

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA HUMEDAD EN EL VALOR
SOPORTE DE LAS CAPAS SUB RASANTE, SUB BASE Y BASE DE UN
PAVIMENTO FLEXIBLE CON APLICACIÓN A VÍAS URBANAS”**

Por:

ANGELO ADRIAN RIOS VELASQUEZ

Proyecto de grado presentado a considerar de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II – 2025

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA HUMEDAD EN EL VALOR
SOPORTE DE LAS CAPAS SUB RASANTE, SUB BASE Y BASE DE UN
PAVIMENTO FLEXIBLE CON APLICACIÓN A VÍAS URBANAS”**

Por:

ANGELO ADRIAN RIOS VELASQUEZ

Proyecto de grado presentado a considerar de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II – 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

A mi madre, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por enseñarme a nunca rendirme y siempre luchar por mis sueños.

A mi padre, por su sabiduría, paciencia y por ser mi guía en la vida. Gracias por mostrarme el camino y por siempre creer en mí.

A mi esposa, por ser mi compañera de vida y mi apoyo. Gracias por tu paciencia, comprensión y por estar a mi lado.

A mis hijos, Bruno y Samantha, por ser mi fuente de inspiración y motivación. Gracias por su amor incondicional y por llenarme de alegría cada día.

A mi docente guía, por su invaluable apoyo, guía y por compartir sus conocimientos conmigo. Gracias por su paciencia y por creer en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Situación problemática.....	3
1.2.1 Problema.....	3
1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema.....	3
1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Hipótesis.....	5
1.6 Operacionalización de las variables.....	5
1.6.1 Variable independiente.....	6
1.6.2 Variable dependiente.....	6
1.7 Identificación del tipo de investigación.....	6
1.8 Unidades de estudio y decisión muestral.....	7
1.8.1 Unidades de estudio.....	7
1.8.2 Población.....	7
1.8.3 Muestra.....	7
1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo.....	8
1.9 Métodos y técnicas empleadas.....	8
1.9.1 Metodología para la evaluación de la variación de humedad en el laboratorio.....	8

1.9.2	Técnicas.....	9
1.9.3	Procedimiento de Aplicación.....	12
1.10	Alcance de la investigación.....	13

CAPÍTULO II

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN PAVIMENTOS

	Página
2.1	Pavimentos flexibles y su comportamiento estructural ante la humedad..... 16
2.2	Efectos hidrológicos de la impermeabilización en áreas urbanas..... 16
2.3	Propiedades hidráulicas y comportamiento mecánico del pavimento..... 17
2.4	El CBR como indicador de la influencia de la humedad..... 18
2.5	Implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)..... 18
2.6	Comportamiento de la capa de base frente a la variación de la humedad.... 19
2.7	Comportamiento de la capa de subbase ante la humedad.....20
2.8	Vulnerabilidad de la subrasante ante variaciones hídricas 20
2.9	Influencia de la humedad en la carpeta de rodamiento.....21
2.10	Especificaciones técnicas mínimas de una subrasante.....22
2.10.1	Cuerpo del terraplén..... 22
2.10.2	Capa final del terraplén.....23
2.11	Especificaciones técnicas mínimas de una capa sub base 24
2.11.1	Conformación de una capa subbase.....24
2.12	Especificaciones técnicas mínimas de una capa base.....25
2.12.1	Conformación de una capa base.....26
2.13	Drenaje en pavimentos.....27
2.14	Efectos del agua sobre el pavimento.....27
2.15	Conclusiones de pavimentos flexibles.....28
2.16	Diseño estructural de un pavimento flexible 28

2.16.1	Módulo de resiliencia.....	29
2.16.2	Periodo de diseño.....	31
2.16.3	Índice de serviciabilidad.....	32
2.16.4	Perdida o disminución del índice de serviciabilidad.....	33
2.16.5	Análisis de tráfico.....	34
2.16.6	Transito medio diario anual.....	34
2.16.7	Clasificación de los vehículos.....	35
2.16.8	Tasa de crecimiento.....	35
2.16.9	Proyección del transito.....	35
2.16.10	Modelos de crecimiento.....	35
2.16.11	Factor de crecimiento.....	36
2.16.12	Factor de distribución de carril.....	38
2.16.13	Transito equivalente.....	38
2.16.14	Factor camión.....	39
2.16.15	Número total de ejes simples equivalentes (ESAL`S).....	40
2.16.16	Nivel de confianza y desviación estándar.....	40
2.16.17	Coeficiente de drenaje C_d	43
2.16.18	Determinación del número estructural (SN).....	44
2.16.19	Determinación de espesores por capas.....	47
2.16.20	Espesores mínimos en función del SN	55

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

	Página
3.1	Ubicación de la zona de aplicación.....58
3.2	Ubicación de toma de muestras de subrasante.....58

3.2.1	Ubicación de toma de muestras de base y subbase	59
3.2.2	Descripción de las características físicas y naturales de la zona	60
3.3	Caracterización de la capa subrasante.....	60
3.3.1	Ensayo de granulometría.....	60
3.3.2	Ensayo de hidrómetro.....	61
3.3.3	Ensayo de humedad natural y clasificación.....	63
3.3.4	Límites líquido de la subrasante.....	63
3.3.5	Límite plástico de la subrasante.....	64
3.3.6	Ensayo de compactación de la subrasante.....	65
3.3.7	Ensayo de California Bearing Ratio de la sub rasante.....	67
3.3.8	Resultados de CBR en subrasante.....	67
3.4	Caracterización de la capa subbase.....	72
3.4.1	Ensayo de granulometría AASHTO T-11 y 27.....	72
3.4.2	Límites líquido (LL) de la subbase.....	74
3.4.3	Límite plástico (LP) de la subbase	75
3.4.4	Clasificación del suelo de la capa sub base.....	76
3.4.5	Ensayo de desgaste de los ángeles de la subbase	77
3.4.6	Ensayo de compactación Proctor T-180 de la subbase.....	77
3.4.7	Ensayo de CBR de la subbase.....	78
3.5	Caracterización de la capa base.....	84
3.5.1	Ensayo de granulometría.....	84
3.5.2	Límites líquido (LL) de la capa base.....	87
3.5.3	Límite plástico (LP) de la capa base.....	87
3.5.4	Clasificación del suelo de la capa base.....	87
3.5.5	Desgaste de los ángeles de la capa base.....	88

3.5.6	Ensayo de compactación de la capa base	88
3.5.7	Ensayo de CBR de la capa base.....	89

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

	Página
4.1 Análisis de capa sub-rasante.....	96
4.1.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 5,00 %.....	100
4.1.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 7,50%.....	101
4.1.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 10,00 %.....	102
4.1.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 12,66 %.....	103
4.1.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 15,00 %.....	105
4.1.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 17,50 %.....	106
4.1.7 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub rasante a una humedad del 20,00 %.....	107
4.2 Impacto de la Humedad en las Propiedades Mecánicas de la Sub Base.....	108
4.2.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 4,00%.....	113
4.2.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 5,00 %.....	114
4.2.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 6,00 %.....	116
4.2.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una	

humedad del 6,83 %.....	117
4.2.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 8,00 %.....	117
4.2.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 10,00 %.....	118
4.3 Análisis de capa base.....	119
4.3.1 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 4,00 %.....	125
4.3.2 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 5,00 %.....	126
4.3.3 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 6,00 %.....	128
4.3.4 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 6,67 %.....	129
4.3.5 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 7,00 %.....	130
4.3.6 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 8,00 %.....	132
4.3.7 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la base a una humedad del 9,00 %.....	133
4.3.8 Análisis de datos de diagnóstico y discusión de la sub base a una humedad del 9,00 %.....	134
4.4 Comportamiento del CBR frente a la variación de humedad en capas de pavimento flexible.....	135
4.5 Efecto de la variación de la humedad sobre el módulo resiliente en diferentes capas de pavimento flexible.....	139
4.6 Efecto de la humedad en los espesores de las capas de rodadura, base y subbase.....	141

4.7	Costo de materiales según espesores determinados por la variación de humedad.....	143
4.8	Evaluación del efecto de la humedad en el espesor de pavimentos flexibles mediante escenarios de simulación (E1, E2 y E3).....	145
4.8.1	Escenario 1: Diseño con la subrasante a humedad óptima.....	145
4.8.2	Escenario 2: Diseño con la sub base a humedad óptima.....	146
4.8.3	Escenario 3: Diseño con la base a humedad óptima.....	147

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
5.1 Conclusiones.....	150
5.2 Recomendaciones.....	153

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO A. ENSAYOS CAPA SUB-RASANTE

ANEXO B. ENSAYOS CAPA SUB-BASE

ANEXO C. ENSAYOS CAPA BASE

ANEXO D. DISEÑO DE ESPESORES

ANEXO E. ANALISIS DE COSTOS DE LAS CAPAS DE PAVIMENTO

ANEXO F. DISEÑO DE ESPESORES VARIANDO CONTENIDOS DE HUMEDADES

ANEXO G. FOTOGRAFÍAS

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. CBR de cuerpo de subrasante.....	23
Tabla 2. CBR de capa final de la subrasante.....	23
Tabla 3. Gradaciones para materiales subbase.....	24
Tabla 4. Gradaciones para materiales de base.....	26
Tabla 5. Relación entre CBR y modulo resiliente.....	31
Tabla 6. Periodos de Diseño en Función del Tipo de Carretera.....	32
Tabla 7. Índice de serviciabilidad.....	32
Tabla 8. Factores de crecimiento.....	37
Tabla 9. Factor de distribución por carril.....	38
Tabla 10. Nivel de confianza.....	41
Tabla 11. Factores de desviación estándar.....	42
Tabla 12. Capacidad del drenaje.....	43
Tabla 13. Valores m_i para modificar los Coeficientes Estructurales.....	44
Tabla 14. Espesores mínimos.....	48
Tabla 15. Coordenadas de extracción de subrasante.....	58
Tabla 16. Coordenadas de extracción de subbase y base.....	59
Tabla 17. Ensayo de granulometría subrasante.....	60
Tabla 18. Ensayo de hidrómetro.....	61
Tabla 19. Tabla de humedad natural.....	63
Tabla 20. Clasificación de suelo de subrasante.....	63
Tabla 21. Limite liquido de la subrasante.....	64
Tabla 22. Limite plástico de la subrasante.....	65
Tabla 23. Resumen de resultados.....	65
Tabla 24. Ensayo de compactación T-180.....	65
Tabla 25. Resultados de CBR _{CHO} patrón.....	67
Tabla 26. Resultados de expansión patrón.....	68
Tabla 27. Resultados CBR 5,00 % de humedad.....	68
Tabla 28. Resultados expansión 5,00 % de humedad.....	68
Tabla 29. Resultados CBR 7,50 % de humedad.....	69
Tabla 30. Resultados expansión 7,50 % de humedad.....	69
Tabla 31. Resultados CBR 10,00 % de humedad.....	69

Tabla 32. Resultados expansión 10% de humedad.....	70
Tabla 33. Resultados CBR 15,00 % de humedad.....	70
Tabla 34. Resultados expansión 15,00 % de humedad.....	70
Tabla 35. Resultados CBR 17.50% de humedad.....	71
Tabla 36. Resultados expansión 17,50% de humedad.....	71
Tabla 37. Resultados CBR 20,00% de humedad.....	71
Tabla 38. Resultados expansión 20,00 % de humedad.....	72
Tabla 39. Humedad higroscópica de la muestra sub base.....	72
Tabla 40. Contenido de humedad de sub base.....	72
Tabla 41. Planilla de granulometría de la sub base.....	73
Tabla 42. Granulometría del mortero subbase.....	73
Tabla 43. Limite liquido de la subbase.....	74
Tabla 44. Limite plástico de la subbase.....	75
Tabla 45. Resumen resultados de límites.....	76
Tabla 46. Humedad natural de la subbase.....	76
Tabla 47. Clasificación del suelo de la capa base.....	76
Tabla 48. Ensayo de desgaste de los ángeles.....	77
Tabla 49. Resumen resultados desgaste de los ángeles.....	77
Tabla 50. Ensayo de compactación T-180.....	77
Tabla 51. Resultados CBR patrón subbase.....	79
Tabla 52. Resultados expansión CBR patrón subbase.....	79
Tabla 53. Resultados CBR 4,00 % de humedad.....	80
Tabla 54. Resultados expansión 4,00 % humedad.....	80
Tabla 55. Resultados CBR 5,00 % de humedad subbase.....	80
Tabla 56. Resultados expansión 5,00 % de humedad subbase.....	81
Tabla 57. Resultados CBR 6,00 % de humedad.....	81
Tabla 58. Resultados expansión 6,00 % de humedad.....	81
Tabla 59. Resultados CBR 8,00 % de humedad.....	82
Tabla 60. Resultados expansión 8,00 % de humedad.....	82
Tabla 61. Resultados CBR 9,00 % humedad.....	82
Tabla 62. Resultados expansión 9,00 % de humedad.....	83

Tabla 63. Resultados CBR 10,00 % de humedad.....	83
Tabla 64. Resultados expansión 10,00 % de humedad.....	83
Tabla 65. Humedad higroscópica de la muestra.....	84
Tabla 66. Contenido de humedad de la muestra.....	84
Tabla 67. Análisis granulométrico capa base.....	85
Tabla 68. Análisis granulométrico del mortero del suelo.....	85
Tabla 69. Resumen de resultados granulometría de la capa base.....	86
Tabla 70. Humedad natural de la capa base.....	87
Tabla 71. Clasificación del suelo de la capa base.....	87
Tabla 72. Ensayo de desgaste de los ángeles.....	88
Tabla 73. Ensayo de compactación de la capa base.....	88
Tabla 74. Resultados CBR _{CHO} patrón base.....	90
Tabla 75. Resultado expansión CBR patrón base.....	90
Tabla 76. Resultados CBR 4,00 % humedad en capa base.....	91
Tabla 77. Resultados expansión humedad 4,00 % en capa base.....	91
Tabla 78. Resultados CBR 5,00 % de humedad en capa base.....	91
Tabla 79. Resultados expansión al 5,00 % de humedad en capa base.....	91
Tabla 80. Resultados CBR 6,00 % de humedad en capa base.....	92
Tabla 81. Resultados expansión al 6,00 % de humedad en capa base.....	92
Tabla 82. Resultados CBR 7,00 % de humedad en capa base.....	92
Tabla 83. Resultados expansión al 7,00 % de humedad en capa base.....	93
Tabla 84. Resultados CBR 8,00 % humedad en capa base.....	93
Tabla 85. Resultados expansión al 8,00 % de humedad en capa base.....	93
Tabla 86. Resultados CBR 9,00 % de humedad en capa base.....	93
Tabla 87. Resultados expansión al 9,00 % de humedad en capa base.....	94
Tabla 88. Resultados capa sub-rasante.....	96
Tabla 89. Resultados capa sub base.....	109
Tabla 90. Resultados capa base.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capas de pavimento flexible.....	55
Figura 2. Ubicación de extracción de muestras de subrasante.....	58
Figura 3. Ubicación del banco de base y subbase.....	59

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Página

Gráfico 1. Abaco para la determinación del daño relativo	30
Gráfico 2. Proyección aritmética del tránsito	36
Gráfico 3. Numero estructural.....	46
Gráfico 4. Abaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles.....	49
Gráfico 5. Abaco para estimar el numero estructural a_1	50
Gráfico 6. Abaco para estimar el numero estructural a_2	51
Gráfico 7. Abaco para estimar el numero estructural a_3	52
Gráfico 8. Abaco para estimar el SN de la capa base con cemento.....	53
Gráfico 9. Abaco para estimar el SN de la capa base con asfalto.....	54
Gráfico 10. Curva granulométrica subrasante.....	61
Gráfico 11. Distribución granulométrica por hidrómetro.....	62
Gráfico 12. Limite líquido.....	64
Gráfico 14. Curva granulométrica de la subbase.....	74
Gráfico 15. Limite liquido de la subbase.....	75
Gráfico 16. Ensayo de compactación de la subbase.....	78
Gráfico 17. Curva granulométrica capa base.....	86
Gráfico 18. Curva de compactación de la capa base.....	89
Gráfico 19. Variación de la humedad en la densidad de la subrasante.....	97
Gráfico 20. Análisis del impacto de variación de la humedad y densidad.....	97
Gráfico 21. Análisis del impacto de la variación de la humedad en el CBR de la subrasante.....	98
Gráfico 22. Análisis de impacto de la variación de la humedad en el CBR de la subrasante.....	98
Gráfico 23. Influencia de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante.....	99
Gráfico 24. Análisis de impacto de la variación de la humedad en el módulo resiliente.....	99
Gráfico 25. Variación de la densidad de la sub base con cambios en la humedad...109	109
Gráfico 26. Impacto del porcentaje de afectación en la densidad de la sub base.....	110
Gráfico 27. Variación del CBR de la subbase con cambios en la humedad.....	110
Gráfico 28. Impacto del porcentaje de afectación del CBR de la sub base.....	111

Gráfico 29. Variación del módulo resiliente de la sub base con cambios en la humedad.....	111
Gráfico 30. Impacto del porcentaje de afectación en el módulo resiliente de la sub base.....	112
Gráfico 31. Variación del espesor de la sub base con cambios en la humedad.....	112
Gráfico 32. Impacto del porcentaje de afectación en el espesor de la subbase	113
Gráfico 33. Variación de la humedad en la densidad de la base.....	121
Gráfico 34. Análisis del impacto de la densidad en la capa base.....	121
Gráfico 35. Influencia de la humedad en el valor de soporte de la capa base.....	122
Gráfico 36. Análisis del impacto en el CBR de la base.....	122
Gráfico 37. Influencia de la humedad en el módulo resiliente de la base.....	123
Gráfico 38. Análisis del impacto en el módulo resiliente de la base.....	123
Gráfico 39. Espesor de base vs humedad.....	124
Gráfico 40. Afectación de la humedad al espesor de la base.....	124
Gráfico 41. CBR vs humedad para diferentes capas.....	136
Gráfico 42. CBR vs humedad para diferentes capas.....	138
Gráfico 43. Modulo Resiliente vs humedad para diferentes capas.....	140
Gráfico 44. Diseño de espesores de pavimento en función de humedades.....	142
Gráfico 45. Costo de materiales de las capas del pavimento flexible.....	144
Gráfico 46. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.....	145
Gráfico 47. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.....	146
Gráfico 48. Diseño de espesores de pavimento en función de la variación de humedad.....	147