UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

"ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CARBONATO DE MAGNESIO COMO FILLER EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA ESTABILIDAD MARSHALL"

POR:

WILDER LEONARDO CHIRILLA AJHUACHO

Proyecto presentado a consideración de la "**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE I -2026

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

"ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CARBONATO DE MAGNESIO COMO FILLER EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA ESTABILIDAD MARSHALL"

POR:

WILDER LEONARDO CHIRILLA AJHUACHO

Proyecto elaborado en la asignatura:

CIV – 502 PROYECTO DE INGENIERIA CIVIL II

Proyecto presentado a consideración de la "**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE I -2026

TARIJA – BOLIVIA

Dedicatoria:

A mis mellizas Sharon y Yareli, el motor de mi vida, quienes con su amor y ternura me dieron la fuerza necesaria para no rendirme y seguir adelante; a mi esposa Abigail, por estar siempre a mi lado, por creer en mí incluso en los momentos difíciles y por ser mi apoyo incondicional; a mis padres, Leonardo Chirilla y Liberata Ajhuacho, quienes con esfuerzo y amor me guiaron y me enseñaron a luchar por mis sueños; a mis hermanos, por su apoyo constante y por ser parte importante de mi vida; y a mis amigos, por su sincera amistad, por compartir los desafíos y alegrías de este camino y por acompañarme en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción 1

1.2 Antecedentes 2

1.3 Justificación.....2

1.3.1 Justificación académica.....2

1.3.2 Justificación sobre la aplicación técnica - practica 3

1.3.3 Justificación e importancia social 3

1.4 Planteamiento del problema.....4

1.4.1 Situación problémica.....4

1.4.2 Delimitación del espacio.....4

1.4.3 Formulación del problema 5

1.5 Objetivos de la investigación 5

1.5.1 Objetivo General.....5

1.5.2 Objetivos Específicos.....6

1.6 Hipótesis.....6

1.7 Conceptualización y operacionalización de variables.....6

1.8 Alcance y tipo de la investigación.....7

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 Marco conceptual 9

2.1.2 Pavimentos flexibles 9

2.1.3 Componentes de un pavimento asfáltico 10

2.1.4 Capa de rodadura o revestimiento asfáltico 11

2.1.5 Componentes de una mezcla asfáltica 12

2.1.5.1 Agregados 12

2.1.5.2 Asfalto 12

2.1.6 Características y comportamiento de la mezcla asfáltica 13

2.1.6.1 Densidad 13

2.1.6.2 Porcentaje de vacíos de aire 13

2.1.6.3 Vacíos en el agregado mineral (V.A.M) 14

2.1.6.4 Contenido de asfalto 15

2.1.7 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas 17

2.1.7.1 Estabilidad 17

2.1.7.2 Durabilidad 19

2.1.7.3 Impermeabilidad 21

2.1.7.4 Trabajabilidad 22

2.1.7.5 Flexibilidad 23

2.1.7.6 Resistencia a la fatiga 24

2.1.7.7 Resistencia al deslizamiento 25

2.1.8 Uso de aditivos en el asfalto....26
2.1.8.1 Caucho en asfalto....26
2.1.8.2 Siliconas....27
2.1.8.3 Cal hidratada....27
2.1.8.4 Carbonato de magnesio....27
2.1.8.5 Información del producto....28
2.1.9 Método Marshall de diseño de mezclas - descripción....30
2.1.9.1 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall....30
2.1.9.2 Selección de las muestras de material....30
2.1.9.3 Preparación del agregado....31
2.1.9.4 Secado del Agregado....31
2.1.9.5 Análisis granulométrico por vía húmeda....32
2.1.9.6 Determinación del peso específico....32
2.1.9.7 Preparación de las muestras (probetas) de ensayo....33
2.1.10 Procedimiento de ensayo Marshall....34
2.1.10.1 Determinación del peso específico total....34
2.1.10.2 Ensayo de estabilidad y fluencia....34
2.1.10.3 Valor de estabilidad Marshall....35
2.1.10.4 Valor de fluencia Marshall....35
2.1.10.5 Análisis de densidad y vacíos....35
2.1.10.6 Análisis de vacíos....36
2.1.10.7 Análisis de peso unitario....36
2.1.10.8 Análisis de V.A.M. 36

2.1.10.9 Análisis de R.B.V. 36

2.2 Marco Normativo 37

2.2.1 Normativa sobre mezclas asfálticas vigente (ABC).....37

2.2.2. Norma ASTM.....37

2.3 Marco referencial 39

2.4 Análisis del aporte teórico.....41

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Criterios del diseño metodológico 43

3.1.1 Unidad de muestra.....43

3.1.2 Población.....43

3.1.3 Muestra.....43

3.1.4 Tamaño de la muestra.....43

3.1.5 Control y validación interna.....45

3.1.6 Caracterización de los materiales.....45

3.1.6.1 Criterios de extracción 45

3.2 Características de los materiales de investigación 53

3.2.1 Ficha técnica del carbonato de magnesio.....53

3.2.2 Ficha técnica del cemento asfáltico Repsol 85-100 55

3.3 Caracterización de los materiales.....56

3.3.1 Ensayo de granulometría (AASHTO T-27) (ASTM C-136).....56

3.3.2 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C 127 AASHTO T85). 62

3.3.3 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos (ASTM C 128 AASHTO T84). 64

3.3.4 Ensayo para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM C 131 AASHTO T96). 65

3.3.5 Ensayo de porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821). 67

3.3.6 Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D-854 AASHTO T-100). 68

3.3.7 Ensayo de equivalente de arena (ASTM D-2419 AASHTO T-176). 71

3.3.8 Método de ensayo de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97). 72

3.3.9 Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96). 72

3.3.10 Método para determinar la densidad (ASTM D71 AASHTO T229-97). 73

3.3.11 Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96) 74

3.3.12 Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00). 75

3.4 Diseño de mezclas asfálticas 76

3.4.1 Resultados del levantamiento de información 76

3.4.1.1 Agregados Pétreos. 76

3.4.1.2 Cemento asfáltico 76

3.4.2 Combinación de agregados 77

3.4.3 Dosificación para tres agregados: método analítico 78

3.5 Contenido mínimo del cemento asfáltico 84

3.5.1 Método del área superficial 84

3.6 Contenido óptimo de cemento asfáltico 86
3.6.1 Dosificación de la mezcla asfáltica 86
3.6.2 Dosificación con variación del porcentaje de cemento asfáltico 87
3.6.3 Desarrollo de la elaboración de briquetas 88
3.7 Procedimiento de ensayo Marshall 92
3.7.1 Método de prueba estándar para espesor o altura de la briqueta de ensayo (ASTM D-3549) 92
3.7.2 Método de prueba estándar del peso específico total (ASTM D-2726). 93
3.7.3 Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas asfálticas. (ASTM D-6927). 94
3.8 Proceso de cálculo de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional 96
3.8.1 Identificación de briquetas. 96
3.8.2 Espesor o altura de las briquetas. 96
3.8.3 Base de mezcla y agregado. 97
3.8.4 Peso de la briqueta 97
3.8.4.1 Peso de la briqueta en estado seco. 97
3.8.4.2 Peso de la briqueta en estado saturado superficialmente seco. 98
3.8.4.3 Peso de la briqueta sumergida en el agua. 98
3.8.5 Volumen de la briqueta. 98
3.8.6 Densidad de la briqueta. 99
3.8.6.1 Densidad real de la briqueta. 99
3.8.6.2 Densidad máxima teórica de la briqueta. 99
3.8.7 Porcentaje de vacíos. 99

3.8.7.1 Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv). 100

3.8.7.2 Porcentaje de vacíos de los agregados minerales (V.A.M.). 100

3.8.8 Estabilidad y fluencia. 100

3.9 Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico. 101

3.10 Determinación del contenido óptimo de cemento asfaltico. 102

3.11 Elaboración de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y reemplazando el filler convencional por carbonato de magnesio. 105

3.12 Elaboración de briquetas con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico añadiendo el filler convencional 111

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DATOS OBSERVADOS

4.1 Análisis y resultados de una mezcla asfáltica convencional y una modificada 117

4.1.1 Densidad vs filler 117

4.1.2 Estabilidad vs filler 118

4.1.3 Fluencia 119

4.1.4 Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs % filler 120

4.1.5 Relación betumen vacíos R.B.V. (%) vs % filler 121

4.1.6 Porcentaje de vacíos % vs % filler 122

4.2 Organización de resultados 123

4.3 Estadística descriptiva del ensayo de estabilidad 126

4.4 Estadística inferencial 129

4.5 Especificación técnica 131

4.5.1 Concepto de objeto de investigación 131

4.5.2 Materiales y equipo 131

4.5.2.1 Materiales utilizados en la investigación 131

4.5.2.2 Equipo utilizado para la investigación 132

4.5.3 Procedimiento y rango de medición 133

4.5.4 Medición de la variable 134

4.6 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica convencional
Composición de la mezcla 134

4.7 Análisis del precio de producción de la mezcla asfáltica modificada 136

4.8 Comparación de precios unitarios entre una carpeta asfáltica modificada y una convencional. 138

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones 139

5.2 Recomendaciones 140

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

ANEXO II CARACTERIZACIÓN DEL CARBONATO DE MAGNESIO.

ANEXO III CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.

ANEXO IV DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

ANEXO V CARTAS DE SOLICITUD.Y FICHAS TECNICAS

ANEXO VI REPORTE FOTOGRÁFICO.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Operacionalización de variables.....7

Tabla 2.1: Causas y efecto de la inestabilidad en el pavimento. 19

Tabla 2.2: Causas y efecto de un poco durabilidad. 20

Tabla 2.3: Causas y efecto de la permeabilidad. 21

Tabla 2.4: Causas y efecto de problemas en la estabilidad. 23

Tabla 2.5: Causas y efecto de una mala resistencia a la fatiga. 24

Tabla 2.6: Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento. 25

Tabla 2.7: Normas aplicadas para la caracterización del agregado pétreo. 38

Tabla 2.8: Normas aplicadas para la caracterización del cemento asfáltico. 38

Tabla 2.9: Criterio de diseño de mezclas Marshall. 39

Tabla 3.1: Cálculo de muestra estratificada. 44

Tabla 3.2: Datos de los ensayos realizados de la grava 3/4”. 56

Tabla 3.3: Datos de los ensayos realizados de la gravilla 3/8”. 57

Tabla 3.4: Datos de los ensayos realizados de la arena. 57

Tabla 3.5: Datos de los ensayos realizados del carbonato de magnesio. 58

Tabla 3.6: Granulometría – agregado grueso (grava 3/4"). 59

Tabla 3.7 Granulometría – agregado grueso (gravilla 3/8").....60
Tabla 3.8: Granulometría – agregado fino (arena). 61
Tabla 3.9: Granulometría – agregado fino (carbonato de magnesio). 62
Tabla 3.10: Datos del ensayo de peso específico para agregado grueso grava 3/4". 63
Tabla 3.11: Resultados del ensayo de peso específico para grava 3/4".....63
Tabla 3.12: Datos del ensayo de peso específico de agregado grueso gravilla 3/8".....63
Tabla 3.13: Resultados del ensayo peso específico de agregado grueso gravilla 3/8".....64
Tabla 3.14: Datos obtenidos del ensayo peso específico para agregado fino. 64
Tabla 3.15: Resultados del ensayo de peso específico para agregado fino. 64
Tabla 3.16: Tabla ASTM C-131 según el tamaño de material que se tenga. 65
Tabla 3.17: Datos del ensayo de desgaste para la grava 3/4". 66
Tabla 3.18: Datos del ensayo de desgaste para la gravilla 3/8". 67
Tabla 3.19: Datos del ensayo de caras fracturadas. 68
Tabla 3.20: Resultados del ensayo de caras fracturadas. 68
Tabla 3.21: Datos de la calibración de frasco volumétrico. 69
Tabla 3.22: Datos y resultados del ensayo de peso específico de filler convencional. 70
Tabla 3.23: Datos y resultados del ensayo de peso específico de filler carbonato de magnesio. 70
Tabla 3.24: Datos del ensayo equivalente de arena.....71
Tabla 3.25: Resultados del ensayo equivalente de arena. 71
Tabla 3.26: Datos del ensayo de penetración del cemento asfáltico 85-100.....72
Tabla 3.27: Datos del ensayo punto de inflamación. 73
Tabla 3.28: Datos del ensayo peso específico. 73
Tabla 3.29: Resultados del ensayo peso específico. 74

Tabla 3.30: Datos del ensayo punto de ablandamiento. 75
Tabla 3.31: Datos del ensayo de ductilidad. 75
Tabla 3.32: Resultados de la caracterización de los agregados pétreos. 76
Tabla 3.33: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico. 77
Tabla 3.34: Promedio de granulometría de agregados pétreos. 77
Tabla 3.35: Combinación granulométrica del agregado grueso. 78
Tabla 3.36: Granulometría del agregado fino (arena). 79
Tabla 3.37 Resumen de % que pasa de material grueso, fino y filler. 80
Tabla 3.38: Dosificación de materiales pétreos. 82
Tabla 3.39: Constante de área. 84
Tabla 3.40: Índice asfáltico. 85
Tabla 3.41: Cálculo del contenido mínimo de cemento asfáltico. 85
Tabla 3.42: Dosificación de la mezcla asfáltica. 87
Tabla 3.43: Dosificación de la mezcla asfáltica con variación de porcentajes de cemento asfáltico. 87
Tabla 3.44: Alturas o espesores de cada briqueta ensayada. 96
Tabla 3.45: Peso de briquetas en estado seco. 97
Tabla 3.46: Peso de briqueta saturada superficialmente seca (S.S.S.). 98
Tabla 3.47: Peso de briqueta sumergida en agua. 98
Tabla 3.48: Alturas promedio y factor de corrección. 101
Tabla 3.49: Resultados de estabilidad y fluencia. 101
Tabla 3.50: Resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional. 102
Tabla 3.51: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall. 104

Tabla 3.52: Dosificación con el contenido óptimo de cemento asfaltico variando el porcentaje del carbonato de magnesio como filler. 105

Tabla 3.53: Peso del agregado y cemento asfáltico. 106

Tabla 3.54: Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con adición del carbonato de magnesio en reemplazo del filler convencional. 107

Tabla 3.55: Resultados de las mezclas asfálticas con porcentaje de carbonato de magnesio como filler en reemplazo del convencional. 108

Tabla 3.56: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de carbonato de magnesio. 110

Tabla 3.57: Datos obtenidos del ensayo Marshall de mezclas asfálticas con filler convencional. 112

Tabla 3.58: Resultados del ensayo Marshall las mezclas asfálticas con porcentaje de filler convencional. 113

Tabla 3.59: Resultados de las gráficas del ensayo Marshall para el contenido óptimo de filler convencional. 115

Tabla 4.1: Resultado del contenido óptimo de filler carbonato de magnesio. 123

Tabla 4.2: Resultado del contenido óptimo de filler convencional. 123

Tabla 4.3: Resultados del ensayo de estabilidad con un porcentaje de 3.8% de filler carbonato de magnesio 125

Tabla 4.4: Datos del ensayo de estabilidad al 3.8% de filler carbonato de magnesio. 126

Tabla 4.5: Cálculo de frecuencia absoluta y relativa. 127

Tabla 4.6: Resultados de cálculos de medias de tendencia central de los ensayos de estabilidad al 3.8% de filler carbonato de magnesio. 128

Tabla 4.7: Cálculo de error medido de la media. 129

Tabla 4.8: Cálculo del rango de confianza. 129

Tabla 4.9: Prueba de hipótesis por el método Z Normal. 130
Tabla 4.10. Composición mezcla convencional. 135
Tabla 4.11. Dosificación para 1 m3 mezcla asfáltica convencional. 135
Tabla 4.12. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica convencional. 135
Tabla 4.13. Composición mezcla modificada. 136
Tabla 4.14. Dosificación para 1 m3 mezcla asfáltica modificada. 137
Tabla 4.15. Análisis de precios unitarios de una carpeta asfáltica modificada. 137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Componentes principales de pavimento asfáltico. 10
Figura 2.2: Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada. 15
Figura 2.3: Carbonato de magnesio. 28
Figura 3.1: Ubicación de la comunidad San Mateo. 46
Figura 3.2: Ubicación de la Chancadora Garzon. 48
Figura 3.3: Ubicación de Telchi Litel.....50
Figura 3.4: Ubicación de la posta municipal.....52
Figura 3.5: Ficha técnica del carbonato de magnesio. 53
Figura 3.6: Ficha técnica del cemento asfáltico Repsol 85-100.....55
Figura 3.7: Mezclado del agregado con cemento asfáltico y lectura de la temperatura. .89
Figura 3.8: Colocación de la muestra al molde en tres capas, cada capa se la compacta con 25 golpes manuales. 90
Figura 3.9: Compactación de la briqueta con el martillo Marshall mecánico. 90
Figura 3.10: Giro de la briqueta para realizar la compactación en la otra cara.....91

Figura 3.11: Proceso de desmolde de la briqueta. 91
Figura 3.12: Reposo de briquetas según su porcentaje de cemento asfáltico. 92
Figura 3.13: Marcado y medición de altura de la briqueta. 93
Figura 3.14: Determinación del peso seco y sumergido en agua. 94
Figura 3.15 Colocación de briqueta al equipo Marshall y ruptura. 95
Figura 3.16: Pesaje del cemento asfaltico y del agregado para realizar briquetas. 106
Figura 3.17: Ruptura de briquetas. 111
Figura 4.1: Área de rechazo de la hipótesis. 130

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Curva granulométrica – grava 59
Gráfico 3.2: Curva granulométrica – gravilla. 60
Gráfico 3.3: Curva granulométrica – arena. 61
Gráfico 3.4: Curva granulométrica – carbonato de magnesio 62
Gráfico 3.5: Curva de calibración del frasco volumétrico. 69
Gráfico 3.6: Curva granulométrica formada. 83
Gráfico 3.7: Porcentaje de cemento asfáltico vs densidad 102
Gráfico 3.8: Porcentaje de cemento asfáltico vs estabilidad corregida. 103
Gráfico 3.9: Porcentaje de cemento asfáltico vs % de vacíos respecto a la mezcla total 103
Gráfico 3.10: Porcentaje de cemento asfáltico vs fluencia. 104
Gráfico 3.11: Porcentaje de cemento asfáltico vs relación betumen vacíos (R.B.V.). ... 104

Gráfico 3.12: Porcentaje de cemento asfáltico vs vacíos del agregado mineral (V.A.M.). 105
Gráfico 3.13: Densidad vs filler. 108
Gráfico 3.14: Estabilidad vs filler. 109
Gráfico 3.15: Porcentaje de vacíos de mezcla vs filler. 109
Gráfico 3.16: Fluencia vs filler..... 110
Gráfico 3.17: R.B.V. vs filler..... 110
Gráfico 3.18: V.A.M. vs filler..... 111
Gráfico 3.19: Densidad vs filler. 113
Gráfico 3.20: Estabilidad corregida vs filler. 114
Gráfico 3.21: Porcentaje de vacíos de mezcla vs filler. 114
Gráfico 3.22: Fluencia vs filler..... 115
Gráfico 3.23: Relación betumen vacíos (R.B.V.). vs filler..... 115
Gráfico 3.24: Vacíos de agregado mineral (V.A.M.) vs filler..... 116
Gráfico 4.1: Densidad vs filler. 117
Gráfico 4.2: Estabilidad vs filler. 118
Gráfico 4.3: Fluencia vs filler..... 119
Gráfico 4.4: V. A.M. vs % filler. 120
Gráfico 4.5: R.B.V. vs % filler. 121
Gráfico 4.6: Porcentaje de vacíos vs % filler 122
Gráfico 4.7: Propiedades de las mezclas asfálticas: filler optimo convencional vs filler optimo carbonato de magnesio..... 124
Fuente: Elaboración propia. 124
Gráfico 4.8: Determinación del histograma y polígono de frecuencias. 127

Gráfico 4.9: Determinación de la curva de frecuencia acumulada. 128

Gráfico 4.10: Comparación de precio de carpeta asfáltica. 138