

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



**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA POROSIDAD EN LA ESTABILIDAD  
MARSHALL, INCORPORANDO CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS A LA  
MEZCLA ASFÁLTICA POROSA”**

**Por:**

**JHONER MARTIN JIMENEZ ALTAMIRANO**

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 I 2019**

**TARIJA - BOLIVIA**

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

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA POROSIDAD EN LA ESTABILIDAD  
MARSHALL, INCORPORANDO CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS A LA  
MEZCLA ASFÁLTICA POROSA”**

**Por:**

**JHONER MARTIN JIMENEZ ALTAMIRANO**

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.

**Julio de 2019**

**Tarija - Bolivia**

.....  
V°B° Ing. Luis Alberto Yurquina Flores

**DOCENTE DE LA MATERIA CIV - 502**

.....  
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**

.....  
Ing. Marcelo Pacheco Núñez

.....  
Ing. Laura Karina Soto Salgado

.....  
Ing. Moisés Díaz Ayarde

El docente y tribunal evaluador del Proyecto de Ingeniería Civil no se solidariza con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleados en la elaboración del presente trabajo, siendo los mismos únicamente responsabilidad del autor.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a Dios por darme salud, sabiduría y a mis padres Alberto Jimenez Borja y Justina Altamirano Alvarado, a mi hermano y hermanas, por brindarme su apoyo y amor incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Dios, tu amor y tu bondad no tienen fin, cuando me caía tú me levantabas, me permitías sonreír ante mis fracasos y logros que son resultado de tu ayuda.

A mi padre Alberto Jimenez Borja por ser un ejemplo, un pilar fundamental para formarme y estar siempre apoyándome para que pueda culminar esta etapa de mi vida.

A mi madre Justina Altamirano Alvarado quien con su amor incondicional, sus palabras de aliento no me dejaba decaer para que siga adelante y pueda cumplir con mis sueños.

A mi hermano y hermanas por brindarme sus palabras de aliento durante todos estos años de mi formación.

A todos los docentes que me brindaron sus conocimientos durante mi formación.

**PENSAMIENTO**

La lógica te llevará desde A hasta B. La imaginación te llevará a todas partes.

**Albert Einstein**

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

### CAPÍTULO I

#### DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

	<b>Pág.</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA .....	3
1.4. PROBLEMA .....	3
1.5. OBJETIVOS.....	3
1.5.1. Objetivo general .....	3
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. HIPÓTESIS .....	4
1.6.1. Identificación de variables .....	4
1.7. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.8. PROCEDIMIENTO SEGÚN PERSPECTIVA .....	5
1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	6

### CAPÍTULO II

#### FUNDAMENTO TEÓRICO

	<b>Pág.</b>
2.1. MARCOTEÓRICO .....	8
2.1.1. Pavimento flexible.....	8
2.1.2. Estructuras de un pavimento flexible .....	9
2.1.2.1. Capa de base asfáltica .....	9
2.1.2.2. Capa asfáltica intermedia o binder.....	9

2.1.2.3.	Capa de rodadura o carpeta .....	9
2.1.2.4.	Base granular.....	9
2.1.2.5.	Subbase granular .....	9
2.1.2.6.	Subrasante granular.....	9
2.1.2.7.	Secciones típicas de pavimentos flexibles .....	10
2.1.3.	Mezclas porosas o drenantes .....	11
2.1.3.1.	Especificación granulométrica para mezclas porosas .....	12
2.1.3.2.	Ventajas y desventajas de las mezclas porosas .....	14
2.1.4.	Características de los materiales a utilizar .....	16
2.1.4.1.	Características principales de los agregados pétreos para pavimentos .....	16
2.1.4.2.	El asfalto .....	18
2.1.4.3.	Caucho .....	20
2.1.5.	Proceso metodológico para la fabricación del polvo de caucho reciclado en masa .....	21
2.1.5.1.	Tratamiento mecánico previo (troceado) .....	21
2.1.5.2.	Trituración ambiental.....	22
2.1.5.3.	Trituración criogénica.....	23
2.1.6.	Técnicas de incorporación en mezclas asfálticas .....	24
2.1.7.	Métodos de adición de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en las mezclas asfálticas .....	24
2.1.7.1.	Proceso por vía húmeda .....	24
2.1.7.2.	Proceso por vía seca.....	27

2.1.8.	Proceso químico - mecánico de la mezcla asfáltica porosa al incorporar el caucho reciclado .....	30
2.1.9.	Especificaciones generales para el diseño de las mezclas asfálticas porosas.....	33
2.1.10.	Especificaciones generales para la caracterización de los materiales .....	35
2.1.10.1.	Caracterización del cemento asfáltico.....	35
2.1.10.2.	Caracterización de los agregados pétreos .....	36
2.2.	MARCO REFERENCIAL.....	37
2.3.	MARCO NORMATIVO .....	38
2.4.	ANÁLISIS Y TENDENCIA .....	39

### **CAPÍTULO III**

#### **RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN**

	<b>Pág.</b>	
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	40
3.2.	UBICACIÓN DE LA FUENTE DE LOS MATERIALES A UTILIZARSE .....	40
3.2.1.	Ubicación y coordenadas del agregado pétreo.....	40
3.2.2.	Ubicación del cemento asfáltico .....	41
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	41
3.3.1.	Población.....	41
3.3.2.	Muestra.....	41
3.3.3.	Tamaño de muestra. ....	42
3.4.	CRITERIOS DE SELECCIÓN, USO Y APLICACIÓN.....	43

3.4.1.	Criterios de selección de agregados pétreos.....	43
3.4.2.	Criterios de selección del cemento asfáltico .....	44
3.4.3.	Criterios de selección del grano de caucho reciclado .....	44
3.4.4.	Criterios de la variación de porcentaje del grano de caucho reciclado .....	44
3.5.	CRITERIOS PARA EL NÚMERO DE ENSAYOS.....	44
3.5.1.	Criterio para el número de ensayos para el agregado pétreo.....	44
3.5.2.	Criterios para el número de ensayos para el cemento asfáltico.....	45
3.6.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO Y EL FILLER.....	46
3.6.1.	Granulometría de los agregados grueso y fino.....	46
3.6.2.	Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados .....	53
3.6.2.1.	Índice de aplanamiento de los agregados.....	54
3.6.2.2.	Índice de alargamiento de los agregados .....	55
3.6.3.	Porcentajes de caras fracturadas en los agregados .....	57
3.6.4.	Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles.....	58
3.6.5.	Peso específico del agregado fino .....	60
3.6.6.	Peso específico del agregado grueso .....	62
3.6.7.	Equivalente de arena .....	64
3.6.8.	Peso específico del filler .....	65
3.6.9.	Resumen de las características de los agregados a utilizar .....	67
3.7.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN AL CEMENTO ASFÁLTICO.....	67
3.7.1.	Penetración.....	67

3.7.2.	Punto de inflamación.....	68
3.7.3.	Punto de ablandamiento .....	69
3.7.4.	Ductilidad.....	70
3.7.5.	Peso específico.....	71
3.7.6.	Resumen de las características del cemento asfáltico a utilizar .....	73
3.8.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTA.....	73
3.8.1.	Granulometría.....	73
3.8.2.	Peso específico.....	76

## **CAPÍTULO IV**

### **APLICACIÓN, CÁLCULO Y DISEÑO**

	<b>Pág.</b>	
4.1.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POROSAS.....	78
4.2.	RESUMEN DE RESULTADOS DEL RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN .....	78
4.3.	CRITERIO Y SELECCIÓN PARA EL NÚMERO DE BRIQUETAS .....	79
4.4.	COMBINACIÓN DE AGREGADOS .....	80
4.5.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA UNA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CONVENCIONAL .....	82
4.5.1.	Dosificación para la elaboración de briquetas convencionales .....	82
4.5.2.	Elaboración de briquetas .....	83
4.5.2.1.	Preparación de la mezcla.....	83

4.5.2.2.	Compactación de la muestra .....	84
4.5.3.	Relevamiento de información de las briquetas realizadas .....	85
4.5.3.1.	Alturas y diámetros de las briquetas .....	85
4.5.3.2.	Pesos de las briquetas.....	87
4.5.4.	Proceso de cálculo para las briquetas compactadas .....	87
4.5.4.1.	Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas .....	88
4.5.4.2.	Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas .....	90
4.5.4.3.	Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas .....	91
4.5.4.4.	Permeabilidad de las briquetas compactadas .....	91
4.5.4.5.	Cántabro seco de las briquetas compactadas .....	92
4.5.4.6.	Cántabro húmedo de las briquetas compactadas.....	93
4.5.4.7.	Estabilidad y fluencia.....	94
4.5.5.	Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico.....	97
4.6.	PROCEDIMIENTO DE LA INCORPORACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO A LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA .....	101
4.7.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO EN RELACIÓN AL PORCENTAJE DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO .....	102
4.7.1.	Dosificación para la elaboración de briquetas con 0.50 % de GCR.....	102

4.7.2.	Elaboración de briquetas .....	102
4.7.3.	Relevamiento de información de las briquetas realizadas .....	103
4.7.3.1.	Alturas y diámetros de las briquetas .....	103
4.7.3.2.	Pesos de las briquetas.....	103
4.7.4.	Proceso de cálculo para las briquetas compactadas .....	103
4.7.4.1.	Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas .....	104
4.7.4.2.	Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas .....	104
4.7.4.3.	Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas .....	104
4.7.4.4.	Permeabilidad de las briquetas compactadas .....	104
4.7.4.5.	Estabilidad y fluencia de las briquetas compactadas .....	105
4.7.5.	Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico en relación al porcentaje de grano de caucho reciclado .....	105
4.8.	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS POR PROCESO DE VÍA SECA .....	112
4.9.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS .....	117
4.10.	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	123
4.11.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADITIVO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA.....	126

4.12.	PRECIOS UNITARIOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) POR VÍA SECA.....	127
4.12.1.	Análisis económico .....	130

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Pág.</b>	
5.1.	CONCLUSIONES .....	132
5.2.	RECOMENDACIONES .....	134

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2. 1. Estructura de un pavimento flexible .....	8
Figura 2. 2. Estructura de pavimento para tráfico ligero.....	10
Figura 2. 3. Estructura de pavimento para tráfico medio .....	10
Figura 2. 4. Estructura de pavimento para tráfico pesado .....	11
Figura 2. 5. Mezcla asfáltica porosa.....	12
Figura 2. 6. Franja granulométrica para mezclas porosas o drenantes.....	13
Figura 2. 7. Proyecciones de agua.....	14
Figura 2. 8. Hidroplaneo .....	15
Figura 2. 9. Macrotextura de pavimento .....	15
Figura 2. 10. Gradación de los agregados.....	17
Figura 2. 11. Adhesión y cohesión.....	19
Figura 2. 12. Trituración mecánica por acción de cuchillas .....	22
Figura 2. 13. Polvo de caucho de tamaño menor a 2mm (izq.) y 1mm (der.).....	23
Figura 2. 14. Proceso por vía húmedo.....	26
Figura 2. 15. Proceso por vía seca.....	28
Figura 2. 16. Efecto del aditivo.....	30

## ÍNDICE DE IMÁGENES

	<b>Pág.</b>
Imagen 2. 1. Grano de caucho reciclado de llantas .....	20
Imagen 3. 1. Ubicación, planta chancadora de Charajas .....	41
Imagen 3. 2. Ensayo de granulometría del agregado grueso y fino .....	47
Imagen 3. 3. Ensayo de aplanamiento de los agregados .....	54
Imagen 3. 4. Ensayo de índice de aplanamiento de agregados .....	55
Imagen 3. 5. Ensayo de caras fracturadas de los agregados .....	57
Imagen 3. 6. Ensayo de abrasión de agregado grueso .....	59
Imagen 3. 7. Ensayo de peso específico del agregado fino .....	60
Imagen 3. 8. Ensayo de peso específico del agregado grueso .....	62
Imagen 3. 9. Ensayo de equivalente de arena.....	65
Imagen 3. 10. Ensayo peso específico del filler .....	66
Imagen 3. 11. Ensayo de penetración del cemento asfáltico .....	68
Imagen 3. 12. Ensayo de punto de inflamación del cemento .....	69
Imagen 3. 13. Ensayo de punto de ablandamiento del cemento asfáltico .....	70
Imagen 3. 14. Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico.....	71
Imagen 3. 15. Ensayo de peso específico del cemento.....	72
Imagen 3. 16. Granulometría del grano de caucho reciclado .....	74
Imagen 3. 17. Ensayo peso específico del caucho reciclado .....	76
Imagen 4. 1. Dosificación para las mezclas asfálticas porosas .....	83
Imagen 4. 2. Mezclado de los agregados con el cemento asfáltico .....	84
Imagen 4. 3. Compactación de la muestra.....	85
Imagen 4. 4. Medición de alturas y diámetros de briquetas .....	86

Imagen 4. 5. Pesos de las briquetas .....	87
Imagen 4. 6. Medición de la permeabilidad .....	92
Imagen 4. 7. Ensayo de cántabro seco y húmedo .....	93
Imagen 4. 8. Ensayo de estabilidad y fluencia .....	94
Imagen 4. 9. Mezcla con el porcentaje de GCR .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 2. 1. Contenido de vacíos aceptado en algunos países.....	12
Tabla 2. 2. Franja granulométrica para mezcla porosa o drenante .....	13
Tabla 2. 3. Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas Asfálticas .....	24
Tabla 2. 4. Criterios específicos para el ensayo Marshall.....	34
Tabla 2. 5. Especificaciones para el cemento asfáltico.....	35
Tabla 2. 6. Especificaciones para los agregados pétreos .....	36
Tabla 2. 7. Normas aplicadas para la caracterización del agregado, cemento asfáltico y mezclas asfálticas.....	38
Tabla 3. 1. Planilla de muestreo.....	43
Tabla 3. 2. Ensayos a realizar en los agregados pétreos y el filler.....	45
Tabla 3. 3. Ensayos a realizar en el cemento asfáltico.....	46
Tabla 3. 4. Datos de las granulometrías de la grava de 3/4" .....	47
Tabla 3. 5. Datos de las granulometrías de la grava de 3/8" .....	48
Tabla 3. 6. Datos de las granulometrías de arena .....	48
Tabla 3. 7. Datos de la granulometría del filler .....	49
Tabla 3. 8. Resultado de la granulometría - ensayo N° 1 .....	49
Tabla 3. 9. Resultado de la granulometría - ensayo N° 2 .....	50
Tabla 3. 10. Resultado de la granulometría - ensayo N° 3 .....	51
Tabla 3. 11. Resultado de la granulometría del filler.....	52
Tabla 3. 12. Datos del ensayo de índice de aplanamiento .....	54
Tabla 3. 13. Resultados del ensayo de índice de aplanamiento .....	55



Tabla 3. 37. Datos de la granulometría del grano de caucho reciclado .....	74
Tabla 3. 38. Resultado de la granulometría del grano de caucho reciclado.....	75
Tabla 3. 39. Datos del ensayo de peso específico del caucho.....	76
Tabla 3. 40. Resultados del ensayo de peso específico del caucho .....	77
Tabla 4. 1. Resumen de resultados de las características de los agregados .....	78
Tabla 4. 2. Resumen de resultados de las características del cemento asfáltico.....	79
Tabla 4. 3. Cantidad de briquetas para el contenido óptimo de C.A .....	79
Tabla 4. 4. Total de briquetas a realizar.....	80
Tabla 4. 5. Combinación de los agregados pétreos.....	81
Tabla 4. 6. Dosificación para la elaboración de briquetas .....	82
Tabla 4. 7. Alturas y diámetros de las briquetas .....	86
Tabla 4. 8. Pesos de las briquetas .....	87
Tabla 4. 9. Resultados de gravedad específica bulk .....	89
Tabla 4. 10. Resultados de porcentaje de vacíos .....	91
Tabla 4. 11. Resultados de permeabilidad .....	92
Tabla 4. 12. Resultados de cántabro seco .....	93
Tabla 4. 13. Resultados de cántabro húmedo .....	94
Tabla 4. 14. Resultados del ensayo Marshall.....	95
Tabla 4. 15. Transformación de la estabilidad en lb .....	95
Tabla 4. 16. Factor de corrección por altura, para la estabilidad Marshall.....	96
Tabla 4. 17. Factor de corrección por altura de briquetas.....	96
Tabla 4. 18. Estabilidad corregida .....	97
Tabla 4. 19. Estabilidad y fluencia real.....	97
Tabla 4. 20. Resumen de resultados de ensayos realizados a las briquetas .....	97

Tabla 4. 21. Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfáltico.....	101
Tabla 4. 22. Dosificación para la elaboración de briquetas con 0.5 % de GCR .....	102
Tabla 4. 23. Alturas y diámetros de las briquetas con 0.50 % de GCR.....	103
Tabla 4. 24. Pesos de las briquetas con 0.50 % de GCR .....	103
Tabla 4. 25. Gravedad específica bulk de las briquetas con 0.50 % de GCR.....	104
Tabla 4. 26. Porcentaje de vacíos con 0.50 % de GCR .....	104
Tabla 4. 27. Permeabilidad de las briquetas con 0.50 % de GCR .....	104
Tabla 4. 28. Estabilidad y fluencia real de briquetas con 0.50 % de GCR .....	105
Tabla 4. 29. Resumen de resultados de ensayos realizados con 0.50 % de GCR.....	105
Tabla 4. 30. Resultados del porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado .....	108
Tabla 4. 31. Porcentajes óptimos de cementos asfálticos en relación al GCR .....	109
Tabla 4. 32. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica porosa, con GCR.....	113
Tabla 4. 33. Resultados de cántabro para el diseño de la mezcla asfáltica porosa, con GCR.....	116
Tabla 4. 34. Desviación estándar de resultados para el diseño .....	118
Tabla 4. 35. Tratamiento estadístico para el diseño de una mezcla asfáltica porosa con GCR.....	120
Tabla 4. 36. Tipos de relación en función a la hipótesis.....	124
Tabla 4. 37. Dosificación para la mezcla asfáltica porosa convencional.....	127
Tabla 4. 38. Dosificación de la mezcla asfáltica porosa para un metro cúbico .....	128
Tabla 4. 39. Dosificación de la mezcla asfáltica porosa modificada .....	128
Tabla 4. 40. Dosificación de la mezcla asfáltica porosa modificada .....	128
Tabla 4. 41. Costo de producción del GCR .....	129

Tabla 4. 42. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica  
porosa convencional ..... 129

Tabla 4. 43. Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica  
porosa con GCR..... 130

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 3. 1. Curva granulométrica - ensayo N° 1 .....	50
Gráfica 3. 2. Curva granulométrica - ensayo N° 2 .....	51
Gráfica 3. 3. Curva granulométrica - ensayo N° 3 .....	52
Gráfica 3. 4. Curva granulométrica del filler .....	53
Gráfica 3. 5. Curva granulométrica del grano de caucho reciclado .....	75
Gráfica 4. 1. Granulometría formada para la mezcla porosa.....	81
Gráfica 4. 2. Porcentajes de vacíos de la mezcla asfáltica porosa.....	98
Gráfica 4. 3. Desgaste cántabro seco de la mezcla asfáltica porosa.....	98
Gráfica 4. 4. Desgaste cántabro húmedo de la mezcla asfáltica porosa .....	99
Gráfica 4. 5. Permeabilidad de la mezcla asfáltica porosa .....	99
Gráfica 4. 6. Estabilidad de la mezcla asfáltica porosa .....	100
Gráfica 4. 7. Fluencia de la mezcla asfáltica porosa .....	100
Gráfica 4. 8. Densidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico .....	106
Gráfica 4. 9. Porcentaje de vacíos Vs. porcentaje de cemento asfáltico .....	106
Gráfica 4. 10. Estabilidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico .....	107
Gráfica 4. 11. Fluencia Vs. porcentaje de cemento asfáltico .....	107
Gráfica 4. 12. Permeabilidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico .....	108
Gráfica 4. 13. Densidades con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado .....	109
Gráfica 4. 14. Vacíos con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado .....	110

Gráfica 4. 15. Estabilidad con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado .....	110
Gráfica 4. 16. Fluencia con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado .....	111
Gráfica 4. 17. Permeabilidad con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado .....	111
Gráfica 4. 18. Comparación de porcentaje de vacíos .....	114
Gráfica 4. 19. Comparación de estabilidad .....	114
Gráfica 4. 20. Comparación de flujo .....	115
Gráfica 4. 21. Comparación de permeabilidad.....	115
Gráfica 4. 22. Desgaste de cántabro seco con GCR .....	116
Gráfica 4. 23. Desgaste de cántabro húmedo con GCR .....	117
Gráfica 4. 24. Densidad real para el diseño de la mezcla asfáltica porosa con GCR .....	121
Gráfica 4. 25. Porcentaje de vacíos para el diseño de la mezcla asfáltica porosa con GCR .....	121
Gráfica 4. 26. Estabilidad para el diseño de la mezcla porosa con GCR .....	122
Gráfica 4. 27. Fluencia para el diseño de la mezcla porosa con GCR .....	122
Gráfica 4. 28. Permeabilidad para el diseño de la mezcla porosa con GCR .....	123
Gráfica 4. 29. Tipos de regiones según el tipo de relación en función a la hipótesis.....	124
Gráfica 4. 30. Región 3, cola a la izquierda .....	125
Gráfica 4. 31. Región 3, con valores calculados .....	126

Gráfica 4. 32. Análisis económico de una mezcla asfáltica convencional y  
una modificada ..... 131

## ÍNDICE DE ESQUEMAS

	<b>Pág.</b>
Esquema 1.1. Procedimiento según perspectiva .....	5
Esquema 2. 1. Etapas para la obtención del polvo de caucho.....	21

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

ANEXO 1. Caracterización de los agregados

ANEXO 2. Caracterización del cemento asfáltico

ANEXO 3. Caracterización del grano de caucho reciclado

ANEXO 4. Diseño de la mezcla asfáltica porosa

ANEXO 5. Precios unitarios