

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DPTO. DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MATRICES FINAS
PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO EN PAVIMENTOS
FLEXIBLES”**

Por:

LIMACHI CAYO JUAN JOSUÉ

Proyecto de investigación 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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DPTO. DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**“CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE MATRICES FINAS
PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO EN PAVIMENTOS
FLEXIBLES”**

Por:

LIMACHI CAYO JUAN JOSUÉ

SEMESTRE II – 2022

TARIJA – BOLIVIA

V°B°

.....
M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

.....
M.Sc. Lic. Clovis Gustavo Succi Aguirre
VICEDECANO
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

TRIBUNAL:

.....
Ing. Marcelo Humberto Pacheco Núñez

.....
Ing. Wilson Yucra Rivera

.....
Ing. José Ricardo Arce A.

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi madre Paulina Cayo Rodríguez y mi padre Valentín Limachi Fernández, quienes creyeron en mí y me apoyaron hasta el último esfuerzo por lo cual no desistí, impulsándome a seguir adelante a pesar de cualquier circunstancia y a toda mi familia por estar presentes conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL TEMA

	Página
1.1. 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 DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. HIPÓTESIS.....	4
1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES	4
1.6.1. Variable independiente.....	4
1.6.2. Variable dependiente.....	5
1.6.3. Operacionalización de variables	5
1.7. DISEÑO METODOLÓGICO	6
1.7.1. Unidad de estudio.....	6
1.7.2. Población.....	6
1.7.3. Muestra.....	6
1.7.4. Muestreo.....	6
1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS.....	6
1.8.1. Método	6

1.8.2. Técnicas	7
1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	7

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO

	Página
2.1. PAVIMENTO	9
2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE	9
2.2.1. Características del pavimento flexible	9
2.2.2. Capas del pavimento flexible	10
2.2.3. Ventajas y desventajas del uso de pavimentos flexibles	10
2.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS	11
2.3.1. Definición.....	11
2.3.2. Clasificación de mezclas asfálticas	11
2.3.3. Tipos de mezclas asfálticas	13
2.3.3.1. Mezclas asfálticas en caliente	13
2.3.3.2. Mezcla asfáltica en frío	13
2.3.3.3. Mezcla porosa o drenante.....	14
2.3.3.4. Microaglomerados.....	14
2.3.3.5. Masillas	14
2.3.3.6. Mezclas de alto módulo	15
2.4. AGREGADOS PÉTREOS	15
2.4.1. Definición.....	15
2.4.2. Tipos de agregados.....	15

2.4.2.1. Agregados naturales.....	15
2.4.2.2. Agregados de trituración.....	16
2.4.2.3. Agregados sintéticos o artificiales.....	17
2.4.2.4. Agregados marginales.....	17
2.4.3. Agregados usados en mezclas asfálticas.....	18
2.4.3.1. Agregado grueso (grava).....	18
2.4.3.2. Agregado fino (arena).....	18
2.4.3.3. Filler.....	18
2.4.4. Propiedades de los agregados para mezclas asfálticas.....	18
2.4.4.1. Graduación y tamaño máximo de la partícula.....	19
2.4.4.2. Tamaño de las partículas.....	19
2.4.4.3. Textura superficial.....	19
2.4.4.4. Limpieza.....	19
2.4.4.5. Capacidad de absorción.....	20
2.4.4.6. Dureza.....	20
2.4.4.7. Afinidad con el asfalto.....	20
2.4.4.8. Forma de la partícula.....	21
2.4.4.9. Peso específico.....	21
2.5. CEMENTO ASFÁLTICO.....	21
2.5.1. Historia del asfalto.....	21
2.5.2. Obtención del asfalto.....	22
2.5.2.1. Destilación primaria.....	23
2.5.2.2. Destilación al vacío.....	23
2.5.3. Definición.....	25

2.1.1. Propiedades del asfalto.....	25
2.1.1.1. Propiedades químicas.....	25
2.1.1.2. Propiedades físicas.....	26
2.1.2. Características deseables del cemento asfáltico.....	26
2.1.3. Reología del cemento asfáltico.....	27
2.1.4. Uso del asfalto en función del clima.....	27
2.2. ASFALTO ESPUMADO.....	29
2.2.1. Introducción.....	29
2.2.2. Origen y desarrollo del asfalto espumado.....	29
2.2.3. Producción del asfalto espumado.....	29
2.2.4. Propiedades del asfalto espumado.....	31
2.2.4.1. Razón de expansión (Ex).....	31
2.2.4.2. Vida media ($t_{1/2}$).....	31
2.2.5. Especificaciones aceptables del asfalto espumado.....	32
2.2.6. Consideraciones para el diseño de mezclas con asfalto espumado.....	33
2.2.6.1. Elección del grado de asfalto.....	33
2.2.6.2. Temperatura del asfalto y porcentaje de agua de inyección.....	34
2.2.6.3. Características de agregado.....	34
2.2.7. Ventajas y desventajas del asfalto espumado.....	35
2.2.7.1. Ventajas.....	35
2.2.7.2. Desventajas.....	36
2.2.8. Aplicaciones del asfalto espumado.....	36
2.2.9. Procedimiento del diseño de mezcla con asfalto espumado.....	36
2.7. MATRIZ ASFÁLTICA FINA.....	37

2.7.1. Ensayos de caracterización de las matrices finas	38
2.7.1.1. Ensayos de caracterización de la arena	38
2.7.1.2. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico 85/100	39
2.7.2. Característica y propiedades de la mezcla	40
2.7.2.1. Densidad.....	41
2.7.2.2. Vacíos de aire.....	41
2.7.2.3. Vacíos en el agregado mineral VAM.....	41
2.7.2.4. Contenido de asfalto.....	42
2.7.3. Propiedades consideradas en el diseño Marshall de mezclas asfálticas.....	42
2.7.3.1. Estabilidad de la mezcla (Lb).....	43
2.7.3.2. Fluencia de la mezcla (1/100")	44
2.7.4. Criterios de dosificación para matrices finas	45

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MATRICES FINAS Y ASFALTO ESPUMADO CON MATERIALES LOCALES

	Página
3.1. UBICACIÓN DE ESTUDIO	46
3.2. UBICACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES	46
3.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA MATRIZ FINA.....	49
3.3.1. Caracterización del agregado fino.....	49
3.3.1.1. Granulometría para matrices finas	49
3.3.1.2. Peso específico y absorción del agregado (ASTM E-128)	52
3.3.1.3. Equivalente de arena (ASTM D-2419)	56

3.3.1.4. Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (ASTM C-88)	58
3.3.2. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico	61
3.3.2.1. Peso específico (ASTM D70-76, AASHTO T228-93)	61
3.3.2.2. Penetración (ASTM D5, AASHTO T49-97)	62
3.3.2.3. Ductilidad (ASTM D113, AASHTO T51-00)	64
3.3.2.4. Viscosidad Saybolt Furol (ASTM E102, AASHTO T-72)	65
3.3.2.5. Punto de inflamación (ASTM D-92, AASHTO T48-04)	66
3.3.2.6. Punto de ablandamiento (ASTM D 36, AASHTO T53-96)	68
3.3.2.7. Película delgada (ASTM D 1754, AASHTO T179-05)	69
3.3.2.8. Penetración del residuo (ASTM D5, AASHTO T49-97)	70
3.3.3. Caracterización del asfalto espumado	71
3.3.3.1. Vida media y razón de expansión	71
3.4. DISEÑO DE LA MEZCLA DE MATRICES FINAS FAM	77
3.4.1. Determinación del contenido óptimo de asfalto	77
3.4.1.1. Contenido mínimo para el agregado triturado	78
3.4.1.2. Contenido mínimo para el agregado natural	78
3.4.2. Dosificación de la mezcla para matrices finas	78
3.5. ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS	79
3.5.1. Determinación de la estabilidad y fluencia por el método Marshall	84
3.5.2. Obtención del contenido óptimo mediante Marshall	89
3.5.2.1. Obtención del contenido óptimo con arena triturada	89
3.5.2.2. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico con arena triturada	94
3.5.2.3. Obtención del contenido óptimo con arena natural	94

3.5.2.4. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico con arena natural	99
3.6. INCORPORACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO EN LAS MATRICES FINAS	99
3.6.1. Dosificación de las matrices finas con asfalto espumado	100
3.6.2. Roturas de las briquetas elaboradas con matrices finas producidas con asfalto espumado en la prensa Marshall	102
3.6.2.1. Resultados obtenidos del diseño Marshall con el porcentaje óptimo de 7,00% arena triturada	104
3.6.2.2. Resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de 7,00% para las matrices finas producidas con asfalto espumado	106
3.6.2.3. Resultados obtenidos del diseño Marshall con el porcentaje óptimo de 7,15% arena natural	108
3.6.2.4. Resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de 7,15% para las matrices finas producidas con asfalto espumado	110
3.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	112
3.7.1. Análisis del agregado fino	112
3.7.2. Análisis del cemento asfáltico	113
3.7.3. Análisis de la relación de expansión y vida media del asfalto	114
3.8. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO	115
3.8.1. Análisis de la estabilidad Marshall	115
3.8.2. Análisis de la fluencia Marshall	118
3.8.3. Análisis de vacíos de la mezcla	120

3.9. CAMPO DE APLICACIÓN DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO	121
3.10. LIMITACIONES DEL CAMPO DE APLICACIÓN	126
3.11. EVALUACIONES DE LAS MATRICES FINAS PRODUCIDAS CON ASFALTO ESPUMADO	127
3.11.1. Evaluación técnica	127
3.11.2. Evaluación social	127
3.11.3. Evaluación ambiental	127
3.11.4. Evaluación económica	128

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página
4.1. CONCLUSIONES	131
4.2. RECOMENDACIONES	133

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ANEXO A Caracterización del agregado fino y cemento asfáltico

ANEXO B Caracterización del asfalto espumado

ANEXO C Diseño Marshall para las matrices finas

ANEXO D Memoria fotográfica

ANEXO E Especificaciones técnicas del agregado fino y cemento asfáltico

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Operacionalización de variables	5
Tabla 2.1 Tipo de asfalto en función del clima	28
Tabla 2.2 Requisitos granulométricos para las matrices finas	38
Tabla 2.3 Requisitos de calidad de la arena para matrices finas N-CMT	39
Tabla 2.4 Requisitos para el cemento asfáltico 85-100	40
Tabla 2.5 Criterios de dosificación para matrices finas	45
Tabla 3.1 Resultados de la granulometría - Arena triturada	51
Tabla 3.2 Resultados de la granulometría - Arena natural	51
Tabla 3.3 Resultado del peso específico - Arena triturada	55
Tabla 3.4 Resultados del peso específico - Arena natural.....	56
Tabla 3.5 Equivalente de arena - Arena Triturada	57
Tabla 3.6 Equivalente de arena - Arena natural	58
Tabla 3.7 Resultados de pérdidas por sulfato - Arena triturada	60
Tabla 3.8 Resultados de pérdidas por sulfato - Arena natural	60
Tabla 3.9 Resultado del peso específico del cemento asfáltico	62
Tabla 3.10 Resultados del ensayo de penetración	64
Tabla 3.11 Resultado de ductilidad	65
Tabla 3.12 Resultados de la viscosidad Saybol Furol	66
Tabla 3.13 Resultado de punto de inflamación	67
Tabla 3.14 Resultado de punto de ablandamiento	69
Tabla 3.15 Resultado de película delgada	70
Tabla 3.16 Resultado de penetración del residuo	71

Tabla 3.17 Primer ensayo de RE vs VM a T=140°C	72
Tabla 3.18 Segundo ensayo RE vs VM a T=150°C.....	73
Tabla 3.19 Tercer ensayo RE vs VM a T=160°C	74
Tabla 3.20 Cuarto ensayo RE vs VM a T=170°C.....	75
Tabla 3.21 Quinto ensayo RE vs VM a T=180°C.....	76
Tabla 3.22 Dosificación de mezclas para matrices fina - arena triturada	79
Tabla 3.23 Dosificación de mezclas para marices finas - arena natural	79
Tabla 3.24 Identificación de Briquetas	86
Tabla 3.25 Factor de corrección.....	88
Tabla 3.26 Planilla Marshall para granulometría de arena triturada	90
Tabla 3.27 Resultados del ensayo Marshall con arena triturada	94
Tabla 3.28 Valores obtenidos del diseño Marshall con el contenido óptimo con arena triturada.....	94
Tabla 3.29 Planilla Marshall para granulometría de arena natural.....	95
Tabla 3.30 Resultados del ensayo Marshall con arena natural	99
Tabla 3.31 Valores obtenidos del diseño Marshall con el contenido óptimo con arena natural	99
Tabla 3.32 Espumado a los contenidos óptimos	100
Tabla 3.33 Dosificación con el contenido óptimo 7,00%	100
Tabla 3.34 Dosificación con el contenido óptimo de 7,15%	101
Tabla 3.35 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo 7,00% para matrices finas con arena triturada	104
Tabla 3.36 Resultados de la reología de matrices finas convencionales con arena triturada.....	105

Tabla 3.37 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo para matrices finas producidas con asfalto espumado con arena triturada	106
Tabla 3.38 Resultados de la reología de matrices finas producidas con asfalto espumado con arena triturada	107
Tabla 3.39 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo 7,15% para matrices finas con arena natural.....	108
Tabla 3.40 Resultados de la reología de matrices finas convencionales con arena natural	109
Tabla 3.41 Datos obtenidos con el porcentaje óptimo 7,15% para matrices producidas con asfalto espumado con arena natural	110
Tabla 3.42 Resultados de la reología de matrices finas producidas con asfalto espumado con arena natural	111
Tabla 3.43 Resultados de caracterización del agregado fino	112
Tabla 3.44 Resultados de caracterización del cemento asfáltico 85-100	113
Tabla 3.45 Estabilidad corregida a diferentes temperaturas	115
Tabla 3.46 Fluencia a diferentes temperaturas	118
Tabla 3.47 Porcentaje de vacíos para matrices finas convencionales y producidas con asfalto espumado	120
Tabla 3.48 Planilla de precios unitarios para mezclas de matrices finas	129
Tabla 3.49 Planilla de precios unitarios para matrices finas producidas con asfalto espumado	130

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Estructura del pavimento flexible	10
Figura 2.2 Proceso de refinación del petróleo para obtener asfalto	24
Figura 2.3 Comportamiento visco-elástico del cemento asfáltico	25
Figura 2.4 Esquema de producción de asfalto espumado	30
Figura 2.5 Razón de expansión y vida media del asfalto espumado	31
Figura 2.6 Optimización de la razón de expansión y vida media	33
Figura 2.7 Clasificación de materiales granulares para uso de asfalto espumado	34
Figura 2.8 Representación de FAM a partir de una mezcla completa	37
Figura 2.9 Prensa Marshall	43
Figura 3.1 Imagen satelital Río Guadalquivir	47
Figura 3.2 Imagen satelital chancadora "La Pintada"	48
Figura 3.3 Imagen satelital planta de asfalto alcaldía de Tarija	48
Figura 3.4 Planta de asfalto de la alcaldía de Tarija	49
Figura 3.5 Proceso de gradación del agregado fino	50
Figura 3.6 Curva granulométrica - Arena triturada	51
Figura 3.7 Curva granulométrica - Arena natural	52
Figura 3.8 Muestra de arena lavada y en reposo durante 24 horas	53
Figura 3.9 Muestra saturada y en el matraz	54
Figura 3.10 Preparación del material para el E.A	57
Figura 3.11 Muestra de sulfato de sodio y agua a 25°C	58
Figura 3.12 Muestra sumergida en la solución y seca	59
Figura 3.13 Colocación del lígate en el picnómetro	61

Figura 3.14 Ligante en baño con agua y lectura de penetración.....	63
Figura 3.15 Muestras y estiramiento en agua a 25°C	65
Figura 3.16 Equipo Saybol Furol.....	66
Figura 3.17 Equipo copa abierta de Cleveland	67
Figura 3.18 Equipo para punto de ablandamiento	68
Figura 3.19 Muestras de asfalto en el horno rotatorio	70
Figura 3.20 Equipo empírico para caracterizar el asfalto espumado	72
Figura 3.21 Relación de expansión y vida media T=140°C	73
Figura 3.22 Relación de expansión y vida media T=150°C	74
Figura 3.23 Relación de expansión y vida media a T=160°C.....	75
Figura 3.24 Relación de expansión y vida media a T=170°C.....	76
Figura 3.25 Relación de expansión y vida media a 180°C	77
Figura 3.26 Arena fina para dosificación.....	81
Figura 3.27 Dosificación y obtención de las matrices asfálticas finas.....	81
Figura 3.28 Compactación de briquetas.....	82
Figura 3.29 Medición de briquetas	83
Figura 3.30 Peso de briquetas sumergidas por 5 min	83
Figura 3.31 Peso sumergido de briquetas	84
Figura 3.32 Briquetas sumergidas en baño a 60°C	84
Figura 3.33 Rotura en la prensa Marshall	85
Figura 3.34 Porcentaje de asfalto vs densidad (C.A. 85-100 con arena triturada).....	91
Figura 3.35 Porcentaje de asfalto vs % vacíos (C.A. 85-100 con arena triturada)	91
Figura 3.36 Porcentaje de asfalto vs VAM (C.A. 85-100 con arena triturada).....	92
Figura 3.37 Porcentaje de asfalto vs RBV (C.A. 85-100 con arena triturada).....	92

Figura 3.38 Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (C.A. 85-100 con arena triturada).....	93
Figura 3.39 Porcentaje de asfalto vs Fluencia (C.A. 85-100 con arena triturada)	93
Figura 3.40 Porcentaje de asfalto vs densidad (C.A. 85-100 con arena natural)	96
Figura 3.41 Porcentaje de asfalto vs vacíos (C.A. 85-100 con arena natural)	96
Figura 3.42 Porcentaje de asfalto vs VAM (C.A. 85-100 con arena natural)	97
Figura 3.43 Porcentaje de asfalto vs RBV (C.A. 85-100 con arena natural)	97
Figura 3.44 Porcentaje de asfalto vs Estabilidad (C.A. 85-100 con arena natural)	98
Figura 3.45 Porcentaje de asfalto vs Fluencia (C.A. 85-100 con arena natural)	98
Figura 3.46 Matrices finas con asfalto espumado.....	101
Figura 3.47 Control de temperatura para las roturas.....	103
Figura 3.48 Comportamiento de estabilidad a diferentes temperaturas.....	116
Figura 3.49 Comportamiento de la fluencia a diferentes temperaturas	119
Figura 3.50 Representación gráfica de los vacíos.....	120
Figura 3.51 Recapados asfálticos con arena fina	122
Figura 3.52 Fresado con material fino	123
Figura 3.53 Renivelación de bermas.....	124
Figura 3.54 Bacheos con mezclas finas	125