

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



**“EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA  
ADHERENCIA Y RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS  
ASFÁLTICAS”**

**Por:**

**RUTH DANIELA CALLE ALÁ**

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 II - 2023**

**TARIJA – BOLIVIA**

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

**“EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA**  
**ADHERENCIA Y RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS**  
**ASFÁLTICAS”**

**Por:**

**RUTH DANIELA CALLE ALÁ**

**Semestre II - 2023**

**TARIJA – BOLIVIA**

**DEDICATORIA:**

A mis padres quienes contribuyeron con esta ardua pero posible tarea y brindaron todo el apoyo emocional para su realización.

Y aunque mi padre ya no esté presente entre nosotros, su ejemplo y memoria perdurará por siempre en nuestra mente y corazón.

# ÍNDICE GENERAL

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

	Página
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.3.1. Situación problemática.....	3
1.3.2. Problema .....	4
1.4.Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos .....	4
1.5.Hipótesis.....	4
1.6.Conceptualización de las variables .....	5
1.6.1. Variable independiente.....	5
1.6.2. Variable dependiente.....	5
1.7. Identificación del tipo de investigación .....	5
1.8. Unidades de estudio y decisión muestral .....	6
1.8.1. Unidad de estudio.....	6
1.8.2. Población.....	6
1.8.3. Muestra.....	6
1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo.....	6
1.9. Métodos y técnicas empleadas .....	7
1.9.1. Métodos.....	7
1.9.2. Técnicas.....	7
1.10. Procesamiento de la información .....	8
1.11. Alcance de la investigación .....	8

## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES SOBRE LA HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

	Página
2.1. Pavimentos .....	10
2.1.1. Tipos de pavimentos .....	10
2.1.2. Conceptos estructurales básicos en los pavimentos flexibles .....	11
2.2. Estructura del pavimento flexible .....	12
2.2.1. Capa asfáltica .....	13
2.2.2. Capa Base.....	14
2.2.3. Capa sub-base.....	14
2.2.4. Sub-rasante.....	15
2.3. Mezcla asfáltica.....	16
2.3.1. Concreto asfáltico en caliente .....	16
2.3.2. El método Marshall.....	17
2.4. Componentes de la mezcla asfáltica .....	19
2.4.1. Cemento asfáltico.....	19
2.4.1.1. Cemento asfáltico modificado con polímero .....	20
2.4.1.2. Definición de polímero .....	21
2.4.2. Agregado.....	22
2.4.2.1. Origen de los materiales granulares .....	23
2.4.2.2. Tipos de agregados para mezclas asfálticas.....	24
2.4.2.3. La fracción “pasa el tamiz N°200” o polvo mineral.....	25
2.5. Humedad en la mezcla asfáltica.....	26
2.6. Ensayo tracción indirecta .....	29
2.7. Factores de influencia en el daño por humedad .....	32
2.7.1. Cemento asfáltico.....	33
2.7.2. Características del agregado.....	33
2.7.3. Volumen de Aire.....	33
2.7.4. Condiciones climáticas al momento de la construcción .....	33
2.7.5. Clima.....	33
2.7.6. Tráfico.....	34

CAPÍTULO III  
RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

	Página
3.1. Criterio de la selección de banco de materiales .....	35
3.2. Criterio de los ciclos de saturación de las muestras .....	36
3.3. Criterios de selección de asfalto.....	37
3.4. Criterio para el número de briquetas de mezclas asfálticas .....	37
3.5. Muestra.....	38
3.6. Muestreo.....	38
3.7. Levantamiento de la información.....	41
3.7.1. Caracterización del material pétreo.....	41
3.7.1.1. Ensayo de granulometría.....	42
3.7.1.2. Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los Ángeles .....	44
3.7.1.3. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos.....	48
3.7.1.4. Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos.....	49
3.7.1.5. Ensayo de peso unitario de los agregados.....	50
3.7.1.6. Ensayo de equivalente de arena .....	52
3.7.1.7. Ensayo de porcentaje de caras fracturadas.....	53
3.7.1.8. Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas .....	53
3.7.2. Caracterización del cemento asfáltico convencional 85/100 .....	54
3.7.2.1. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol .....	55
3.7.2.2. Ensayo de penetración.....	55
3.7.2.3. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland.....	57
3.7.2.4. Peso específico del asfalto .....	58
3.7.2.5. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola .....	59
3.7.2.6. Ensayo de ductilidad .....	60
3.7.3. Caracterización del cemento asfáltico modificado con polímero SBS 50/75... ..	60
3.7.3.1. Ensayo de penetración.....	61
3.7.3.2. Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland.....	62
3.7.3.3. Peso específico del asfalto .....	62
3.7.3.4. Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola .....	63

3.7.3.5. Ensayo de ductilidad .....	64
3.8. Diseño Marshall para mezclas asfálticas.....	65
3.8.1. Agregados pétreos.....	65
3.8.2. Cemento asfáltico convencional 85/100 .....	66
3.8.3. Cemento asfáltico modificado 50/75 .....	67
3.8.4. Diseño por el método Marshall para el contenido óptimo .....	67
3.8.5. Desarrollo de la elaboración de las briquetas.....	71
3.8.6. Ensayo de Marshall.....	73
3.8.7. Procedimiento de cálculo para el ensayo Marshall .....	75
3.8.7.1. Alturas de briquetas.....	75
3.8.7.2. Base de mezcla y agregado .....	75
3.8.7.3. Peso de briqueta en el aire.....	75
3.8.7.4. Peso de briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.) .....	76
3.8.7.5. Peso de briquetas sumergida en el agua.....	76
3.8.7.6. Volumen de la briqueta .....	76
3.8.7.7. Densidad real de la briqueta.....	76
3.8.7.8. Densidad máxima teórica de la briqueta .....	77
3.8.7.9. Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv) .....	77
3.8.7.10. Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM) .....	77
3.8.7.11. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV) .....	77
3.8.8. Estabilidad y fluencia.....	77
3.8.9. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica 85/100 .....	79
3.8.10. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico 85/100 .....	82
3.8.11. Resultados del ensayo Marshall para el C.A. modificado 50/75 .....	83
3.8.12. Determinación del porcentaje óptimo de C.A. modificado 50/75 .....	87

#### CAPÍTULO IV

#### PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

	Página
4.1. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo para el asfalto 85/100 .....	89
4.2. Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo para el asfalto 50/75 .....	89
4.3. Ensayo Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto 85/100 .....	90

4.4. Ensayo Marshall para el porcentaje óptimo de asfalto 50/75 .....	92
4.5. Ensayo de tracción indirecta para el porcentaje óptimo de asfalto 85/100 .....	94
4.5.1. Cálculo del índice de resistencia conservada .....	98
4.6. Ensayo de tracción indirecta para el porcentaje óptimo de asfalto 50/75 .....	100
4.6.1. Cálculo del índice de resistencia conservada .....	101
4.7. Evaluación del ensayo Marshall.....	102
4.7.1. Evaluación del ensayo Marshall para el asfalto 85/100 .....	102
4.7.2. Evaluación del ensayo Marshall para el asfalto 50/75 .....	103
4.7.3. Análisis comparativo de estabilidad del asfalto convencional y modificado. ....	104
4.8. Evaluación del ensayo de tracción indirecta .....	105
4.8.1. Evaluación del ensayo de tracción indirecta para el asfalto 85/100.....	105
4.8.2. Evaluación del ensayo de tracción indirecta para el asfalto 50/75.....	107
4.8.3. Análisis comparativo de la resistencia a tracción indirecta. ....	108
4.8.4. Análisis de adherencia.....	109

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
5.1. Conclusiones .....	113
5.2. Recomendaciones.....	115

### **Bibliografía**

### **ANEXOS**

ANEXO 1 PLANILLAS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

ANEXO 2 PLANILLA DE CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO 85/100

ANEXO 3 PLANILLA DE CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO 50/75

ANEXO 4 PLANILLAS DE DISEÑO POR MÉTODO MARSHALL

ANEXO 5 PLANILLAS DE ENSAYO MÉTODO MARSHALL

ANEXO 6 PLANILLAS DE ENSAYO MÉTODO TRACCIÓN INDIRECTA

ANEXO 7 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ASFALTO 85/100

ANEXO 8 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ASFALTO 50/75

ANEXO 9 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1. Cuadro de operacionalización.....	5
Tabla 2.1. Clasificación de los cementos asfálticos en función de su penetración	20
Tabla 2.2. Factores que contribuyen al daño por humedad.....	28
Tabla 2.3. Parámetros ensayos normas ASTM D4867, AASHTO T283 y LNV ..	32
Tabla 3.1. Total de briquetas para la evaluación del daño por humedad .....	38
Tabla 3.2. Ensayos de la muestra estratificada.....	39
Tabla 3.3. Análisis estadístico.....	39
Tabla 3.4. Cálculo de muestra estratificada .....	40
Tabla 3.5. Resultado de muestra estratificada.....	41
Tabla 3.6. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 1 .....	43
Tabla 3.7. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 2 .....	43
Tabla 3.8. Planilla de resultados de las granulometrías del ensayo 3 .....	44
Tabla 3.9. Agregados gruesos y el N° de esferas para desgaste de los Ángeles ....	46
Tabla 3.10. Datos de la grava 3/4” para el ensayo .....	46
Tabla 3.11. Datos de la gravilla 3/8” para el ensayo.....	47
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de peso específico de la grava 3/4” .....	48
Tabla 3.13. Resultados del ensayo de peso específico de la gravilla 3/8” .....	48
Tabla 3.14. Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino .....	49
Tabla 3.15. Resultados del ensayo para peso unitario suelto .....	51
Tabla 3.16. Resultados del ensayo para peso unitario compactado .....	51
Tabla 3.17. Resultados del ensayo de equivalente de arena.....	52
Tabla 3.18. Resultados del ensayo de caras fracturadas .....	53
Tabla 3.19. Resultados del ensayo para grava 3/4”.....	54
Tabla 3.20. Resultados del ensayo para gravilla 3/8” .....	54
Tabla 3.21. Resultado del ensayo de viscosidad Saybolt-Furol del C.A. 85/100 ....	55
Tabla 3.22. Resultados del ensayo de penetración del C.A. 85/100 .....	56
Tabla 3.23. Resultados del ensayo de punto de inflamación del C.A. 85/100.....	57
Tabla 3.24. Resultados del ensayo de peso específico para el C.A. 85/100 .....	58

Tabla 3.25.	Resultados de punto de ablandamiento para el C.A. 85/100.....	59
Tabla 3.26.	Resultados del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85/100 .....	60
Tabla 3.27.	Especificación técnica del C.A. modificado con polímero SBS .....	61
Tabla 3.28.	Resultados del ensayo de penetración del C.A. 50/75 .....	61
Tabla 3.29.	Resultados del ensayo de punto de inflamación del C.A. 50/75 .....	62
Tabla 3.30.	Datos y resultados de peso específico para el C.A. 50/75 .....	62
Tabla 3.31.	Resultados de punto de ablandamiento del C.A 50/75 .....	63
Tabla 3.32.	Resultados de ductilidad del cemento asfáltico modificado 50/75 .....	64
Tabla 3.33.	Resumen de resultados de granulometrías de los agregados .....	65
Tabla 3.34.	Tabla resumen de resultados de la caracterización del agregado.....	66
Tabla 3.35.	Resultados de caracterización de C.A. convencional 85/100 .....	66
Tabla 3.36.	Resultados de caracterización de C.A. modificado 50/75.....	67
Tabla 3.37.	Designación de mezcla para el tamaño máximo nominal .....	67
Tabla 3.38.	Dosificación para la mezcla asfáltica densa.....	68
Tabla 3.39.	Índice asfáltico para la distribución de tamaño de partículas .....	69
Tabla 3.40.	Variaciones del porcentaje de asfalto para el porcentaje óptimo .....	70
Tabla 3.41.	Dosificación para el contenido óptimo de asfalto 85/100.....	70
Tabla 3.42.	Planilla de criterios de diseño Marshall .....	71
Tabla 3.43.	Alturas para la briqueta 3,42% .....	75
Tabla 3.44.	Peso al aire de la briqueta para el porcentaje de 3,42 .....	75
Tabla 3.45.	Peso briqueta saturadas superficialmente seca.....	76
Tabla 3.46.	Peso briqueta sumergida en agua. ....	76
Tabla 3.47.	Datos del ensayo de estabilidad y fluencia para la briqueta 3,42.....	78
Tabla 3.48.	Estabilidad real.....	78
Tabla 3.49.	Alturas promedio y factor de corrección por altura .....	78
Tabla 3.50.	Resultados de la estabilidad y fluencia para la briqueta 3,42 .....	78
Tabla 3.51.	Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85/100.....	79
Tabla 3.52.	Resultado del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85/100.....	82
Tabla 3.53.	Resultados del diseño óptimo de la mezcla convencional 85/100 .....	83
Tabla 3.54.	Porcentaje en la mezcla total.....	83
Tabla 3.55.	Resultado del diseño de la mezcla asfáltica modificado 50/75.....	84

Tabla 3.56.	Resultado del diseño de la mezcla asfáltica modificada 50/75 .....	87
Tabla 3.57.	Resultados del diseño óptimo de la mezcla convencional 50/75 .....	88
Tabla 3.58.	Porcentaje en la mezcla total.....	88
Tabla 4.1.	Dosificación con el contenido óptimo de asfalto 85/100 .....	89
Tabla 4.2.	Dosificación con el contenido óptimo de asfalto 50/75 .....	89
Tabla 4.3.	Datos obtenidos del ensayo Marshall con asfalto 85/100 .....	90
Tabla 4.4.	Resultados con tiempos de saturación utilizando el asfalto 85/100.....	91
Tabla 4.5.	Datos del ensayo Marshall con asfalto 50/75.....	92
Tabla 4.6.	Resultados con tiempos de saturación utilizando el asfalto 50/75 .....	93
Tabla 4.7.	Datos del ensayo tracción indirecta utilizando asfalto 85/100.....	97
Tabla 4.8.	Desarrollo del ensayo tracción indirecta .....	98
Tabla 4.9.	Resultados del ensayo tracción indirecta para asfalto 85/100.....	99
Tabla 4.10.	Datos del ensayo tracción indirecta utilizando asfalto 50/75.....	100
Tabla 4.11.	Resultados del ensayo tracción indirecta para asfalto 50/75.....	101
Tabla 4.12.	Resultados del ensayo Marshall, cemento asfáltico 85/100.....	102
Tabla 4.13.	Resultados del ensayo Marshall, cemento asfáltico 50/75.....	103
Tabla 4.14.	Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 85/100 .....	106
Tabla 4.15.	Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 50/75 .....	107
Tabla 4.16.	Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 85/100 .....	110
Tabla 4.17.	Resultados del ensayo a tracción indirecta, C.A. 50/75 .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Distribución de cargas de neumáticos en la estructura del pavimento..	11
Figura 2.2. Esfuerzo de tracción y compresión como resultado del paso de carga .	12
Figura 2.3. Estructura típica del pavimento flexible .....	12
Figura 2.4. Capa asfáltica .....	13
Figura 2.5. Base granular.....	14
Figura 2.6. Sub base granular .....	15
Figura 2.7. Esquema del ensayo Marshall.....	18
Figura 2.8. Ejemplos de gráficos Marshall.....	19
Figura 2.9. Fotografía equipo TSR.....	29
Figura 2.10. Configuración de la carga, así como la rotura del ensayo TSR .....	30
Figura 3.1. Ubicación de la comunidad de San Mateo.....	35
Figura 3.2. Coordenadas de la chancadora Garzón .....	36
Figura 3.3. Tamices para granulometría de agregado fino .....	42
Figura 3.4. Tamices para granulometría de agregado grueso.....	42
Figura 3.5. Máquina de desgaste de los Ángeles.....	45
Figura 3.6. Realización del ensayo de desgaste de los Ángeles .....	45
Figura 3.7. Calibración de la balanza mecánica para el peso sumergido .....	48
Figura 3.8. Canastillo para el peso sumergido de agregado grueso .....	49
Figura 3.9. Matraz con el agregado fino para peso específico .....	50
Figura 3.10. Arena para el ensayo de peso específico para agregado fino.....	50
Figura 3.11. Enrazado del agregado grueso para el peso unitario suelto .....	51
Figura 3.12. Muestras en reposo.....	52
Figura 3.13. Separando las muestras para realizar el ensayo .....	53
Figura 3.14. Aparato para realizar el ensayo .....	54
Figura 3.15. Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol para el C.A. 85/100.....	55
Figura 3.16. Equipo de penetración.....	56
Figura 3.17. Aparato de punto de inflamación .....	57
Figura 3.18. Frascos calibrados para el peso específico del C.A. 85/100 .....	58

Figura 3.19. Ensayo de punto de ablandamiento de C.A. 85/100 en ejecución .....	59
Figura 3.20. Moldes de ductilidad con cemento asfáltico 85/100 .....	60
Figura 3.21. Peso para el ensayo de peso específico del C.A. modificado 50/75 .....	63
Figura 3.22. Ensayo de punto de ablandamiento de C.A. 50/75 .....	64
Figura 3.23. Elaboración de briquetas .....	72
Figura 3.24. Compactación y desmolde de briquetas .....	73
Figura 3.25. Medición de las alturas de briquetas y rotura en la prensa Marshall ....	74
Figura 4.1. Acondicionamiento de briquetas para el ensayo de tracción indirecta .	95
Figura 4.2. Equipo para realizar el ensayo y ruptura de briquetas .....	96
Figura 4.3. Rotura de briquetas del ensayo de tracción indirecta asfalto 85/100 ..	111
Figura 4.4. Rotura de briquetas del ensayo de tracción indirecta asfalto 50/75 ....	111

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 3.1. Curva granulométrica de la mezcla según diseño Marshall.....	69
Gráfica 3.2. Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta .....	80
Gráfica 3.3. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire de la mezcla .....	80
Gráfica 3.4. Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM) .....	81
Gráfica 3.5. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos lleno de asfalto (RBV)..	81
Gráfica 3.6. Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida .....	81
Gráfica 3.7. Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo).....	82
Gráfica 3.8. Porcentaje de asfalto vs densidad de la probeta .....	85
Gráfica 3.9. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacíos en aire de la mezcla .....	85
Gráfica 3.10. Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral (VAM) .....	86
Gráfica 3.11. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de vacío lleno de asfalto (RBV)	86
Gráfica 3.12. Porcentaje de asfalto vs estabilidad corregida.....	86
Gráfica 3.13. Porcentaje de asfalto vs fluencia (flujo) .....	87
Gráfica 4.1. Tiempo vs estabilidad C.A. 85/100.....	102
Gráfica 4.2. Tiempo vs estabilidad C.A. 50/75.....	103
Gráfica 4.3. Comparación de la estabilidad .....	104
Gráfica 4.4. Tiempo vs tracción indirecta C.A. 85/100 .....	106
Gráfica 4.5. Tiempo vs tracción indirecta C.A. 50/75 .....	107
Gráfica 4.6. Comparación de la resistencia a tracción indirecta .....	108