

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



**“ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE LAS MEZCLAS  
ASFÁLTICAS, APLICANDO EL DISEÑO VOLUMÉTRICO A  
GRANULOMETRÍAS SUPERPAVE”**

**Por:**

**MIGUEL GÓMEZ CASTELLÓN**

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

**SEMESTRE I1 - 2021**

**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 RESISTENCIA A LA FATIGA DE LAS MEZCLAS  
ASFÁLTICAS, APLICANDO EL DISEÑO VOLUMÉTRICO A  
GRANULOMETRÍAS SUPERPAVE”**

**Por:**

**MIGUEL GÓMEZ CASTELLÓN**

**PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV -502**

**SEMESTRE II - 2021**

**TARIJA- BOLIVIA**

**VºBº**

.....  
M.Sc. Ing. José Aurelio Navia Ojeda

**DECANO a. i.**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y  
TECNOLOGÍA**

.....  
M.Sc. Lic. Deysi B. Arancibia Márquez

**VICEDECANA a. i.**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y  
TECNOLOGÍA**

**TRIBUNAL:**

.....  
Ing. Eusebio Ortega Alvarado

.....  
M.Sc. Ing. José Ricardo Arce A.

.....  
M.Sc. Ing. Marcelo Segovia C.

### **ADVERTENCIA**

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

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis padres Gregorio Miguel Gómez Krayasich y Lia Castellón Rivero, por toda la paciencia y ayuda incondicional que me brindaron durante todos mis años de estudio, que sin ellos no sería absolutamente nada, siempre los tendré en mi mente, los quiero y querré siempre.

Y se la dedico a mis dos hijos, que son el motivo de mi vida, daré todo por ustedes hasta el fin de mis días, los amo Alexander y Sofía.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi esposa Ana Gabriela Salazar Salazar es un ángel que me puso en el camino correcto, todo ese amor y apoyo incondicional en cada instante, gracias por darme un motivo de vida, y que hermosa familia que me has dado, siempre te amare y cuidare con todo mi ser.

## **PENSAMIENTO**

Solo vivimos una vez y debemos hacerlo sin arrepentimientos, siempre pensando cada acción que tomamos, vive libre, vive pleno, vive feliz.

## ÍNDICE

ADVERTENCIA  
DEDICATORIA  
AGRADECIMIENTO  
PENSAMIENTO  
RESUMEN

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

	<b>Página</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Situación problemática.....	3
1.3.1. Problema .....	4
1.4. Objetivos .....	4
1.4.1. Objetivo general .....	4
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Operacionalización de las variables .....	5
1.6.1. Variable independiente .....	5
1.6.2. Variable dependiente.....	5
1.6.3. Variable interviniente.....	5
1.7. Alcance de la investigación.....	6



**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTO TEÓRICO**

	<b>Página.</b>
2.1. Agregados pétreos en una mezcla asfáltica.....	7
2.1.1. Graduación y tamaño máximo de la partícula.....	7
2.1.1.1. Limpieza.....	8
2.1.1.2. Dureza .....	8
2.1.1.3. Forma de la partícula.....	9
2.1.1.4. Textura superficial .....	9
2.1.1.5. Capacidad de absorción.....	10
2.1.1.6. Afinidad con el asfalto .....	10
2.1.1.7. Peso específico .....	11
2.2. Ligante asfáltico en las mezclas asfálticas .....	12
2.2.1. Composición química del asfalto .....	12
2.2.2. Propiedades físicas del asfalto .....	13
2.2.2.1. Durabilidad o susceptibilidad al envejecimiento .....	13
2.2.2.2. Adhesión y cohesión .....	14
2.2.2.3. Susceptibilidad a la temperatura .....	14
2.2.2.4. Métodos modernos para medir las propiedades de los asfaltos propuesta SHRP, Superpave.....	15
2.3. Diseño SUPERPAVE .....	21
2.4. Evaluación Superpave para los agregados minerales.....	22
2.4.1. Propiedades de origen .....	22
2.4.1.1. Tenacidad .....	22
2.4.1.2. Durabilidad.....	23

2.4.2. Propiedades de consenso Superpave.....	23
2.4.2.1. Angularidad del agregado grueso.....	24
2.4.2.2. Angularidad del agregado fino.....	25
2.4.2.3. Partículas alargadas y planas.....	26
2.4.2.4. Contenido de arcilla o prueba de equivalente de arena.....	27
2.5. Análisis de la granulometría Superpave.....	28
2.5.1. Gráfica elevada al exponente 0,45 .....	29
2.5.2. Línea de máxima densidad.....	32
2.5.3. Mecanismos de control de la granulometría .....	32
2.6. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.....	36
2.6.1. Vacíos de Aire (Va) .....	38
2.6.2. Vacíos en el Agregado Mineral (VAM).....	38
2.6.3. El Contenido Efectivo de Asfalto (Pbe).....	41
2.6.4. Vacíos llenos de asfalto (RBV).....	43
2.6.5. Relación de polvo o relación llenante efectivo, (P0.075 / Pbe) .....	44
2.7. Análisis de falla por fatiga de la carpeta asfáltica.....	48
2.7.1. Resistencia a la fatiga.....	48
2.7.2. Deformación permanente .....	49
2.7.3. Forma de aplicación de carga en la prueba .....	49
2.7.4. Efecto del tiempo de receso .....	51
2.7.5. Vacíos de aire.....	51
2.7.6. Métodos de estimación de leyes de fatiga.....	51
2.7.7. Ensayos de fatiga dinámicos .....	56
2.7.8. Factores que afectan la respuesta a la fatiga .....	57
2.7.8.1. Métodos de fabricación de las probetas .....	57

2.7.8.2. Modo de carga.....	57
2.7.8.3. Variables de la mezcla .....	58
2.7.8.4. Variables de carga y medio ambiente .....	58
2.8. Métodos de ensayo a la fatiga .....	59
2.8.1. Flexión simple.....	59
2.8.2. Flexión soportada.....	59
2.8.3. Axial directa .....	59
2.8.4. Triaxial .....	59
2.8.5. Ensayos de fractura .....	59
2.8.6. Wheel –Tracking test .....	59
2.8.7. Diametral.....	60
2.8.8. Ensayo de tracción indirecta .....	60
2.9. Diseño Marshall .....	64

### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS, CÁLCULOS Y DISEÑO**

	<b>Página</b>
3.1. Introducción .....	66
3.2. Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse .....	66
3.2.1. Ubicación y coordenadas del agregado pétreo.....	66
3.2.2. Ubicación del cemento asfáltico .....	67
3.3. Ensayos de caracterización de los agregados.....	67
3.3.1. Resumen de las características de los agregados a utilizar .....	67
3.4. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico .....	67
3.4.1. Resumen de las características del cemento asfáltico a utilizar .....	67
3.5. Diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	68

3.5.1. Combinación de agregados .....	68
3.5.2. Dosificación para la elaboración de briquetas Superpave.....	70
3.5.3. Elaboración de briquetas .....	70
3.5.3.1. Preparación de la mezcla.....	70
3.5.3.2. Compactación de la muestra .....	71
3.5.4. Relevamiento de información de las briquetas realizadas .....	72
3.5.4.1. Alturas y diámetros de las briquetas .....	72
3.5.4.2. Pesos de las briquetas secas .....	73
3.5.4.3. Peso de la briqueta en el aire saturada superficialmente S.S.S .....	73
3.5.4.4. Peso de la briqueta sumergida.....	74
3.5.5. Proceso de cálculo para las briquetas compactadas .....	74
3.5.5.1. Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas.....	74
3.5.5.2. Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas .....	75
3.5.5.3. Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas (Va).....	76
3.5.5.4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) .....	77
3.5.5.5. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral (RBV) .....	78
3.5.5.6. Fatiga.....	78
3.6. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla con granulometría Superpave .....	78
3.7. Diseño de la mezcla asfáltica densa .....	83
3.7.1. Combinación de agregados pétreos mezcla asfáltica densa .....	83
3.7.2. Dosificación para la elaboración de briquetas convencionales.....	84
3.7.3. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla densa convencional.....	85
3.8. Tratamiento estadístico de los resultados.....	89

3.9. Justificación del ensayo de la tracción indirecta para la determinación de la fatiga.	96
3.10. Precios unitarios de la mezcla asfáltica Superpave y una mezcla asfáltica densa ..	98
3.10.1. Análisis económico .....	100

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página.</b>
4.1. Conclusiones .....	102
4.2. Recomendaciones.....	103

### **BIBLIOGRAFÍA**

#### **ANEXOS**

- ANEXO 1. Caracterización de los agregados
- ANEXO 2. Caracterización del cemento asfáltico
- ANEXO 3. Diseño de la mezcla asfáltica porosa
- ANEXO 4. Precios unitarios
- ANEXO 5. Fotografías

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página.</b>
Tabla 1. Nuevos ensayos Superpave para el ligante asfáltico.....	16
Tabla 2. Niveles de diseño de mezclas Superpave.....	22
Tabla 3. Requerimiento Superpave para la angularidad del agregado fino .....	24
Tabla 4. Requerimiento Superpave para la angularidad del agregado fino .....	26
Tabla 5. Requerimiento Superpave para las partículas planas y alargadas.....	27
Tabla 6. Requerimiento Superpave para el contenido de arcilla (E.A).....	28
Tabla 7. Especificaciones Superpave para los agregados .....	28
Tabla 8. Graduaciones para mezclas Superpave .....	34
Tabla 9. Distintos tipos de requerimientos para granulometrías Superpave.....	35
Tabla 10. Criterios para VAM .....	36
Tabla 11. Criterios para VFA.....	37
Tabla 12. Coeficientes de regresión de la ecuación .....	53
Tabla 13. Deformaciones correspondientes a los promedios y percentiles 15 .....	55
Tabla 14. Resumen de las características de los ensayos a la fatiga .....	62
Tabla 15. Tipos de patrones de carga.....	63
Tabla 16. Especificaciones del diseño Marshall .....	64
Tabla 17. Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral.....	65
Tabla 18. Resumen de resultados de las características de los agregados .....	67
Tabla 19. Resumen de resultado de las características del cemento asfáltico .....	67
Tabla 20. Combinación de agregados pétreos Superpave.....	69
Tabla 21. Dosificación Superpave .....	70
Tabla 22. Alturas y diámetros de las briquetas .....	72
Tabla 23. Pesos de las briquetas.....	73
Tabla 24. Pesos de briquetas en el aire saturada superficialmente seca.....	73

Tabla 25. Pesos de briquetas sumergidas .....	74
Tabla 26. Resultados de gravedad especifica bulk.....	75
Tabla 27. Resumen de resultado de ensayos realizados a las briquetas .....	78
Tabla 28. Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfáltico .....	82
Tabla 29. Combinación de agregados pétreos mezcla asfáltica densa.....	83
Tabla 30. Dosificación mezcla densa.....	84
Tabla 31. Resumen de resultado de ensayos realizados a las briquetas.....	85
Tabla 32. Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfaltico .....	89
Tabla 33. Desviación estándar de resultados para el diseño .....	90
Tabla 34. Tratamiento estadístico para el diseño de una mezcla asfáltica Superpave .....	92
Tabla 35. Dosificación para la mezcla asfáltica Superpave .....	98
Tabla 36. Dosificación de la mezcla asfáltica Superpave para un metro cubico .....	99
Tabla 37. Dosificación de la mezcla asfáltica densa.....	99
Tabla 38. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica Superpave .....	99
Tabla 39. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica densa .....	100

## ÍNDICE DE IMÁGENES

	<b>Página.</b>
Imagen 1. Ubicación planta chancadora de Charajas.....	66
Imagen 2. Mezclado de los agregados con el cemento asfáltico.....	71
Imagen 3. Compactación de la muestra .....	71
Imagen 4. Medición de alturas y diámetros de briquetas.....	72
Imagen 5. Pesos de las briquetas.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página.</b>
Figura 1. Poros permeables en una partícula de agregado .....	11
Figura 2. Ilustración del volumen $V_{se}$ , de volumen de sólidos más volumen de los poros no llenos de asfalto .....	12
Figura 3. Comportamiento visco-elástico del asfalto.....	15
Figura 4. Ensayo para la determinación de la angularidad del agregado fino .....	25
Figura 5. Representación de granulometría según FHWA .....	30
Figura 6. Ilustración de cómo se grafican las abscisas.....	31
Figura 7. Gradación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm .....	32
Figura 8. Límites para las granulometrías Superpave .....	34
Figura 9. Diagrama de fases.....	37
Figura 10. Diagrama de fases (volúmenes y masas considerados en los análisis volumétricos).....	38
Figura 11. Curva típica de VAM contra contenido de asfalto .....	40
Figura 12. Evaluación de la curva de VAM.....	41
Figura 13. Evaluación de la curva de VAM.....	41
Figura 14. Diagrama de fases para $G_{se}$ .....	43
Figura 15. Diagrama de fases para $G_{em}$ .....	45
Figura 16. Diagrama de fases para $G_{eb}$ .....	46
Figura 17. Evaluación de la curva de VAM.....	47
Figura 18. Efecto del nivel de compactación en los vacíos de aire.....	47
Figura 19. Representación esquemática del comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas con distintos modos de carga .....	50
Figura 20. Curva de vida de fatiga relativa contra porcentaje de vacíos de aire.....	51



Figura 21. Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos a) bajo deformación controlada y b) bajo esfuerzo controlado .....	53
Figura 22. Relaciones $N_f$ vs $\epsilon$ correspondientes a promedios y percentiles 15 .....	55
Figura 23. Distribución de esfuerzos durante ensayo de tracción indirecta.....	61
Figura 24. Configuración de la carga para ensayo de tracción indirecta .....	64

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	<b>Página</b>
Gráfica 1. Curva granulométrica combinada Superpave .....	69
Gráfica 2. Densidad real de la mezcla asfáltica Superpave .....	79
Gráfica 3. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica Superpave .....	79
Gráfica 4. Porcentajes de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica Superpave .....	80
Gráfica 5. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral en la mezcla asfáltica Superpave .....	80
Gráfica 6. Fatiga de la mezcla asfáltica Superpave .....	81
Gráfica 7. Fatiga .....	82
Gráfica 8. Curva granulométrica combinada Marshall .....	84
Gráfica 9. Densidad real de la mezcla asfáltica densa .....	85
Gráfica 10. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica densa .....	86
Gráfica 11. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica densa .....	86
Gráfica 12. Porcentajes de vacíos de la llenante mineral de la mezcla asfáltica densa .....	87
Gráfica 13. Fatiga de la mezcla asfáltica densa .....	87
Gráfica 14. Fatiga mezcla densa.....	88
Gráfica 15. Densidad real para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	93
Gráfica 16. Porcentaje de vacíos de la mezcla para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	93
Gráfica 17. Porcentaje de vacíos del agregado mineral para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	94

Gráfica 18. Porcentaje de vacíos de la llenante mineral para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	94
Gráfica 19. Fatiga para el diseño de la mezcla asfáltica Superpave .....	95
Gráfica 20. Fatiga de las dos mezclas asfálticas con su porcentaje óptimo de cemento asfaltico .....	96
Gráfica 21. Fatiga de las dos mezclas asfálticas con su porcentaje óptimo de cemento asfaltico y numero de repeticiones .....	97
Gráfica 22. Análisis económico de una mezcla asfáltica Superpave y una densa convencional.....	101