

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA ROTURA LENTA DE
EMULSIONES CATIÓNICAS COMBINADAS CON AGREGADOS
DE DIFERENTE DENSIDAD PARA LA ESTABILIZACIÓN
ASFÁLTICA”**

Por:

BERMAN ORTEGA OVANDO

Proyecto de grado, presentado a consideración de la “**UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO**”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil

SEMESTRE I - 2025
TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA ROTURA LENTA DE
EMULSIONES CATIONICAS COMBINADAS CON AGREGADOS
DE DIFERENTE DENSIDAD PARA LA ESTABILIZACIÓN
ASFÁLTICA”**

Por:

BERMAN ORTEGA OVANDO

SEMESTRE I - 2025
TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional y sacrificio, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi familia, por ser mi refugio en los momentos difíciles. A Dios, por darme fuerza y guiar mi camino. Este logro es nuestro. Con todo mi amor y gratitud.

INDICE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	2
1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	3
1.2.1. Planteamiento del Problema	3
1.2.2. Problema	4
1.3. HIPÓTESIS	5
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. IDENTIFICACIÓN Y CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLES.....	5
1.5.1. Variable independiente.....	5
1.5.2. Variable dependiente:.....	6
1.5.3. Operacionalización de las variables.....	6
1.6. ALCANCE	6

CAPITULO II

MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO

2. MARCO CONCEPTUAL.....	9
2.1. ASFALTO	9
2.1.1. Emulsión Asfáltica	10
2.1.1.1. Composición de las emulsiones asfálticas.....	10
2.1.1.2. Clasificación de las emulsiones asfálticas.....	11

2.1.1.3. Proceso de Emulsificación	13
2.1.1.4. Rotura de la Emulsión	13
2.1.1.5. Factores que Influyen en la Rotura de una Emulsión.....	14
2.1.1.6. Propiedades de las Emulsiones Asfálticas	15
2.1.1.6.1. Estabilidad al Almacenamiento	15
2.1.1.6.2. Estabilidad de la Emulsión ante los Agregados Pétreos	16
2.1.1.6.3. Características reológicas del residuo	17
2.1.1.7. Almacenamiento de emulsiones asfálticas.....	17
2.1.1.8. Manipulación de las emulsiones asfáltica.....	18
2.1.2. Agregados Pétreos.....	20
2.1.2.1. Definición	20
2.1.2.2. Clasificación de los agregados pétreos.....	20
2.1.2.2.1. Según su Naturaleza	20
2.1.2.2.2. Según el tamaño de sus partículas.	21
2.1.2.3. Propiedades de los agregados pétreos	22
2.1.2.3.1. Gradación y tamaño máximo de partículas	22
2.1.2.3.2. Limpieza	24
2.1.2.3.3. Durabilidad y Resistencia	24
2.1.2.3.4. Forma de la partícula	24
2.1.2.3.5. Textura de la superficie	24
2.1.2.3.6. Capacidad de absorción	25
2.1.2.3.7. Afinidad con el cemento asfáltico.....	25
2.1.3. Mezclas Asfálticas	25
2.1.3.1. Definición	25

2.1.3.2. Características y comportamiento de la mezcla	26
2.1.3.2.1. Densidad	26
2.1.3.2.2. Vacíos de aire (o simplemente vacíos)	26
2.1.3.2.3. Vacíos en el agregado mineral.....	27
2.1.3.3. Propiedades consideradas en las mezclas Asfálticas	27
2.1.3.3.1. Estabilidad	27
2.1.3.3.2. Durabilidad	28
2.1.3.3.3. Impermeabilidad	29
2.1.3.3.4. Trabajabilidad	29
2.1.3.3.5. Flexibilidad.....	30
2.1.3.3.6. Resistencia a la fatiga	30
2.1.3.3.7. Resistencia al deslizamiento.....	31
2.1.3.4. Mezclas con emulsión asfáltica.....	32
2.1.3.5. Diseño de mezclas	32
2.1.4. Pavimento	33
2.1.4.1. Pavimentos flexibles	33
2.1.4.2. Funciones de las capas de un pavimento flexible.....	33
2.1.4.2.1. La subbase granular.....	33
2.1.4.2.2. La base granular.....	34
2.1.4.2.3. Carpetas asfálticas.....	34
2.1.5. Método Marshall	35
2.1.5.1. Principios del Método Marshall.....	35
2.1.5.2. Equipo Marshall	35
2.1.5.2.1. Componentes del Equipo	36

2.1.5.2.2. Preparación del Equipo	36
2.1.5.2.3. Especificaciones Técnicas	36
2.1.5.3. Procedimiento de Ensayo con el Equipo Marshall.....	37
2.1.5.3.1. Preparación de la Muestra	37
2.1.5.3.2. Realización del Ensayo.....	37
2.1.5.4. Mezclas Asfálticas en Frío y el Método Marshall.....	37
2.1.5.5. Parámetros Clave en el Método Marshall.....	38
2.1.5.5.1. Estabilidad Marshall.....	38
2.1.5.5.2. Fluencia Marshall.....	38
2.1.5.6. Criterios de Diseño de Mezclas Asfálticas usando el Método Marshall	38
2.1.5.6.1. Contenido Óptimo de Asfalto	39
2.1.5.6.2. Relación Aire-Vacíos	39
2.1.5.7. Factores que Afectan los Resultados del Ensayo Marshall	39
2.1.5.7.1. Temperatura de Ensayo.....	39
2.1.5.7.2. Compactación de la Muestra.....	40
2.1.5.8. Aplicaciones del Método Marshall en Mezclas en Frío.....	40
2.1.5.8.1. Adaptación del Ensayo para Mezclas en Frío.....	40
2.1.5.8.2. Ventajas y Limitaciones del Método Marshall en Mezclas en Frío	40
2.2. NORATIVA	40
2.2.1. Manual de Carreteras de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).....	41
2.2.2. Reglamento Nacional de Transporte y Vialidad	41
2.2.3. Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)	42
2.2.4. Caracterización de Agregados Pétreos	42

2.2.4.1. Método para el cuarteo de muestras (ASTM C702).....	42
2.2.4.2. Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E11).....	43
2.2.4.3. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)	43
2.2.4.4. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C131).....	44
2.2.4.5. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C127).....	44
2.2.4.6. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C128).....	44
2.2.4.7. Determinación del peso unitario de los agregados (ASTM C29)	45
2.2.5. Caracterización de Emulsiones Asfálticas	45
2.2.5.1. Método de residuo por destilación (ASTM D6997).....	45
2.2.5.2. Método de carga de partícula de emulsión asfáltica (ASTM D244)	45
2.2.5.3. Ensayo de viscosidad (ASTM D244).....	46
2.2.5.4. Método de ensayo de penetración (ASTM D5, AASHTO T49-97)	46
2.2.5.5. Método para determinar la densidad (ASTM D71-94).....	46
2.2.6. Método de diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión	46

CAPITULO III

APLICACIÓN METODOLÓGICA DEL ESTUDIO

3.1. TIPO DE MEZCLA DEL TRABAJO.....	48
3.2. MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO.....	48
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	50
3.3.1. Caracterización de agregados	50
3.3.1.1. Granulometría de Agregado Grueso y Fino	52

3.3.1.1.1. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de 1”	53
3.3.1.1.2. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de $\frac{3}{4}$ ”	54
3.3.1.1.3. Granulometría de Agregado Grueso para una Muestra de $\frac{3}{8}$ ”	55
3.3.1.1.4. Granulometría del Agregado Fino (Arena)	56
3.3.1.2. Peso Específico del Agregado Grueso.....	58
3.3.1.2.1. Peso Específico del Agregado Grueso de 1”	59
3.3.1.2.2. Peso Específico del Agregado Grueso de $\frac{3}{4}$ ”	59
3.3.1.2.3. Peso Específico del Agregado Grueso de $\frac{3}{8}$ ”	60
3.3.1.3. Peso Específico del Agregado Fino (Muestra de Arena).....	60
3.3.1.4. Peso Unitario del Agregado	63
3.3.1.4.1. Peso Unitario del Agregado Grueso de 1” (Suelto y Compactado).....	64
3.3.1.4.2. Peso Unitario del Agregado Grueso de $\frac{3}{4}$ ” (Suelto y Compactado).....	65
3.3.1.4.3. Peso Unitario del Agregado Grueso de $\frac{3}{8}$ ” (Suelto y Compactado)	66
3.3.1.4.4. Peso Unitario del Agregado Fino Arena (Suelto y Compactado).....	66
3.3.1.5. Ensayo del Desgaste de los Ángeles (ASTM C131)	67
3.3.1.5.1. Ensayo del Desgaste de los Ángeles para Grava de 1”	68
3.3.1.5.2. Ensayo del Desgaste de los Ángeles para Grava de $\frac{3}{4}$ ”	70
3.3.1.5.3. Ensayo del Desgaste de los Ángeles para Grava de $\frac{3}{8}$ ”	71
3.3.1.6. Ensayo de Equivalente de Arena (ASTM D2419)	72
3.3.1.7. Densidad de los Agregados	73
3.3.2. Caracterización de la Emulsión Asfáltica	74
3.3.2.1. Método de Residuo por Destilación (ASTM D6997, AASHTO T59-97) ...	75
3.3.2.2. Método de Carga de Partícula de Emulsión Asfáltica (ASTM D244, AASHTO T59-97).....	75

3.3.2.3. Método para Determinar la Densidad (ASTM D71-94, AASHTO T229-97)	76
3.3.2.4. Ensayo de Penetración	77
3.3.2.5. Método para Determinar la Ductilidad	78
3.3.2.6. Ensayo de Viscosidad (ASTM D244, AASHTO T59-97)	80
3.3.2.7. Método para Determinar el Equivalente de Arena	80
3.4. DISEÑO MÉTODO MARSHALL POR GRADACIONES	81
3.4.1. Gradación A	81
3.4.1.1. Faja granulométrica para la gradación A	82
3.4.1.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación A	83
3.4.1.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación A	83
3.4.1.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación A	85
3.4.2. Gradación B	86
3.4.2.1. Combinación Granulométrica para la gradación B	86
3.4.2.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación B	87
3.4.2.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación B	88
3.4.2.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación B	89
3.4.3. Gradación C	90
3.4.3.1. Combinación Granulométrica para la gradación C	91

3.4.3.2. Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica Combinación Granulométrica para la gradación C.....	92
3.4.3.3. Contenido de Ligante Según la Granulometría Combinación Granulométrica para la gradación C	93
3.4.3.4. Diseño Método Marshall Combinación Granulométrica para la gradación C	94

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DISEÑO DEL MÉTODO MARSHAL	96
4.2. DISEÑO MÉTODO MARSHALL PARA EL LIGANTE ÓPTIMO	97
4.2.1. Contenido de Ligante Optimo según la Granulometría	97
4.2.2. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación A	99
4.2.3. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación B	100
4.2.4. Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo Combinación Granulométrica para la gradación C	102
4.2.5. RESUMEN DE DISEÑO.....	104
4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	105
4.3.1. Análisis del diseño Marshall para gradación A.....	105
4.3.2. Análisis del diseño Marshall para gradación b	108
4.3.3. Análisis del diseño Marshall para gradación C.....	110
4.3.4. Análisis de resultados del diseño Marshall para el contenido optimo	113
4.3.4.1. Contenido Optimo de ligante asphaltico	113
4.3.4.2. Densidad	115

4.3.4.3. Estabilidad	116
4.3.4.4. Estabilidad y Fluencia.....	118
4.3.4.5. Relación entre fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante	119
4.3.4.6. Trabajabilidad.....	121
4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS COMPARATIVO DE DISEÑO MARSHALL DEL CONTENIDO OPTIMO DE LAS GRADACIONES A, B Y C.....	122
4.5. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA EMULSIÓN	124
4.5.1. Efectos de la Gradación A	124
4.5.2. Efectos de la gradación B	125
4.5.3. Efectos de la gradación C	125
4.5.4. Comparativa de Efectos de la Emulsión en las Gradaciones	126

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES	130
5.2. RECOMENDACIONES.....	132
BIBLIOGRAFIA.....	133

ANEXOS

ANEXO I: CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO

ANEXO II: CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

ANEXO III: DISEÑO MARSHALL GRADACIÓN A

ANEXO IV: DISEÑO MARSHALL GRADACIÓN B

ANEXO V: DISEÑO MARSHALL GRADACIÓN C

**ANEXO VI: DISEÑO MÉTODO MARSHALL PARA EL LIGANTE OPTIMO
PARA LA GRADACIÓN A, B Y C**

ANEXO VII: FICHA TÉCNICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

ANEXO VIII: INFORME FOTOGRÁFICO

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variable Independiente	6
Tabla 2. Variable Dependiente	6
Tabla 3. Temperatura de almacenamiento para las emulsiones asfálticas.....	18
Tabla 4. Granulometría Densa.....	23
Tabla 5. Granulometría Abierta.....	23
Tabla 6. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 1”	53
Tabla 7. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 3/4”	54
Tabla 8. Granulometría de agregado grueso para una muestra de 3/8”	55
Tabla 9. Granulometría de agregado grueso para una muestra de arena.....	56
Tabla 10. Peso específico muestra de 1”	59
Tabla 11. Peso específico muestra de 3/4”	59
Tabla 12. Peso específico muestra de 3/8”	60
Tabla 13. Peso específico muestra de 3/4”	62
Tabla 14. Peso unitario suelto del agregado de 1”	64
Tabla 15. Peso unitario compactado del agregado de 1”.....	64
Tabla 16. Peso unitario suelto del agregado de 3/4”	65
Tabla 17. Peso unitario compactado del agregado de 3/4”	65
Tabla 18. Peso unitario suelto del agregado de 3/8”	66
Tabla 19. Peso unitario compactado del agregado de 3/8”	66
Tabla 20. Peso unitario suelto del agregado de 3/8”	67
Tabla 21. Peso unitario compactado del agregado de 3/8”	67
Tabla 22. Desgaste de los ángeles para muestra de 1”.....	69
Tabla 23. Desgaste de los ángeles para muestra de 1”.....	69

Tabla 24. Separación de piedra pizarra para muestra de 1”	69
Tabla 25. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4”	70
Tabla 26. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4”	70
Tabla 27. Separación de piedra pizarra para muestra de 3/4”	70
Tabla 28. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4”	71
Tabla 29. Desgaste de los ángeles para muestra de 3/4”	71
Tabla 30. Separación de piedra pizarra para muestra de 3/4”	71
Tabla 31. Equivalente de Arena %	72
Tabla 32. Densidad del agregado para la muestra A	73
Tabla 33. Densidad del agregado para la muestra A	73
Tabla 34. Densidad del agregado para la muestra A	74
Tabla 35. Prueba de destilación	75
Tabla 36. Ensayo de la Carga de Partícula	76
Tabla 37. Ensayo de densidad	76
Tabla 38. Ensayo de Penetración	77
Tabla 39. Ensayo de Ductilidad	78
Tabla 40. Ensayo de Viscosidad	80
Tabla 41. Ensayo de equivalencia de arena	80
Tabla 42. Tabla resumen de la granulometría de gradación A	82
Tabla 43. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación A ..	83
Tabla 44. Datos para el contenido de ligante de la gradación A	84
Tabla 45. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de la gradación A	84
Tabla 46. Datos para el diseño método Marshall de la gradación A	85
Tabla 47. Tabla resumen de la granulometría de gradación B	86

Tabla 48. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación B...	88
Tabla 49. Datos para el contenido de ligante de la gradación B	88
Tabla 50. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de la gradación B	89
Tabla 51. Datos para el diseño método Marshall de la gradación B	90
Tabla 52. Tabla resumen de la granulometría de gradación C	91
Tabla 53. Tabla resumen contenido inicial de emulsión asfáltica de gradación C ..	92
Tabla 54. Datos para el contenido de ligante de la gradación C.....	93
Tabla 55. Porcentaje de emulsión residual en la mezcla de la gradación C	93
Tabla 56. Datos para el diseño método Marshall de la gradación C parte 1.....	95
Tabla 57. Datos para el diseño método Marshall de la gradación C parte 2.....	95
Tabla 58. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación A.....	96
Tabla 59. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación B.....	96
Tabla 60. Tabla resumen del diseño método Marshall de la gradación C.....	97
Tabla 61. Tabla de resumen del contenido de ligante.....	98
Tabla 62. Tabla Resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación A.....	99
Tabla 63. Tabla resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación B.....	101
Tabla 64. Tabla resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo para la gradación C.....	102
Tabla 65. Resumen del Diseño Método Marshall para el Ligante Óptimo	104
Tabla 66. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación A.....	105
Tabla 67. Resumen del Diseño Método Marshall gradación A.....	106
Tabla 68. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación B	108

Tabla 69. Resumen del Diseño Método Marshall gradación B.....	108
Tabla 70. Tabla resumen del diseño método Marshall gradación C.....	110
Tabla 71. Resumen del Diseño Método Marshall gradación C.....	111
Tabla 72. Resumen del Diseño Método Marshall de contenido optimo	113
Tabla 73. Contenido óptimo de ligante	113
Tabla 74. Densidad.....	115
Tabla 75. Estabilidad	116
Tabla 76. Estabilidad y Fluencia	118
Tabla 77. Fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante.....	119
Tabla 78. Resumen comparativo de los efectos de la emulsión.....	127

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Curva Granulometría - muestra de 1"	53
Grafica 2. Curva Granulometría - muestra de 3/4"	55
Grafica 3. Curva Granulometría - muestra de 3/8"	56
Grafica 4. Curva Granulometría - muestra de arena.....	57
Grafica 5. Faja granulométrica de la gradación A	82
Grafica 6. Faja granulométrica de la gradación B	87
Grafica 7. Faja granulométrica de la gradación C	91
Grafica 8. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 1	106
Grafica 9. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 2	106
Grafica 10. Graficas del diseño Marshall gradación A parte 3	107
Grafica 11. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 1.....	109
Grafica 12. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 2.....	109
Grafica 13. Graficas del diseño Marshall gradación B parte 3.....	109
Grafica 14. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 1	111
Grafica 15. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 2	111
Grafica 16. Graficas del diseño Marshall gradación C parte 3	112
Grafica 17. Contenido óptimo de ligante asfaltico en la mezcla	114
Grafica 18. Densidad del agregado.....	115
Grafica 19. Estabilidad	117
Grafica 20. Estabilidad y fluencia	118
Grafica 21. Fluencia, densidad, porcentaje de vacíos y contenido de ligante.....	120

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Emulsiones Aniónicas y Catiónicas	11
Imagen 2. Rotura de Emulsión	14
Imagen 3. Planta Chancadora la Victoria	49
Imagen 4. Material Chancado.....	49
Imagen 5. Ubicación de la Empresa Quimitec	50
Imagen 6. Cuarteo del agregado	51
Imagen 7. Granulometría del agregado	52
Imagen 8. Peso específico del agregado grueso	58
Imagen 9. Peso Específico del Agregado Fino	61
Imagen 10. Peso Unitario del Agregado.....	63
Imagen 11. Ensayo del desgaste de los Ángeles	68
Imagen 12. Ensayo de Penetración	77
Imagen 13. Muestra del Ensayo de Penetración	78
Imagen 14. Ensayo de ductilidad	79
Imagen 15. Muestras del Ensayo de ductilidad.....	79
Imagen 16. Briquetas de la mezcla A y C	121