

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN ENSAYOS
ACELERADOS DE PAVIMENTOS Y DEFLEXIÓN**

Por:

STEFANY DEL CASTILLO AMABOBO

SEMESTRE I - 2022

Tarija – Bolivia

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN ENSAYOS
ACELERADOS DE PAVIMENTOS Y DEFLEXIÓN**

Por:

STEFANY DEL CASTILLO AMABOBO

Modalidad de graduación PROYECTO DE GRADO, presentada a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE I - 2022

Tarija – Bolivia

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso, a mis padres y familia
por brindarme su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

	Página
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación del proyecto de aplicación.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	4
1.3.1 Situación problemática.....	4
1.3.2 Problema	5
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.5.1 Definición de variables independientes y dependientes.....	6
1.5.1.1 Variables independientes	6
1.5.1.2 Variables dependientes.....	6
1.6 Alcance de estudio de aplicación	7

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS Y SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL

	Página
2.1 Pavimentos	9
2.2 Tipos de pavimentos	10
2.2.1 Pavimento flexible	10
2.2.2 Pavimento rígido	10

2.3 Diferencia entre pavimento flexible y pavimento rígido	11
2.4 Funciones de las capas de los pavimentos	11
2.4.1 Funciones de las capas de los pavimentos flexibles.....	11
2.4.1.1 Sub-base granular.....	11
2.4.1.2 Base granular.....	11
2.4.1.3 Riego de imprimación.....	12
2.4.1.4 Carpeta asfáltica	12
2.4.2 Funciones de las capas de los pavimentos rígidos	12
2.4.2.1 Sub-base granular.....	12
2.4.2.2 Losa de concreto hidráulico	12
2.4.2.3 Juntas.....	12
2.5 Variables que participan en el diseño y comportamiento de los pavimentos.....	13
2.5.1 Variables estructurales	13
2.6 La resistencia estructural.....	13
2.7 La deformabilidad.....	14
2.8 Análisis estructural de pavimentos.....	16
2.8.1 Análisis de erosión	17
2.8.2 Análisis de fatiga.....	17
2.9 Deflexión en pavimento	17
2.9.1 Forma de la deflexión	17
2.9.2 Medición de la deflexión.....	18
2.10 El retrocálculo	19
2.11 Modelos matemáticos para pavimentos	21
2.11.1 Análisis elástico de capas.....	21
2.11.2 Modelo bicapa.....	23

2.11.3 Modelo multicapa.....	24
2.11.4 Modelo de Boussinesq	25
2.11.6 Modelo de elementos finitos	28
2.11.7 Modelo de Hogg.....	29
2.11.7.1 Antecedentes del modelo de Hogg.....	29
2.11.7.2 Ventajas y desventajas del análisis de capas	29
2.11.7.3 Desarrollo de modelo de Hogg	29
2.11.7.4 Ecuación que resuelve Hogg.....	30
2.11.7.5 Características y utilización del modelo.....	33
2.11.7.6 Método de Hogg simplificado.....	37
2.11.8 Metodología empírica (CONREVIAL).....	41
2.12 Forma de medición de la deflexión.....	49
2.12.1 Medición de deflexión estática o de movimiento lento	49
2.12.1.1 Viga Benkelman.....	49
2.12.1.2 Metodología de medición de deflexiones con viga Benkelman.....	51
2.13 Ensayos acelerados en mezclas asfálticas en caliente	52
2.13.1 Diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	52
2.13.1.1 Ensayos de caracterización de los agregados	52
2.13.1.2 Ensayos de caracterización del cemento asfáltico.....	60
2.13.1.1 Diseño granulométrico	63
2.13.1.2 Contenido de cemento asfáltico	64
2.13.2 Introducción a ensayos acelerados	66
2.13.2.1 Ensayos acelerados de pavimentos	67
2.12.1 Definición.....	68

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE ENSAYOS ACELERADOS Y DEFLEXIÓN EN EL TRAMO DE ESTUDIO

	Página
3.1 Aplicación de ensayos acelerados en mezclas asfálticas en caliente	69
3.1.1 Selección de materiales	69
3.1.2 Caracterización de los agregados	69
3.1.3 Resumen y evaluación de la caracterización de agregados	69
3.1.4 Caracterización del cemento asfáltico.....	71
3.1.4.1 Resumen y evaluación de la caracterización del cemento asfaltico	71
3.1.5 Diseño de mezclas asfálticas	72
3.1.5.1 Diseño granulométrico	73
3.1.5.2 Contenido mínimo de cemento asfáltico.....	74
3.1.5.3 Contenido óptimo de cemento asfáltico según granulometría de diseño	75
3.1.5.4 Aplicación metodología Marshall	77
3.1.6 Datos de ensayos acelerados	86
3.1.6.1 Briqueta sometida a temperatura elevada constante al horno 180°C	86
3.1.6.2 Briqueta sometida en agua hervida	87
3.1.6.3 Resultados de ensayos acelerados	88
3.2 Deflexiones	95
3.2.1 Ubicación del tramo de estudio.....	95
3.2 Características del tramo de aplicación.....	96
3.2.1 Clima.....	96
3.2.2 Tráfico.....	96
3.2.3 Datos de deflexiones obtenidos empleando la viga Benkelman	97

3.2.3.1 Planilla de campo.....	100
3.2.3.2 Procedimiento de cálculo.....	101
3.2.4 Método de Hogg para determinar el valor del CBR a partir de las deflexiones....	110
3.2.4.2 Aplicación de estadística a valores de CBR obtenidos a partir de deflexiones .	114
3.2.5 Ensayo CBR In situ para validar las deflexiones.....	115
3.3 Resultados.....	121
3.3.2 Ensayos acelerados.....	121
3.3.1 Deflexiones y radios de curvatura.....	122
3.4 Análisis de resultados.....	130
3.4.1 Análisis deformación acelerada.....	130
3.4.1.1 Horno a temperatura 180 °C.....	130
3.4.1.2 Hervida.....	131
3.4.2 Análisis de deflexiones con viga Benkelman.....	132
3.4.2.1 Análisis de deflexiones.....	132
3.4.2.1 Análisis radios de curvatura.....	136
3.4.2.2 Análisis de deflexión y radio de curvatura.....	140
3.4.3 Análisis de deflexión admisible con deflexión característica.....	141
3.4.6 Comparación de CBR empírico con el CBR In situ.....	144

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
4.1 Conclusiones.....	145
4.2 Recomendaciones.....	147

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización de los agregados y cemento asfáltico

Anexo 2. Factura de pesaje de volqueta

Anexo 3. Tráfico promedio diario

Anexo 4. Cálculo del número de ejes equivalentes

Anexo 5. Autorización para la realización del ensayo CBR In situ

Anexo 6. Planillas de laboratorio

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Definición de variables independientes y dependientes.....	6
Tabla 2. Diferencia entre pavimento flexible y pavimento rígido	11
Tabla 3. Parámetros del modelo de Hogg	30
Tabla 4. Ecuaciones para la obtención de parámetros de evaluación	35
Tabla 5. Valor de coeficientes y variables de ajuste de curvas	36
Tabla 6. Factor de corrección por estacionalidad.....	45
Tabla 7. Ecuaciones de deflexión característica.....	47
Tabla 8. Tamaños nominales.....	54
Tabla 9. Dimensiones de las medidas	56
Tabla 10. Grado de ensaye definido por sus rangos de tamaños	58
Tabla 11. Dimensiones de los calibradores para espesor y longitud.....	59
Tabla 12. Máxima entre mediciones	61
Tabla 13. Gradación propuesta ASTM D 3515	63
Tabla 14. Índice asfáltico - método del área superficial	65
Tabla 15. Resumen de caracterización de los agregados	70
Tabla 16. Requisito según norma para el desgaste de los ángeles	71
Tabla 17. Requisito según norma para el equivalente de arena	71
Tabla 18. Resumen de la caracterización del cemento asfáltico	71
Tabla 19. Diseño granulométrico - método Marshall ASTM D 3515	73
Tabla 20. Porcentajes de cemento asfáltico	75
Tabla 21. Porcentajes de cemento asfáltico	76
Tabla 22. Datos de laboratorio para metodología Marshall	77
Tabla 23. Factores de corrección para estabilidad Marshall	82
Tabla 24. Resultados de ensayo Marshall	83
Tabla 25. Valores de cemento asfáltico óptimo	85
Tabla 26. Material requerido en la elaboración de briquetas	85
Tabla 27. Datos de laboratorio - horno 180°	86
Tabla 28. Datos de laboratorio - briqueta hervida.....	87

Tabla 29. Resultados de ensayos acelerados - horno 180°	90
Tabla 30. Resumen de aplicación de estadística	92
Tabla 31. Resultado de ensayos acelerados - briqueta hervida.....	92
Tabla 32. Resumen de aplicación de estadística	94
Tabla 33. Datos de campo - carril derecho	100
Tabla 34. Datos de campo - carril izquierdo	101
Tabla 35. Ecuaciones de deflexión característica.....	107
Tabla 36. CBR obtenido aplicando método de Hogg - tramo derecho	111
Tabla 37. CBR obtenido aplicando modelo de Hogg - tramo izquierdo.....	112
Tabla 38. Comparación de valores de CBR obtenidos por el método de Hogg.....	113
Tabla 39. CBR In situ - punto N°1.....	115
Tabla 40. CBR In situ - punto N°2.....	116
Tabla 41. CBR In situ - punto N°3.....	117
Tabla 42. CBR In situ - punto N°4.....	118
Tabla 43. CBR In situ – punto N°5.....	119
Tabla 44. Resumen de valores del ensayo CBR In situ	120
Tabla 45. Resultados de ensayos acelerados - horno 180°	121
Tabla 46. Resultados de ensayos acelerados - briqueta hervida	121
Tabla 47. Resultados de deflexiones y radios de curvatura corregida en c. derecho	122
Tabla 48. Resumen de resultados para deflexiones carril derecho	123
Tabla 49. Resultados de deflexiones y radios de curvatura corregida c. izquierdo.....	126
Tabla 50. Resumen de resultados para deflexiones carril izquierdo.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cuenco o línea de influencia producida por una carga	18
Figura 2. Deformación del pavimento sujeto a una carga.....	19
Figura 3. Análisis de capas elásticas	22
Figura 4. Modelo bicapa	23
Figura 5. Modelo multicapa	24
Figura 6. Modelo de Boussinesq.....	25
Figura 7. Deflexión producida por dos llantas	26
Figura 8. Modelo de Westergaard.....	27
Figura 9. Modelo de elementos finitos.....	28
Figura 10. Modelo de Hogg	30
Figura 11. Curva de deflexiones - modelo de Hogg.....	34
Figura 12. Nomograma para evaluación estructural - modelo de Hogg	34
Figura 13. Relación $D_0 \times R_{50}$ versus E_0	39
Figura 14. Validación del método de Hogg simplificado	40
Figura 15. Deflexiones.....	42
Figura 16. Deformada del pavimento.....	44
Figura 17. Esquema y principio de operación de la viga Benkelman	51
Figura 18. Configuración del sistema de carga en ensayos con viga Benkelman.....	51
Figura 19. Aguja para ensayo de penetración	60
Figura 20. Molde para ensayo de ductilidad	61
Figura 21. Resultados gráficos de ensayo Marshall.....	84
Figura 22. Ubicación del tramo de aplicación.....	95
Figura 23. CBR - tramo derecho.....	112
Figura 24. CBR tramo izquierdo.....	113
Figura 25. Carga - penetración N°1	115
Figura 26. Carga - penetración N°2	116
Figura 27. Carga - penetración N° 3	117
Figura 28. Carga - penetración N°4	118

Figura 29. Carga - penetración N°5	119
Figura 30. Deflexiones máximas corregidas - carril derecho.....	123
Figura 31. Radios de curvatura - carril derecho.....	124
Figura 32. Lectura de deflexiones en la progresiva 00 + 300	125
Figura 33. Lectura de deflexiones en la progresiva 03 + 200	125
Figura 34. Lectura de deflexiones en la progresiva 05 + 000	125
Figura 35. Deflexiones máximas corregidas carril izquierdo.....	127
Figura 36. Radios de curvatura - carril izquierdo	128
Figura 37. Lectura de deflexión en la progresiva 00 + 300	129
Figura 38. Lectura de deflexión en la progresiva 03 + 200	129
Figura 39. Lectura de deflexiones en la progresiva 05 + 000	129
Figura 40. Lectura de deflexión en progresiva 03 + 200 carril derecho sin corregir	134
Figura 41. Análisis de radios de curvatura c. derecho	138
Figura 42. Análisis de radios de curvatura c. izquierdo.....	139
Figura 43. Análisis de la deflexión admisible con la deflexión característica	142
Figura 44. Análisis de la deflexión admisible con la deflexión característica	143