrasante.....	27
1.5.1.1. Requisitos de la capa subrasante.....	27
1.5.1.1.1. Terraplenes.....	28
1.5.2. Capa Sub-base.....	28
1.5.2.1. Requisitos de la capa sub-base.....	29
1.5.3. Capa Base.....	30
1.5.3.1. Base granular.....	30

### **CAPÍTULO III LA VIGA BENKELMAN Y SUS USOS**

3.1. Introducción.....	32
3.2 Definición de la viga Benkelman.....	32
3.3 Esquema y operación de la Viga Benkelman.....	33
3.4 Ensayos de medición de deflexiones y Equipo mínimo requerido.....	35
3.5 Procedimiento de ensayos de medición de deflexiones.....	35
3.6 Análisis de cálculo de flexiones.....	38
3.6.1 Cálculo de flexión.....	38
3.6.2 Cálculo del radio de curvatura.....	38
3.6.3 Deflexión característica.....	39
3.6.4 Deflexión admisible.....	39
3.6.5 Juicio de la capacidad estructural del pavimento.....	39
3.7 Control deflectométricos.....	41
3.7.1 Ejecución de controles.....	41
3.7.2 Criterios de análisis.....	43
3.8 Comportamiento de la vía cuando se hace la prueba de la Deflectometría.....	44
3.8.1. Principios del módulo resiliente.....	45
3.8.2. Factores que afectan el módulo resiliente.....	49
3.8.3. Determinación del módulo resiliente.....	49
3.8.4. Otros métodos.....	53

3.8.5. Método Hogg Simplificado.....	53
3.8.5.1. Generalidades.....	53
3.8.5.2. El Método de Hogg.....	54
3.8.5.3. Método de análisis.....	59
3.8.5.3.1. Modelo de carga.....	59
3.8.5.3.2. Determinación del R50.....	60
3.8.5.3.3. Determinación de la longitud característica de la curva de flexión (L0).....	60
3.8.5.3.4. Determinación del módulo de elasticidad de la sub-rasante (E0).....	61
3.9. Parámetros de evaluación.....	62
3.9.1. Significado de L0.....	63
3.9.2. Significado de E0 y su relación con el CBR.....	64
3.9.3. Correlación E0 versus CBR.....	67
3.9.3.1 Determinación del módulo resiliente.....	67
3.9.3.2. Validación de resultados.....	68
3.9.4. Correlaciones entre Módulo Resiliente y CBR .....	69
3.9.5. Esfuerzo y comportamiento de una estructura de pavimento frente a las cargas .....	70

## **CAPÍTULO IV APLICACIÓN PRÁCTICA**

1. Antecedentes.....	73
2. Descripción de la carretera.....	79
3. Control de Deflectometría.....	84
3.1. Ejecución de control.....	84
3.2 Criterios de análisis.....	87
4. Cálculo de deflexiones.....	87
5. Determinación del módulo resiliente mediante el método Hogg.....	131
5.1. Método de análisis.....	131
5.2. Modelo de carga.....	131
5.3. Determinación de R50.....	131
5.4. Determinación de la longitud elástica (L0).....	145
5.5. Determinación del módulo de elasticidad de la sub-rasante (E0).....	158

6. Determinación de módulo resiliente aplicando el método Hogg Simplificado.....	184
6.1. Procedimiento de cálculo.....	184
6.2. Determinación del R50 para el método de Hogg Simplificado.....	184
6.3. Resumen de resultados .....	198
7. Comparación de resultados entre los métodos Hogg y Hogg Simplificado y validación de resultados.....	202

## **CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1. CONCLUSIONES .....	217
2. RECOMENDACIONES.....	222
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	224
ANEXOS.....	225



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 2.1. Interpretación de la curva granulométrica.....	11
Figura 2.2. Estados de consistencia de un suelo.....	12
Figura 2.3. Aparato de Casagrande. . . . .	14
Figura 2.4. Ensayo del equivalente de arena . . . . .	15
Figura 2.5. Carta de Casagrande para los suelos cohesivos.....	18
Figura 2.6. Curva humedad-densidad seca.....	23
Figura 2.7. Influencia de la energía de compactación.....	24
Figura 2.8 Determinación del índice CBR . . . . .	26
Figura 3.1 Esquema de la viga Benkelman.....	33
Figura 3.2 Esquema del proceso de medición.....	37
Figura 3.3 Radio de curvatura.....	39
Figura 3.4 Viga analógica.....	41
Figura 3.5 Viga digital... . . . .	41
Figura 3.6 Espaciamiento para lecturas.....	42
Figura 3.7 Camión para la realización del ensayo.....	43
Figura 3.8 Transmisión de cargas.....	45
Figura 3.9 Cámara triaxial para ensayos cíclicos . . . . .	46
Figura 3.10 Estado de esfuerzos provocados en la sub rasante por el paso de un Vehículo en movimiento.....	47
Figura 3.11 Deformaciones bajo carga repetidas . . . . .	48
Figura 3.12 Módulo efectivo de Resiliencia de la subrasante para pavimentos flexibles en función del criterio de serviciabilidad,.....	51
Figura 3.13 Correlación CBR – Mr (Gráfica de Kentucky).....	52
Figura 3.14 Modelo de carga . . . . .	55
Figura 3.15 Tipos de curvas . . . . .	64
Figura 3.16 Relación D0xR50 versus E0.....	66
Figura 3.17 Validación del Método Hogg Simplificado . . . . .	68

Figura 3.18 Esquema de transmisión de cargas.....	71
Figura 3.19 Deformación y deflexión producida por cargas móviles. ....	71
Figura 3.20 Esquema del bulbo de presiones y cuenco de deflexiones.....	72
Figura 3.21 Características del cuenco de deflexión. ....	72
Figura 4.1 Plano de Ubicación Regional.....	74
Figura 4.2 Tramo I.....	75
Figura 4.3 Tramo II.....	76
Figura 4.4 Tramo III.....	77
Figura 4.5 Croquis de ubicación del proyecto .....	78
Figura 4.6 Tramo actual (imagen1).....	81
Figura 4.7 Tramo actual (imagen 2).....	81
Figura 4.8 Capa Sub rasante de la carretera .....	82
Figura 4.9 Viga analógica.....	84
Figura 4.10 Viga digital.....	84
Figura 4.11 Espaciamiento para lecturas.....	85
Figura 4.12 Esquema para la medición de deflexiones, mostrando las distancias off-set a ser consideradas en los ensayo.....	86
Figura 4.13 Camión para la realización del ensayo.....	86
Figura 5.1. Validación de resultados .....	218
Figura 6.1. Viga Benkelman.....	245
Figura 6.2. Lectura de deflexiones .....	245
Figura 6.3. Posición de inicio de la práctica.....	245
Figura 6.4. Protección de la viga contra el viento.....	245
Figura 6.5. Compactado de sub rasante.....	246
Figura 6.6. Chancadora y seleccionadora de áridos.....	246
Figura 6.7. Fijación del señalador en la lectura inicial.....	246
Figura 6.8. Transporte del material para terraplén.....	246

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 2.1 Límites de tamaño de suelos separados.....	8
Tabla 2.2 Tamaño de mallas estándar.....	10
Tabla 2.3. Valores típicos de consistencia del suelo .....	14
Tabla 2.4. Símbolos de grupo (SUCS).....	17
Tabla 2.5. Tipología de suelos (SUCS).....	17
Tabla 2.6. Características de los suelos según el SUCS.....	19
Tabla 2.7. Sistema unificado de clasificación de suelos .....	19
Tabla 2.8 Clasificación de suelos AASHTO .....	21
Tabla 2.9. Normas de calidad (granulometría) Sub-base .....	29
Tabla 2.10 Gradación para bases granulares .....	31
Tabla 3.1. Esquema y parámetros del Modelo de Hogg.....	56
Tabla 3.2. Coeficiente para el Modelo de Hogg.....	58
Tabla 3.3 Otros métodos mecánico-empíricos. ....	70
Tabla 4.1. División del proyecto por tramos.....	74
Tabla 4.2. a 4.25. Resultado de deflexiones (viga Benkelman).....	89
Tabla 4.26. a 4.37. Cálculo de la relación de deflexiones para el cálculo de R50.....	133
Tabla 4.38. a 4.49. Cálculo de la longitud característica.....	146
Tabla 4.50. a 4.61. Cálculo de la relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida .....	153
Tabla 4.62. a 4.73. Cálculo del módulo resiliente (Eo) por el método de Hogg.....	172
Tabla 4.74. a 4.85 Cálculo de la longitud característica.....	186
Tabla 4.86.a 4.89. Determinación del módulo resiliente.....	198
Tabla 4.90. a 4.101. Validación de resultados.....	202
Tabla 4.102 Cálculo de Módulo Resiliente Métodos SHELL y USACE.....	214
Tabla 4.103 Validación de resultados para el método Hogg Simplificado - SHELL .....	215
Tabla 4.104 Validación de resultados para el método Hogg Simplificado - USACE.....	216
Tabla 5.1. a 5.2. Módulo resiliente por el método de Hogg Simplificado.....	219

Tabla 5.3. a 5.4. CBR por el método de Hogg Simplificado.....	220
Tabla 2. Valores tabulados para el cálculo del factor de longitud de curva.....	225
Tabla 3. Valores tabulados para el cálculo de elasticidad de la subrasante.....	229
Tabla 6.1. a 6.12. Cálculo del CBR mediante el método de Hogg Simplificado.....	233