

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



“APLICACIÓN DEL PARÁMETRO DE GLOVER-ROWE PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE RAP EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE”

Por:

JAEL ALEJANDRA FARFÁN GONZALES

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 - 2022

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres Carmen y Samuel, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mi Abuelo Roberto Gonzales que, aunque no se encuentre presente físicamente siempre vivirá en mi corazón y recuerdos.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

	Página
1. Introducción	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.3.1. Situación problemática.....	3
1.3.2. Problema	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.6. Definición de variables independientes y dependientes.....	5
1.6.1. Operacionalización de variables	5
1.7. Procedimiento de aplicación	6
1.8. Alcance de la investigación.....	8
2. Fundamentación teórica	10
2.1 Pavimentos	10
2.1.1 Definición.....	10
2.1.2 Estructura de los pavimentos	10
2.1.3 Características de un pavimento.....	11
2.1.4 Tipos de pavimento.....	12
2.1.4.1 Pavimentos flexibles	12
2.1.5 Diferencias entre pavimentos de hormigón y asfalto.....	13
2.2. Pavimentos flexibles	14
2.2.1. Componentes de pavimentos flexibles.....	14
2.2.1.1. Terracería o terreno natural.....	15
2.2.1.2. Cuerpo del terraplén.....	16

2.2.1.3	Capa sub-rasante	16
2.2.1.4.	Capa sub-base.....	17
2.2.1.5.	Capa base	17
2.2.1.6.	Carpeta asfáltica.....	18
2.2.2.	Características de pavimentos flexibles	19
2.2.2.1.	Resistencia estructural.....	19
2.2.2.2.	Deformabilidad	20
2.2.2.3.	Durabilidad.....	20
2.2.2.4.	Costo	21
2.2.2.5.	Requerimientos de conservación.....	21
2.2.2.6.	Comodidad.....	21
2.3.	Definición de asfalto	22
2.4.	Mezclas asfálticas.....	22
2.4.1.	Características de las mezclas asfálticas en caliente	23
2.4.2.	Propiedades de las mezclas asfálticas	24
2.5.	Fallas en los pavimentos flexibles	25
2.5.1.	Falla por insuficiencia estructural	25
2.5.2.	Falla por defectos constructivos.....	25
2.5.3.	Falla por fatiga	25
2.5.4.	Fallas comunes en los pavimentos	26
2.5.4.1.	Agrietamiento en “Piel de cocodrilo”	26
2.5.4.2.	Deformación permanente en la superficie del pavimento.....	26
2.5.5.	Fallas por cortante.....	26
2.5.5.1.	Agrietamiento longitudinal	27
2.5.5.2.	Consolidación del terreno de cimentación	27
2.6.	Reciclado de pavimentos.....	27
2.6.1.	Campos De Aplicación Del Reciclaje.....	28
2.6.2.	Fundamentos de la técnica de reciclaje.....	28
2.6.3.	Formas de obtención del pavimento asfáltico a reciclar (RAP).....	29
2.6.3.1.	Demolición mecánica.....	29

2.6.3.2.	Fresado	30
2.6.4.	Importancia del proceso de reciclaje de carpeta asfálticas.....	30
2.6.5.	Ventajas del reciclado como técnica de conservación	30
2.6.5.1	Reciclado en caliente.....	31
2.6.5.2.	Reciclado en frío	32
2.7.	Tipos de reciclado	32
2.7.1.	Reciclaje superficial	32
2.7.2.	Reciclaje en el lugar (in-situ).....	32
2.7.3.	Reciclaje en planta	32
2.8.	Parámetro Glover – Rowe.....	34
2.9.	Metodología	41
2.9.1.	Ensayos de caracterización de agregados pétreos	41
2.9.1.1.	Análisis granulométrico por tamizado (Astm D422; Aashto T88)	41
2.9.1.2.	Método de los sulfatos para determinar la desintegración (Astm C 88 Aashto T104).....	47
2.9.1.3.	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127; AASHTO T85-91)	54
2.9.1.4.	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128; AASHTO T84-00)	57
2.9.1.5.	Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en agregado grueso (ASTM D 5821-13)	66
2.9.1.6.	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99).....	70
2.9.2.	Ensayos de caracterización del betumen.....	74
2.9.2.1.	Método de ensayo de penetración (ASTM D5; AASHTO T49-97)	74
2.9.2.2.	Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de cleveland (ASTM D1310-01; AASHTO T79.96)	79
2.9.2.3.	Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51-00).....	85

2.9.2.4.	Método para determinar la densidad (ASTM D71-94; AASHTO T 229-97).....	88
2.9.2.5.	Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D36 AASHTO T53-96)	90
2.9.2.6.	Método para determinar el contenido de ligante de mezclas asfálticas por centrifugación – ensaye de extracción	95
2.9.2.7.	Método para determinar la viscosidad Saybolt (ASTM D 244)	99
2.10.	Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall.....	106
3.1.	Selección de materiales	110
3.1.1.	Materiales pétreos	110
3.1.2.	Cemento asfáltico.....	111
3.1.3.	Carpeta asfáltica a reciclar	111
3.2.	Caracterización de agregados.....	112
3.2.1.	Análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T-27) (ASTM C-136).....	112
3.2.2.	Ensayo de desgaste por medio de la máquina de los ángeles (AASHTO T-96) (ASTM C-131).....	113
3.2.3.	Ensayo de durabilidad por el método de los sulfatos para determinar la desintegración (AASHTO T-104) (ASTM C-88)	116
3.2.4.	Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (AASHTO T-85) (ASTM C-127)	120
3.2.5.	Ensayo de peso específico y absorción de agua del agregado fino (AASHTO T-84) (ASTM C-128)	122
3.2.6.	Ensayo de equivalente de arena (AASHTO T-176) (ASTM D-2419).....	124
3.2.7.	Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821-95)	126
3.2.8.	Ensayo determinación de partículas laminares, chatas y alargadas (ASTM-4791).....	128
3.3.	Ensayos realizados en el cemento asfáltico	130
3.3.1	Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol (AASHTO T-84) (ASTM E-102).....	130
3.3.2.	Ensayo de penetración (AASHTO T49-97) (ASTM D-5).....	132

3.3.3.	Ensayo punto de inflamación (AASHTO T-48) (ASTM D-92)	133
3.3.4.	Ensayo peso específico del asfalto AASHTO T-43 (ASTM D-70).....	134
3.3.5.	Ensayo punto de ablandamiento AASHTO T-53 (ASTM D-36).....	136
3.3.6.	Ductilidad de materiales bituminosos (AASHTO T 51-93; ASTM: D 11379).....	137
3.4.	Diseño de mezclas asfálticas.....	138
3.4.1.	Resultados del Levantamiento de Información.....	138
3.4.1.1.	Agregados Pétreos.....	138
3.4.1.2.	Cemento Asfáltico.....	139
3.5.	Diseño de la mezcla asfáltica por el método de Marshall para obtener el contenido óptimo.....	139
3.5.1.	Composición granulométrica de los agregados.....	140
3.5.2.	Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico convencional 85-100	142
3.5.2.1.	Diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall.....	142
3.5.2.2.	Preparación de las probetas.....	143
3.5.2.3.	Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio.....	145
3.6.	Ensayo de Marshall.....	148
3.6.1.	Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100.....	150
3.6.2.	Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo.....	154
3.6.3.	Análisis.....	158
3.7.	Investigación de mezclas asfálticas con rap bajo el parámetro de glover rowe.....	158
3.7.1.	Introducción	158
3.7.2.	Método para determinar el contenido de ligante de mezclas asfálticas por centrifugación - ensayo de extracción.....	159
3.7.3.	Dosificación de los agregados.....	162
3.7.4.	Procedimiento de ensayo realizado en laboratorio.....	169
3.7.5.	Ensayo de Marshall.....	172

3.7.5.1.	Proceso de cálculo de propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional 85-100	173
3.7.5.2.	Altura de briquetas	174
3.7.5.3.	Peso de briqueta en el aire.....	174
3.7.5.4.	Peso de briqueta en el aire saturado superficialmente seco (S.S.S.)	175
3.7.5.5.	Peso de briqueta sumergida en el agua	175
3.7.5.6.	Volumen de la briqueta	176
3.7.5.7.	Densidad de la briqueta.....	176
3.7.5.8.	Densidad real de la briqueta.....	176
3.7.5.9.	Densidad máxima teórica de la briqueta	177
3.7.5.10.	Porcentaje de Vacíos.....	177
3.7.5.11.	Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv).	177
3.7.5.12.	Porcentaje de vacíos de los agregados (VAM).	177
3.7.5.13.	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (RBV).	177
3.7.5.14.	Estabilidad y Fluencia.	178
3.7.6.	Resultados del Diseño de la Mezcla Asfáltica Convencional 85-100.....	181
3.7.7.	Preparación de briquetas con el porcentaje óptimo de RAP	185
3.8.	Ensayo de extracción de asfalto	189
3.9.	Comparación económica de precios unitarios de la mezcla convencional y mezcla con incorporación de RAP.....	195
3.10.	Análisis de los resultados y comparaciones	199
4.1.	Conclusiones	207
4.2.	Recomendaciones.....	208

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I	PLANILLAS DE CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS
ANEXO II	PLANILLAS DE CARACTERIZACION DEL CEMENTO ASFALTICO
ANEXO III	PLANILLAS DE DOSIFICACION DE MATERIALES
ANEXO IV	PLANILLAS DISEÑO MARSHALL
ANEXO V	PLANILLAS EXTRACCION DE ASFALTO
ANEXO VI	SOLICITUDES

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Variable Dependiente.....	5
Tabla 2. Variable Independiente	5
Tabla 3. Características de materiales de capa sub-base.....	17
Tabla 4. Características de materiales de capa base.....	18
Tabla 5. Técnicas de Reciclado.....	33
Tabla 6. Serie de tamices	42
Tabla 7. Cantidad mínima de muestra para granulometría según tamaño máximo absoluto del suelo	43
Tabla 8. Tamaño de la Muestra de ensayo de áridos fino	49
Tabla 9. Árido grueso.....	50
Tabla 10. Serie de Tamices para el examen cuantitativo	52
Tabla 11. Masa mínima de la muestra de prueba.....	67
Tabla 12. Grados de ensayo (definidos por sus rangos de tamaño, en mm)	73
Tabla 13. Condiciones para ensayos especiales.....	77
Tabla 14. Criterios de precisión	79
Tabla 15. Máxima entre mediciones	79
Tabla 16. Valores de corrección del punto de inflamación y de combustión	82
Tabla 17. Especificaciones.....	83
Tabla 18. Especificaciones.....	84
Tabla 19. Especificaciones.....	85
Tabla 20. Termómetros Astm Para Viscosidades Saybolt	100
Tabla 21. Precisión.....	104

Tabla 22.	Criterios de diseño de mezclas Marshall.....	108
Tabla 23.	Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)	109
Tabla 24.	Planilla de resultados de las granulometrías de la grava, gravilla y arena..	112
Tabla 25.	Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4”	115
Tabla 26.	Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8”.	115
Tabla 27.	Datos del ensayo de durabilidad para el agregado grueso	117
Tabla 28.	Resultados del ensayo de durabilidad para agregado grueso	118
Tabla 29.	Datos del ensayo de durabilidad para agregado fino	119
Tabla 30.	Resultados del ensayo de durabilidad para agregado fino	119
Tabla 31.	Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso.....	120
Tabla 32.	Resultados del ensayo de peso específico del agregado grueso".	121
Tabla 33.	Datos del ensayo peso específico del agregado fino.....	123
Tabla 34.	Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino.	124
Tabla 35.	Datos del ensayo de equivalente de arena.....	126
Tabla 36.	Resultados del Ensayo Equivalente de Arena.....	126
Tabla 37.	Datos de ensayo de caras fracturadas.....	127
Tabla 38.	Resultados del ensayo de caras fracturadas	128
Tabla 39.	Datos del ensayo partículas Laminares	128
Tabla 40.	Resultado de ensayo.....	129
Tabla 41.	Datos del ensayo Chatas Alargadas	129
Tabla 42.	Resultados del ensayo chatas y alargadas	130
Tabla 43.	Datos del ensayo de viscosidad cemento asfáltico convencional 85-100.....	131
Tabla 44.	Datos del ensayo de penetración cemento asfáltico 85-100	133

Tabla 45.	Datos del ensayo de punto de inflamación-cemento asfaltico 85-100.....	134
Tabla 46.	Datos del ensayo de peso específico cemento asfaltico 85-100.....	135
Tabla 47.	Datos obtenidos del ensayo punto de ablandamiento cemento asfaltico 85-100	137
Tabla 48.	Resultados ensayo de ductilidad	138
Tabla 49.	Caracterización de los agregados pétreos	138
Tabla 50.	Características del cemento asfáltico 85-100.....	139
Tabla 51.	Dosificación de materiales pétreos	140
Tabla 52.	Requisitos De Gradación Para La Mezcla - Faja “C”	140
Tabla 53.	Granulometría de faja de trabajo.....	141
Tabla 54.	Dosificación	144
Tabla 55.	Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional 85-100.....	150
Tabla 56.	Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica convencional 85-100.....	154
Tabla 57.	Dosificación con el contenido óptimo de asfalto de 5,2%.....	155
Tabla 58.	Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de asfalto 85-100.....	156
Tabla 59.	Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo a las 24 hr ...	157
Tabla 60.	Datos de extracción.....	161
Tabla 61.	Análisis granulométrico	161
Tabla 62.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 5 %.....	163
Tabla 63.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 10 %.....	164
Tabla 64.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 15 %.....	165
Tabla 65.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 20 %.....	166

Tabla 66.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 25 %.....	167
Tabla 67.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 30 %.....	168
Tabla 68.	Alturas medidas de cada briqueta	174
Tabla 69.	Peso al aire de las briquetas	174
Tabla 70.	Peso al aire de las briquetas	175
Tabla 71.	Peso briqueta sumergida en agua.....	176
Tabla 72.	Datos del ensayo de estabilidad y fluencia	178
Tabla 73.	Estabilidad real.....	179
Tabla 74.	Alturas promedio y factor de corrección por altura	179
Tabla 75.	Estabilidad corregida.....	180
Tabla 76.	Corrección de fluencia	180
Tabla 77.	Resultados del diseño de la mezcla asfáltica con RAP 85-100.....	181
Figura 68.	Porcentaje de RAP vs VAM	183
Tabla 78.	Resultados del diseño óptimo de la mezcla asfáltica con RAP.....	185
Tabla 79.	Dosificación con el contenido óptimo de RAP de 10%	186
Tabla 80.	Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo de RAP	187
Tabla 81.	Datos obtenidos del ensayo Marshall con porcentaje óptimo a las 24 hr.....	188
Tabla 82.	Datos de extracción.....	191
Tabla 83.	Análisis granulométrico	192
Tabla 84.	Análisis de precios unitarios, mezcla convencional.....	196
Tabla 85.	Análisis de precios unitarios, mezcla con RAP 15.57%	197
Tabla 86.	Comparación de precios unitarios.....	199

Tabla 87. Resultados de los ensayos de estabilidad Marshall.....	206
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Flujograma de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva.....	6
Figura 2. Estructura de un pavimento flexible.....	12
Figura 3. Distribución de esfuerzos en un pavimento	14
Figura 4. Estructuración de pavimento flexible sección transversal	15
Figura 5. Gráfica Glover & Rowe. Zona de inicio de daño y Zona de agrietamiento en bloque.	35
Figura 6. Probeta graduada, Sifón	65
Figura 7. Partículas fracturadas (orillas angulosas y superficie rugosa)	68
Figura 8. Partícula fracturada (orillas angulosas, superficie lisa).....	69
Figura 9. Partícula fracturada (orillas redondeadas, superficie rugosa)	69
Figura 10. Partícula fracturada (centro) acompañada por dos partículas no fracturadas	69
Figura 11. Máquina de los Ángeles	74
Figura 12. Aguja para ensayo de penetración.....	75
Figura 13. Copa abierta de Cleveland.....	83
Figura 14. Placa de calentamiento, Copa abierta de Cleveland.....	84
Figura 15. Placa de calentamiento, Copa abierta de Cleveland.....	84

Figura 16. Molde para ductilidad de muestra de ensayo	88
Figura 17. Picnómetros.....	90
Figura 18. Anillo, Porta anillo, guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos.....	94
Figura 19. Tapa y Bol de Aluminio.....	98
Figura 20. Viscosímetro Saybolt con orificio Universal y Furol.....	104
Figura 21. Viscosímetro Saybolt con orificio Universal y Furol.....	105
Figura 22. Ubicación de la planta de asfaltos y trituradora de agregados de SEDECA	111
Figura 23. Ubicación de lugar de obtención de RAP	111
Figura 24. Máquina de desgaste de los Ángeles.....	114
Figura 25. Máquina de desgaste por abrasión y material después del proceso	114
Figura 26. Colocando las muestras en los recipientes para posteriormente colocar el sulfato de sodio.....	117
Figura 27. Vertiendo la muestra para realizar el ensayo.	122
Figura 28. Determinación del equivalente de arena	125
Figura 29. Muestra en reposo	125
Figura 30. Separando las muestras para la realizar el ensayo.....	127
Figura 31. Ensayo de viscosidad de saybolt-furol	131
Figura 32. Penetración de la muestra.....	132
Figura 33. Punto de inflamación en proceso de ejecución	134
Figura 34. Ensayo de peso específico.....	135
Figura 35. Soporte de anillos.....	136
Figura 36. Ensayo ductilidad.....	137

Figura 37. Curva proyectada.....	141
Figura 38. Calentamiento de los moldes para realizar el ensayo.....	145
Figura 39. Se realiza el pesaje de los agregados para la muestra a ensayar	145
Figura 40. Se realiza el mezclado homogéneo de la muestra	146
Figura 41. Controlando temperatura.....	146
Figura 42. Extracción de muestras.....	147
Figura 43. Briquetas finalizadas	147
Figura 44. Alturas de briquetas.....	148
Figura 45. Baño maría	148
Figura 46. Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia.....	149
Figura 47. Porcentaje de Asfalto vs Densidad de la Briqueta	151
Figura 48. Porcentaje de Asfalto vs Vacíos de la mezcla (Vv)	151
Figura 49. Porcentaje de Asfalto vs RBV	152
Figura 50. Porcentaje de Asfalto vs VAM.....	152
Figura 51. Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad.....	153
Figura 52. Porcentaje de Asfalto vs Fluencia	153
Figura 53. Extracción de núcleos.....	160
Figura 54. Colocado de carpeta desintegrada en el extractor centrifugo.....	160
Figura 55. Agregado sin ligante.....	161
Figura 56. Granulometría.....	162
Figura 57. Calentando mezcla asfáltica a reciclar	169
Figura 58. Calentamiento de los moldes para realizar el ensayo.....	170
Figura 59. Se realiza el pesaje de los agregados para la muestra a ensayar	170
Figura 60. Se realiza el mezclado homogéneo de la muestra	171

Figura 61. Preparación de los moldes para el compactado.....	171
Figura 62. Compactado de briquetas	172
Figura 63. Ensayo Marshall de estabilidad y fluencia.....	173
Figura 64. Peso sumergido	175
Figura 65. Porcentaje de RAP vs Densidad de la Briqueta	182
Figura 66. Porcentaje de RAP vs Vacíos de la mezcla (Vv).	182
Figura 67. Porcentaje de RAP vs RBV.....	183
Figura 69. Porcentaje de RAP vs Estabilidad.....	184
Figura 70. Porcentaje de RAP vs Fluencia	184
Figura 71. Peso del plato más filtro.....	190
Figura 72. Proceso de extracción.....	190
Figura 73. Proceso de extracción.....	191
Figura 74. Curva proyectada.....	192
Figura 75. Diagrama black space para graficar el parámetro Glover – Rowe Zona de inicio de daño y Zona de agrietamiento en bloque.....	193
Figura 76. Diagrama graficado el parámetro Glover – Rowe	194
Figura 77. Histograma de Densidad de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP.....	200
Figura 78. Histograma de % de Vacíos de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP.....	201
Figura 79. Histograma de % de R.V.B. de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP.....	202
Figura 80. Histograma de % de V.A.M. de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP	203

Figura 81. Histograma de % de Estabilidad de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP	204
Figura 82. Histograma de % de fluencia de las mezclas asfálticas, convencional y mezcla con 15,57% de RAP	205

