

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN



**“ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DEL ENSAYO MARSHALL
MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL ELEMENTO FINITO”**

POR:

VALDA ESTRADA MARCO ANTONIO

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

SEMESTRE II - 2018

TARIJA - BOLIVIA

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

**“ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DEL ENSAYO MARSHALL
MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL ELEMENTO FINITO”**

POR:

VALDA ESTRADA MARCO ANTONIO

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

SEMESTRE II - 2018

TARIJA - BOLIVIA

V°B°

.....
M. Sc. Ing. Ernesto R. Álvarez Gozalvez

DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA

.....
M. Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

VICEDECANA
FACULTAD DE CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA

TRIBUNAL:

.....
M. Sc. Ing. Luis Alberto Yurquina Flores

.....
Ing. Ada Lopez Rueda

.....
Ing. Nelson Rodriguez

ADVERTENCIA:

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIA:

Este trabajo está dedicado a mis padres, Cira Estrada Gareca y Antonio Valda, quienes me apoyaron hasta el último esfuerzo y por los que no claudiqué.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios por guiar mi camino y ser la luz al final de todo el entendimiento, a mi amada madre por la comprensión incondicional, a mi padre por los consejos a mis docentes quienes me formaron para emprender mi camino.

ÍNDICE

Advertencia
Dedicatoria
Agradecimiento
Resumen

CAPÍTULO I GENERALIDADES

	Página
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.4.1 Situación problemática	2
1.4.2 Problema.....	2
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.5.1 Objetivo general	3
1.5.2 Objetivos específicos.....	3
1.6 HIPÓTESIS.....	3
1.5 DEFINICIÓN DE VARIABLES EN ESTUDIO.....	3
1.5.1 Variables independientes.....	3
1.5.2 Variables dependientes.....	3

1.5.3 Conceptualización y operacionalización de las variables.	4
1.6 DISEÑO METODOLÓGICO.....	5
1.6.1 Componentes	5
1.6.1.1 Unidad de estudio	5
1.6.1.2 Población	5
1.6.1.3 Muestra	5
1.6.1.4 Muestreo	5
1.7 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS	6
1.7.1 Método.....	6
1.7.2 Técnica	6
1.7.3 Técnica de muestreo.....	7
1.8 ESQUEMA METODOLÓGICO	8
1.10 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN	10
1.11 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	10
1.12 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	11

CAPÍTULO II

CONCEPTUALIZACIÓN DEL TEMA

	Página
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS	12
2.1.1 Modelo matemático simple	12
2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS Y LA PRÁCTICA EN INGENIERÍA	13

2.3 ANTECEDENTES MATEMÁTICOS	15
2.3.1 Ecuaciones diferenciales ordinarias	15
2.3.2 Ecuaciones diferenciales parciales	15
2.4 EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO	16
2.4.1 Introducción a los elementos finitos.....	16
2.4.2 Descripción del MEF.....	17
2.4.3 División en elementos finitos.....	17
2.4.3.1 Elementos unidimensionales.....	17
2.4.3.2 Elementos bidimensionales.....	18
2.4.3.3 Elementos tridimensionales	18
2.4.4 Vector de desplazamientos del elemento	19
2.4.4.1 Funciones unidimensionales	19
2.4.4.2 Funciones bidimensionales	19
2.4.4.3 Funciones tridimensionales.....	21
2.4.5 Enfoque general a las funciones unidimensionales	22
2.4.6 Enfoque General a las Funciones Bidimensionales.....	28
2.5 PROGRAMACIÓN	30
2.5.1 Introducción.....	30
2.5.2 Programación estructurada	30
2.5.2.1 Programación en Matlab.....	31
2.5.2.2 Métodos de optimizacion.....	31
2.6 MEZCLAS ASFÁLTICAS	32
2.6.1 Dosificación por el método Marshall	32

2.6.2 Caracterización y criterios de aceptación de los materiales.	32
2.6.3 Graduación del agregado y tamaño máximo	34
2.6.4 Composición granulométrica.....	34
2.6.4.1 Tamaño máximo nominal	34
2.6.4.2 Curvas límite.....	34
2.6.5 Características del cemento asfáltico.....	36
2.6.7 Procedimiento del ensayo.....	39
2.6.8 Determinación de los parámetros físico mecánicos	40
2.6.8.1 Determinación de las densidades aparentes.....	40
2.6.8.2 Determinación de los vacíos de las series de mezclas.....	40
2.6.8.3 Vacíos totales de la mezcla compactada.....	42
2.6.8.4 Vacíos de agregado mineral VAM	42
2.6.8.5 Vacíos ocupados por el betún	43
2.6.8.6 Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall.....	44
2.6.9 Análisis de los resultados del ensayo Marshall	46

CAPÍTULO III

ZONAS DE MUESTREO, CRITERIOS DE DISEÑO, ANÁLISIS DE LOS DATOS PROPORCIONADOS, DISEÑO CONVENCIONAL

	Página
3.1 UBICACIÓN DE PLANTAS CHANCADORAS.....	50
3.2 ANÁLISIS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PROPORCIONADAS	52
3.2.1 Planta Vafercon y filler Charaja.....	52

3.2.1.1 Características granulométricas	52
3.2.1.2 Características del cemento asfáltico	60
3.2.2 Planta Vafercon, Gaucho y filler Charaja.....	62
3.2.2.1 Características granulométricas	62
3.2.2.2 Características del cemento asfáltico.....	69
3.3 DISEÑO DE MEZCLAS CONVENCIONAL	71
3.3.1 Criterios de diseño.....	71
3.3.2 Ensayos de Caracterización de los Agregados	71
3.3.2.1 Granulometría	71
3.3.2.2 Peso específico.....	74
3.3.2.3 Desgaste de los Ángeles	75
3.3.2.4 Equivalente de arena.....	77
3.3.3 Ensayo de caracterización del cemento asfáltico	78
3.3.3.1 Viscosidad.....	78
3.3.3.2 Punto de inflamación	79
3.3.3.3 Penetración.....	80
3.3.3.4 Ductilidad.....	81
3.3.3.5 Peso específico.....	82
3.3.4 Procedimiento para el diseño Marshall en laboratorio	83
3.3.4.1 Resultados de la mezcla asfáltica convencional	90
3.3.4.2 Resumen de resultados del ensayo en laboratorio.....	93

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DEL ELEMENTO FINITO, SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE, APLICACIÓN Y ANÁLISIS

	Página
4.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	94
4.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS UNIDIMENSIONAL	95
4.2.1 Análisis de la curva densidad	95
4.2.2 Análisis de la curva vacíos totales	97
4.2.3 Análisis de la curva relación betún vacíos.....	98
4.2.4 Análisis de la curva vacíos de agregado mineral	99
4.2.5 Análisis de la curva estabilidad	100
4.2.6 Análisis de la curva flujo	102
4.3 CONDICIONES DE BORDE Y CORRELACIÓN DE LOS DISEÑOS.....	108
4.3.1 Datos de los Diseños Marsall	108
4.3.2 Resumen de los valores obtenidos.....	110
4.3.3 Correlación datos densidad.....	110
4.3.4 Correlación datos vacios totales	112
4.3.5 Correlación datos relación betun vacios.....	113
4.3.6 Correlación datos vacios de agregado mineral	114
4.3.7 Correlación datos estabilidad	115
4.3.8 Correlación datos flujo	116
4.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO CON LAS CONDICIONES DE BORDE.....	117

4.4.1 Simulación factor densidad.....	119
4.4.2 Simulación factor vacíos totales.....	125
4.4.3 Simulación factor betún vacíos (RBV).....	130
4.4.4 Simulación factor vacíos de agregado mineral (VAM).....	135
4.4.5 Simulación factor estabilidad.....	140
4.4.6 Simulación factor flujo.....	145
4.4.7 Resumen de resultados simulados.....	150
4.5 ANÁLISIS CORRELACIONAL PARA LOS FACTORES SIMULADOS.....	151
4.5.1 Análisis curva densidad.....	151
4.5.2 Análisis curva vacíos totales.....	153
4.5.3 Análisis curva RBV.....	154
4.5.4 Análisis curva VAM.....	155
4.5.5 Análisis curva estabilidad.....	156
4.5.6 Análisis curva flujo.....	157
4.6 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS.....	158
4.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	159
4.7.1 Análisis de los resultados para la FEM y Marshall mezcla convencional ...	159
4.7.1.1 Análisis de los resultados de la Densidad.....	159
4.7.1.2 Análisis de los resultados de los vacíos totales.....	160
4.7.1.3 Análisis de los resultados de la relación betún vacíos.....	161
4.7.1.4 Análisis de los resultados de los vacíos de agregado mineral.....	162
4.7.1.5 Análisis de los resultados de la estabilidad.....	163
4.7.1.6 Análisis de los resultados del flujo.....	164

4.7.2 Análisis de los resultados del porcentaje óptimo de asfalto	165
---	-----

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

Página

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	167
5.1.1 CONCLUSIONES.....	167
5.1.2 RECOMENDACIONES	170

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

I: Caracterización de los agregados y cemento asfáltico obtenidos del SEDECA

II: Caracterización de los agregados y cemento asfáltico obtenidos de la HAMT

III: Desarrollo de las formulas, prueba de bondad, intervalo de confianza

IV: Reporte fotográfico

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. 1 Población	5
Figura 1. 2 Esquema metodológico.....	8
Figura 2. 1 Esquema de un modelo matemático	13
Figura 2. 2 Esquema de aplicación de los métodos numéricos.....	14
Figura 2. 3 Representación gráfica de una EDO.....	15
Figura 2. 4 Representación gráfica de una EDP	16
Figura 2. 5 Elemento unidimensional	17
Figura 2. 6 Elementos bidimensionales	18
Figura 2. 7 Elementos tridimensionales.....	18
Figura 2. 8 Vector de desplazamientos función unidimensional	19
Figura 2. 9 Vector desplazamiento función bidimensional.....	20
Figura 2. 10 Vector desplazamientos función bidimensional	21
Figura 2. 11 Vector desplazamientos función tridimensional.....	22
Figura 2. 12 Representación esquemática del agregado	41
Figura 2. 13 Representación esquemática de una mezcla asfáltica.....	43
Figura 2. 14 Maquina Marshall.....	44
Figura 3. 1 Curva granulométrica grava.....	72
Figura 3. 2 Curva granulométrica gravilla	73
Figura 3. 3 Curva Granulométrica material fino.....	74
Figura 4. 1 Despejando el primer término (matriz de rigidez).....	120

Figura 4. 2 Despejando la función de efectos externos.....	120
Figura 4. 3 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	123
Figura 4. 4 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	124
Figura 4. 5 Curva densidad simulada.....	124
Figura 4. 6 Despejando la función de efectos externos.....	126
Figura 4. 7 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	128
Figura 4. 8 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	128
Figura 4. 9 Curva simulada vacíos totales	129
Figura 4. 10 Despejando la función de efectos externos.....	131
Figura 4. 11 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	133
Figura 4. 12 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	133
Figura 4. 13 Curva simulada RBV	134
Figura 4. 14 Despejando la función de efectos externos.....	136
Figura 4. 15 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	138
Figura 4. 16 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	138
Figura 4. 17 Curva simulada vacíos de agregado mineral	139
Figura 4. 18 Despejando la función de efectos externos.....	141
Figura 4. 19 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	143
Figura 4. 20 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	143
Figura 4. 21 Curva simulada estabilidad.....	144
Figura 4. 22 Despejando la función de efectos externos.....	146
Figura 4. 23 Introduciendo y resolviendo el sistema de ecuaciones en Matlab	148
Figura 4. 24 Introduciendo los valores determinados para ser graficados	148

Figura 4. 25 Curva simulada flujo.....	149
Figura 4. 26 Comparación resultados de las densidades.....	159
Figura 4. 27 Comparación resultados vacíos totales.....	160
Figura 4. 28 Comparación resultados RBV	161
Figura 4. 29 Comparación resultados VAM	162
Figura 4. 30 Comparación Resultados Estabilidad	163
Figura 4. 31 Comparación resultados flujo.....	164
Figura 4. 32 Comparación de los porcentajes óptimos todas las propiedades	165
Figura 4. 33 Porcentajes óptimos de las propiedades de la mezcla asfáltica	166

ÍNDICE DE IMÁGENES

	Página
Imagen 3. 1 Ubicación satelital planta chancadora Charaja SEDECA.....	50
Imagen 3. 2 Ubicación satelital planta chancadora Vafercon-Gaicho	51
Imagen 3. 3 Ubicación satelital planta de mezcla asfáltica La Pintada	52
Imagen 3. 4 Curva granulométrica.....	53
Imagen 3. 5 Curva granulométrica.....	63
Imagen 3. 6 Muestra calentada al horno	84
Imagen 3. 7 Preparación de la muestra de asfalto.....	84
Imagen 3. 8 Anillos calentados y limpios para la muestra.....	85
Imagen 3. 9 Mezclado de los materiales y control de temperatura.....	86
Imagen 3. 10 Vaciado de la mezcla en la probeta.....	86
Imagen 3. 11 Desmoldado de las probetas.....	87
Imagen 3. 12 Peso de la muestra seca	87
Imagen 3. 13 Peso de la muestra sumergida	88
Imagen 3. 14 Rotura de probetas en la máquina Marshall.....	88

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. 1 Conceptualización y operacionalización de variables independientes	4
Tabla 1. 2 Conceptualización y operacionalización de variables dependientes.....	4
Tabla 1. 3 Ensayos propuestos	7
Tabla 2. 1 Ensayos de laboratorio normalizados para agregados.....	33
Tabla 2. 2 Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515).....	35
Tabla 2. 3 Granulometría para mezclas densas, semidensas y gruesas.....	36
Tabla 2. 4 Ensayos normalizados para el asfalto	37
Tabla 2. 5 Criterios de diseño de mezclas Marshall.....	38
Tabla 2. 6 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral	39
Tabla 3. 1 Planilla de granulometría proyectada.....	53
Tabla 3. 2 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino	54
Tabla 3. 3 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso.....	55
Tabla 3. 4 Resultados desgaste de los Ángeles grava	56
Tabla 3. 5 Resultados desgaste de los Ángeles gravilla.....	56
Tabla 3. 6 Resultados método de sulfato de sodio agregado grueso.....	57
Tabla 3. 7 Resultado método de sulfato de sodio agregado fino	57
Tabla 3. 8 Ensayo de laminaridad material 3/4”	58
Tabla 3. 9 Ensayo de laminaridad material 3/8”	58
Tabla 3. 10 Resultados del ensayo de caras fracturadas	59
Tabla 3. 11 Resultados del ensayo de equivalente de arena	59

Tabla 3. 12 Ensayos al cemento asfáltico	61
Tabla 3. 13 Planilla de granulometría proyectada.....	62
Tabla 3. 14 Determinación del peso específico y absorción del agregado fino	64
Tabla 3. 15 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso.....	65
Tabla 3. 16 Resultados desgaste de los Ángeles grava	65
Tabla 3. 17 Resultados desgaste de los Ángeles gravilla.....	66
Tabla 3. 18 Resultados método de sulfatos de sodio agregado grueso	66
Tabla 3. 19 Resultados método de sulfato de sodio agregado fino	67
Tabla 3. 20 Ensayo de laminaridad material 3/4”	67
Tabla 3. 21 Ensayo de laminaridad material 3/8”	68
Tabla 3. 22 Resultados del ensayo de caras fracturada.....	68
Tabla 3. 23 Resultados del ensayo de equivalente de arena	68
Tabla 3. 24 Ensayos al cemento asfáltico	70
Tabla 3. 25 Granulometría material grueso.....	72
Tabla 3. 26 Granulometría gravilla	73
Tabla 3. 27 Granulométrica material fino (Arena).....	74
Tabla 3. 28 Peso específico del agregado grueso.....	75
Tabla 3. 29 Desgaste de los Ángeles material de 1"	76
Tabla 3. 30 Resultados de la prueba.....	76
Tabla 3. 31 Desgaste de los Ángeles material de 3/4"	77
Tabla 3. 32 Resultados de la prueba.....	77
Tabla 3. 33 Equivalente de arena	78
Tabla 3. 34 Resultados de la prueba.....	78

Tabla 3. 35 Resultados viscosidad	79
Tabla 3. 36 Resultados del punto de inflamación	80
Tabla 3. 37 Resultados ensayo de penetración.....	81
Tabla 3. 38 Resultados de la ductilidad	82
Tabla 3. 39 Peso específico.....	83
Tabla 3. 40 Resumen del material para la mezcla asfáltica	83
Tabla 3. 41 Datos obtenidos de cada factor	93
Tabla 3. 42 Resumen de resultados.....	93
Tabla 4. 1 Resultados de la mezcla asfáltica.....	110
Tabla 4. 2 Resultados de la mezcla asfáltica.....	110
Tabla 4. 3 Datos simulados para cada factor.....	150
Tabla 4. 4 Resultados para cada contenido óptimo de asfalto	150
Tabla 4. 5 Tabla comparativa.....	151
Tabla 4. 6 Tabla comparativa.....	153
Tabla 4. 7 Tabla Comparativa.....	154
Tabla 4. 8 Tabla comparativa.....	155
Tabla 4. 9 Tabla comparativa.....	156
Tabla 4. 10 Tabla comparativa.....	157
Tabla 4. 11Resumen de resultados.....	158

INDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 2. 1 Ensayo de estabilidad y fluencia.....	45
Gráfico 2. 2 Ensayo de Estabilidad y Fluencia.	45
Gráfico 2. 3 Determinación del contenido óptimo de asfalto densidad	47
Gráfico 2. 4 Determinación del contenido óptimo de asfalto vacíos totales.....	47
Gráfico 2. 5 Determinación del contenido óptimo de asfalto VAM	48
Gráfico 2. 6 Determinación del contenido óptimo de asfalto RBV	48
Gráfico 2. 7 Determinación del contenido óptimo de asfalto estabilidad	49
Gráfico 2. 8 Determinación del contenido óptimo de asfalto fluencia	49
Gráfica 3. 1 Contenido óptimo de asfalto densidad.....	90
Gráfica 3. 2 Contenido óptimo de asfalto vacíos totales.....	90
Gráfica 3. 3 Contenido óptimo de asfalto RBV	91
Gráfica 3. 4 Contenido óptimo de asfalto VAM	91
Gráfica 3. 5 Contenido óptimo de asfalto estabilidad	92
Gráfica 3. 6 Contenido óptimo de asfalto fluencia	92
Gráfica 4. 1 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall densidad ...	96
Gráfica 4. 2 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall Vt	97
Gráfica 4. 3 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall RBV	98
Gráfica 4. 4 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall VAM	99
Gráfica 4. 5 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall E.	101
Gráfica 4. 6 Curva analítica del comportamiento de la probeta Marshall flujo	102

Gráfica 4. 7 Curva de correlación para el factor densidad	111
Gráfica 4. 8 Curva de correlación para el factor vacíos totales	112
Gráfica 4. 9 Curva de correlación para el factor RBV	113
Gráfica 4. 10 Curva de correlación para el factor VAM.....	114
Gráfica 4. 11 Curva de Correlación para el Factor Estabilidad	115
Gráfica 4. 12 Curva de correlación para el factor flujo.....	116
Gráfica 4. 13 Curva de elementos finitos 6 nodos 5 elementos	118
Gráfica 4. 14 Curva de elementos finitos 4 nodos 3 elementos	118
Gráfica 4. 15 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall	152
Gráfica 4. 16 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall	153
Gráfica 4. 17 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall	154
Gráfica 4. 18 Correlación de los datos con la MEF y lo diseños Marshall.....	155
Gráfica 4. 19 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall	156
Gráfica 4. 20 Correlación de los datos con la MEF y los diseños Marshall	157