

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE TIPOS DE PAVIMENTOS NO
CONVENCIONALES MEDIANTE LOS MÉTODOS ELÁSTICOS,
MECANICISTAS Y ELEMENTOS FINITOS APLICADO AL TRAMO URBANO
DE SAN LORENZO”**

Por:

RAMIRO RAMOS CALIZAYA

Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en INGENIERÍA CIVIL.

SEMESTRE I - 2019

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE TIPOS DE PAVIMENTOS NO
CONVENCIONALES MEDIANTE LOS MÉTODOS ELÁSTICOS,
MECANICISTAS Y ELEMENTOS FINITOS APLICADO AL TRAMO URBANO
DE SAN LORENZO”**

Por:

RAMIRO RAMOS CALIZAYA

SEMESTRE I - 2019
TARIJA – BOLIVIA

El tribunal calificador del presente proyecto de grado, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo.

AGRADECIMIENTO:

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio, enseñándome a valorar todo lo que tengo.

DEDICATORIA:

A Dios quien me ha dado la fortaleza y la vida, a mis padres que siempre me han apoyado y estimulado, a mi esposa e hijas por ser el pilar fundamental en mi vida porque han fomentado en mí el deseo de superación y de triunfo.

Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

PENSAMIENTO:

"Nunca desistas de un sueño. Sólo trata de ver las señales que te lleven a él".

Paolo Coelho.

ÍNDICE

DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
PENSAMIENTO
RESUMEN

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

	Pág.
1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Situación problemática.....	4
1.4. Problema.....	5
1.5. Objetivo general.....	5
1.5.1. Objetivos específicos.....	5
1.6. Unidad de estudio y decisión muestral.....	5
1.6.1. Población.....	6
1.6.2. Muestra.....	6
1.6.3. Muestreo.....	7
1.7. Tratamiento estadístico.....	7
1.7.1. Teoría estadística que utiliza la aplicación.....	7
1.7.2. Estadística descriptiva.....	8
1.7.3. Estadística inferencial.....	8
1.7.4. Parámetros estadísticos muestrales.....	9
1.8. Alcance.....	10

CAPÍTULO II
PAVIMENTOS NO CONVENCIONALES

	Pág.
2. Generalidades.....	12
2.1 Factores que intervienen en el diseño de una carretera o camino.....	13
2.1.1. Factores funcionales y físicos.....	13
2.1.2. Factores de costo asociados a la carretera.....	14
2.1.3. Factores humanos y ambientales.....	14
2.2. Tráfico y Aforo vehicular.....	14
2.2.1. Modalidades para aforos de tránsito.....	15
2.2.2. Tránsito Promedio Diario (T.P.D.).....	15
2.2.3. Tránsito Promedio Horario (T.P.H.).....	16
2.2.4. Tráfico de diseño.....	16
2.3. Configuraciones de eje.....	17
2.3.1. Tipo de ejes.....	18
2.3.2. Conversión de tránsito a ejes equivalentes ESALs.....	19
2.3.3. Factores equivalentes de carga (LEF).....	19
2.3.4. Factor de camión.....	20
2.3.5. Número de ejes equivalentes (ESAL's).....	20
2.3.6. Nivel de confianza y desviación estándar.....	21
2.3.7. Distribución direccional "DD".....	22
2.3.8. Factor de distribución por carril "DI".....	22
2.4. El pavimento.....	22
2.4.1. Subrasante.....	23

	Pág.
2.4.2. Sub-base.	24
2.4.3. Base.	24
2.4.4. Capa de rodadura.....	25
2.5. Tipos de pavimentos.	26
2.5.1. Pavimentos convencionales (Pavimento flexible).	26
2.5.2. Pavimentos convencionales (Pavimento rígido).	28
2.6. Pavimentos no convencionales (Pavimento articulado).....	30
2.6.1. Fallas del pavimento articulado (adoquín).....	32
2.6.2. Comportamiento estructural de los pavimentos articulados (adoquín).....	32
2.7. Tipos de pavimentos no convencionales.....	33
2.8. Características de pavimentos no convencionales.	34
2.9. Comportamiento del sistema del pavimento articulado (adoquín).	35
2.10. Diseño del pavimento articulado, Norma IRAM 11656 (CONCRETEC).....	36
2.10.1. Adoquines de hormigón.	38
2.10.2. Ejecución del pavimento articulado (adoquín).	39
2.10.3. Ventajas del pavimento articulado (adoquín).	42
2.11. Especificaciones técnicas de los adoquines (CONCRETEC).....	43
2.11.1. Usos y Aplicaciones.....	44
2.12. Extracción del suelo y toma de muestras.	45
2.13. Análisis granulométrico (AASHTO T-27).....	45
2.14. Límites de Atterberg (LL. AASHTO T- 89, LP. T-90).	46
2.15. Relación humedad – densidad, Compactación (AASHTO T – 180).	47
2.16. Ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR).	48

2.17.	Ensayo de resistencia a compresión probetas cúbicas (ASTM C39 – AASHTO T22).....	48
2.18.	CBR de diseño.	49
2.18.1	Módulo de resiliencia.	49
2.18.2.	Correlaciones entre el % CBR y módulo de resiliencia.	49
2.18.3	Periodo de diseño.	50
2.18.4.	Serviciabilidad.....	50
2.18.5.	Pérdida del índice serviciabilidad.	51
2.19.	Métodos de dimensionamiento, análisis elástico.	51
2.20.	Método mecanicista para pavimentos.	53
2.20.1.	Metodologías mecanicistas.	54
2.20.2.	Ventajas y características del método mecanicista.	54
2.20.3.	Componentes de entrada al diseño mecanicista.	55
2.20.4.	Cálculo de respuestas estructurales.....	55
2.20.4.1.	Esfuerzos y deformaciones.	56
2.20.5.	Procedimiento de diseño mecanicista, tránsito vehicular.	56
2.20.5.1.	Factores Equivalente de Carga.....	57
2.20.6.	Beneficios que presentan los procedimientos de diseño mecanicistas.....	57
2.21.	Dimensionamiento de los espesores (método mecanicista).....	58
2.21.1.	Módulo elástico del pavimento.	58
2.21.2.	Módulo resiliente de la subrasante.....	59
2.21.3.	Determinación del número estructural (SN) para pavimentos.	59
2.21.4.	Determinación de espesores por capa.	60
2.21.5.	Coefficientes estructurales.....	61

	Pág.
2.22. Parámetros de diseño.....	61
2.22.1. Forma de los adoquines.....	62
2.22.2. Espesor de los adoquines	62
2.22.3. Resistencia Mecánica.....	62
2.22.4. Juntas entre adoquines.....	62
2.22.4. Límites de la deformación.....	63
2.23. Método elementos finitos para pavimentos.	63
2.23.1. Ecuación fundamental de los elementos finitos en pavimentos.....	64
2.23.2. Análisis de elementos finitos para un problema de pavimentos.	66
2.23.2.1. Discretizar el medio de interés.....	67
2.23.2.2. Determinar las características de cada elemento.....	67
2.24. Dimensionamiento de los espesores (Método de Elementos Finitos).....	68
2.24.1. El peso específico del material.....	68
2.24.2. Carga aplicada al pavimento.	68
2.24.3. Módulo de elasticidad.	69
2.24.4. El coeficiente de Poisson.	69
2.25. Comparación de métodos de dimensionamiento.	70
2.26. Aplicabilidad en nuestro medio.	71
2.27. Costos de construcción.....	72
2.27.1. Costos directos e indirectos.....	73
2.27.2. Gastos generales.....	73
2.27.3. Cómputos métricos.....	75

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA

	Pág.
3.1. Ubicación geográfica.	76
3.1.1. Límites territoriales.	76
3.2. Características arquitectónicas del municipio.	77
3.3. Demografía. El departamento y el municipio de San Lorenzo.	78
3.4. Infraestructura vial.	78
3.5. Problemática identificada en el municipio.	79
3.6. Vinculación vial.	79
3.6.1. Integración vial.	79
3.6.2. Objetivo estratégico vial.	80
3.7. Ubicación del proyecto.	80
3.8. La caracterización de los suelos consistirá en ensayos de muestras.	82
3.8.1. Resultado del ensayo Análisis granulométrico (AASHTO T-27).	83
3.8.2. Resultado del ensayo límites de Atterberg (LL. AASHTO T- 89, LP. T-90).	84
3.8.3. Resultado del ensayo Compactación (AASHTO T – 180).	86
3.8.4. Resultados del ensayo de la Relación de Soporte de California (CBR).	87
3.8.5. Ensayo de resistencia a compresión del adoquín (ASTM C39 – AASHTO T22).....	89
3.9. Aforo de vehículos calle C.G. Zilvetty.	92
3.10. Aforo de vehículos calle Gabriel Lunda.	93
3.11. Justificación del tiempo de aforo.	95
3.12. Ejes equivalentes.	96
3.13. ESALs o W18 de diseño.	98

	Pág.
3.14. Espesores mínimos en función del SN estructural.....	99
3.15. Cálculo método mecanicista AASHTO-93 pavimento flexible.....	99
3.15.1. Cálculo mediante el programa AASHTO (1993) por Luis Vásquez para el diseño de pavimentos.	102
3.16. Cálculo para el dimensionamiento del pavimento articulado (adoquín) por el método Mecanicista.	103
3.16.1. Método mecanicista AASHTO-93 pavimento articulado (Adoquín).	103
3.16.2. Cálculo mediante el programa AASHTO (1993) por Luis Vásquez para el diseño de pavimentos articulados (adoquines).....	105
3.16.3. Cálculo de los esfuerzos, deformación y deflexión del pavimento.....	106
3.17. Cálculo para el dimensionamiento del pavimento articulado (Adoquín) por el método de Elementos Finitos.....	107
3.17.1. Cálculo mediante el software: AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL ANALISIS PROFESSIONAL 2016.	108
3.18. Análisis de costos del pavimento con adoquín.	112
3.19. Estadística descriptiva de la resistencia a compresión del adoquín.	113
3.20. Estadística inferencial de la resistencia a compresión del adoquín.....	114
3.21. Variable de la resistencia a la compresión.....	115
3.22. Estadística descriptiva de la subbase.	117
3.23. Estadística inferencial de la subbase.	118
3.24. Estadística descriptiva de la subrasante.	120
3.25. Estadística inferencial de la subrasante.....	121
3.26. Análisis de los resultados obtenidos por los métodos mecanicista y elemento finito.	122

**CAPITULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	Pág.
4.1. Conclusiones del proyecto.	125
4.1. Recomendaciones del proyecto.....	128
	Pág.
BIBLIOGRAFÍA.....	131

ANEXOS

ANEXO 1	INFORME FOTOGRÁFICO.
ANEXO 2	CARACTERIZACIÓN DEL LOS SUELOS SUB-BASE.
ANEXO 3	CARACTERIZACIÓN DEL LOS SUELOS SUB-RASANTE.
ANEXO 4	RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DEL ADOQUÍN.
ANEXO 5	AFORO DE VEHÍCULOS CALLE: GILBERTO ZILVETTY CALLE: GABRIEL LUNDA.
ANEXO 6	TABLAS Y ÁBACOS.
ANEXO 7	MANEJO DEL PROGRAMA AASHTO 93 PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.
ANEXO 8	MANEJO DEL PROGRAMA PITRA PAVE (Multicapa Elástica) PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES PARA EL MÉTODO MECANICISTA.
ANEXO 9	MANEJO DEL PROGRAMA AUTODESK ROBOT ESTRUCTURAL ANÁLISIS PROFESSIONAL 2016.
ANEXO 10	CÁLCULO DE 4 DIFERENTES ESPESORES DEL PAVIMENTO CON ADOQUÍN (Método elemento finito).

ANEXO 11 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y COSTOS DEL PAQUETE
ESTRUCTURAL CON ADOQUÍN.

ANEXO 12 SOLICITUDES Y CERTIFICADOS.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Peso admisible de eje simple 2 neumáticos de 7000 Kg.....	18
Figura 2. Peso admisible eje simple de 4 neumáticos es de 11000 Kg.....	18
Figura 3. Peso máximo admisible para un eje tándem de 8 neumáticos de 18000 kg..	18
Figura 4. Peso máximo admisible para eje trídem de 6 neumáticos es de 25000 kg...	19
Figura 5. Comportamiento de un sistema de pavimentos.....	26
Figura 6. Sección transversal del pavimento flexible.....	27
Figura 7. Pavimento flexible.....	28
Figura 8. Sección transversal del pavimento rígido.....	29
Figura 9. Pavimento rígido.....	29
Figura 10. Pavimento no convencional.....	30
Figura 11. Elemento estructural de un pavimento de adoquines (ASCE,2010)	31
Figura 12. Las distintas etapas de construcción de un pavimento con adoquín.....	39
Figura 13. Dimensiones del adoquín utilizado.....	44
Figura 14. Adoquín doble “S”.....	44
Figura 15. Coeficiente de Poisson.....	69
Figura 16. Ubicación del municipio de San Lorenzo.....	76
Figura 17. Límite territorial del municipio.	77

	Pág.
Figura 18. Población, según censo 2001 y 2012 San Lorenzo.....	78
Figura 19. Ubicación de las calles en estudio (C.G.Zilvetty y Gabriel Lunda), municipio de San Lorenzo.....	80
Figura 20. Ubicación de las calles para el proyecto en el municipio de San Lorenzo Calles. C.G. Zilvetty y Gabriel Lunda.....	81
Figura 21. Plano cartográfico de las calles del proyecto en la comunidad de San Lorenzo, ubicación de las tomas de muestra de suelos.....	81
Figura 22. Extracción de la muestra.....	82
Figura 23. Análisis granulométrico de los suelos (tamizado).....	84
Figura 24. Realización de los límites del suelo.....	85
Figura 25. Compactacion del suelo.....	87
Figura 26. Lectura de la expansión del suelo.....	89
Figura 27. Ruptura del adoquín a compresión.....	89
Figura 28. Dimensionamiento de las capas del pavimento.....	101
Figura 29. Programa AASHTO 93 resultados.....	102
Figura 30. Resultados del programa.....	102
Figura 31. Dimensionamiento de las capas del pavimento con adoquín.....	105
Figura 32. Programa AASHTO 93. Considerando al adoquín.....	105
Figura 33. Resultados del programa. Considerando al adoquín.....	106
Figura 34. Esquema del pavimento calculado AASTHO 93.....	107
Figura 35. Desplazamiento en el eje Y representado con esquema de colores.....	108
Figura 36. Descripción de la deformación del paquete estructural.....	108
Figura 37. Estado tensional dentro del paquete estructural de la vía.....	109

	Pág.
Figura 38. Visualización de las isolíneas en el paquete estructural donde se muestra las curvas de igual tensión.....	109
Figura 39. Visualización mediante mapas de las deformaciones.....	110
Figura 40. Visualización del enmallado de los elementos finitos mostrando el comportamiento del paquete estructural.....	110
Figura 41. Dimensionamiento de las capas del pavimento con adoquín.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación tráfico promedio diario.....	17
Tabla 2. Rango de tráfico según los ejes equivalentes.....	17
Tabla 3. Ficha técnica.....	43
Tabla 4. Ficha técnica de la dosificación del adoquín.....	43
Tabla 5. Espesores mínimos constructivos para diferentes materiales de base.....	61
Tabla 6. Espesores mínimos, concreto asfáltico y base, en función al tránsito.....	61
Tabla 7. Pesos específicos de materiales (kg/cm ³).....	68
Tabla 8. Valores orientativos de NSPT, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos.....	69
Tabla 9. Valores aproximados de coeficiente de Poisson para distintos tipos de suelos.....	70
Tabla 10. Resumen de las principales características de los suelos estudiados.....	77

	Pág.
Tabla 11. Vías camineras.....	78
Tabla 12. Dimensiones de la extracción de las muestras.....	82
Tabla 13. Resultados de la granulometría suelos 1,2 y 3 (subbase).....	83
Tabla 14. Resultados de la granulometría suelos 1,2, y 3 (subrasante).....	83
Tabla 15. Resultados del ensayo de límites de Atterberg suelos 1,2 y 3 (subbase).....	84
Tabla 16. Resultados del ensayo de límites de Atterberg (subrasante).....	85
Tabla 17. Resultados del ensayo de compactación (AASHTO T-180) suelos 1,2 y 3 (subbase).....	86
Tabla 18. Resultados del ensayo de compactación (AASHTO T-180) suelos 1,2 y 3 (subrasante).....	86
Tabla 19. Resultados del ensayo (CBR) suelos 1,2 y 3 (subbase).....	87
Tabla 20. Resultados del ensayo valor soporte california (CBR) subrasante.....	88
Tabla 21. Laboratorio tecnología del hormigón. Ensayo de resistencia a compresión de adoquines doble (S) de hormigón.....	90
Tabla 22. Laboratorio de tecnología del hormigón ensayo de resistencia a flexión y tracción del adoquín.....	91
Tabla 23. Aforo de vehículos horas de 07:00 Am - 18:00.....	92
Tabla 24. Composición de volúmenes de tráfico diario. Calle: C.G. Zilvetty.....	92
Tabla 25. Resumen total de aforo horas de 07:00 am - 18:00.....	93
Tabla 26. Composición de volúmenes de tráfico diario. Calle: Gabriel Lunda.....	94
Tabla 27. Cálculo de los ejes equivalentes para la calle Gabriel Lunda.....	96
Tabla 28. Cálculo de los ejes equivalentes para la calle G. Zilvetty.....	97
Tabla 29. Análisis de precios unitarios y costos del pavimento articulado (adoquín) por el método mecanicista.....	112

Tabla 30.	Análisis de precios unitarios y costos del pavimento articulado (adoquín) por el método elemento finito.....	112
Tabla 31.	Estadística descriptiva para la resistencia a compresión del adoquín a 20 Mpa (Concretec).....	113
Tabla 32.	Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín (20 Mpa.) $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$; $H_1: \mu \neq 20 \text{ Mpa}$	115
Tabla 33.	Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín (20 Mpa.) $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$; $H_1: \mu < 20 \text{ Mpa}$	115
Tabla 34.	Análisis estadístico para la resistencia a compresión del adoquín (20 Mpa.) $H_0: \mu = 20 \text{ Mpa}$; $H_1: \mu > 20 \text{ Mpa}$	116
Tabla 35.	Granulometría de la Subbase (AASHTO T-27).....	117
Tabla 36.	Análisis descriptivo de la Subbase.....	117
Tabla 37.	Análisis estadístico inferencial de la Subbase $H_0: \mu = 50 \%$; $H_1: \mu \neq 50 \%$	118
Tabla 38.	Análisis estadístico inferencial de la Subbase $H_0: \mu = 50 \%$; $H_1: \mu < 50 \%$	118
Tabla 39.	Análisis estadístico inferencial de la Subbase $H_0: \mu = 50 \%$; $H_1: \mu > 50 \%$	119
Tabla 40.	Ensayos de suelos de la Subrasante.....	120
Tabla 41.	Análisis descriptivo de la Subrasante.....	120
Tabla 42.	Análisis estadístico inferencial de la Subrasante $H_0: \mu = 20 \%$; $H_1: \mu \neq 20 \%$	121
Tabla 43.	Análisis estadístico inferencial de la Subrasante $H_0: \mu = 20 \%$; $H_1: \mu < 20 \%$	121
Tabla 44.	Análisis estadístico inferencial de la Subrasante $H_0: \mu = 20 \%$; $H_1: \mu > 20 \%$	122

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Tránsito horario (T.P.H): calle C.G.Zilvetty.....	93
Gráfico 2. Tránsito Horario (T.P.H) calle Gabriel Lunda.....	94
Gráfico 3. Histograma de la resistencia a compresión del adoquín a 20 Mpa.....	113
Gráfico 4. Distribución normal (Gauss) para la resistencia del adoquín.....	114