

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TOMO I

**“ANÁLISIS DE IMÁGENES APLICADO A MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS”**

POR:

NATALY NATALIA SEGOVIA LEÓN

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

SEMESTRE II -2025
TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TOMO I

**“ANÁLISIS DE IMÁGENES APLICADO A MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS”**

POR:

NATALY NATALIA SEGOVIA LEÓN

PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV - 502

SEMESTRE II -2025
TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres Jaime Segovia Navarro y María León Cazón y mis hermanos quienes con su amor, comprensión y apoyo incondicional han estado siempre a lo largo de mi vida y en cada reto que he tomado; a ellos que siempre tienen una palabra de aliento en los momentos difíciles y que han sido incentivos en mi vida, no hay palabras en este mundo para agradecerles, por tanto.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

		Página
1.1	Introducción	1
1.2	Justificación	2
1.3	Situación problemática y problema	3
1.3.1	Situación problemática	3
1.3.2	Problema	4
1.4	Hipótesis	4
1.5	Objetivos	4
1.5.1	Objetivo general	4
1.5.2	Objetivos específicos	4
1.6	Variables	5
1.6.1	Variable independiente	5
1.6.2	Variable dependiente	5
1.7	Alcance	5

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SU EVALUACIÓN A TRAVÉS DE TOMOGRAFÍAS

		Página
2.1	Pavimentos flexibles	8
2.1.1	Estructural	8
2.1.2	Funcional	9
2.1.3	Impermeabilización	9
2.1.4	Carpeta Asfáltica	9
2.2	Asfalto	11

2.2.1	Tipos de asfaltos y usos	12
2.3	Mezcla asfáltica	16
2.3.1	Definición de Mezcla Asfáltica.	17
2.3.2	Clasificación de las Mezclas Asfálticas según sus características.....	17
2.3.3	Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.	19
2.4	Mezclas asfálticas densas.....	22
2.4.1	Agregados	22
2.4.2	Material bituminoso	22
2.5	Mezclas asfálticas abiertas.....	24
2.5.1	Agregados	24
2.6	Mezclas asfálticas finas	25
2.7	Mezclas asfálticas porosas o drenantes.....	27
2.7.1	Proposición de especificación para diseñar mezclas drenantes	28
2.8	Caracterización del agregado en mezclas asfálticas	29
2.8.1	Tamaño y estructura Granulométrica	30
2.8.2	Resistencia	30
2.8.3	Textura superficial	30
2.8.4	Porosidad	30
2.8.5	Adherencia	31
2.8.6	Gravedad Específica	31
2.8.7	Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles	31
2.8.8	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	31
2.8.9	Equivalentes de arenas y agregados finos.....	32
2.8.10	Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados	32
2.8.11	Gravedad específica y absorción del agregado.....	33
2.9	Introducción al procesamiento mediante tomografía axial.....	33
2.9.1	Tomografía computarizada	33
2.9.2	Metodología para la caracterización de M.A. tomografías.....	38
2.9.3	Aplicación del análisis de imagen a las mezclas asfálticas.....	38

2.9.4	Análisis integral de la información obtenida en todas las imágenes	39
2.9.5	Elaboración o valoración de imágenes de briquetas de M.A.....	40
2.9.6	Criterios de medición para la caracterización microscópica.	40

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA SOBRE LA EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

		Página
3.1	Ubicación	42
3.2	Caracterización de agregados	43
3.2.1	Ensayo de granulometría	43
3.2.2	Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles	50
3.2.3	Equivalente de arenas	55
3.2.4	Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados	57
3.2.5	Gravedad específica de agregados gruesos ASTM C-127.....	60
3.2.6	Gravedad específica de agregados finos ASTM -128	66
3.3	Caracterización de las mezclas asfálticas	71
3.3.1	Ensayo de penetración	71
3.3.2	Ensayo de Viscosidad	74
3.3.3	Peso específico del asfalto	77
3.3.4	Ensayo de ductilidad.....	78
3.3.5	Ensayo para determinar la inflamación de copa abierta de Cleveland	81
3.4	Dosificación	84
3.5	Elaboración de probetas.....	98
3.6	Tomografía de probetas	120
3.7	Evaluación de imágenes.....	123
3.8	Caracterización de tamaño	138
3.9	Distribución de partículas	156

3.10	Comparación entre cortes de observación a 4cm y 3cm.....	163
3.11	Resultados	171
3.12	Análisis de resultados	182
3.12.1	Porcentaje de vacíos.....	182
3.12.2	Contacto agregado - agregado	183
3.12.3	Caracterización de partículas	184
3.12.4	Distribución de partículas	186

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

		Página
4.1	Conclusiones	189
4.2	Recomendaciones	191

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I	ENSAYO DE GRANULOMETRÍA
ANEXO II	ENSAYO DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES
ANEXO III	ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENAS
ANEXO IV	ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO EN LOS AGREGADOS
ANEXO V	PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
ANEXO VI	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO
ANEXO VII	DISEÑO GRANULOMÉTRICO PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS
ANEXO VIII	CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO DEL CEMENTO ASFÁLTICO PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS
ANEXO IX	CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

ANEXO X ENSAYO DE MARSHALL PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
ESTUDIADAS

ANEXO XI TOMOGRAFÍAS EN ESTUDIO

ANEXO XII EVALUACIÓN DE IMÁGENES MEDIANTE TOMOGRAFÍA

ANEXO XIII CARACTERIZACIÓN DE TAMAÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ANEXO XIV DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Especificaciones para Cementos Asfálticos.....	14
Tabla 2.2 Especificaciones para Gradaciones Densas ASTM D3515	23
Tabla 2.3 Gradaciones para mezclas asfálticas abiertas en caliente	24
Tabla 2.4 Valores comunes de una Mezcla Asfáltica Fina	25
Tabla 2.5 Gradación mezcla asfáltica fina (FAM).....	26
Tabla 2.6 Gradación mezcla asfáltica drenante.....	28
Tabla 3.1 Granulometría de materiales M.A. Densa y M.A. Fina	47
Tabla 3.2 Granulometría de la grava para M.A. Abiertas	48
Tabla 3.3 Granulometría agregados para M.A. Drenante	49
Tabla 3.4 Requerimiento según el tamaño de material que se tenga	51
Tabla 3.5 Desgaste para agregados M.A. Finas y Densas	54
Tabla 3.6 Desgaste de los ángeles para agregados M.A. Abiertas.....	54
Tabla 3.7 Desgaste de los ángeles para gravilla M.A. Drenante.....	55
Tabla 3.8 Ensayo Equivalente de Arena en M.A.	57
Tabla 3.9 Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados en M.A.	60
Tabla 3.10 Peso específico de la grava en M.A. densas y finas.....	65
Tabla 3.11 Peso específico de la gravilla en M.A. densas y finas	65
Tabla 3.12 Peso específico de la grava en M.A. Abiertas.....	65
Tabla 3.13 Peso específico de la gravilla en M.A. Abiertas	66
Tabla 3.14 Peso específico de la gravilla en M.A. Drenantes.....	66
Tabla 3.15 Peso específico de la arena en M.A. densas y finas	70
Tabla 3.16 Peso específico de la arena en M.A. Abiertas	70
Tabla 3.17 Peso específico de la arena M.A. Drenantes.....	70
Tabla 3.18 Tabla de resultados de penetración del C.A.....	74
Tabla 3.19 Tabla de resultados de viscosidad del C.A.	76
Tabla 3.20 Tabla de resultado del peso específico del C.A.	78
Tabla 3.21 Tabla de resultados ductilidad.....	81
Tabla 3.22 Resultados de Punto de Inflamación.....	84

Tabla 3.23	Requisitos de calidad de agregados para mezclas asfálticas.....	84
Tabla 3.24	Diseño granulométrico para una M.A. Densa.....	85
Tabla 3.25	Diseño granulométrico para una M.A. Fina.....	87
Tabla 3.26	Diseño granulométrico para una M.A. Abierta.....	89
Tabla 3.27	Diseño granulométrico para una M.A. Drenante	91
Tabla 3.28	Dosificación de M.A. Densas para 5 probetas	94
Tabla 3.29	Dosificación de M.A. Finas para 5 probetas	95
Tabla 3.30	Dosificación de M.A. Abiertas para 5 probetas	96
Tabla 3.31	Dosificación de M.A. Drenantes para 5 probetas	97
Tabla 3.32	Diseño Marshall para mezclas asfálticas densas.....	105
Tabla 3.33	Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Densa.....	108
Tabla 3.34	Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Fina	112
Tabla 3.35	Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Abierta.....	115
Tabla 3.36	Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Drenante o Porosa	119
Tabla 3.37	Resumen número de contactos para M.A. Densas.....	126
Tabla 3.38	Resumen número de contactos para M.A. Finas.....	127
Tabla 3.39	Resumen número de contactos para M.A. Abiertas.....	128
Tabla 3.40	Resumen número de contactos para M.A. Drenantes	129
Tabla 3.41	Porcentaje de vacíos para una M.A. Densa.....	134
Tabla 3.42	Porcentaje de vacíos para una M.A. Fina.....	135
Tabla 3.43	Porcentaje de vacíos para una M.A. Abierta.....	136
Tabla 3.44	Porcentaje de vacíos para una M.A. Drenante	137
Tabla 3.45	Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Densa	141
Tabla 3.46	Caracterización de tamaño para 1" en una M.A. Densa	142
Tabla 3.47	Caracterización de tamaño para ¾" en una M.A. Densa	143
Tabla 3.48	Caracterización de tamaño para ½" en una M.A. Densa	144
Tabla 3.49	Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Fina	145
Tabla 3.50	Caracterización de tamaño para 1" en una M.A. Fina	146
Tabla 3.51	Caracterización de tamaño para ¾" en una M.A. Fina	147
Tabla 3.52	Caracterización de tamaño para ½" en una M.A. Fina	148
Tabla 3.53	Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Abierta ..	149

Tabla 3.54	Caracterización de tamaño para 1" en una M.A. Abierta	150
Tabla 3.55	Caracterización de tamaño para ¾" en una M.A. Abierta	151
Tabla 3.56	Caracterización de tamaño para ½" en una M.A. Abierta	152
Tabla 3.57	Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Drenante.	153
Tabla 3.58	Caracterización de tamaño para 3/8" en una M.A. Drenante.....	154
Tabla 3.59	Caracterización de tamaño para ¼" en una M.A. Drenante.....	155
Tabla 3.60	Distribución de partículas en M.A. Densa	159
Tabla 3.61	Distribución de partículas en M.A. Fina	160
Tabla 3.62	Distribución de partículas en M.A. Abierta	161
Tabla 3.63	Distribución de partículas en M.A. Drenante	162
Tabla 3.64	Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Densa.....	171
Tabla 3.65	Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Fina.....	171
Tabla 3.66	Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Abierta....	172
Tabla 3.67	Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Drenante .	172
Tabla 3.68	Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Densa	174
Tabla 3.69	Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Fina	174
Tabla 3.70	Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Abierta	175
Tabla 3.71	Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Drenante	175
Tabla 3.72	Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Densa	177
Tabla 3.73	Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Fina	178
Tabla 3.74	Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Abierta	179
Tabla 3.75	Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Drenante.....	180
Tabla 3.76	Cálculo del grado de incertumbre para una M.A. Densa	185

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Paquete estructural.....	9
Figura 2.2 Comportamiento del pavimento frente a cargas de tránsito.	11
Figura 2.3 Composición con emulsión asfáltica	15
Figura 2.4 Ubicación de la Matriz Asfáltica Fina en una Mezcla Asfáltica	26
Figura 2.5 Mezcla drenante.....	27
Figura 2.6 Tomografías computarizadas en mezclas asfálticas	34
Figura 2.7 Ejemplos de una sección de mezcla.....	35
Figura 3.1 Ubicación chancadora Ramírez	42
Figura 3.2 Ubicación Alcaldía de Tarija	43
Figura 3.3 Juego de tamices para realizar el análisis granulométrico.....	45
Figura 3.4 Pesado de los materiales retenidos en cada malla	46
Figura 3.5 Curva granulométrica agregados M.A. Densa y Fina.....	47
Figura 3.6 Curva granulométrica agregados M.A. abiertas	49
Figura 3.7 Curva granulométrica agregados para M.A. Drenante	50
Figura 3.8 Cilindro metálico para realizar la prueba de desgaste de “Los Ángeles”	52
Figura 3.9 Pesaje de los materiales retenidos según el método de abrasión	53
Figura 3.10 Introducción de la muestra en la máquina de “Los Ángeles”.....	53
Figura 3.11 Tamización del material por malla N.º12	53
Figura 3.12 Lavado del material retenido en malla N.º 12	54
Figura 3.13 Probetas de ensayo por cada arena utilizado en diferente M.A.....	56
Figura 3.14 Calibrador de longitud y calibrador de espesores.....	58
Figura 3.15 Tamizado y pesado del material grueso	59
Figura 3.16 Agregados gruesos sumergidos en agua durante 24 horas.	61
Figura 3.17 Obtención del peso en su condición superficialmente seca.....	61
Figura 3.18 Preparación del equipo para hallar el peso sumergido del agregado.....	62
Figura 3.19 Calibración de la balanza para el peso sumergido.....	62
Figura 3.20 Balanza calibrada para conocer el peso sumergido del agregado.....	63
Figura 3.21 Determinación del peso sumergido en agua del agregado grueso.....	63
Figura 3.22 Secado en el horno del material grueso durante 24 horas	64

Figura 3.23	Agregados finos sumergidos en agua durante 24 horas.....	67
Figura 3.24	Secado del agregado fino.....	68
Figura 3.25	Colocación de las arenas en el cono metálico	68
Figura 3.26	Medición de la temperatura y pesaje del material fino.....	69
Figura 3.27	Equipo de Penetración	72
Figura 3.28	Muestra de C.A. en 3 vasos de precipitación de 50 ml.....	72
Figura 3.29	Ajuste de la aguja para ensayar la penetración.....	73
Figura 3.30	Medición de las muestras de C.A. con el equipo de penetración	73
Figura 3.31	Viscosímetro Saybolt.....	75
Figura 3.32	Medición de la temperatura del aceite y el asfalto	75
Figura 3.33	Medición del tiempo para calcular la Viscosidad Saybolt.....	76
Figura 3.34	Viscosidad del C.A.	76
Figura 3.35	Muestras colocadas en el baño María para el ensayo de peso específico...77	
Figura 3.36	Ductilímetro.....	78
Figura 3.37	Preparación de los moldes	79
Figura 3.38	Colocación de los moldes en el baño María a temperatura de 25°C.....	80
Figura 3.39	Medición de la elongación de las muestras de asfalto en el ductilímetro...80	
Figura 3.40	Llenado de la Copa de Cleveland con M.A.	82
Figura 3.41	Aplicación de calor a la copa de Cleveland con la M.A.....	82
Figura 3.42	Control de la temperatura en la copa de Cleveland	83
Figura 3.43	Control del destello y anotación de la temperatura en ese instante	83
Figura 3.44	Curva granulométrica para M.A. Densa	86
Figura 3.45	Curva granulométrica para una M.A. Fina	88
Figura 3.46	Curva granulométrica para una M.A. Abierta	90
Figura 3.47	Curva granulométrica para una M.A. Drenante.....	92
Figura 3.48	Contenido mínimo de las mezclas asfálticas estudiadas.....	93
Figura 3.49	Máquina de Marshall	102
Figura 3.50	Mordaza para rotura de especímenes Marshall	102
Figura 3.51	Extractor de muestras de asfaltos	103
Figura 3.52	Muestras de las diferentes mezclas asfálticas estudiadas	103
Figura 3.53	M.A. Densa: Densidad vs % C.A.	105

Figura 3.54	M.A. Densa: Estabilidad vs % C.A.	106
Figura 3.55	M.A. Densa: Fluencia vs % C.A.....	106
Figura 3.56	M.A. Densa: V.A.M. vs % C.A.	107
Figura 3.57	M.A. Densa: R.B.V. vs % C.A.	107
Figura 3.58	M.A. Densa: % Vacíos mezcla vs % C.A.	108
Figura 3.59	M.A. Fina: Densidad vs %C.A.	109
Figura 3.60	M.A. Fina: Estabilidad vs % C.A.	109
Figura 3.61	M.A. Fina: Fluencia vs % C.A.	110
Figura 3.62	M.A. Fina: V.A.M. vs % C.A.....	110
Figura 3.63	M.A. Fina: R.B.V. vs % C.A.	111
Figura 3.64	M.A. Fina: % Vacíos Mezcla vs % C.A.	111
Figura 3.65	M.A. Abierta: Densidad vs % C.A. (135°C).....	112
Figura 3.66	M.A. Abierta: Estabilidad vs % C.A.	113
Figura 3.67	M.A. Abierta: Fluencia vs % C.A.	113
Figura 3.68	M.A. Abierta: V.A.M. vs % C.A.	114
Figura 3.69	M.A. Abierta: R.B.V. vs % C.A.	114
Figura 3.70	M.A. Abierta: % Vacíos Mezcla vs % C.A.	115
Figura 3.71	M.A. Drenante o Porosa: Densidad vs % C.A.....	116
Figura 3.72	M.A. Drenante o Porosa: Estabilidad vs % C.A.....	116
Figura 3.73	M.A. Drenante o Porosa: Fluencia vs % C.A.	117
Figura 3.74	M.A. Drenante o Porosa: V.A.M. vs % C.A.	117
Figura 3.75	M.A. Drenante o Porosa: R.B.V. vs % C.A.	118
Figura 3.76	M.A. Drenante o Porosa: % Vacíos Mezcla vs % C.A.....	118
Figura 3.77	Tomógrafo Clínica Panosas.....	120
Figura 3.78	Extracción de imágenes mediante tomografía a diferentes alturas.....	120
Figura 3.79	Tomografía axial M.A. Densa	121
Figura 3.80	Tomografía axial de M.A. Fina	121
Figura 3.81	Tomografía axial M.A. Abierta	122
Figura 3.82	Tomografía axial M.A. Drenante.....	122
Figura 3.83	Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica densa	123
Figura 3.84	Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica fina	124

Figura 3.85	Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica abierta	125
Figura 3.86	Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica drenante	125
Figura 3.87	Medición del área de vacíos en las tomografías axiales	130
Figura 3.88	Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Densa	131
Figura 3.89	Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Fina	132
Figura 3.90	Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Abierta	133
Figura 3.91	Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Drenante.....	133
Figura 3.92	Caracterización para una M.A. Densa	138
Figura 3.93	Caracterización para una M.A. Fina	139
Figura 3.94	Caracterización para una M.A. Abierta	139
Figura 3.95	Caracterización para una M.A. Drenante	140
Figura 3.96	Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom.....	141
Figura 3.97	Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom.....	145
Figura 3.98	Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom.....	149
Figura 3.99	Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom.....	153
Figura 3.100	Distribución para una mezcla asfáltica Densa	156
Figura 3.101	Distribución para una mezcla asfáltica fina.....	157
Figura 3.102	Distribución para una mezcla asfáltica abierta	157
Figura 3.103	Distribución para una mezcla asfáltica drenante	158
Figura 3.104	% Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Densa.....	163
Figura 3.105	% Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Fina	164
Figura 3.106	% Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Abierta.....	165
Figura 3.107	% Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Drenante	166
Figura 3.108	Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Densa	167
Figura 3.109	Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Fina	168
Figura 3.110	Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Abierta .	169
Figura 3.111	Contacto A-A entre dos cortes para una M.A. Drenante.....	170
Figura 3.112	Comparación del número de contacto entre A-A en M.A.	173
Figura 3.113	Comparación de porcentaje de vacíos entre M.A.	176
Figura 3.114	Comparación de la distribución de partículas en las M.A.	181
Figura 3.115	Porcentaje de Vacíos para cada mezcla asfáltica estudiada.....	182

Figura 3.116	Puntos de Contacto en las mezclas analizadas	183
Figura 3.117	Resultado de caracterización para M.A. Densa	185
Figura 3.118	Resultado de distribución de partículas de las mezclas estudiadas	186