

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



**“ANÁLISIS DEL CONTACTO AGREGADO – AGREGADO EN
MEZCLAS DRENANTES EMPLEANDO TOMOGRAFÍA
COMPUTARIZADA CON RAYOS X”**

Realizado Por:

MARCOS FIGUEROA

**Gestión 2014
TARIJA – BOLIVIA**

DEDICATORIA

A Dios quien ha guiado mis pasos con amor,
fortaleza y fe para cumplir uno de mis
más anhelados sueños.

A mi madre Emma Figueroa Gómez por ser
la razón de mi existencia, que gracias a
sus consejos, cariño, esfuerzo diario y
apoyo incondicional, hicieron posible
que culminara con éxito una etapa más
de mi vida.

A mi hermana Miriam Susana Figueroa, por
la confianza que ha depositado en mí,
por todo su apoyo brindado durante el
tiempo que implica labrarse una
profesión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar en cada momento de mi vida,
por permitirme concluir esta etapa y
compartirla con las personas que quiero y
aprecio.

A la Universidad Autónoma Juan Misael
Saracho, en especial a la facultad de Ciencias y
Tecnología.

Al laboratorio de Suelos y Pavimentos del
consorcio VIAL COPACABANA, a todo su
personal en especial al Ing. Juan Carlos
Robledo y al señor Melean Camacho por su
colaboración activa en el desarrollo de la
presente investigación y la supervisión en los
ensayos realizados en el laboratorio, ya que sus
comentarios y sugerencias contribuyeron a
enriquecer y complementar este trabajo.

"Los hombres y pueblos en
decadencia viven acordándose de
dónde vienen; los hombres
geniales y pueblos fuertes sólo
necesitan saber a dónde van."

(Anónimo)

ÍNDICE

CAP. I INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 DISEÑO TEÓRICO	4
1.3.1 Planteamiento del Problema	4
1.3.1.1 Situación Problemática	4
1.3.1.2 Formulación del Problema	5
1.3.2 Objetivos	5
1.3.2.1 Objetivo General	5
1.3.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3.3 Hipótesis	6
1.3.4 Variables	6
1.3.5 Alcance	6
1.4 DISEÑO METODOLÓGICO	8
1.4.1 Población	8
1.4.2 Muestra	8
1.4.3 Procesos y Medios	8
1.4.4 Procesamiento Estadístico	9
CAP. II ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE MEZCLAS DRENANTES Y SU EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO-AGREGADO POR RAYOS-X.13	
2.1 DESARROLLO DE CONCEPTOS BÁSICOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	13
2.1.1 Definición de Pavimento	13
2.1.2 Tipos de Pavimento	14
2.1.2.1 Pavimento Rígido	14
2.1.2.2 Pavimento Flexible	15
2.1.2.3 Pavimentos Articulado	15
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE ASFALTO	16

2.2.1	Definición de Asfalto	16
2.2.2	Propiedades Físicas del Asfalto	17
2.2.2.1	Adhesión y Cohesión	18
2.2.2.2	Durabilidad	18
2.2.2.3	Propiedades Químicas del Asfalto	19
2.2.3	Sistemas de Clasificación del Cemento Asfáltico	21
2.2.3.1	Sistema de Clasificación por Penetración	21
2.2.3.2	Sistema de Clasificación por Viscosidad	22
2.3	CONCEPTOS BÁSICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	23
2.3.1	Definición de Mezclas Asfálticas	23
2.3.2	Clasificación de las Mezclas Asfálticas	24
2.3.2.1	Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado	24
2.3.2.2	Por la Temperatura de Puesta en Obra	24
2.3.2.3	Por la Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica	24
2.3.2.4	Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo	25
2.3.2.5	Por la Estructura del Agregado Pétreo	25
2.3.2.6	Por la Granulometría	25
2.3.3	Tipología de las Mezclas Asfálticas	26
2.3.3.1	Mezcla Asfáltica en Caliente	26
2.3.3.2	Mezcla Asfáltica en Frio	27
2.3.3.3	Mezcla Porosa o Drenante	27
2.4	CARACTERÍSTICAS Y METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES	28
2.4.1	Definición de Mezclas Asfálticas Drenantes	28
2.4.2	Historia de los Pavimentos Drenantes	29
2.4.3	Aplicaciones, Ventajas y Desventajas de las Mezclas Asfálticas Drenantes	31
2.4.3.1	Ventajas de las Mezclas Asfálticas Drenantes	31
2.4.3.2	Desventajas de las Mezclas Drenantes	32
2.4.4	Conservación y Vida Útil de Mezclas Drenantes	33
2.4.5	Especificaciones Técnicas para el Ligante de una Mezcla Drenante	34
2.4.6	Especificaciones Técnicas para los Agregados de Mezclas Drenantes	35

2.4.6.1	Agregado Grueso	35
2.4.6.2	Agregado Fino	36
2.4.6.3	Relleno Mineral (FILLER)	36
2.4.6.4	Mezcla de Agregados	36
2.4.7	Metodologías de Diseño de Mezclas Asfálticas Porosas o Drenantes	38
2.4.7.1	RP (Origen Chile)	38
2.4.7.2	Cántabro (Origen España).....	39
2.4.7.3	Descripción del Método Marshall.....	43
2.4.8	Comportamiento de las Mezclas Asfálticas.....	44
2.5	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES	48
2.5.1	Ensayos a los Agregados	48
2.5.1.1	Método para extraer y preparar muestras (ASTM C 75 AASHTO T2-91).....	48
2.5.1.2	Ensayo para tamizar y determinar la granulometría (ASTM D-422)	48
2.5.1.3	Gravedad Específica en Agregados Finos, AASTHO T-84.....	49
2.5.1.4	Gravedad específica en agregados gruesos, AASHTO T-85.....	50
2.5.1.5	Ensayo para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). 51	51
2.6	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO.....	52
2.6.1	Ensayos del asfalto	52
2.6.1.1	Ensayo de penetración (ASTM D-5).....	52
2.6.1.2	Ensayo para determinar la ductilidad (ASTM D- 113).....	53
2.6.1.3	Ensayo para determinar la viscosidad cinemática (ASTM E-102).....	54
2.6.1.4	Punto de inflamación (ASTM D-92).	54
2.7	TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA CON RAYOS-X.....	55
2.7.1	Definición	55
2.7.2	Utilización en la Ingeniería	56
2.7.3	Descripción de la Técnica de Rayos-x para Caracterizar Mezclas Drenantes	57

**CAP. III INVESTIGACIÓN SOBRE EL ANÁLISIS DE CONTACTO AGREGADO-
AGREGADO EN MEZCLAS DRENANTES EMPLEANDO TOMOGRAFÍA
COMPUTARIZADA CON RAYOS-X..... 61**

3.1	PROCEDENCIA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	61
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	62
3.2.1	Ensayos en Ligante Asfáltico	62
3.2.1.1	Ensayo de Penetración (ASTM D-5).....	62
3.2.1.2	Ensayo de Ductilidad (ASTM D-113).....	65
3.2.1.3	Ensayo de Punto de Inflamación (ASTM D-92).....	67
3.2.1.4	Ensayo de Viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102).....	68
3.2.1.5	Ensayo de Peso Específico (ASTM D-70).....	70
3.2.2	Ensayos en los Agregados	73
3.2.2.1	Abrasión de Agregado Grueso Maquina de los Ángeles (AASHTO T-96).....	73
3.2.2.2	Peso Específico Agregado Fino (AASHTO T-84)	75
3.2.2.3	Peso Específico y Absorción Agregado Grueso (AASHTO T-85)	77
3.3	ENSAYOS SOBRE LA MEZCLA ASFÁLTICA.	79
3.3.1	Granulometría y Mezcla de Agregados.....	79
3.3.1.1	Granulometría.....	79
3.3.1.2	Mezcla de Agregados.....	82
3.4	DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE O POROSA	83
3.5	PREPARACIÓN Y FABRICACIÓN DE BRIQUETAS	84
3.5.1	Preparación de las Muestras	85
3.5.1.1	Calculo de Materiales Diseño Marshall.....	86
3.5.1.2	Compactación de las Briquetas	89
3.5.2	Peso y Volumen de las Briquetas.....	91
3.5.3	Densidad Bulk	92
3.5.4	Gravedad Específica Máxima Teórica	97
3.5.5	Calculo de Vacíos	97
3.5.6	Pruebas de estabilidad y fluencia	99
3.5.7	Desgaste en la Maquina de los Ángeles	100
3.5.8	Permeabilidad	103

3.6	CALCULO DE VACÍOS EMPLEANDO TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA.....	104
3.6.1	Cuantificación del Contacto Agregado-Agregado.....	114
3.7	RESUMEN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	116
CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		136
4.1	CONCLUSIONES.....	136
4.2	RECOMENDACIONES.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 2-1 PAVIMENTO RÍGIDO (HORMIGÓN)	14
FIGURA Nº 2-2 PAVIMENTO FLEXIBLE (ASFALTO)	15
FIGURA Nº 2-3 PAVIMENTO ARTICULADO	15
FIGURA Nº 2-4 ACCIÓN DE DESENVUELTA DEL AGUA	18
FIGURA Nº 2-5 COMPOSICIÓN DEL ASFALTO	19
FIGURA Nº 2-6 ESTRUCTURA COLOIDAL DEL ASFALTO	20
FIGURA Nº 2-7 ESQUEMA MEZCLA DRENANTE	29
FIGURA Nº 2-8 ESPECIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA MD-1	37
FIGURA Nº 2-9 REPRESENTACIÓN DE LOS VOLÚMENES EN UNA BRIQUETA COMPACTADA DE MEZCLA ASFÁLTICA	46
FIGURA Nº 2-10 ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN	53
FIGURA Nº 2-11 ENSAYO DE DUCTILIDAD	54
FIGURA Nº 2-12 ENSAYO DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN	55
FIGURA Nº 2-13 SISTEMA DE RAYOS-X: VISTA EN PLANTA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES	58
FIGURA Nº 2-14 EQUIPO TÍPICO DE RAYOS-X (TEXAS A&M UNIVERSITY)	58
FIGURA Nº 2-15 EJEMPLOS DE SECCIONES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS: (A) DE GRADACIÓN DENSA, (B) DE GRADACIÓN ABIERTA	59
FIGURA Nº 3-1 ACOPIO DE MATERIAL PÉTREO EN LA PLANTA DE ASFALTOS EL MOLINO A) AGREGADO DE ¾" B) AGREGADO 3/8" C) AGREGADO FINO D) ASFALTO BETUPEN PLUS 85-100.....	61
FIGURA Nº 3-2 ENSAYO DE PENETRACIÓN EN MUESTRAS DE ASFALTO	63
FIGURA Nº 3-3 PENETRACIÓN EN MUESTRAS	64
FIGURA Nº 3-4 MUESTRAS ESTIRADAS ANTES DE QUE SE ROMPAN	66
FIGURA Nº 3-5 EJECUCIÓN DEL ENSAYO PUNTO DE INFLAMACIÓN	67
FIGURA Nº 3-6 EJECUCIÓN DEL ENSAYO PESO ESPECÍFICO DEL LIGANTE	72
FIGURA Nº 3-7 DESGASTE EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	74
FIGURA Nº 3-8 MUESTRA SATURADA Y PESO SUMERGIDO DE LA MUESTRA	79
FIGURA Nº 3-9 CUARTEADOR DE MUESTRAS.....	80
FIGURA Nº 3-10 SERIE DE TAMICES UTILIZADOS	81
FIGURA Nº 3-11 BRIQUETAS DE ESTUDIO	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1 REQUISITOS PARA CLASIFICAR EL ASFALTO	22
TABLA 2-2 REQUISITOS PARA CLASIFICAR EL ASFALTO	23
TABLA 2-3 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	26
TABLA 2-4 PORCENTAJE DE VACÍOS.....	28
TABLA 2-5 USO DE MEZCLAS DRENANTES EN PAÍSES EN EL 2001	30
TABLA 2-6 REQUISITOS DEL CEMENTO ASFALTICO	34
TABLA 2-7 REQUISITOS DEL AGREGADO GRUESO.....	35
TABLA 2-8 REQUISITOS DEL AGREGADO FINO	36
TABLA 2-9 FRANJA GRANULOMÉTRICA PARA MEZCLAS DRENANTES	37
TABLA 2-10 FRANJA GRANULOMÉTRICA PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES	49
TABLA 3-1 RESULTADOS DE ENSAYO DE PENETRACIÓN	64
TABLA 3-2 RESULTADOS DE ENSAYO DE DUCTILIDAD	66
TABLA 3-3 RESULTADO DE ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN	68
TABLA 3-4 GRAVEDAD ESPECIFICA DEL LIGANTE ASFALTICO	72
TABLA 3-5 RESULTADOS OBTENIDOS COMPARACIÓN CON ESPECIFICACIONES	73
TABLA 3-6 PORCENTAJE DE DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ÁNGELES	75
TABLA 3-7 DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL AGREGADO FINO	77
TABLA 3-8 DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO	79
TABLA 3-9 GRANULOMETRÍAS INDIVIDUALES DE LOS AGREGADOS	81
TABLA 3-10 FRANJA GRANULOMÉTRICA PARA MEZCLAS DRENANTES	82
TABLA 3-11 GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL COMBINADO	82
TABLA 3-12 CALCULO DE MATERIALES DISEÑO MARSHALL	86
TABLA 3-13 GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK "FAJA GRANULOMÉTRICA A"	94
TABLA 3-14 GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK "FAJA GRANULOMÉTRICA B"	95
TABLA 3-15 GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK "FAJA GRANULOMÉTRICA C"	96
TABLA 3-16 DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA FAJA A, B Y C	97
TABLA 3-17 VACÍOS EN LA MEZCLA (GRANULOMETRÍA "A")	98
TABLA 3-18 VACÍOS EN LA MEZCLA (GRANULOMETRÍA "B")	98
TABLA 3-19 VACÍOS EN LA MEZCLA (GRANULOMETRÍA "C")	99
TABLA 3-20 RESULTADO DE DESGASTE DE BRIQUETAS MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.	102

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MEZCLA DE AGREGADOS	83
GRÁFICO 2 PORCENTAJE DE VACÍOS PARA LAS GRANULOMETRÍAS A, B Y C	118
GRÁFICO 3 % DE VACÍOS VS. % DE ASFALTO GRANULOMETRÍA "B"	118
GRÁFICO 4 DESGASTE CÁNTABRO VS. % DE ASFALTO	119
GRÁFICO 5 PERDIDA POR ENSAYO DE CÁNTABRO GRANULOMETRÍA "B"	120
GRÁFICO 6 % DE VACÍOS VS. % DE ASFALTO GRANULOMETRÍA "B"	121
GRÁFICO 7 PERMEABILIDAD	121
GRÁFICO 8 DENSIDAD VRS. % DE ASFALTO	124
GRÁFICO 9 ESTAB. MARSHALL VRS. % DE ASFALTO	125
GRÁFICO 10 % DE VACÍOS VRS. % DE ASFALTO	125
GRÁFICO 11 FLUJO VRS. % DE ASFALTO	126
GRÁFICO 12 DISTRIBUCIÓN VERTICAL DEL NÚMERO DE PUNTOS DE CONTACTO	127
GRÁFICO 13 DISTRIBUCIÓN VERTICAL DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS	128
GRÁFICO 14 RELACIÓN DEL NÚMERO DE PUNTOS Y EL NÚMERO DE CONTACTOS	128
GRÁFICO 15 RELACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS Y EL NÚMERO DE PUNTOS DE CONTACTO	129
GRÁFICO 16 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VACÍOS GRANULOMETRÍA A	131
GRÁFICO 17 ANÁLISIS COMPARATIVO GRANULOMETRÍA B	132
GRÁFICO 18 ANÁLISIS COMPARATIVO GRANULOMETRÍA C	133
GRÁFICO 19 ANÁLISIS COMPARATIVO GRANULOMETRÍA SEMI-CERRADA	134

