



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GERENCIA DE**  
**CONSTRUCCIONES**

**Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas  
de caucho triturado.**

**Trabajo de grado previo a la obtención de título de:**  
**INGENIERO CIVIL CON MENCION EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

**Autores:**

**PEDRO JOSE ARCOS SALAMEA**  
**GABRIEL EDUARDO MONTALVAN VIVAR**

**Director:**

**ING. PABLO ANDRES CARVALLO CORRAL**

**CUENCA-ECUADOR**

**2022**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado a toda mi familia, en especial a mis padres por todo el apoyo brindado durante todo este proceso, por los sacrificios que han hecho por darme siempre la mejor educación y los consejos tan valiosos que han servido para cumplir con este objetivo. No existen suficientes palabras para expresar mi agradecimiento; por todo esto y más este trabajo está dedicado a ustedes.  
(Gabriel Eduardo Montalván Vivar)

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su apoyo, por nunca permitir que me dé por vencido, por sus valores, por su esfuerzo y sacrificio gracias ellos soy la persona que soy, a mis hermanos que me han impulsado a ser cada día mejor y así ser un ejemplo para ellos, a mi esposa que me acompaña en cada paso de este trayecto y así a tantas personas que son importantes para mí y han aportado para que hoy pueda alcanzar este sueño. Va para todos y cada uno de ustedes.

(Pedro José)

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos en primer lugar agradecer a Dios por permitirnos estar aquí para cumplir esta meta.

Al ingeniero Pablo Carvallo quien con su conocimiento nos supo guiar en la realización del proyecto que estamos concluyendo.

Queremos agradecer al personal que labora en el laboratorio de suelos de la Universidad del Azuay. Ramiro Molina, Jorge León e ingeniero Rolando Armas. Quienes en base a su conocimiento y experiencia supieron acompañarnos en la realización de cada uno de los ensayos necesarios para culminar con el proyecto.

Agradecer a la Universidad del Azuay que nos ha podido dar el equipo adecuado para realizar el proyecto.

Y por último agradecer a amigos y compañero que siempre fueron un aporte fundamental a lo largo de este trayecto.

## DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POROSO CON INCLUSIÓN DE PARTÍCULAS DE CAUCHO TRITURADO.

### RESUMEN

La investigación busca demostrar que el material de la zona funciona efectivamente para ejecutar una mezcla modificada. Usando límites granulométricos indicados en la norma INVIAS 2012, se espera obtener el porcentaje de vacíos para mezcla drenante. Se realizarán dos tipos de mezcla, sin incorporación de neumático y con 1% de neumático. La mezcla se compactará a 25 y 50 golpes. Se trabajará con porcentajes de asfalto desde 3.5% hasta 5% en intervalos de 0.5%, en grupos de tres briquetas por porcentaje asfáltico, realizando 48 briquetas. Se obtuvo la granulometría indicada en la norma para mezcla porosa, respecto a la sobre capa los diseños propuestos no obtuvieron los vacíos para mezcla drenante, se realizó una dosificación extra, compuesta por 5% de neumático y 25 golpes de compactación, cumpliendo los vacíos para mezcla drenante con un 20.5% pero las características de estabilidad y flujo no fueron las mínimas indicadas en la NEVI 2012.

**Palabras claves:** Asfalto, neumático, drenante, mezcla, briquetas.



Pedro José Arcos Salamea

Autor



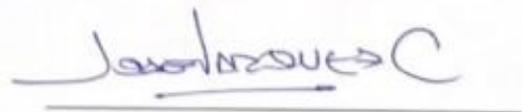
Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral

Director de Trabajo de titulación



Gabriel Eduardo Montalván Vivar

Autor



Ing. José Fernando Vásquez Calero

Director de carrera

## DESIGN OF POROUS FLEXIBLE PAVEMENT WITH THE INCLUSION OF CRUSHED RUBBER PARTICLES.

### ABSTRACT

The research sought to demonstrate that the material of the area works effectively to execute a modified mix. Using granulometric limits indicated in the INVIAS 2012 standard, it was expected to obtain the percentage of voids for the drainage mix. Two types of mixes were made, without the incorporation of a tire and with 1% of a tire. The mix was compacted at 25 and 50 blows. The asphalt percentages ranged from 3.5% to 5% in 0.5% intervals, in groups of three briquettes per asphalt percentage, making 48 briquettes. The granulometry indicated in the standard for the porous mix was obtained, regarding the overlay, the proposed design did not obtain the voids for draining the mix, an extra dosage was made, composed of 5% of a tire and 25 compaction blows, fulfilling the voids for draining mix with 20.5% but the stability and flow characteristics were not the minimum indicated in the NEVI 2012.

**Keywords:** Asphalt, tire, draining, mix, briquettes.



Pedro José Arcos Salamea

Author



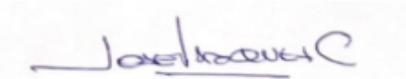
Gabriel Eduardo Montalván Vivar

Author



Ing. Pablo Andrés Carvallo Corral

Director of the Degree Project



Ing. José Fernando Vázquez Calero

School Director

Translated by



---

Pedro José Arcos Salamea & Gabriel Eduardo Montalván Vivar

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRAC.....	VI
1    CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    ASPECTOS GENERALES.....	1
1.2    ANTECEDENTES .....	2
1.3    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4    ALCANCE .....	5
1.5    OBJETIVOS.....	5
1.5.1    OBJETIVO GENERAL .....	5
1.5.2    OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	5
1.6    METODOLOGÍA.....	6
1.7    ZONA DE ESTUDIO .....	6
2    CAPITULO 2: MATERIALES Y METODOLOGIA .....	7
2.1    MATERIALES .....	7
2.1.1    Material bituminoso .....	7
2.1.2    Agregado grueso.....	9
2.1.3    Agregado fino.....	9
2.1.4    Neumático triturado .....	9
2.2    PAVIMENTO ASFALTICO POROSO .....	14
2.2.1    Granulometría para pavimento poroso.....	15

2.2.2	Características del agregado .....	15
2.2.3	Ventajas pavimento asfaltico poroso .....	17
2.2.4	Desventajas pavimento asfaltico poroso .....	17
2.2.5	Aplicaciones .....	18
2.3	METODOLOGIA PARA EL DISENO DE LA MEZCLA .....	19
2.3.1	Procedimiento preparación de probetas .....	19
2.3.2	Método Marshall.....	21
2.4	SOBRE CAPA ASFALTICA.....	27
2.4.1	Hidroplaneo o Aquaplaning .....	27
2.4.2	Efecto Spray .....	27
2.5	BASES DE DISEÑO .....	27
3	CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	30
3.1	Materiales para la mezcla porosa asfáltica.....	30
3.1.1	Asfalto.....	30
3.1.2	Agregados.....	30
3.1.3	Ensayos realizados a los agregados .....	30
3.2	Diseño de la curva granulométrica .....	39
3.3	Obtención de polímero reciclado de caucho .....	41
3.4	Diseño de mezcla asfáltica porosa .....	41
3.4.1	Elaboración de briquetas de mezcla asfáltica porosa.....	48
3.4.2	Ensayo de briquetas asfálticas porosa.....	53
3.5	RESULTADOS DE LA INVESTIGACION .....	55
3.5.1	Diseño de mezcla porosa sin polímero .....	55
3.5.2	Curvas de diseño de mezcla asfáltica porosa .....	59
3.5.3	Diseño de mezcla porosa con polímero .....	64

3.5.4	Elaboración de briquetas de mezcla asfáltica porosa con polímero .....	64
3.5.5	Ensayo de briquetas asfálticas porosa con polímero .....	66
3.5.6	Curvas de diseño de mezcla asfáltica porosa con polímero .....	70
3.6	INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS .....	75
3.7	Ensayo de comprobación final.....	76
4	CONCLUSIONES .....	80
5	RECOMENDACIONES.....	82
6	BIBLIOGRAFÍA.....	83
7	ANEXOS .....	87

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1. Especificaciones técnicas del asfalto AC-20 de la empresa ASFALTAR-EP. Fuente: Ingeniero Sergio Ortiz, colaborador de la empresa ASFALTAR EP.....	8
Ilustración 2.2 Incorporación por vía seca. (Ayala & Heredia, 2019) .....	13
Ilustración 2.3. Incorporación por vía húmeda. (Ramirez, Ladino, & Rosas, 2014) .....	14
Ilustración 2.4. Pavimento poroso Universidad Carolina del Norte. Fuente (Green Counsel, 2006) .....	18
Ilustración 2.5. Asfalto poroso Suzhou. Fuente: (Go Green, 2019) .....	19
Ilustración 2.6. Martillo de compactación. (Made-in-China, 2022) .....	20
Ilustración 2.7. Tabla 405.5.4. Fuente: (MOP, 2002). .....	20
Ilustración 2.8. Horno para baño María. (fabiequipos S.A.S., 2022) .....	21
Ilustración 2.9. Equipo Marshall. (Alibaba.com, 2022).....	22
Ilustración 2.10. Comparación de la Estabilidad. (Vega Zurita, 2016).....	28
Ilustración 2.11. Porcentaje de vacíos. (Meneses & Paez, 2017). .....	29
Ilustración 3.1. Mapa ubicación cantera Rookaazul. Fuente: Elaboración propia. ....	30
Ilustración 3.2. Análisis granulométrico. Fuente: Elaboración Propia. ....	31

Ilustración 3.3. Masado de las muestras de material para ensayo de gravedad específica. ....	31
Ilustración 3.4. Masado de la muestra para ensayo de gravedad específica (agregado grueso). Fuente: Elaboración propia.....	32
Ilustración 3.5. Ubicación de cada uno de los tamices. Fuente: Elaboración propia.....	32
Ilustración 3.6. Uso de picnómetro en el ensayo de gravedad específica. ....	35
Ilustración 3.7. Límites curva granulométrica. Fuente: Elaboración propia. ....	39
Ilustración 3.8. Curva granulométrica obtenida. Fuente: Elaboración propia.....	40
Ilustración 3.9. Neumático triturado. Fuente: Elaboración propia. ....	41
Ilustración 3.10. Proceso de mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia. ....	42
Ilustración 3.11. Grupo de briquetas por porcentaje. Fuente: Elaboración propia. ....	43
Ilustración 3.12. Equipo Marshall. Fuente: Elaboración propia. ....	43
Ilustración 3.13. Balanza de precisión. Fuente: Elaboración propia.....	44
Ilustración 3.14. Martillo de compactación. Fuente: Elaboración propia. ....	44
Ilustración 3.15. Pedestal de compactación. Fuente: Elaboración propia. ....	44
Ilustración 3.16. Moldes para realización de briquetas. Fuente: Elaboración propia. ....	45
Ilustración 3.17. Equipo de baño María. Fuente: Elaboración propia. ....	45
Ilustración 3.18. Equipo metálico para la mezcla. Fuente: Elaboración propia. ....	46
Ilustración 3.19. Proceso de unificación de los materiales. Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 3.20. Horno. Fuente: Elaboración propia.....	47
Ilustración 3.21. Mezcla de agregados y asfalto. Fuente: Elaboración propia. ....	47
Ilustración 3.22. Material bituminoso Asfalto. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Ilustración 3.23. Proceso de mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia.....	49
Ilustración 3.24. Asfalto en diferentes porcentajes. Fuente: Elaboración propia. ....	49
Ilustración 3.25. Mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia. ....	50
Ilustración 3.26. Materiales una vez mezclados. Fuente: Elaboración propia. ....	50
Ilustración 3.27. Briqueta realizada luego de la compactación. Fuente: Elaboración propia. ....	51
Ilustración 3.28. Enfriamiento de las briquetas. Fuente: Elaboración propia. ....	51
Ilustración 3.29. Briqueta finalizada. Fuente: Elaboración propia. ....	51
Ilustración 3.30. Masado de la briqueta en distintas condiciones. Fuente: Elaboración propia. ...	52
Ilustración 3.31. Equipo de ensayo Marshall. Fuente: Elaboración propia.....	52
Ilustración 3.32. Ensayo Rice para determinación de vacíos equipo de extracción de aire.....	53

Ilustración 3.33. Ensayo de densidad. Fuente: Elaboración propia. ....	53
Ilustración 3.34. Briquetas en baño María previo al ensayo de flujo y estabilidad. ....	54
Ilustración 3.35. Ensayo de estabilidad y flujo. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Ilustración 3.36. Colocación de agua en el recipiente. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Ilustración 3.37. Maquina extractora de aire. Fuente: Elaboración propia. ....	58
Ilustración 3.38. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). Fuente: Elaboración propia.....	60
Ilustración 3.39. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). ....	60
Ilustración 3.40. Flujo vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). ....	60
Ilustración 3.41. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). ....	61
Ilustración 3.42. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). Fuente: Elaboración propia.....	61
Ilustración 3.43. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). Fuente: Elaboración propia. ....	61
Ilustración 3.44. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). .....	62
Ilustración 3.45. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). ....	62
Ilustración 3.46. Flujo vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). ....	63
Ilustración 3.47. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). ....	63
Ilustración 3.48. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). Fuente: Elaboración propia.....	63
Ilustración 3.49. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes). ....	64
Ilustración 3.50. Asfalto mezclado en caliente con el polímero. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Ilustración 3.51. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes). .....	71
Ilustración 3.52. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes). ....	71
Ilustración 3.53. Flujo vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes). ....	71

Ilustración 3.54. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).	72
Ilustración 3.55. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).	72
Ilustración 3.56. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).	72
Ilustración 3.57. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	73
Ilustración 3.58. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	73
Ilustración 3.59. Flujo vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	74
Ilustración 3.60. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	74
Ilustración 3.61. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	74
Ilustración 3.62. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).	75
Ilustración 3.63. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).	77
Ilustración 3.64. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).	77
Ilustración 3.65. Flujo vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).	78
Ilustración 3.66. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).	78
Ilustración 3.67. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes). Fuente: Elaboración propia.	78
Ilustración 3.68. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes). Fuente: Elaboración propia.	79
Ilustración 7.1. Corrección por volumen de briqueta asfáltica estándar método Marshall.	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Granulometría mezcla porosa. Fuente: (INVIAS Artículo 453, 2012). .....	15
Tabla 2.2. Denominación de los agregados minerales. Fuente: (INVIAS Artículo 453, 2012)....	15
Tabla 2.3. Requisitos de los agregados para mezcla drenante.....	16
Tabla 3.1. Tamizado material 3/4". Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 3.2. Tamizado material 3/8". Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 3.3. Tamizado material fino. Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 3.4. Gravedad específica y densidad aparente agregado fino. Fuente: Elaboración Propia. .....	36
Tabla 3.5. Gravedad específica y densidad aparente material 3/4". Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 3.6. Gravedad específica y densidad aparente material 3/8". Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 3.7. Límites granulométricos para mezclas porosas. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 3.8. Granulometría combinada. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 3.9. Porcentajes para la mezcla porosa. Fuente: Elaboración Propia.....	41
Tabla 3.10. Gramos utilizados de material por cada porcentaje. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Tabla 3.11. Pesos de briquetas con 0% de polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia. ...	55
Tabla 3.12. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta 0% polímero y 50 golpes. ....	55
Tabla 3.13. Pesos de briquetas con 0% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Tabla 3.14. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 0% polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 3.15. Gravedad específica teórica máxima. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 3.16. Resultados para briquetas con 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 3.17. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 3.18. Porcentajes en gramos de cada material. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 3.19. Pesos de briquetas con 1% de polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia. ...	67
Tabla 3.20. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 1% polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.....	67
Tabla 3.21. Pesos de briquetas con 1% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia. ...	68
Tabla 3.22. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 1% polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 3.23. Gravedad específica teórica máxima. Fuente: Elaboración propia.....	70

Tabla 3.24. Resultados briquetas con 50 golpes. Fuente: Elaboración propia. ....	70
Tabla 3.25. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia. ....	73
Tabla 3.26. Porcentajes en gramos de cada material. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 3.27. Pesos de briquetas con 5% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia. ...	76
Tabla 3.28. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia. ....	77
Tabla 3.29. Tabla 404-3.2. (NEVI, 2012). ....	79
Tabla 7.1. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 50 golpes y 1% de polímero. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 7.2. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 50 golpes y 0% de polímero. Fuente: Elaboración propia.....	90
Tabla 7.3. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 1% de polímero. Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 7.4. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 0% de polímero. Fuente: Elaboración propia.....	94
Tabla 7.5. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 5% de polímero. Ensayo de comprobación final. Fuente: Elaboración propia.....	96
Tabla 7.6. Resultados de ensayo RICE. Fuente: Elaboración propia. ....	98

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec 2.1. Gravedad específica. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) .....	22
Ec 2.2. Gravedad específica promedio de agregados. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	23
Ec 2.3. Volumen. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) .....	23
Ec 2.4. Gravedad específica. Fuente: (ASTM D 1188) .....	23
Ec 2.5. RICE. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	24
Ec 2.6. Porcentaje en volumen de agregados. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)	24
Ec 2.7. Porcentaje total de vacíos respecto al volumen de la probeta. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	24
Ec 2.8. Volumen de asfalto. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) .....	25
Ec 2.9. Porcentaje de vacíos en los agregados de la muestra compactada. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) .....	25
Ec 2.10. Volumen efectivo de asfalto en la mezcla compactada. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	25
Ec 2.11. Asfalto efectivo. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	25
Ec 2.12. Asfalto absorbido por el agregado. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) ..	26
Ec 2.13. Gravedad específica efectiva del agregado. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.) .....	26
Ec 2.14. Vacíos rellenos de asfalto. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).....	26

# **1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 ASPECTOS GENERALES**

El asfalto es uno de los materiales utilizados frecuentemente en las obras civiles de vías y carreteras en la ciudad, el país, a lo largo de los años se ha realizado varias investigaciones y estudios para mejorar el comportamiento y la durabilidad del pavimento asfáltico.

Las mezclas de asfalto porosas o también llamadas drenantes son mezclas asfálticas que se usan como carpeta o capa de rodadura, su principal característica es su alto contenido de vacíos que varía entre el 18% al 25% y están interconectados entre sí. Los vacíos permiten el paso del agua superficial a través de la estructura del pavimento facilitando la rápida evacuación hacia abajo y hacia las zonas laterales, mejorando la adherencia entre el neumático de los vehículos y el pavimento ya que se drena el agua superficial (Arce, Elizondo, Jimenez, & Ramirez Castro, 2005).

Las mezclas asfálticas que son modificadas con grano de caucho reciclado de neumáticos, permiten la obtención de pavimentos con mejores respuestas a los cambios térmicos que estos sufren a lo largo de su vida, también aumenta la resistencia a las fisuras provocadas por el efecto de fatiga del mismo y evita el rápido envejecimiento, aumentando así la vida útil del pavimento y disminuyendo los costos de mantenimiento a largo plazo (Campaña, Galeas, & Guerrero, 2015).

Según (Campos Canessa, 2008), este tipo de mezclas ofrecen grandes ventajas con relación a los pavimentos considerados “normales” como pueden ser: eliminación del hidroneo que ocurre cuando la capa de agua que se forma entre el neumático y el pavimento rompe el contacto entre ambos, ocasionando que el conductor pierda el control sobre su vehículo, la reducción del agua superficial durante periodos de lluvia que previene que se produzca el levantamiento como la pulverización del agua por el paso de los vehículos, reducen el ruido al paso de vehículos ya que absorben el sonido que se genera por el roce del neumático y el pavimento.

La principal ventaja que otorga este tipo de capa de rodadura es que no permite que el agua se mantenga acumulada luego de una lluvia de larga duración de con intensidad considerable.

Las desventajas que puede presentar este tipo de mezclas son: la colmatación de poros por acumulación de polvo, arena, materia orgánica u otros, es necesario mencionar que este fenómeno no afecta el funcionamiento como carpeta de rodadura tan solo sus propiedades drenantes. El mayor coste económico de las mezclas también resulta en una desventaja ya que se requiere de

asfaltos modificados y áridos de una calidad superior a lo normal, lo que eleva el costo de construcción, al inicio la capeta será un poco resbalosa por la poca cantidad de árido fino que ayude a la fricción neumático capa de rodadura y también el de mantenimiento de este tipo de obras (Campos Canessa, 2008).

## **1.2 ANTECEDENTES**

Los pavimentos porosos se desarrollan por primera vez en Estados Unidos en 1940 con fin de mejorar la textura de la superficie y evitar el hidropelaje sin considerar las ventajas múltiples que implica este sistema. Más tarde en 1968 en Francia se diseñó estos pavimentos y se comprobó que en un plazo de 10 años la estructura, a pesar de estar colmada de sedimentos, poseía excelente rugosidad y drenaje superficial (IMCYC, 2003).

A la fecha de hoy en Ecuador no existe una Norma que indique las características granulométricas que debe tener una mezcla de estas características, lo que da un indicio de por qué dichas mezclas no se usan en la región.

El correcto porcentaje de vacíos para esta mezcla se logra con una granulometría diferente, la misma que debe tener un alto porcentaje de árido grueso, poco fino y un porcentaje muy pequeño de polvo. En el caso de este proyecto se harán ensayos agregando a la mezcla porcentajes de neumático triturado, el mismo que ayudará como material aglutinante del árido grueso lo que resultará en un porcentaje mayor de vacíos y de esta manera drenar de mejor manera el agua acumulada.

En la ciudad no existen estudios de la aplicación de pavimentos asfálticos porosos con caucho reciclado ya que es una técnica usada hace muy pocos años, además de que se siguen realizando pruebas para encontrar un pavimento asfáltico poroso de buena calidad y actualmente en la ciudad se sigue realizando los pavimentos asfálticos con las técnicas tradicionales.

Según (Rodríguez Hernández, 2008) en los años ochenta en España se desarrolló la primera metodología de diseño y control de pavimentos porosos con la intervención de la Dirección General de Carreteras y empresas privadas de la región y desde entonces se utiliza una capa de rodadura asfáltica drenante con espesores de 3 a 5 cm.

Como ya se ha mencionado en el país no se ha realizado un estudio que guíe en la dosificación de este tipo de mezcla, lo que ha llevado a buscar Normas de otros países en los cuales ya se tiene en cuenta este tipo de pavimento.

El crecimiento diario del parque automotor en el mundo ha provocado la generación de neumáticos usados en grandes cantidades provocando un problema de residuos que no se puede reciclar fácilmente, convirtiéndose en un desecho inservible (Ruiz, 2014).

El caucho reciclado obtenido de neumáticos desechados, puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) o como un modificador del ligante (proceso húmedo). Por otro lado, la utilización del caucho trae beneficios ambientales al valorizar un desecho como son los neumáticos y solucionar el problema de la disposición final de ellos, disminuyendo la contaminación (Ramirez N. , 2006).

Los neumáticos usados una vez cumplida su vida útil son desechados y generan gran contaminación. Los botaderos de la ciudad se han visto colmados ya de este tipo de desechos por lo que siempre se busca darle un uso a este tipo de material. Con las comprobaciones que puedan realizarse en este proyecto se podrá dar un uso más a estos desechos y con ello estaría ayudando al medio ambiente en cierta manera.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que tienen los pavimentos porosos se desarrollara una mezcla con los materiales ya nombrados cumpliendo con las Normas vigentes y de esta manera obtener información necesaria para determinar si una mezcla de este tipo es factible o no.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La zona geográfica en la que se encuentra la ciudad de Cuenca hace que en determinadas épocas del año existan gran cantidad de lluvias. Esto provoca que tanto en su red vial como la estructura vial existan algunas complicaciones como pueden ser: el aumento de la accidentabilidad debido a la acumulación de agua en las vías lo que provoca el llamado hidroplaneo.

Los problemas provocados por el agua son los que se busca resolver en la aplicación de este tipo de pavimentos, estos son: La infiltración del agua a la estructura vial lo que provoca baches en ella, esto obliga a los conductores a realizar maniobras para evitar los baches y de esta manera aumenta el riesgo de accidentes en la red vial. Otro problema es el agua que salpica de los vehículos que van delante, el denominado “efecto spray” producido por el agua pulverizada que sale disparada de las ruedas del vehículo delantero y que provocan una reducción de la visibilidad.

Otro punto en el que se busca aportar es la de dar un uso a los neumáticos que ya han cumplido su vida útil, el material a usarse como polímero y a su vez aglutinante son residuos de neumático triturado, ayudando así al reciclaje en la zona, el cual se ha visto afectado por la falta de espacio que provoca tener demasiada cantidad de neumáticos en los botaderos de la ciudad.

En todo el mundo los neumáticos son parte principal de la economía, debido a que se encuentran en el transporte cotidiano del ser humano como puede ser en autos, motos, buses, etc. Permitiendo la movilización a través de las vías terrestres. Del mismo modo son de los elementos que más se desechan en el mundo. En nuestra ciudad gracias al sistema de limpieza que tenemos aún no se puede observar el complejo tema que es el desechar estos materiales (Castro & Diaz, 2017).

Según la (Dirección de Comunicación Ministerio del Ambiente y Agua, 2021) el país está en busca de métodos y maneras de reciclar los neumáticos una vez cumplida su vida útil. Una de las soluciones que se le ha podido dar es la de triturarlo y usarlo como parte de la capa asfáltica y así ayudar al reciclaje que se produce en cantidades grandes en el caso de este material.

De los datos que se pudieron recolectar del programa nacional para la gestión integral de desechos sólidos (PNGIDS) en el año 2019 se logró recuperar a nivel nacional 1 664 442 neumáticos que ya cumplieron su vida útil.

Esto indica que el porcentaje de neumáticos que han cumplido su vida útil y han sido recuperados para ser reciclados, es muy bajo. Lo que no se recupera por lo general es quemado provocando una contaminación mayor al medio ambiente.

## **1.4 ALCANCE**

Lo que pretende este estudio es obtener un diseño de mezcla asfáltica porosa que pueda ser aplicada como sobre capa en cualquier parte de la región. Cumpliendo con los requerimientos que las Normas dicten al momento de realizar el diseño. El proyecto estará basado en la Norma INVIAS 2012 (Colombia), donde se indica que el contenido de vacíos para conseguir un asfalto de estas características debe contener un porcentaje de vacíos de entre el 18% y 25%.

Realizando ensayos se espera obtener las curvas de caracterización de la sobre capa se realizará, se busca verificar si el diseño que se ha propuesto cumple con la Norma, de esta manera también se busca dar una aplicación extra para el reciclaje de la gran cantidad de neumáticos que se desechan en el país.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la factibilidad de realizar una mezcla asfáltica drenante con neumático triturado que cumpla el porcentaje de vacíos que indica la Norma sin perjudicar a la estabilidad y flujo de la misma.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Obtener información disponible acerca de los pavimentos porosos, recopilar información de Normas internacionales en las que se ejecute este tipo de pavimento.
- Determinar los porcentajes de áridos de la zona, necesarios para cumplir con la granulometría de la Norma INVIAS.
- Determinar el aporte que tiene el neumático triturado dentro de la mezcla. En cuanto al porcentaje de vacíos se refiere.
- Realizar una comparación de como incide la inclusión del neumático triturado dentro de la mezcla asfáltica, la misma que se podrá analizar realizando ensayos.

## **1.6 METODOLOGÍA**

Como parámetro básico para el diseño de la capa de rodadura, en este caso de pavimento poroso se utilizará las Normas que intervienen en el proceso de diseño de la misma como son: NEVI-12, AASHTO, ASTM y la INEN las mismas especifican como se deben ensayar los materiales a usar en este proceso.

El método que será utilizado para realizar los ensayos de laboratorio se denomina AASHTO 93, el cual sirve para el diseño tanto para pavimentos rígidos como para pavimentos flexibles. La Norma INVIAS 2012 señala que para mezclas bituminosas drenantes o consideradas porosas el porcentaje de vacíos deberá ser de 18% a 25% que será lo que se buscará lograr en el presente proyecto.

Para llegar a obtener dicho porcentaje de vacíos se realizará la combinación de dos variables: la primera será reducir el porcentaje de áridos finos, además teniendo como límite el uso de áridos de tamaño de 3/4", cumpliendo de esta manera la Norma.

El otro componente a utilizarse será el neumático triturado, lo que se espera con la adición del mismo es que funcione como material aglutinante del árido que compone la mezcla.

## **1.7 ZONA DE ESTUDIO**

El estudio se realizará para vías de tráfico moderado ya que es donde abarcara mayores vías de la región.

## **2 CAPITULO 2: MATERIALES Y METODOLOGIA**

En este capítulo se expondrán los materiales empleados en el proyecto a realizar, los mismos, que serán lo que se encuentran con facilidad en zonas aledañas a la ciudad de Cuenca. Así mismo se hablará de la metodología que se tomará en cuenta para la realización de ensayos y ejecución de la mezcla porosa o también llamada drenante.

### **2.1 MATERIALES**

#### **2.1.1 Material bituminoso**

El material bituminoso suele denominarse como asfalto, el cual consiste en una sustancia de color negro que se caracteriza por su alta viscosidad con una consistencia variable. Se origina a partir del procesamiento de hidrocarburos pesados como el petróleo, aunque también se encuentra en yacimientos naturales. Su principal función es actuar como aglomerante en las mezclas asfálticas, es decir, unir las partículas de los materiales (agregados) de tal forma que se garantice su adherencia al mismo tiempo que soportan las cargas a las cuales va a estar sometida la mezcla (Meneses & Paez, 2017).

El asfalto que se usara para el estudio en cuestión es el AC-20 que es el que se usa para las carreteras que están a cargo de la prefectura del Azuay, en concreto es el material asfáltico usado por la empresa ASFALTAR EP.

A continuación, se mostrará las características del asfalto distribuido y comercializado por la empresa ASFALTAR EP, la misma que es entregada por la empresa PETROECUADOR. Aquí podemos observar las características con las que sale por primera vez dicho asfalto una vez cumplido el proceso de refinación.

## EP - PETROECUADOR INFORME DE RESULTADOS



Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con  
ACREDITACIÓN No. SAE LEN 13-002.

GERENCIA: **GERENCIA DE REFINACIÓN** REFERENCIA: **PROGRAMA DE TRANSFERENCIA # 177**  
 ORGANIZACIÓN: **M01\_REFINERÍA ESMERALDAS** PRODUCTO ANALIZADO: **0280 ASFALTO AC-20**  
 INFORME NO. **M01-0707-2022** CODIGO MUESTRA: **ECC-22-1061**

DATOS CLIENTE	
NOMBRE	JEFE DE CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN (ING. ALEJANDRO CAMACHO)
DIRECCIÓN	Km 7 1/2 Antigua Vía Atacames.
TELÉFONO	062994000 (85070 85074)
SOLICITADO POR	ING. MIGUEL GUAGUA - ESPECIALISTA DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

DATOS DE LA MUESTRA			
ORIGEN DE LA MUESTRA	AO-V10	HORA TOMA DE MUESTRA	23:00:35
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2022/06/26	HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	23:30:40
CANTIDAD DE MUESTRA	1500 ml	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA	AFORO DE TANQUE
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	2022/06/26		
LUGAR TOMA DE MUESTRA	ASFALTOS		

DATOS DE ANÁLISIS			
TEMPERATURA AMBIENTE	23.0 °C	PRESIÓN BAROMÉTRICA	100.9 kPa
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE	66.0 %HR	FECHA FINALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	2022/06/27 05:00:35
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	2022/06/26 23:40:40		
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME	2022/06/27		

PARÁMETRO	MÉTODO				RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	UI*
	(ASTM_INEN)		INTERNO				
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140 °F (60 °C)	ASTM D2171	NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	160	240	172.0	Pa s ±5 %
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 275 °F (135 °C)	ASTM D2170	NTE INEN 810/1981	V03.06.01.03-T-23	300	-	358.0	mm <sup>2</sup> /s ±1.9 %
PENETRACIÓN 77 °F (25 °C 100 G, 5s)	ASTM D5	NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-20	60	-	80	dmm ±4 dmm
PUNTO DE INFLAMACIÓN	ASTM D92	NTE INEN 808	V03.06.01.03-T-21	232	-	310	°C ±N/A
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO*	ASTM D2042	NTE INEN 915	V03.06.01.03-T-31	99	-	99.94	%P -
RESIDUO DE ENSAYOS DE PELÍCULA FINA EN HORNO ROTATORIO*	N/A	-	V03.06.01.03-T-30	N/A	N/A	N/A	- -
VISCOSIDAD 60°C*	ASTM D2171	NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	-	800	638.0	Pa s ±N/A
DUCTILIDAD 77 °F (25 °C) 5cm/min*	ASTM D113	NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-24	50	-	64.0	cm -
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298	NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	7.3	°API ±N/A
DENSIDAD RELATIVA (15.6/15.6°C)	ASTM D1298	NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	1.0195	- ±N/A
GRAVEDAD ESPECÍFICA 25/25 °C	ASTM 70	-	V03.06.01.03-T-57	REPORTE	REPORTE	1.013	- ±0.002
PUNTO DE ABLANDAMIENTO*	ASTM D36	-	-	-	-	48.2	°C -
ÍNDICE DE PENETRACIÓN*	ASTM D5	-	-	-1.5	1	-0.6	- -
CAMBIO DE MASA*	ASTM D2872	-	V03.06.01.03-T-30	-	1	-0.200	%P -
*API OBSERVADO: 14.085							
TEMPERATURA OBSERVADA: 88.4 °C							
OBSERVACIONES:							

**EDGAR FABRICIO CAMPOVERDE LASTRA**  
 FIRMAS DE RESPONSABILIDAD  
 Firmado digitalmente por EDGAR FABRICIO CAMPOVERDE LASTRA  
 Fecha: 2022.06.27 10:10:25 -05'00'  
 AUTORIZADO POR: JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD

**NOTAS:**  
 Los datos del cliente, origen, fecha, hora, muestra, parámetro o análisis requerido de la muestra, es información proporcionada por el cliente.  
 Los resultados de este informe corresponden únicamente a las propiedades de la muestra analizada en el laboratorio.  
 Los resultados se aplican únicamente a la muestra como se recibió.  
 Sin la aprobación del Especialista y/o Jefe de Control de Calidad, no se deberá reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad.  
 Los ensayos marcados con (\*) NO están dentro del alcance de la acreditación del SAE.  
 Los resultados de los ensayos realizados a la muestra son de responsabilidad del Laboratorio RE, excepto si la información es suministrada por el cliente y esta afecte la validez de los resultados; esto se detallará en observaciones.  
 (1) Referido a la Norma INEN: NTE 2515:2014 Enmienda 1  
 (2) La U es estimación multiplicando la U típica por el factor de cobertura k=2 (95% nivel de confianza).

Dirección Organización: Km 7 1/2 VÍA ATACAMES S/N - teléfono: (593)06 2994000 - extensiones: 85450 - 85455 - 85457 - 85453 - ESMERALDAS-ECUADOR

Ilustración 2.1. Especificaciones técnicas del asfalto AC-20 de la empresa ASFALTAR-EP.

Fuente: Ingeniero Sergio Ortiz, colaborador de la empresa ASFALTAR EP.

Las especificaciones que mostramos en la tabla anterior fueron proporcionadas por el ingeniero Sergio Ortiz. Colaborador de la empresa ASFALTAR EP.

### **2.1.2 Agregado grueso**

Corresponde al material que es retenido en el tamiz No.4 (4,75 mm). Dos aspectos son fundamentales al momento de seleccionar este agregado: la angulosidad y la forma. La angulosidad incide en el rozamiento interno de las partículas pues se busca que estas permanezcan en el mismo sitio y no se produzcan desplazamientos, por lo cual, para aumentar la angulosidad y por tanto aumentar el rozamiento (INVIAS Artículo 400, 2012).

Las mezclas asfálticas porosas al igual que las otras mezclas, exigen del agregado grueso determinados valores dependiente del diseño del pavimento para cada una de las características necesarias para su selección, de esta manera se garantiza el comportamiento óptimo del agregado en la mezcla asfáltica.

### **2.1.3 Agregado fino**

El agregado fino, se utiliza en un porcentaje bajo en la mezcla asfáltica porosa, con el propósito de permitir la generación de espacios en el agregado grueso libres o vacíos para permitir la filtración de agua.

En el país ninguna Norma habla de los pavimentos asfálticos porosos. Es por esa razón que se va a tomar como Norma base (INVIAS Artículo 453, 2012), que es la Norma colombiana.

### **2.1.4 Neumático triturado**

El neumático que conocemos normalmente es el que se usa en los diferentes tipos de vehículos que vemos y usamos a lo largo de nuestro diario vivir, dicho neumático este compuesto por fibras textiles, cables de acero y caucho, este caucho puede ser de origen natural o sintético. Según (Solano Mosquera & Orellana, 2019) el caucho natural le proporciona elasticidad al neumático mientras que el sintético le aporta estabilidad térmica.

Una vez obtenido el látex de diferentes tipos de plantas y siguiendo el proceso respectivo para la generación del neumático, estos componentes son sometidos a altas temperaturas lo que es llamado vulcanización lo que provoca la reacción de todos los componentes que componen la llanta. De esta manera dando paso al neumático.

El caucho reciclado obtenido de neumáticos desechados, puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) o como un modificador del ligante (proceso húmedo). Por otro lado, la utilización del caucho trae beneficios ambientales al valorizar un desecho como son los neumáticos y solucionar el problema de la disposición final de ellos, disminuyendo la contaminación (Ramirez N. , 2006).

El proceso de obtención para el neumático triturado o polvo de caucho según (Solano Mosquera & Orellana, 2019) y (Israel, 2013) es el siguiente.

- Recepción de neumáticos a reencauchar
- Inspección inicial
- Trituración mecánica
- Separación magnética primaria
- Molienda mecánica
- Separación magnética secundaria
- Aspiración de polvos
- Clasificación del polvo
- Almacenamiento del polvo

Otros autores hablan de tres pasos a seguir dejando de lado solo el punto de “Recepción de neumáticos a recauchar”

### **Recepción de neumáticos a reencauchar**

Los neumáticos que han cumplido su vida útil, según el (Ambiente, 2015) deben seguir el “INSTRUTIVO PARA LA GESTION INTEGRAL DE NEUMATICOS USADOS” en el acuerdo ministerial 98 de Ecuador. Dice que los distribuidores y comerciantes de neumáticos deben receptor los neumáticos usados una vez cumplida la vida útil de los mismos.

Luego de realizada esta recepción los neumáticos son llevados a las empresas encargadas del reencauche de los mismos. En estos canchones se procede a realizar una categorización de los neumáticos dividiéndolos en los que son de tipo tradicional y radiales. (Solano Mosquera & Orellana, 2019).

## **Inspección inicial**

Lo que se realiza una vez realizada la categorización de los neumáticos a reencauchar es realizar una revisión exhaustiva con personal apto y calificado para la misma. Este punto es clave ya que depende de ello de si el neumático es apto o no para realizar el reencauchado. El personal encargado debe revisar diferentes tipos de anomalías que pueden presentar los neumáticos una vez cumplida su vida útil, estas afecciones pueden ser: roturas, perforaciones, agrietamientos, soplos, estado de los hombros, pestana, envejecimiento, etc. (Moscoso & Paredes, 2010).

El neumático triturado es el material que tendrá un aporte para el porcentaje de vacíos, los mismo que deben tener un rango de porcentajes en específico para cumplir las características de este tipo de pavimentos.

## **Trituración mecánica**

El neumático usado una vez terminada su vida útil sigue manteniendo las características tanto de resistencia como de elasticidad. Es por esta razón que el primer paso para poder obtener el polvo de caucho debe ser una trituración, la que se realiza en trituradores de rotación inversa. Formados por dos o más ejes paralelos de cuchillas que giran a distintas velocidades. Y lo que hace esta trituración es separar el acero que lleva dentro el neumático. Luego de triturado se obtienen pedazos de 15,7 mm y 6,35 mm. Los trituradores usados en este proceso son muy parecidos a los que se usan en la trituración de los áridos en las canteras mineras.

## **Separación magnética primaria**

En esta parte del proceso, el material triturado llega a través de una banda transportadora, la misma que se encarga de trasladar el material que llega una vez ha cumplido el primer proceso de trituración. El material llega con residuos del acero que llevan en su composición los neumáticos. En esta etapa lo que se hace con la ayuda de grandes magnetos separar los residuos de acero del caucho triturado.

## **Molienda mecánica**

El método de molienda se ha venido utilizando durante mucho tiempo, este se usa para poder obtener granos mucho más pequeños que los que salen de las trituradoras. Estas máquinas de molienda son muy sensibles es por esta razón que en el proceso anterior de separación magnética

se debe cumplir con la separación del acero y el caucho. Existen dos tipos de molienda mecánica la una es la molienda mecánica al ambiente y la molienda mecánica criogénica. La molienda al ambiente se la realiza en un rodillo grande que lo que consigue son granos de un tamaño no menor a 0.8mm. En la molienda criogénica lo que se hace es congelar el material con nitrógeno líquido, provocando una fragilización de este y permitiendo desintegrarlo con mayor facilidad en la molienda.

### **Separación magnética secundaria**

En esta etapa se vuelve a usar magnetos para separar material pequeño que pudo haber pasado en el resto de los procesos, esto para conseguir separar el material ferroso antes de realizar el aspirado de los polvos ya que luego de este se procede al almacenamiento y lo que se busca obtener es la mayor pureza en el caucho.

Se usan diferentes tipos de magnetos como pueden ser en la parte superior de la banda transportadora y en la polea de la banda transportadora.

### **Aspiración de polvos**

Se realiza una aspiración llamada de tubo la que busca aspirar el material textil que es el más liviano y dejar en la parte inferior el material más pesado que es el material ferroso que aun en esta parte del proceso sigue llegando a ser parte de la mezcla.

### **Clasificación del polvo**

Para este momento el polvo de neumático usado pasa por un método de clasificación muy tradicional como es el tamizado. Aquí es donde se los pondrá con los diferentes tipos de grosores según el uso que se le vaya a dar al polvo de caucho.

### **Almacenamiento del polvo**

Una vez llegado a este punto solo se almacena de igual manera por el tipo de grosor y para el diferente tipo de uso que se le vaya a dar.

De esta manera es como se obtiene el polvo de neumático que es ocupado en diferentes tipos de aplicaciones, esto buscando dar una alternativa al reciclado de este material que causa tanto daño al medio ambiente y existe en cantidades tan abundantes en nuestro país y el mundo.

### 2.1.4.1 Proceso de mezclado por vía seca

Este método generalmente de granulometría fina se agrega el caucho triturado directamente con los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, todo esto antes de agregar el cemento asfáltico.

El GCR (grano de caucho reciclado) sigue interactuando con el betún por el fenómeno de digestión que se da, este proceso de interacción consiste en que el asfalto baña las partículas de GCR desde la parte más superficial hasta la parte más interna, modificando de esta manera al betún y a la mezcla asfáltica (Ayala & Heredia, 2019)



Ilustración 2.2 Incorporación por vía seca. (Ayala & Heredia, 2019)

### Grado de digestión caucho-asfalto en el proceso vía seca

Es necesario estimar el tiempo y temperatura mínima para alcanzar el grado de digestión deseado, de lo contrario la falta de digestión produce que la mezcla desarrolle baja resistencia al agua, mala compactibilidad y disgregabilidad de la mezcla (Ayala & Heredia, 2019).

Se requiere de menos una hora para alcanzar una buena digestión, tiempo que se demora normalmente en cualquier obra de pavimento en mantener la mezcla caliente. La digestión es más rápida cuando las partículas de caucho son más finas, cuando las temperaturas son más elevadas y la cantidad de caucho sea menor.

El fenómeno de la digestión, y en definitiva el grado de modificación que el betún de la mezcla progresivamente alcanza quedaron de manifiesto en unos ensayos de laboratorio en los que varias

mezclas bituminosas se sometieron a digestión en estufa, y posteriormente se recuperó su ligante en destilador rotatorio para a continuación medir su viscosidad, donde se demostró que mientras mayor era el tiempo de digestión y las partículas de caucho eran más finas, el grado de digestión era mayor y también su viscosidad (Gallego & Prieto, 2004).

#### 2.1.4.2 Proceso de mezclado por vía húmeda

Agregar el material de neumático triturado de esta manera consiste en agregar el caucho a altas temperaturas al asfalto en caliente, esto permitiendo que el caucho empiece a ablandarse conformando al final una sola mezcla con el asfalto. Lo que se busca con esto es que el caucho funcione como un ligante de la mezcla, es decir un aditivo ligante.



Ilustración 2.3. Incorporación por vía húmeda. (Ramirez, Ladino, & Rosas, 2014) .

## 2.2 PAVIMENTO ASFALTICO POROSO

Las mezclas de asfalto porosas o también llamadas drenantes son mezclas asfálticas que se usan como carpeta o capa de rodadura, su principal característica es su alto contenido de vacíos que varía entre el 18% al 25% y están interconectados entre sí. Los vacíos permiten el paso del agua superficial a través de la estructura del pavimento facilitando la rápida evacuación hacia abajo y hacia las zonas laterales, mejorando la adherencia entre el neumático de los vehículos y el pavimento ya que se drena el agua superficial (Arce, Elizondo, Jimenez, & Ramirez Castro, 2005).

Las mezclas asfálticas que son modificadas con grano de caucho reciclado de neumáticos, permiten la obtención de pavimentos con mejores respuestas a los cambios térmicos que estos sufren a lo largo de su vida, también aumenta la resistencia a las fisuras provocadas por el efecto de fatiga del

mismo y evita el rápido envejecimiento, aumentado así la vida útil del pavimento y disminuyendo los costos de mantenimiento a largo plazo (Campaña, Galeas, & Guerrero, 2015).

Las mezclas drenantes requieren un menor esfuerzo de compactación que las mezclas densas. El número de pasadas en obra deberá ser el establecido durante la fase de experimentación y será lo suficientemente bajo para prevenir excesos de compactación que reduzcan el volumen de aire en la mezcla. Igualmente, las temperaturas requeridas para la compactación también son menores, pero se debe tener cuidado de terminar el proceso con prontitud debido a que, por el limitado espesor de la capa y su elevado contenido de vacíos, la mezcla pierde temperatura rápidamente. (INVIAS, 2012).

### 2.2.1 Granulometría para pavimento poroso

Según la Norma (INVIAS Artículo 453, 2012), siendo la Norma que rige en el país Colombia, establece la siguiente granulometría para la realización de un pavimento con estas características.

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U.S. Standard)						
	19.0 3/4"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
ÚNICA	% PASA						
	100	70-100	50-75	15-32	9-20	5-12	3-7
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO ( $\pm$ )	4%			3%			1%

Tabla 2.1. Granulometría mezcla porosa. Fuente: (INVIAS Artículo 453, 2012).

### 2.2.2 Características del agregado

La Tabla 2.2 muestra la denominación de los agregados según su tamaño, los mismos que son utilizados en mezclas asfálticas.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
Agregado grueso	Porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
Agregado fino	Porción del agregado comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 $\mu$ m (No. 4 y No. 200)

Tabla 2.2. Denominación de los agregados minerales. Fuente: (INVIAS Artículo 453, 2012).

Los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de alteración físico- química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que presumiblemente se puedan dar en la zona de empleo.

El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto es menor o igual al 50 % de la masa total del agregado fino. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto (INVIAS Artículo 400, 2012).

Los agregados pétreos deberán cumplir los requisitos de calidad de la Tabla 2.3.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>NIVEL DE TRÁNSITO</b>
<b>Dureza, agregado grueso</b>	
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	
- 500 revoluciones	25
- 100 revoluciones	5
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, Máximo (%)	20
<b>Limpieza, agregado grueso</b>	
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	0.5
<b>Geometría de las partículas, agregado grueso</b>	
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	10
Caras fracturadas, mínimo (%): dos caras	100

Tabla 2.3. Requisitos de los agregados para mezcla drenante.

Fuente: (INVIAS Artículo 400, 2012).

### **2.2.3 Ventajas pavimento asfáltico poroso**

- Es una gran alternativa para realizar un drenaje rápido del agua lluvia de la calzada.
- Se produce menores caudales circulando por la red, disminuyendo la carga hidráulica en el sistema en tiempo de lluvia y se reducen los diámetros de las conducciones (García Haba, 2011).
- Un pavimento poroso tiene el mismo tiempo de duración que un pavimento convencional si se encuentra bien diseñado.
- Tiene fácil maniobrabilidad lo que permite su fácil colocación en obra. Además, se puede evitar el uso de cortadoras de disco de diamante y el sellado de juntas presentes en este (Saucedo Vidal, 2012).
- Los pavimentos permeables se consideran como una cadena de drenaje sostenible completa, pues integra los procesos de infiltración, captación, transporte y almacenamiento (Rodríguez Hernández, 2008).
- Se reducen los ruidos producidos por los neumáticos de los vehículos, una superficie porosa absorbe la energía del sonido y permite que parte del aire que se encuentra alrededor de los neumáticos sea presionada dentro de los poros de este, disipando así la presión de aire antes de que se genere algún ruido (Ferguson, 2005).
- El mantenimiento es muy bajo en comparación con otras técnicas de drenaje sostenible y el costo de ejecución es menor (Rodríguez Hernández, 2008).

### **2.2.4 Desventajas pavimento asfáltico poroso**

- Se debe tener mucho cuidado al momento de la compactación en campo ya que puede verse reducida la capacidad de infiltración (García Haba, 2011).
- Se debe colocar este tipo de pavimentos en zonas de tráfico ligero ya que su resistencia es menor que la de un pavimento asfáltico común (Saucedo Vidal, 2012).
- Debe evitarse colocar este pavimento en zonas con presencia de muchos sedimentos ya que afecta a los vacíos del pavimento o en terrenos con pendientes mayores a 5% (García Haba, 2011).
- La colocación en obra debe ser muy minuciosa y laboriosa para mantener la estructura según el diseño inicial

- La estética del pavimento poroso es limitada, dado que ofrece un acabado continuo, si la superficie no tiene buenos acabados puede resultar incómodo de pisar y de rodar con ruedas pequeñas debido a las discontinuidades (Rodríguez Hernández, 2008).
- La gran desventaja de carácter económico es su elevado costo de instalación y de mantenimiento de la permeabilidad en caso de condiciones adversas de aporte de sedimentos (García Haba, 2011).
- El pavimento permeable requiere un mantenimiento constante, lo cual eleva los costos debido a que puede perder permeabilidad ya que con el tiempo y las lluvias los espacios vacíos tienden a taparse con material fino (Saucedo Vidal, 2012).

### 2.2.5 Aplicaciones

El pavimento asfáltico poroso tiene varios usos en diferentes partes del mundo. A continuación, se exponen algunos casos.

- Pavimento poroso en el parqueadero de la Universidad de Carolina del Norte durante una lluvia.



Ilustración 2.4. Pavimento poroso Universidad Carolina del Norte. Fuente (Green Counsel, 2006)

- El proyecto de asfalto poroso Go Green en Suzhou.



Ilustración 2.5. Asfalto poroso Suzhou. Fuente: (Go Green, 2019)

## **2.3 METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA**

### **2.3.1 Procedimiento preparación de probetas**

El método Marshall inicia con la elaboración de briquetas de prueba, para lo cual se utilizarán materiales que cumplan con las características para este tipo de pavimento como son granulometría y demás, establecidas para el proyecto. Sumado a esto, deberá establecerse con anterioridad el peso específico aparente de los áridos, así como el peso específico del asfalto.

Una vez obtenida la curva granulométrica indicada en la Norma base, se procederá a conocer los porcentajes adecuados correspondientes a cada material propuesto. Obtenido dichos porcentajes se realizará una combinación de los mismos con su correspondiente porcentaje. De esta muestra se obtendrán tres briquetas las mismas que serán ensayadas con el método Marshall, el material restante se lo reservara para realizar el ensayo Rice.

Los 5000 g de la combinación de material serán colocados en horno a una temperatura de 110 grados Celsius, obtenidas las cantidades correspondientes a cada grupo de briquetas, se procede a realizar la mezcla. Para ello se usará una cocina común de domicilio. La mezcla se la realizara a una temperatura de 150 grados Celsius. Una vez obtenida una mezcla lo más uniforme posible se llevarán aproximadamente 1000 g del material para ser compactado.

La compactación se realizará con el martillo compactador, para este proyecto y por las características que se necesitan obtener se hará una compactación de 25 golpes por cada cara de la briqueta, esto para no poner en riesgo el volumen de vacíos de aire que tengamos en la mezcla. Esta compactación es utilizada para tráfico ligero.



Ilustración 2.6. Martillo de compactación. (Made-in-China, 2022)

TABLA 405.5.4

TIPO DE TRAFICO CRITERIOS MARSHALL	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacios en mezcla								
-Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
-Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
-Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacios agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
-Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

**Notas:**

1.- Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 °C, se consideran satisfactorias si cumplen con los criterios cuando se ensayan a 38 °C, y se colocan 100mm por debajo de la superficie.

2.- **Clasificación del tráfico.** Es función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDP) esperada por el carril de diseño en el momento de poner en funcionamiento la vía, luego de su construcción o de su rehabilitación. Los vehículos pesados no comprenden autos, camionetas ni tractores sin remolque.

TRAFICO	IMDP
Liviano	Menos de 50
Medio	50 a 200
Pesado	200 a 1000
Muy pesado	Más de 1000

Ilustración 2.7. Tabla 405.5.4. Fuente: (MOP, 2002).

Obtenidas las briquetas se dejará al ambiente por el tiempo de 24 horas, finalizado este tiempo se las colocará en baño maría por 30 minutos a una temperatura de 60 grados Celsius. (METODO MARSHALL (ASTM D-1559), 2016)



Ilustración 2.8. Horno para baño María. (fabiequipos S.A.S., 2022)

Finalizado este tiempo se procederá a realizar el ensayo Marshall.

### **2.3.2 Método Marshall**

Dicho diseño se realiza basado en la normativa (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.). Diseño de mezclas método Marshall.

En esta metodología de diseño se usan probetas con dimensiones especificadas con la finalidad de encontrar el porcentaje óptimo de asfalto que requiere la mezcla. Los valores de asfalto que deben aumentarse o disminuir serán en intervalos de 0.5%. Para la obtención de resultados se deben preparar tres briquetas para cada mezcla obtenida con su respectiva cantidad de asfalto.

Esta normativa describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la densidad Bulk y el porcentaje de vacíos para cada serie de muestras asfálticas, mediante el cálculo y análisis de diferentes pesos y volúmenes. Existen tres tipos de compactación. 25 golpes por cara es usada para obtener mayor número de vacíos, pero está hecha para tráfico ligero o mantenimiento, luego se tiene la compactación a 50 golpes por cara la que se utiliza para carpetas que tienen una carga vehicular moderada como puede ser vías de segundo orden. Y como última la que está sometida a 75 golpes que son para vías con una cantidad de tráfico mucho más grande y significativa como pueden ser carreteras y autopistas.

Una vez conocido esto, se realizará este proyecto con la compactación de 25 golpes y 50 golpes para poder realizar una comparación.



Ilustración 2.9. Equipo Marshall. (Alibaba.com, 2022)

La normativa indica realizar un procedimiento que permitirá conocer las diferentes características que pueda dar la mezcla en la que se está trabajando.

Como primer paso se realizará un promedio de los pesos específicos o “bulk” de todas las probetas que se han elaborado y se descartaran aquellas que estén dispersas al valor promedio.

La gravedad específica “bulk” de los agregados se calculará con la siguiente expresión.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots}$$

Ec 2.1. Gravedad específica. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

P1, P2, P3 ... es el porcentaje en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado

G1, G2, G3 ... Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones mencionadas anteriormente.

- Ahora se calculará la gravedad específica máxima teórica de la muestra para cada contenido de asfalto, este es el mismo que se obtendría si fuera posible compactar la mezcla hasta obtener una masa de asfalto y agregados que no tenga vacíos con aire. Encontrando con la siguiente ecuación.

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{\% \text{ de agregados}}{G_{sb}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{G_{asf}}}$$

Ec 2.2. Gravedad específica promedio de agregados. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).

Porcentaje de agregados = 100 - % de asfalto

$G_{sb}$  = Gravedad específica promedio de agregados.

- Se procede a obtener el volumen de la siguiente manera.

$$\text{Volumen} = \text{Peso del aire SSS} - \text{Peso del agua SSS}$$

Ec 2.3. Volumen. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.).

Peso del aire SSS = Peso de la muestra en aire en estado SSS.

Peso del agua SSS = Peso de la muestra en agua en estado SSS

- De esta manera se encontrará la gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada Bulk de cada una de las muestras.

$$G_{mb} = \frac{\text{Peso aire seco}}{\text{Peso aire SSS} + \text{Peso agua SSS}}$$

Ec 2.4. Gravedad específica. Fuente: (ASTM D 1188)

Peso aire seco = Peso en el aire de la muestra seca

Peso aire SSS = Peso en el aire de la muestra en estado SSS

Peso agua SSS = Peso en agua de la muestra en estado SSS

- Ahora calcular el peso específico de la mezcla asfáltica suelta RICE.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Ec 2.5. RICE. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

A = Peso de la muestra

D = Peso del envase (Matraz + Agua)

E = Peso del envase (Matraz + Agua + Muestra)

- Calcular el porcentaje en volumen de los agregados para cada porcentaje de cemento asfáltico utilizado.

$$\%V_{agr} = \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

Ec 2.6. Porcentaje en volumen de agregados. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$G_{mb}$  = Bulk promedio de las tres briquetas.

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk del agregado

$P_s$  = % agregados = % total - % de asfalto utilizado

- Determinación de porcentaje total de vacíos con respecto al volumen total de la probeta mediante la siguiente expresión.

$$P_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Ec 2.7. Porcentaje total de vacíos respecto al volumen de la probeta. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima RICE

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla compactada Bulk promedio de las tres briquetas.

- Calcular el volumen de asfalto como porcentaje del volumen total de la probeta.

$$V_a = 100 - \% V \text{ de agregados} - P_a$$

Ec 2.8. Volumen de asfalto. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$\% V \text{ de agregados} = \% \text{ Volumen de agregados}$

$P_a = \% \text{ total de vacíos con respecto al volumen total de la probeta.}$

- Determinación del porcentaje de vacíos en los agregados de la muestra ya compactada.

$$V_{am} = 100 - \% V_{agr}$$

Ec 2.9. Porcentaje de vacíos en los agregados de la muestra compactada. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$\% V_{agr} = \% \text{ Volumen de agregados}$

- Volumen efectivo de asfalto en la mezcla compactada

$$V_{ea} = 100 * \frac{V_a}{V_{am}}$$

Ec 2.10. Volumen efectivo de asfalto en la mezcla compactada. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$V_a = \text{Volumen de asfalto}$

$V_{am} = \% \text{ de vacíos en los agregados}$

- Obtención del contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla.

$$A_e = \% \text{ de asfalto} * \frac{P_{ba}}{100} * \% \text{ de agregados}$$

Ec 2.11. Asfalto efectivo. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb$$

Ec 2.12. Asfalto absorbido por el agregado. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Ec 2.13. Gravedad especifica efectiva del agregado. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

Pmm = Sumatoria de los porcentajes de la mezcla (100%).

Pb = Porcentaje de asfalto.

Gmm = Gravedad teórica máxima

Gb = 1.011

Gse = Gravedad especifica efectiva del agregado

Gsb = Gravedad especifica bulk del agregado

Gb = Peso específico del asfalto

Pba = Asfalto absorbido por el agregado

- Vacíos llenos de asfalto

$$Vaf = 100 * \frac{Vam - Pa}{Vam}$$

Ec 2.14. Vacíos rellenos de asfalto. Fuente: (ASTM D 1559 & AASHTO T 225, s.f.)

Vaf = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de Vam.

Vam = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

Pa = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

## **2.4 SOBRE CAPA ASFALTICA**

Consiste en la colocación de una capa de una mezcla asfáltica en caliente, sobre una capa de rodamiento existente para mejorar las condiciones superficiales del pavimento. Puede sustituir total o parcialmente el espesor de una capa existente (LanammeUCR, 2021).

Este proyecto buscará obtener una sobre capa que permita drenar el agua acumulada en la red vial en la que será implementada, ayudando con esto a la reducción de los diferentes tipos de problemas que existen debido a esta acumulación. Estos problemas son el hidroplaneo y el efecto spray.

### **2.4.1 Hidroplaneo o Aquaplaning**

Según (LanammeUCR, 2021). Es el efecto en que se pierde adherencia entre las llantas del vehículo y la superficie de rueda debido a la presencia de una película de agua sobre la superficie del pavimento.

### **2.4.2 Efecto Spray**

El efecto spray es un fenómeno que se produce en los días de intensa lluvia y que hace referencia al agua pulverizada que sale disparada de los neumáticos de otros coches, generalmente de aquellos que van por delante de nosotros, y que puede manchar nuestro limpiaparabrisas, reduciendo nuestra visibilidad y capacidad de reacción y aumentando el riesgo de que suframos una peligrosa colisión. (Vila, 2021).

## **2.5 BASES DE DISEÑO**

En este apartado se detallarán las guías que permitirán dar un punto de partida a las dosificaciones que se propondrán en este proyecto.

Para el porcentaje de caucho se tomará como referencia el trabajo de titulación nombrado “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE ASFALTO CONFORMADO POR CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS COMO MATERIAL CONSTITUTIVO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO”, donde (Vega Zurita, 2016) menciona que las mezclas modificadas con caucho tienen una tendencia creciente con cada aumento de la cantidad de caucho y disminución del asfalto, en los resultados mostrados por Zurita se puede observar mayor estabilidad en las mezclas que tiene un porcentaje de caucho igual al 1%. En la ilustración 2.10 se pueden observar dichos resultados.

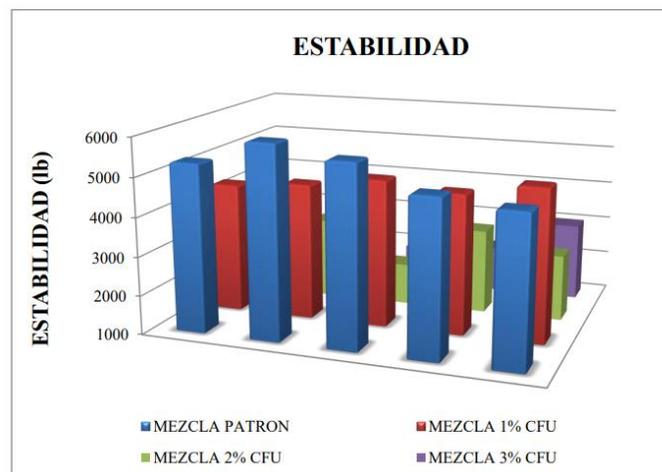


Ilustración 2.10. Comparación de la Estabilidad. (Vega Zurita, 2016)

Es por esta razón que se tomará como punto de partida para este proyecto un porcentaje de neumático del 1%.

Para el porcentaje de asfalto que se ocupará en cada mezcla según lo indicado en el proyecto. “Mezcla asfáltica permeable como parte de la estructura de pavimento a partir del uso y modificación de una mezcla drenante aplicado a vías rurales”. (Meneses & Paez, 2017). En la cual se observa que realiza ensayos con cuatro muestras de asfalto diferente con intervalos diferentes tomando como punto inicial 4.5% y terminando con 6% de asfalto. Lo que se observa en la ilustración 2.11.

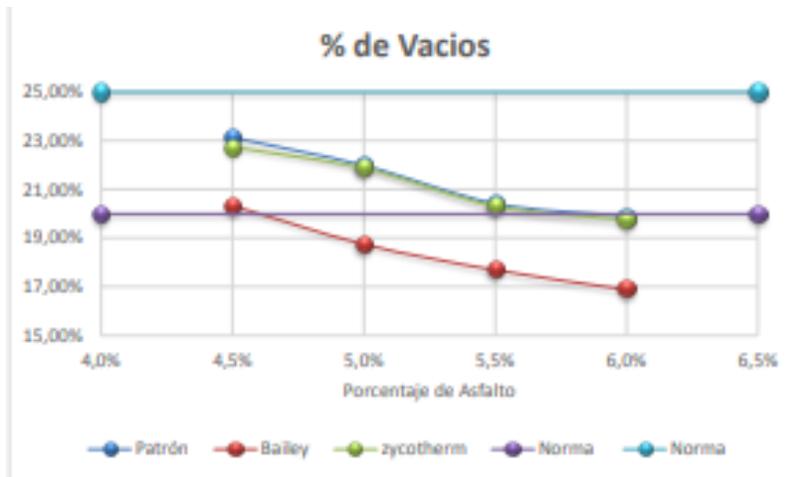


Ilustración 2.11. Porcentaje de vacíos. (Meneses & Paez, 2017).

La ilustración 2.11 muestra que a una menor cantidad de asfalto los porcentajes de vacíos aumentan, en el proyecto que se realizará el porcentaje de vacíos es clave para la obtención de una mezcla porosa.

### 3 CAPÍTULO 3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los materiales y los ensayos realizados para obtener la mezcla de áridos adecuada para el asfalto poroso, además los porcentajes de asfalto y caucho triturado utilizados dentro de los ensayos y los resultados obtenidos.

#### 3.1 Materiales para la mezcla porosa asfáltica

##### 3.1.1 Asfalto

El cemento asfáltico utilizado en el estudio es el AC-20 proporcionado por la empresa ASFALTAR EP la cual es la encargada del mantenimiento vial en la provincia del Azuay, las características del asfalto se describen en la ilustración 2.1.

##### 3.1.2 Agregados

Los agregados utilizados en la mezcla asfáltica fueron obtenidos de la empresa Minera Rookaazul Cía. Ltda, ubicada en la zona del descanso en la Provincia del Azuay: la misma que provee agregados triturados de diferentes tamaños para este proyecto utilizamos agregados de 3/4 de pulgada, 3/8 de pulgada y agregado fino. Se presenta un mapa con la ubicación de la cantera.

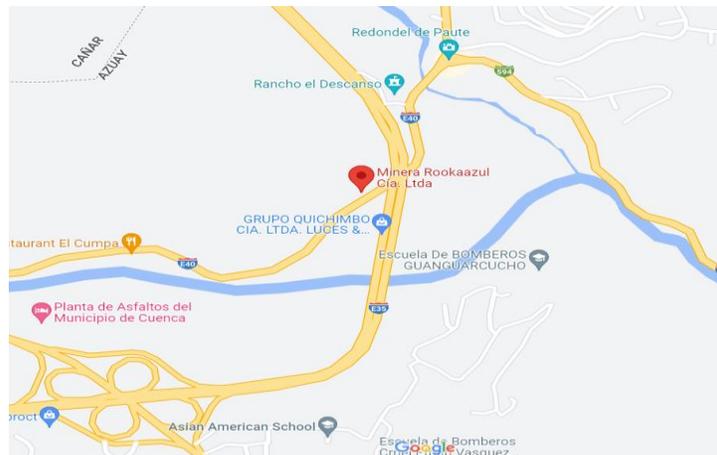


Ilustración 3.1. Mapa ubicación cantera Rookaazul. Fuente: Elaboración propia.

##### 3.1.3 Ensayos realizados a los agregados

La elaboración de briquetas se realizó en el laboratorio de materiales y suelos de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay.

Primero se procedió a realizar el ensayo granulométrico y los ensayos de gravedad específica tanto para agregado fino como para agregado grueso tal y como la Norma específica. Y para tener un

correcto conocimiento de cómo actuara el material que hemos decidido ocupar en la mezcla propuesta.

Los ensayos realizados son:

- Análisis granulométrico ASTM D 422



Ilustración 3.2. Análisis granulométrico. Fuente: Elaboración Propia.

- Gravedad específica y absorción del agregado fino ASTM C 128



Ilustración 3.3. Masado de las muestras de material para ensayo de gravedad específica.

Fuente: Elaboración Propia.

- Gravedad específica y absorción del agregado grueso ASTM C 127

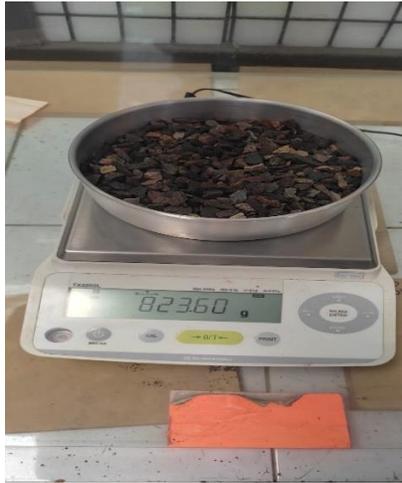


Ilustración 3.4. Masado de la muestra para ensayo de gravedad específica (agregado grueso).  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3.1 Ensayo análisis granulométrico

Este ensayo cubre el muestreo de los áridos finos y gruesos

#### Procedimiento

Como primer paso se toma una parte de la muestra total a ensayar, la misma que se coloca dentro de los tamices los cuales están conformados de la siguiente manera: 3/4", 1/2", 3/8", N<sup>o</sup>4, N<sup>o</sup>10, N<sup>o</sup>40, N<sup>o</sup>200 como se muestra en la ilustración 3.5, luego colocamos los tamices sobre el pedestal vibratorio para que las partículas puedan pasar o retenerse por cada uno de los tamices colocados.



Ilustración 3.5. Ubicación de cada uno de los tamices. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del ensayo se indican en la Tabla 3.1 para la muestra de agregado de 3/4, en la Tabla 3.2 se indican los resultados de la muestra del agregado de 3/8 y en la Tabla 3.3 se indican los resultados de la muestra de agregado fino. En las cuales se observa los porcentajes retenidos del peso total del material ensayado.

<b>TAMIZ</b>	<b>Apertura (mm)</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
3/4"		0	0.00%	0.00%	100.00%
1/2"		504	50.40%	50.40%	49.60%
3/8"		380	38.00%	88.40%	11.60%
No. 4		116	11.60%	100.00%	0.00%
No. 10		0	0.00%	100.00%	0.00%
No. 40		0	0.00%	100.00%	0.00%
No. 200		0	0.00%	100.00%	0.00%
BASE		0	0.00%	100.00%	0.00%
	<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>100%</b>		

Tabla 3.1. Tamizado material 3/4". Fuente: Elaboración propia.

<b>TAMIZ</b>	<b>Apertura (mm)</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
3/4"		0	0.00%	0.00%	100.00%
1/2"		0	0.00%	0.00%	100.00%
3/8"		9	0.90%	0.90%	99.10%
No. 4		887	88.70%	89.60%	10.40%
No. 10		104	10.40%	100.00%	0.00%
No. 40		0	0.00%	100.00%	0.00%
No. 200		0	0.00%	100.00%	0.00%
BASE		0	0.00%	100.00%	0.00%
	<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>100%</b>		

Tabla 3.2. Tamizado material 3/8". Fuente: Elaboración propia.

<b>TAMIZ</b>	<b>Apertura (mm)</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
3/4"		0	0.00%	0.00%	100.00%
1/2"		0	0.00%	0.00%	100.00%
3/8"		0	0.00%	0.00%	100.00%
No. 4		0	0.00%	0.00%	100.00%
No. 10		237.155	23.72%	23.72%	76.28%
No. 40		429.715	42.97%	66.69%	33.31%
No. 200		192.325	19.23%	85.92%	14.08%
BASE		140.8	14.08%	100.00%	0.00%
	<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>100%</b>		

Tabla 3.3. Tamizado material fino. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3.2 Gravedad específica y absorción de los agregados finos

Este ensayo se realiza para determinar la gravedad específica y la absorción de agua de los agregados finos, se realizará en estado saturada superficialmente seca (SSS) en donde usaremos el picnómetro.

#### Procedimiento

La muestra del ensayo se deja cubierta totalmente por agua durante 24 horas, luego de pasar el tiempo se retira del recipiente y se coloca en una bandeja en la cual se procede a un secado de las partículas por medio de un trapo frotándole uniformemente.

Luego se vierte la muestra por medio de un embudo en el picnómetro se procede a pesar la muestra y a colocar agua hasta la marca de aforo y se pesa en conjunto.

Procedemos a dar vueltas al picnómetro con la muestra y el agua, para poder liberar el aire que se puede encontrar dentro, se deja reposar unos minutos y se separa la muestra del agua.



Ilustración 3.6. Uso de picnómetro en el ensayo de gravedad específica.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de los ensayos realizados.

<b>Agregado Fino</b>			
Peso en el aire	A	479.5	g
Volumen de la probeta	B	500	g
Peso del agua incluida	C	322	g
Gravedad específica Bulk	$A/(B-C)$	2.69	
Gravedad específica SSS	$B/(B-C)$	2.81	
Gravedad aparente	$A/(A-C)$	3.04	
% de absorción	$((B-A) / A) * 100$	4.28	
Densidad Bulk		2687.09	kg/m <sup>3</sup>
Densidad SSS		2801.97	kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente		3036.83	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 3.4. Gravedad específica y densidad aparente agregado fino. Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar que cada uno de los resultados encontrados serán de suma importancia para conocer cómo reacciona el material en la mezcla asfáltica.

**Gravedad específica Bulk:** Es la relación entre la masa de un volumen dado de material a una temperatura específica que generalmente es de 25 grados Celsius.

**Gravedad específica SSS:** Es la relación de entre la masa del material usado en la probeta sumergido en agua durante 24 horas. Con la misma cantidad de material seco.

**Gravedad aparente:** Es la relación existente entre el peso del material seco en el aire contra el material pesado sumergido en el agua.

**Porcentaje de absorción:** Este porcentaje nos indica cuanto de agua puede retener el material luego de haber estado sumergido por 24 horas seguidas.

- **Densidad Bulk:** Es el peso de material por metro cubico de agua.
- **Densidad SSS:** Es el peso de material saturado por cada metro cubico de agua.
- **Densidad aparente:** Es el peso de material incluida el agua por cada metro cubico de agua.

### **3.1.3.3 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos**

Este ensayo se realiza para determinar la gravedad específica y absorción de agua de los agregados gruesos cuando estos han sido sumergidos durante 24 horas, se lo realiza en estado saturada superficialmente seca (SSS) y usaremos el método de la canastilla.

#### **Procedimiento**

La muestra para el ensayo se deja sumergida totalmente en agua en un recipiente por 24 horas, pasado el tiempo se coloca sobre un trapo en el cual se le procede a frotar los agregados hasta eliminar el agua.

Se pesa en una balanza la muestra en condiciones superficialmente seca, luego colocamos esta muestra en la canastilla y pesamos dentro del agua. Después secamos la muestra en el horno a una temperatura constante de 110 °C durante 24 horas y procedemos a pesarla.

Los resultados de la muestra para el agregado de 3/4” se muestra en la Tabla 3.5 y los resultados de la muestra del agregado de 3/8 se indican en la Tabla 3.6.

<b>Agregado 3/4</b>			
Peso en el aire	A	986.18	g
Peso en el aire en condiciones sss	B	1000	g
Peso en el agua en condiciones sss	C	625	g
Gravedad específica Bulk	$A/(B-C)$	2.63	
Gravedad específica SSS	$B/(B-C)$	2.67	
Gravedad aparente	$A/(A-C)$	2.73	
% de absorción	$((B-A)/A) * 100$	1.40	
Densidad Bulk		2623.24	kg/m <sup>3</sup>
Densidad SSS		2660.00	kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente		2723.61	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 3.5. Gravedad específica y densidad aparente material 3/4". Fuente: Elaboración propia.

<b>Agregado 3/8</b>			
Peso en el aire	A	962.2	g
Peso en el aire en condiciones sss	B	1000	g
Peso en el agua en condiciones sss	C	601	g
Gravedad específica Bulk	$A/(B-C)$	2.41	
Gravedad específica SSS	$B/(B-C)$	2.51	
Gravedad aparente	$A/(A-C)$	2.66	
% de absorción	$((B-A)/A) * 100$	3.93	
Densidad Bulk		2405.50	kg/m <sup>3</sup>
Densidad SSS		2500.00	kg/m <sup>3</sup>
Densidad aparente		2657.24	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 3.6. Gravedad específica y densidad aparente material 3/8". Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Diseño de la curva granulométrica

Teniendo los ensayos de la granulometría de los tres tamaños de agregados que se muestra en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se procede a realizar una granulometría combinada para encontrar la curva que se encuentre dentro de los máximos y mínimos que nos dice la Tabla 3.7.

TAMIZ	Límite superior	Límite inferior
3/4"	100	96
1/2"	100	66
3/8"	79	46
No. 4	35	12
No. 10	23	6
No. 40	15	2
No. 200	8	2

Tabla 3.7. Límites granulométricos para mezclas porosas. Fuente: Elaboración propia.

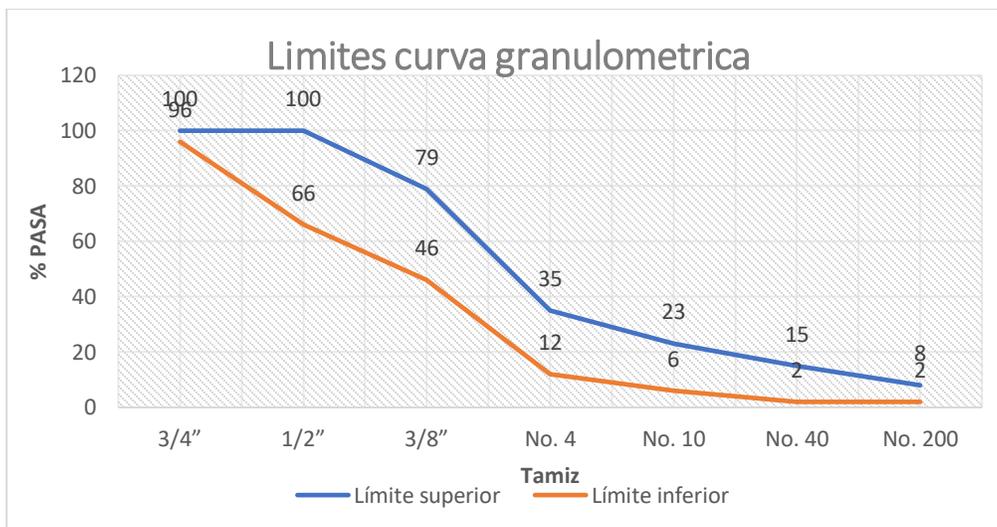


Ilustración 3.7. Límites curva granulométrica. Fuente: Elaboración propia.

Proponiendo una mezcla con 50% de agregado de 3/4", 25% de agregado de 3/8" y 25% de agregado fino, al multiplicar estos porcentajes por los porcentajes que pasan en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 de tamizado se obtiene como resultado los porcentajes que pasa con el material ya combinado, el mismo que se muestran en la Tabla 3.8. Como se puede observar los mismos están dentro de los límites que nos dicta la Norma para una mezcla drenante.

TAMIZ	Material 3/4	Material 1/2	Material Fino	TOTAL	TOTAL
3/4"	50.00	25.00%	25.00%	100.00%	100.00
1/2"	24.80%	25.00%	25.00%	74.80%	74.80
3/8"	5.80%	24.78%	25.00%	55.58%	55.58
No. 4	0.00%	2.60%	25.00%	27.60%	27.60
No. 10	0.00%	0.00%	19.07%	19.07%	19.07
No. 40	0.00%	0.00%	8.33%	8.33%	8.33
No. 200	0.00%	0.00%	3.52%	3.52%	3.52
BASE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-

Tabla 3.8. Granulometría combinada. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Ilustración 3.8 se observa la gráfica de la curva granulométrica combinada realizada con los áridos de la cantera Rookaazul Cía. Ltda, la misma que servirá como punto inicial para la realización de la investigación sobre diseño de pavimentos flexible poroso.

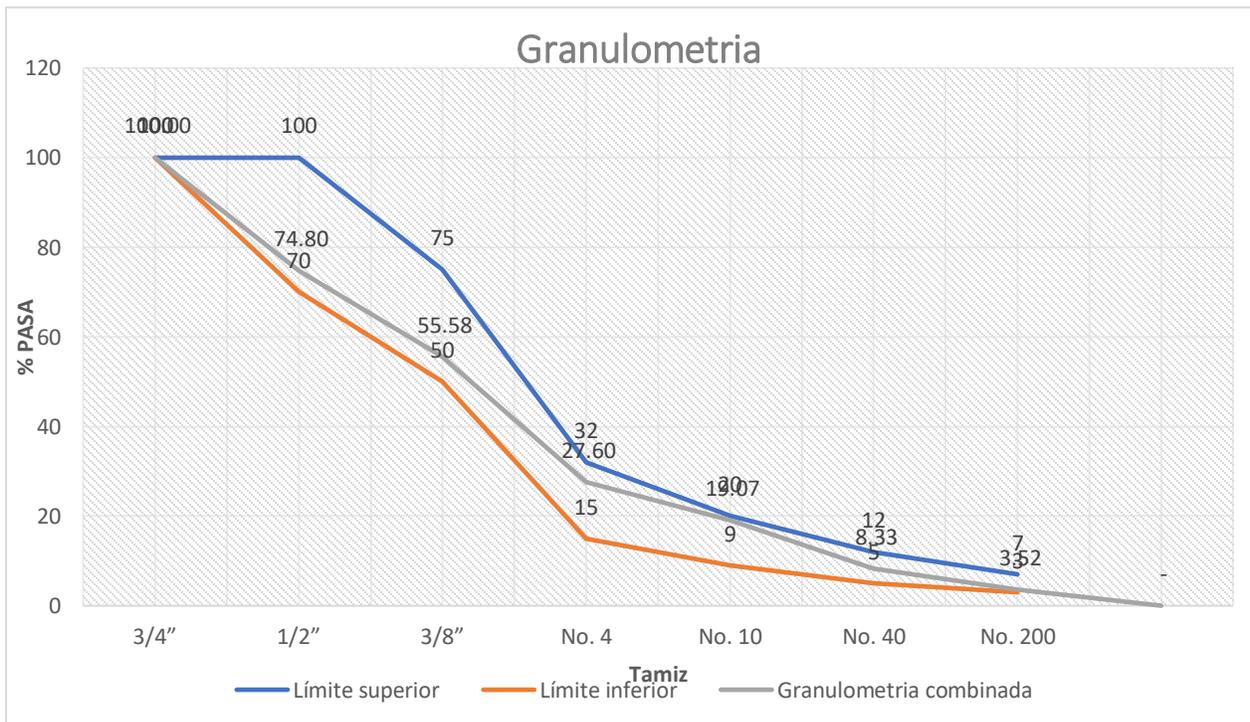


Ilustración 3.8. Curva granulométrica obtenida. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Obtención de polímero reciclado de caucho

El polímero triturado que usaremos como material aportante en la mezcla, es neumático triturado el mismo que es comercializado en el caso de la ciudad de Cuenca, por una empresa encargada de venta y mantenimiento de canchas sintéticas de uso múltiple. La empresa trabaja bajo el nombre de PLANET GRASS.



Ilustración 3.9. Neumático triturado. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Diseño de mezcla asfáltica porosa

En esta investigación se realizará la mezcla de 3 tipos de agregados de tamaño 3/4", 3/8" y fino proveniente de la planta trituradora de la empresa Rookaazul Cía. Ltda, ubicada en la provincia del Azuay. Los porcentajes de áridos están determinados en la Tabla 3.9.

<b>Porcentajes de Áridos Inicial</b>	
Árido 3/4	50%
Árido 3/8	25%
Árido fino	25%

Tabla 3.9. Porcentajes para la mezcla porosa. Fuente: Elaboración Propia.



Ilustración 3.10. Proceso de mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia.

El método Marshall para diseño de pavimentos asfálticos consiste en la elaboración de briquetas con la mezcla de los agregados y asfalto caliente, cada grupo de briquetas serán realizadas con varios porcentajes de asfalto, este procedimiento se realizará dentro de un laboratorio con todos los equipos necesarios para la elaboración de las briquetas.

Para encontrar el contenido necesario de asfalto para el pavimento asfáltico poroso se realizarán 4 grupos de briquetas, los cuales ayudaran a elaborar las curvas que representan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio.

Para esta investigación se empezará con porcentaje de 3,5% de asfalto y se irá incrementando 0.5% de asfalto hasta llegar a 5%.

Los grupos de briquetas constaran de 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto para realizar un promedio de las tres y obtener mejores resultados.



Ilustración 3.11. Grupo de briquetas por porcentaje. Fuente: Elaboración propia.

### Equipo.

- Equipo Marshall

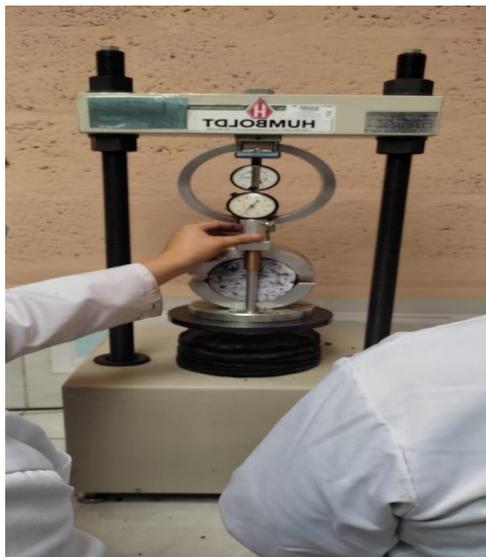


Ilustración 3.12. Equipo Marshall. Fuente: Elaboración propia.

- Balanza con precisión de 0.1 gr



Ilustración 3.13. Balanza de precisión. Fuente: Elaboración propia.

- Martillo de compactación con una zapata circular de 3 7/8" - (10 libras de peso y 18" de altura de caída).



Ilustración 3.14. Martillo de compactación. Fuente: Elaboración propia.

- Pedestal de compactación.



Ilustración 3.15. Pedestal de compactación. Fuente: Elaboración propia.

- Moldes de compactación especial de 4" de diámetro y 3" de altura con su collar.



Ilustración 3.16. Moldes para realización de briquetas. Fuente: Elaboración propia.

- Equipo para baño María.



Ilustración 3.17. Equipo de baño María. Fuente: Elaboración propia.

- Recipientes metálicos.



Ilustración 3.18. Equipo metálico para la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

- Bandeja para calentamiento.



Ilustración 3.19. Proceso de unificación de los materiales. Fuente: Elaboración propia.

- Horno que mantenga una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C.



Ilustración 3.20. Horno. Fuente: Elaboración propia.

- Cucharon
- Termómetro digital.
- Espátula y guantes de cuero
- Mezcla de agregados



Ilustración 3.21. Mezcla de agregados y asfalto. Fuente: Elaboración propia.

- Asfalto



Ilustración 3.22. Material bituminoso Asfalto. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.1 Elaboración de briquetas de mezcla asfáltica porosa

Se coloca en recipientes los diferentes agregados que se utilizarán en la mezcla, los cuales previamente serán secados a 110°C al horno. Se realiza la mezcla de áridos para un total de 5000g y restándole el porcentaje de asfalto se procede a calcular los gramos para cada uno de los áridos como se muestra en la Tabla 3.10.

	Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos
<b>Asfalto</b>	3.5%	175	<b>Asfalto</b>	4.0%	200	<b>Asfalto</b>	4.5%	225	<b>Asfalto</b>	5.0%	250
<b>Polímero</b>	0.0%	0	<b>Polímero</b>	0.0%	0	<b>Polímero</b>	0.0%	0	<b>Polímero</b>	0.0%	0
<b>Árido 3/4</b>	48.25%	2412.5	<b>Árido 3/4</b>	48.00%	2400	<b>Árido 3/4</b>	47.75%	2387.5	<b>Árido 3/4</b>	47.50%	2375
<b>Árido 3/8</b>	24.13%	1206.25	<b>Árido 3/8</b>	24.00%	1200	<b>Árido 3/8</b>	23.88%	1193.75	<b>Árido 3/8</b>	23.75%	1187.5
<b>Árido fino</b>	24.13%	1206.25	<b>Árido fino</b>	24.00%	1200	<b>Árido fino</b>	23.88%	1193.75	<b>Árido fino</b>	23.75%	1187.5
<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000

Tabla 3.10. Gramos utilizados de material por cada porcentaje. Fuente: Elaboración Propia.

Se procede a pesar los áridos de las diferentes fracciones y realizar la mezcla en una bandeja metálica, posteriormente se coloca en la bandeja de calentamiento a temperatura 140 a 180 °C.



Ilustración 3.23. Proceso de mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a calentar el cemento asfáltico a una temperatura de 150 °C para posteriormente pesar en un recipiente de acero los gramos establecidos para utilizarlo en la mezcla.



Ilustración 3.24. Asfalto en diferentes porcentajes. Fuente: Elaboración propia.

En la bandeja de calentamiento se mezcla perfectamente los agregados con una espátula o bailejo y se realiza un cráter en la misma para colocar el asfalto caliente.



Ilustración 3.25. Mezclado de materiales. Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la mezcla uniforme de los agregados y el asfalto con el bailejo hasta conseguir una mezcla completa y homogénea a una temperatura no menor de 120 °C.



Ilustración 3.26. Materiales una vez mezclados. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a limpiar bien los moldes y la base de compactación, posteriormente se coloca la mezcla asfáltica en caliente en el interior del molde y aplicamos 25 pinchazos con la espátula para obtener un compactado uniforme.

Se coloca el collarín de la base de compactación y se aplica 50 y 25 golpes por lado dependiendo la briqueta en la que se esté trabajando. Cuidando que el vástago del pistón se mantenga vertical.



Ilustración 3.27. Briqueta realizada luego de la compactación. Fuente: Elaboración propia.

Se retira el molde del pedestal, se quita el collar y la base y se deja enfriar en agua, para luego extraer la briqueta del molde.



Ilustración 3.28. Enfriamiento de las briquetas. Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de mezcla asfáltica porosa se realizaron 12 briquetas con 25 golpes y 12 briquetas con 50 golpes.



Ilustración 3.29. Briqueta finalizada. Fuente: Elaboración propia.

Luego de extraer las briquetas de los moldes; cada muestra compactada se somete a los siguientes ensayos en el orden indicado:

- Determinación del peso específico “Bulk”.



Ilustración 3.30. Masado de la briqueta en distintas condiciones. Fuente: Elaboración propia.

- Ensayos de estabilidad y flujo.



Ilustración 3.31. Equipo de ensayo Marshall. Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de la densidad y vacíos.



Ilustración 3.32. Ensayo Rice para determinación de vacíos equipo de extracción de aire.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.4.2 Ensayo de briquetas asfálticas porosa**

#### **3.4.2.1 Ensayo de estabilidad y flujo.**

De las briquetas con distintos porcentajes de asfalto se debe tomar 3 pesos distintos que son:

Peso en el aire: pesar las briquetas apenas se las desmolda y anotar su respectivo peso.

Peso saturado superficie seca: sumergir en agua las briquetas durante un periodo de 10 minutos, sacarlas del agua, secarlas con un paño absorbente, y tomar su peso.

Peso sumergido: tomar el peso de las briquetas sumergidas en agua.



Ilustración 3.33. Ensayo de densidad. Fuente: Elaboración propia.

Previo al ensayo de flujo y estabilidad se sumergen las briquetas a baño maría a una temperatura de 60 °C. Durante un tiempo de 30 a 40 minutos.



Ilustración 3.34. Briquetas en baño María previo al ensayo de flujo y estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Se coloca la briqueta en las mordazas y se aplica la carga, a una velocidad constante hasta que se produzca la rotura, se anota el valor de la estabilidad Marshall y al mismo tiempo se lee y se anota el flujo de la briqueta.



Ilustración 3.35. Ensayo de estabilidad y flujo. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

#### 3.5.1 Diseño de mezcla porosa sin polímero

Ensayo realizado con briquetas compuestas por 0% de polímero y 50 golpes con el martillo de compactación.

50 golpes	0% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1054	1134	1137	1295	1077	1049	1105	1084	1005	1206	1115	1123
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1075	1165	1174	1318	1095	1059	1136	1105	1016	1228	1136	1151
Peso de la muestra en agua (g)	585	631	627	723	591	573	619	598	551	669	612	625

Tabla 3.11. Pesos de briquetas con 0% de polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Asfalto (%)	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto
5	3277.12	17.67	2.12
4.5	3234.16	15.00	2.16
4	3345.57	14.33	2.15
3.5	2985.97	13.00	2.14

Tabla 3.12. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta 0% polímero y 50 golpes.

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo realizado con briquetas compuestas por 0% de polímero y 25 golpes con el martillo de compactación.

25 golpes	0% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1024	1059	1020	1051	1042	1048	1040	1073	1103	1044	1050	1001
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1043	1083	1045	1071	1064	1074	1057	1094	1123	1071	1093	1033
Peso de la muestra en agua (g)	562	586	558	587	580	586	586	601	600	576	590	567

Tabla 3.13. Pesos de briquetas con 0% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Asfalto (%)	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto
5	1191.27	22.33	2.12
4.5	1382.40	21.67	2.16
4	1292.67	17.33	2.16
3.5	1021.38	17.00	2.11

Tabla 3.14. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 0% polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se puede desprender que la gravedad neta entre ambos tipos de briqueta es parecida, la estabilidad es mayor con una compactación de 50 golpes, es por esta razón que se usa este tipo de compactación para vías de tráfico moderado y de 25 golpes para vías de tráfico ligero o mantenimiento. En lo que respecta al flujo se observa que en la compactación menor el flujo es mayor lo que probaría que con una compactación menor la deformación es más grande antes de la ruptura.

### 3.5.1.1 Densidad y vacíos de las briquetas asfálticas porosas

Para determinar la densidad y vacíos en las briquetas se utilizará el Ensayo Rice

#### ENSAYO RICE ASTM D 2041

Este ensayo sirve para determinar el volumen real de los vacíos en las mezclas asfálticas no compactadas a una temperatura de 25 °C.

#### Equipos.

- Máquina de extracción de vacíos.
- Termómetro.
- Muestra para el ensayo.

#### Procedimiento.

Para este ensayo primero se obtiene exactamente el peso del frasco con tapa más el peso del agua a 25°C.

Las muestras elaboradas con los diferentes porcentajes de asfalto son disgregadas y enfriadas a temperatura ambiente para luego ser pesadas y colocada en el frasco.



Ilustración 3.36. Colocación de agua en el recipiente. Fuente: Elaboración propia.

Luego agregar agua suficiente aproximadamente a 25°C para cubrir en su totalidad la muestra y colocar el frasco en el dispositivo agitador y proceder a encender la bomba de vacíos.

Luego de transcurrir aproximadamente 15 minutos se libera lentamente la presión del frasco, se retira el frasco y se procede a llenarlo en su totalidad con agua, una vez llena se procede a pesar el recipiente con tapa y su contenido.



Ilustración 3.37. Máquina extractora de aire. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene como resultado la Tabla 3.15. La misma que indica el valor Gmm que será un valor importante en la determinación del porcentaje de vacíos existentes en cada dosificación.

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA		50 GOLPES				25 GOLPES			
		0% de caucho				0% de caucho			
		Muestra 1 5% de asfalto sin	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto
<b>A</b>	PESO DE LA MEZCLA (g)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	672
<b>D</b>	PESO DEL PICNOMETRO + AGUA A 25 C (g)	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454
<b>E</b>	PESO DEL PICNOMETRO CON MEZCLA AFORADA A 25 C (g)	8039	8052	8048	8061	8049	8047	8051	7857
<b>RICE Gmm= A/(A+ D-E)</b>	GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA, Gmm:	2.41	2.49	2.46	2.54	2.47	2.46	2.48	2.50

Tabla 3.15. Gravedad específica teórica máxima. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 Curvas de diseño de mezcla asfáltica porosa

- Resultados de las briquetas con 50 golpes por lado.

Asfalto (%)	Porcentaje de vacíos	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto	Vacíos rellenos de asfalto-Contenido de asfalto	Vacíos de agregados-Contenido de asfalto
5	12.11	3277.12	17.67	2.12	45.63	22.22
4.5	13.28	3234.16	15.00	2.16	34.80	20.35
4	12.89	3345.57	14.33	2.15	36.74	20.37
3.5	14.62	2985.97	13.00	2.14	27.42	20.16

Tabla 3.16. Resultados para briquetas con 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.

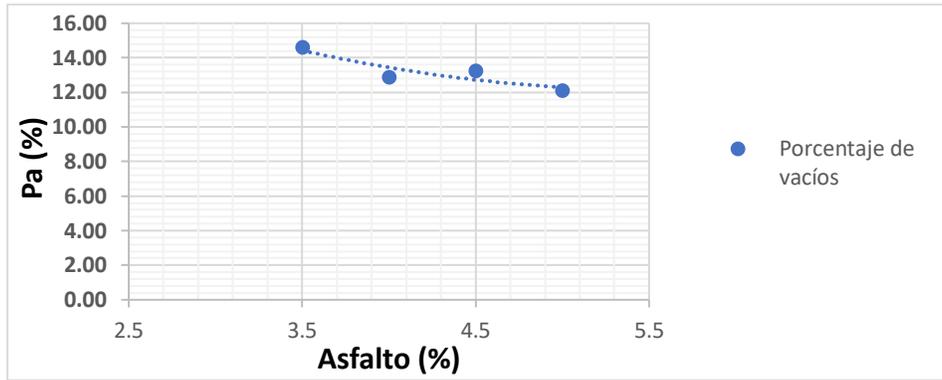


Ilustración 3.38. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia

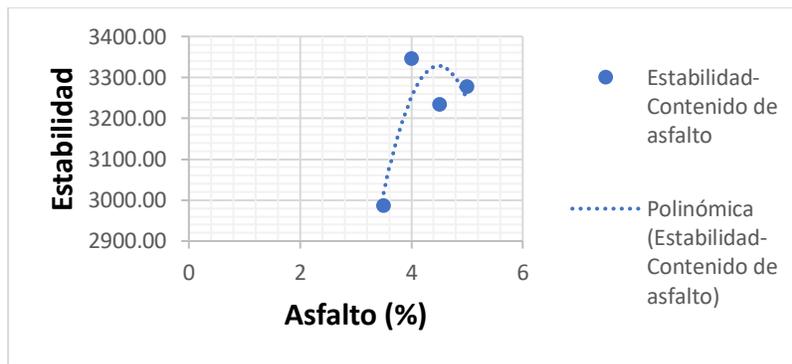


Ilustración 3.39. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

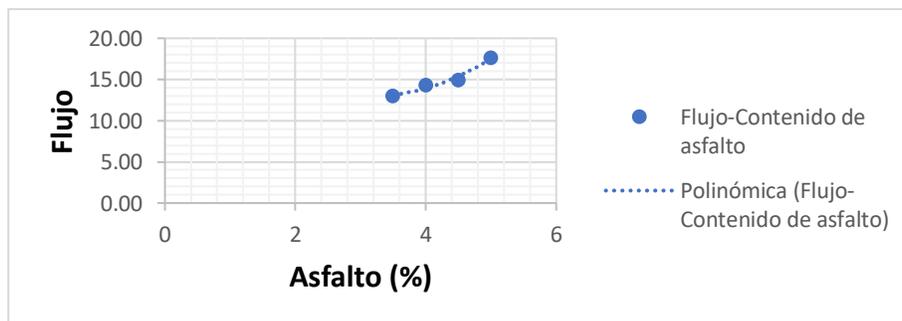


Ilustración 3.40. Flujo vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

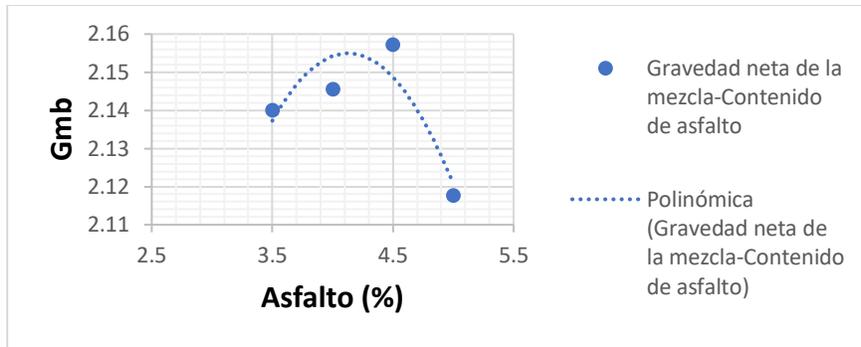


Ilustración 3.41. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

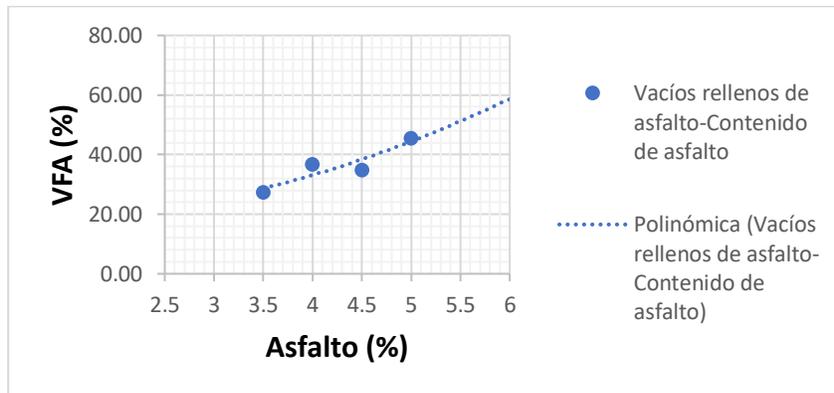


Ilustración 3.42. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

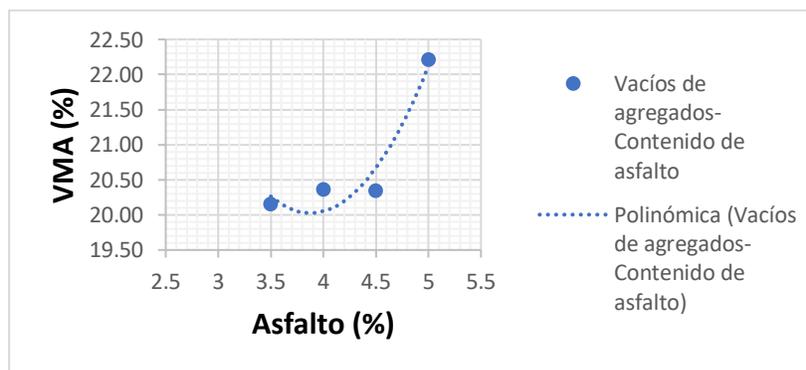


Ilustración 3.43. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 50 golpes). Fuente: Elaboración propia.

- Resultados de las briquetas con 25 golpes por lado

Asfalto (%)	Porcentaje de vacíos	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto	Vacíos rellenos de asfalto-Contenido de asfalto	Vacíos de agregados-Contenido de asfalto
5	14.22	1191.27	22.33	2.12	36.01	22.21
4.5	12.20	1382.40	21.67	2.16	40.08	20.35
4	12.77	1292.67	17.33	2.16	35.33	19.67
3.5	15.34	1021.38	17.00	2.11	27.36	21.10

Tabla 3.17. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

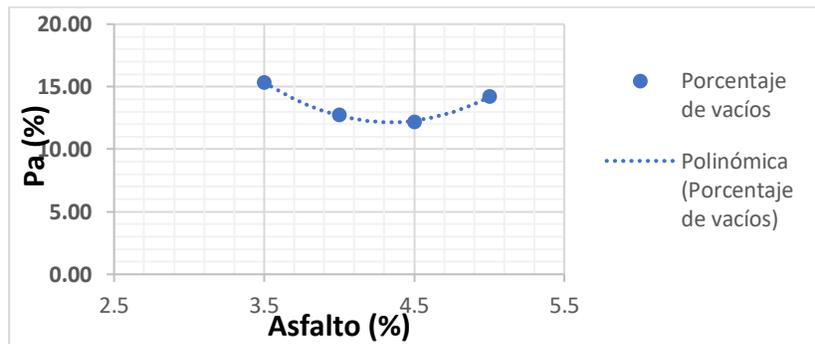


Ilustración 3.44. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

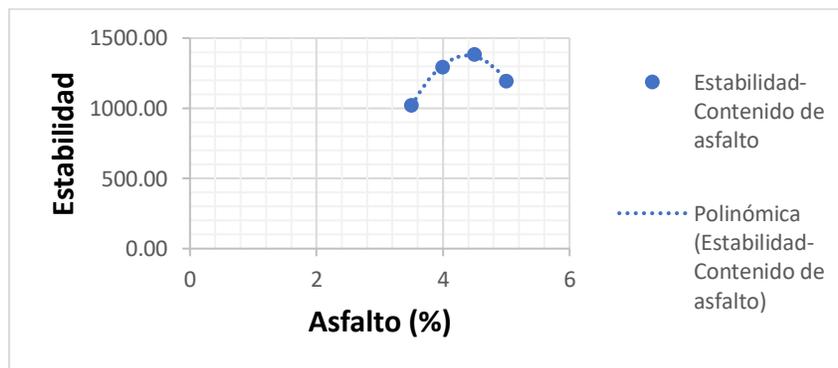


Ilustración 3.45. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

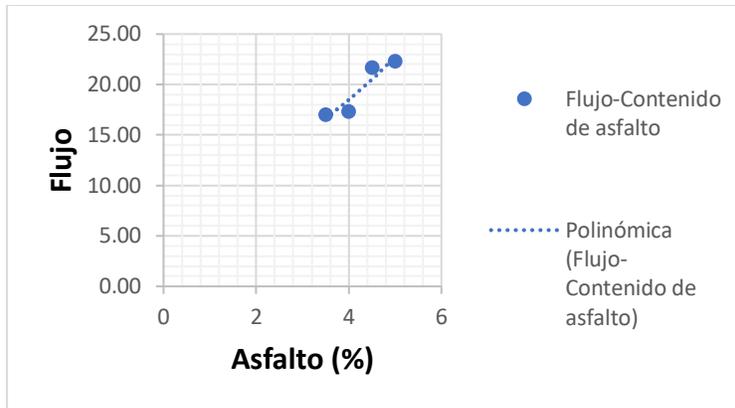


Ilustración 3.46. Flujo vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

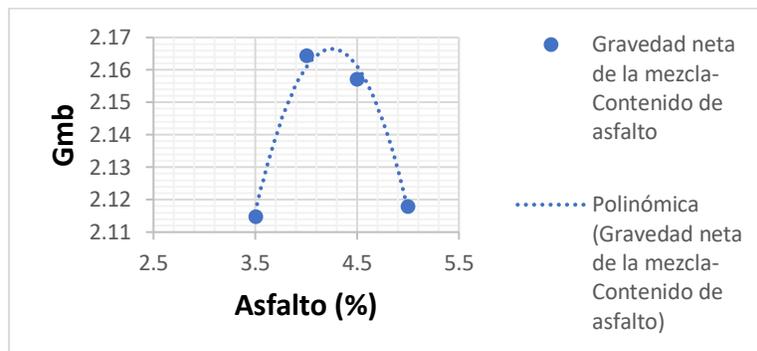


Ilustración 3.47. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

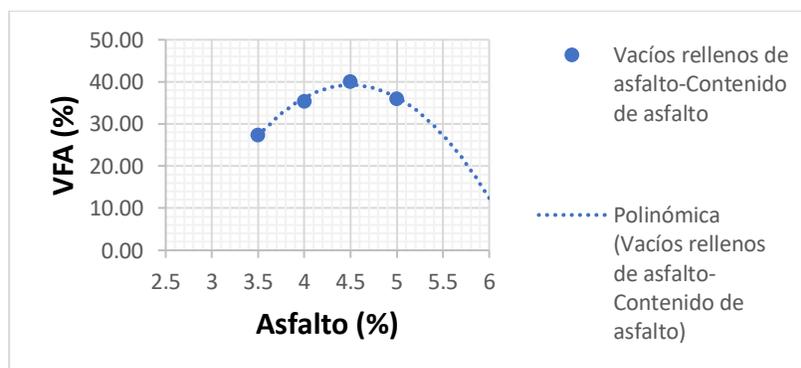


Ilustración 3.48. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

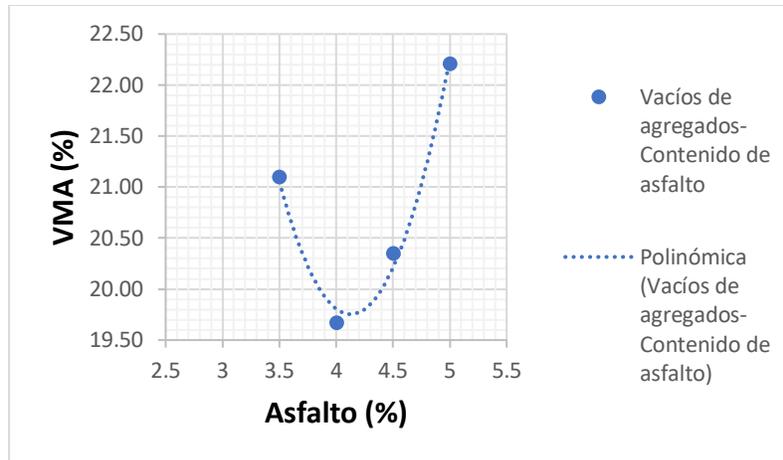


Ilustración 3.49. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (0% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3 Diseño de mezcla porosa con polímero

En esta investigación se utilizará el 1% de polímero, el cual proviene del caucho de neumáticos triturados y servirán como aglutinante en la fabricación de las briquetas.

Los porcentajes de cemento asfáltico con los que se trabaja en los diferentes grupos de briquetas con polímero son 3.5%, 4%, 4.5%, 5%.

El asfalto poroso con polímero reciclado y triturado es una mezcla de áridos, cemento asfáltico y polímero como aglutinante, con el objetivo de analizar su influencia en la estabilidad, flujo y el porcentaje de vacíos de las muestras compactadas.

### 3.5.4 Elaboración de briquetas de mezcla asfáltica porosa con polímero

Previamente se calcula los gramos necesarios de cada uno de los agregados, el polímero y el cemento asfáltico.

	Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos
<b>Asfalto</b>	3.5%	175	<b>Asfalto</b>	4.0%	200	<b>Asfalto</b>	4.5%	225	<b>Asfalto</b>	5.0%	250
<b>Polímero</b>	1.0%	50	<b>Polímero</b>	1.0%	50	<b>Polímero</b>	1.0%	50	<b>Polímero</b>	1.0%	50
<b>Árido 3/4</b>	47.75%	2387.5	<b>Árido 3/4</b>	47.50%	2375	<b>Árido 3/4</b>	47.25%	2362.5	<b>Árido 3/4</b>	47.00%	2350
<b>Árido 3/8</b>	23.88%	1193.75	<b>Árido 3/8</b>	23.75%	1187.5	<b>Árido 3/8</b>	23.63%	1181.25	<b>Árido 3/8</b>	23.50%	1175
<b>Árido fino</b>	23.88%	1193.75	<b>Árido fino</b>	23.75%	1187.5	<b>Árido fino</b>	23.63%	1181.25	<b>Árido fino</b>	23.50%	1175
<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000

Tabla 3.18. Porcentajes en gramos de cada material. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a pesar los gramos de cada uno de los agregados y del polímero, colocar en un recipiente y mezclar para posteriormente colocar en un recipiente de calentamiento.



Ilustración 3.50. Asfalto mezclado en caliente con el polímero. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico para poder extraer los gramos dependiendo del porcentaje de asfalto del grupo de briquetas.

Se mezcla completamente los agregados y el polímero y se forma un cráter con el bailejo se procede a introducir el asfalto caliente y realizar una mezcla uniforme hasta alcanzar una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 120 °C.

A continuación, se introduce la mezcla asfáltica en los moldes y se pincha 25 veces con la espátula para obtener una mejor compactación.

Se coloca el collarín de la base de compactación y se procede a aplicar 50 y 25 golpes por cara a caída libre cuidando que el pistón se mantenga vertical dependiendo del grupo de briquetas.

Se retira el molde de la base de compactación y se deja sumergidos en agua por unos minutos, para luego extraer la briketa modificada del molde.

Para el diseño de mezcla asfáltica porosa con polímero se realizaron 12 briquetas con 25 golpes y 12 briquetas con 50 golpes.

Luego de extraer las briquetas con polímero de los moldes; cada muestra compactada se somete a los siguientes ensayos en el orden indicado:

- Determinación del peso específico “Bulk”.
- Ensayos de estabilidad y flujo.
- Análisis de la densidad y vacíos.

### **3.5.5 Ensayo de briquetas asfálticas porosa con polímero**

Las briquetas con distintos porcentajes de asfalto y polímero, se debe tomar 3 pesos distintos que son:

- Peso en el aire: pesar las briquetas modificadas apenas se las desmolda y anotar su respectivo peso.
- Peso saturado superficie seca: sumergir en agua las briquetas modificadas durante un periodo de 10 minutos, sacarlas del agua, secarlas con un paño absorbente, y tomar su peso.
- Peso sumergido: tomar el peso de las briquetas modificadas sumergidas en agua.

Previo al ensayo, se sumergen las briquetas a baño maría a una temperatura de 60 °C durante un tiempo de 30 a 40 minutos.

Se coloca la briketa en las mordazas y se aplica la carga, a una velocidad constante hasta que se produzca la rotura se anta el valor de la estabilidad Marshall y al mismo tiempo se lee y se anota el flujo de la briketa.

Ensayo realizado con briquetas compuestas por 1% de polímero y 50 golpes con el martillo de compactación.

50 golpes	1% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1090	1036	1041	1068	1062	1007	994	1095	1116	1021	1006	1018
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1094	1040	1045	1075	1073	1015	1026	1129	1148	1048	1031	1036
Peso de la muestra en agua (g)	578	550	544	582	579	545	568	615	615	559	548	559

Tabla 3.19. Pesos de briquetas con 1% de polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Asfalto (%)	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto
5	1538.41	24.00	2.10
4.5	1111.96	35.00	2.15
4	2020.32	27.00	2.13
3.5	1522.83	18.33	2.10

Tabla 3.20. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 1% polímero y 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo realizado con briquetas compuestas por 1% de polímero y 25 golpes con el martillo de compactación.

25 golpes	1% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1142	870	930	980	1177	1096	1040	1049	1028	1043	989	1012
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1165	897	953	1000	1200	1117	1058	1061	1044	1065	1016	1040
Peso de la muestra en agua (g)	606	467	500	534	637	590	567	560	558	565	550	558

Tabla 3.21. Pesos de briquetas con 1% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Asfalto (%)	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto
5	612.30	18.67	2.04
4.5	880.32	17.67	2.09
4	615.70	13.67	2.11
3.5	1028.87	16.67	2.10

Tabla 3.22. Resultados ensayo estabilidad, flujo y gravedad neta briquetas 1% polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se puede desprender que la gravedad entre ambos tipos de briketa sigue siendo parecida, la estabilidad es mayor con una compactación de 50 golpes y en la de 25 golpes la estabilidad cae de manera drástica.

Lo que sería un indicativo de que una mezcla con la inclusión del neumático triturado afecta la estabilidad. En lo que respecta al flujo se observa que en la compactación de 50 golpes se logra tener una mayor deformación antes de la ruptura. Lo que indicaría que el caucho aporta en la deformación que pueda tener la estructura.

### **3.5.5.1 Densidad y vacíos de las briquetas asfálticas porosas**

Para determinar la densidad y vacíos en las briquetas se utilizará el Ensayo Rice

#### **ENSAYO RICE ASTM D 2041**

Este ensayo sirve para determinar el volumen real de los vacíos en las mezclas asfálticas no compactadas a una temperatura de 25 °C.

#### **Equipos.**

- Máquina de extracción de vacíos.
- Termómetro.
- Muestra para el ensayo.

#### **Procedimiento.**

Para este ensayo primero sacamos exactamente el peso del frasco con tapa más el peso del agua a 25°C.

Las muestras elaboradas con los diferentes porcentajes de asfalto son disgregadas y enfriadas a temperatura ambiente para luego ser pesadas y colocada en el frasco

Luego agregamos agua suficiente aproximadamente a 25°C para cubrir en su totalidad la muestra y colocamos el frasco en el dispositivo agitador y procedemos a encender la bomba de vacíos.

Después de transcurrir aproximadamente 15 minutos se libera lentamente la presión del frasco, se retira el frasco y procedemos a llenarlo en su totalidad con agua, una vez llena procedemos a pesar el recipiente con tapa y su contenido.

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA		50 GOLPES				25 GOLPES			
		1% de caucho				1% de caucho			
		Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto
<b>A</b>	PESO DE LA MEZCLA (g)	1794	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>D</b>	PESO DEL PICNOMETRO + AGUA A 25 C (g)	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454
<b>E</b>	PESO DEL PICNOMETRO CON MEZCLA AFORADA A 25 C (g)	8516	8046	8047	8052	8043	8051	8050	8048
<b>RICE</b> $G_{mm}=A/(A+D-E)$	GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA, Gmm:	2.45	2.45	2.46	2.49	2.43	2.48	2.48	2.46

Tabla 3.23. Gravedad especifica teórica máxima. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.6 Curvas de diseño de mezcla asfáltica porosa con polímero

- Resultados de las briquetas con 50 golpes por lado.

Asfalto (%)	Porcentaje de vacíos	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto	Vacíos rellenos de asfalto-Contenido de asfalto	Vacíos de agregados-Contenido de asfalto
5	14.25	1538.41	24.00	2.10	39.72	23.63
4.5	12.16	1111.96	35.00	2.15	43.04	21.35
4	13.25	2020.32	27.00	2.13	39.13	21.72
3.5	15.51	1522.83	18.33	2.10	30.82	22.41

Tabla 3.24. Resultados briquetas con 50 golpes. Fuente: Elaboración propia.

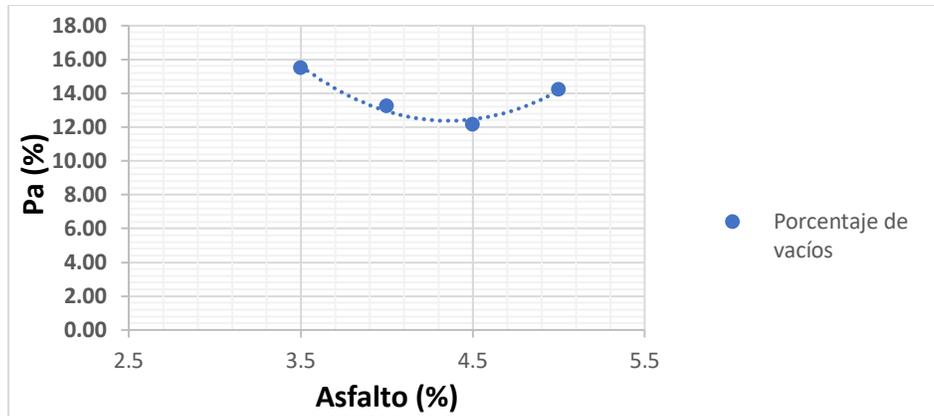


Ilustración 3.51. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

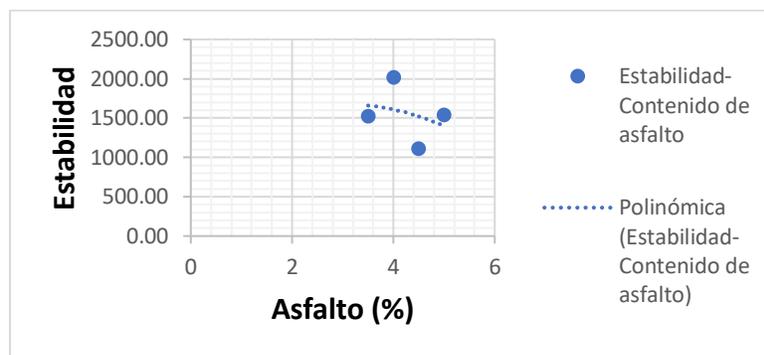


Ilustración 3.52. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

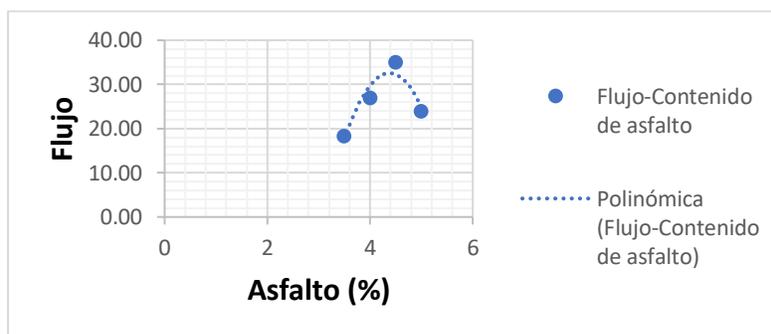


Ilustración 3.53. Flujo vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

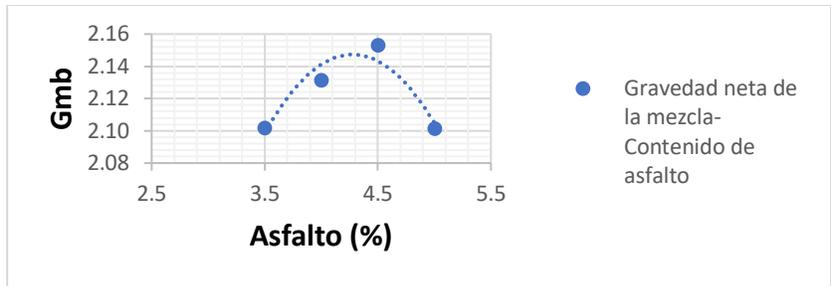


Ilustración 3.54. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

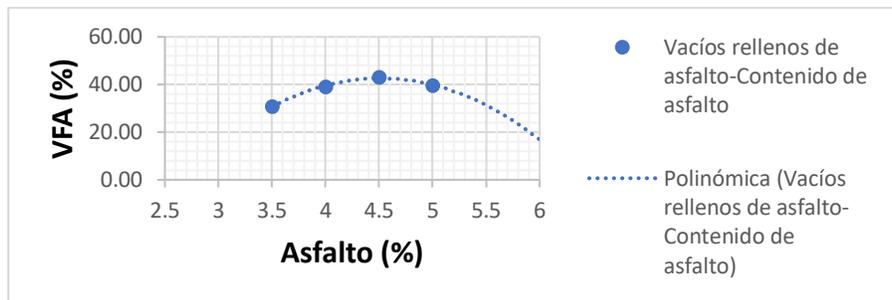


Ilustración 3.55. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

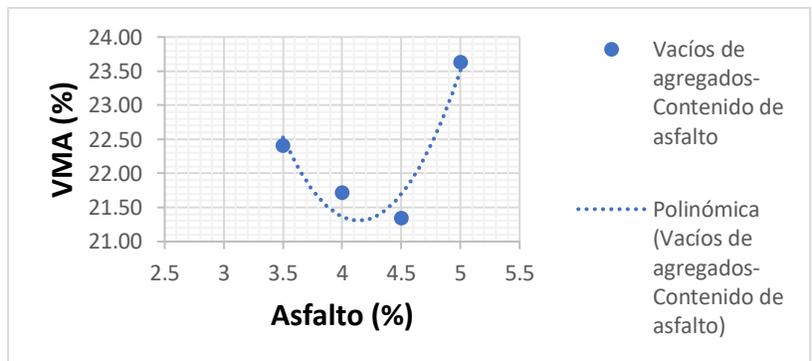


Ilustración 3.56. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 50 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

- Resultados de las briquetas con 25 golpes por lado.

Asfalto (%)	Porcentaje de vacíos	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto	Vacíos rellenos de asfalto-Contenido de asfalto	Vacíos de agregados-Contenido de asfalto
5	14.63	612.30	18.67	2.04	37.53	25.88
4.5	14.79	880.32	17.67	2.09	33.37	23.60
4	15.73	615.70	13.67	2.11	34.38	22.54
3.5	16.17	1028.87	16.67	2.10	34.61	22.37

Tabla 3.25. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

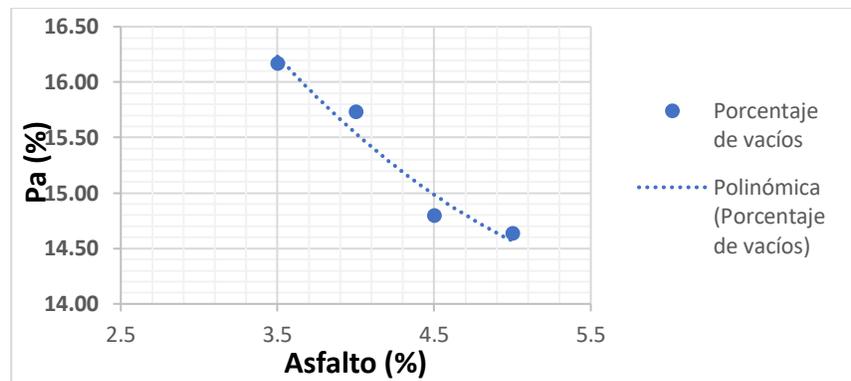


Ilustración 3.57. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

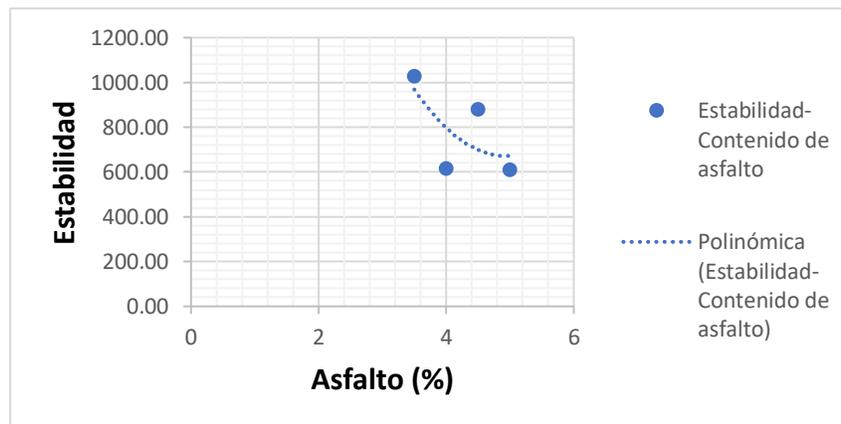


Ilustración 3.58. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

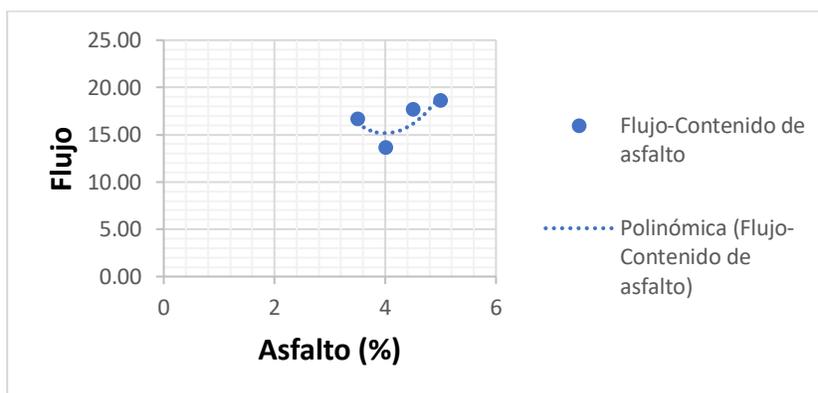


Ilustración 3.59. Flujo vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

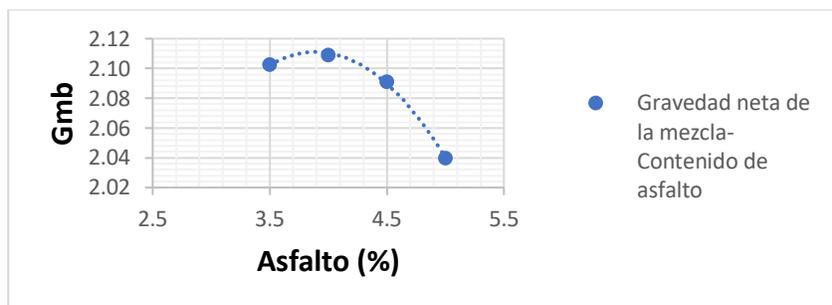


Ilustración 3.60. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

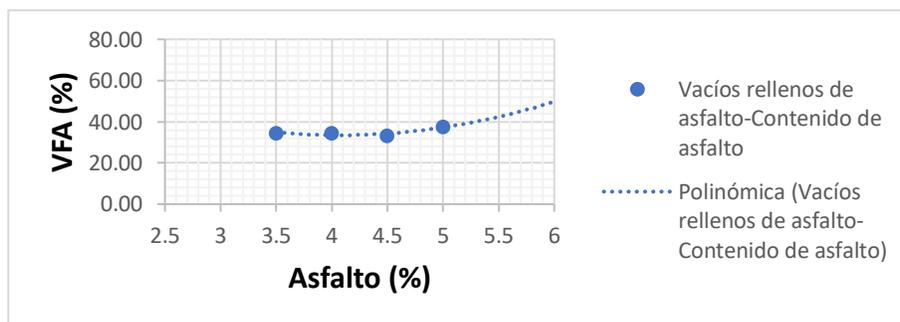


Ilustración 3.61. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

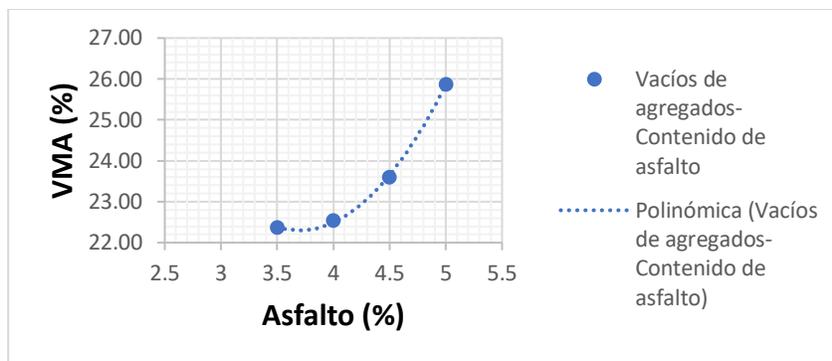


Ilustración 3.62. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (1% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Luego de realizados los ensayos con cada uno de los porcentajes propuestos se pudo determinar tres puntos claves para la obtención de una mezcla porosa.

Uso de neumático triturado: Se ha podido observar que al aumentar el porcentaje de polímero la mezcla obtiene un porcentaje más alto de vacíos ayudando de esta manera a que la mezcla tenga la porosidad deseada.

Estabilidad y flujo: Se pudo observar que la estabilidad disminuía cuando el polímero era agregado en grandes cantidades. Mientras que el flujo no sufría una alteración mayor.

Compactación: Observamos que al realizar una compactación mayor el porcentaje de vacíos variaba mínimamente que con una compactación menor. Siendo más alto el porcentaje con la compactación de 25 golpes por lado.

Es por ello que luego de realizado los ensayos de la dosificación propuesta hemos visto necesario para aportar más información a esta investigación, realizar un ensayo con un porcentaje mayor de neumático triturado que permita obtener mayor porcentaje de vacíos, pero a su vez aumentar el asfalto para no perder en la estabilidad y flujo. La dosificación que hemos propuesto es la de usar 5% de neumático triturado, con una compactación que nos aporte a los vacíos que en este caso sería de 25 golpes por lado de cada briqueta y mantenernos en los mismos porcentajes de asfalto en los que realizamos los anteriores ensayos.

### 3.7 Ensayo de comprobación final

Se realizó una mezcla asfáltica con 5% de caucho con los siguientes porcentajes para un total de 5000g.

	Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos		Porcentaje	Gramos
<b>Asfalto</b>	3.5%	175	<b>Asfalto</b>	4.0%	200	<b>Asfalto</b>	4.5%	225	<b>Asfalto</b>	5.0%	250
<b>Caucho</b>	5.0%	250	<b>Caucho</b>	5.0%	250	<b>Caucho</b>	5.0%	250	<b>Caucho</b>	5.0%	250
<b>Árido 3/4</b>	45.75%	2287.5	<b>Árido 3/4</b>	45.50%	2275	<b>Árido 3/4</b>	45.25%	2262.5	<b>Árido 3/4</b>	45.00%	2250
<b>Árido 3/8</b>	22.88%	1143.75	<b>Árido 3/8</b>	22.75%	1137.5	<b>Árido 3/8</b>	22.63%	1131.25	<b>Árido 3/8</b>	22.50%	1125
<b>Árido fino</b>	22.88%	1143.75	<b>Árido fino</b>	22.75%	1137.5	<b>Árido fino</b>	22.63%	1131.25	<b>Árido fino</b>	22.50%	1125
<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000	<b>TOTAL</b>	100%	5000

Tabla 3.26. Porcentajes en gramos de cada material. Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo los siguientes resultados.

25 golpes	5% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1067	992	1026	1064	1074	1057	1104	1103	1106	1086	1135	1108
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1096	1028	1063	1093	1108	1096	1125	1124	1127	1130	1181	1142
Peso de la muestra en agua (g)	529	495	508	529	531	532	545	539	548	541	564	546

Tabla 3.27. Pesos de briquetas con 5% de polímero y 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Asfalto (%)	Porcentaje de vacíos	Estabilidad-Contenido de asfalto	Flujo-Contenido de asfalto	Gravedad neta de la mezcla-Contenido de asfalto	Vacíos rellenos de asfalto-Contenido de asfalto	Vacíos de agregados-Contenido de asfalto
5	18.36	255.84	24.67	1.86	47.77	35.15
4.5	18.48	319.73	24.67	1.87	46.34	34.43
4	19.07	343.27	21.67	1.90	42.50	33.17
3.5	20.56	404.70	20.67	1.85	40.67	34.65

Tabla 3.28. Resultados briquetas con 25 golpes. Fuente: Elaboración propia.

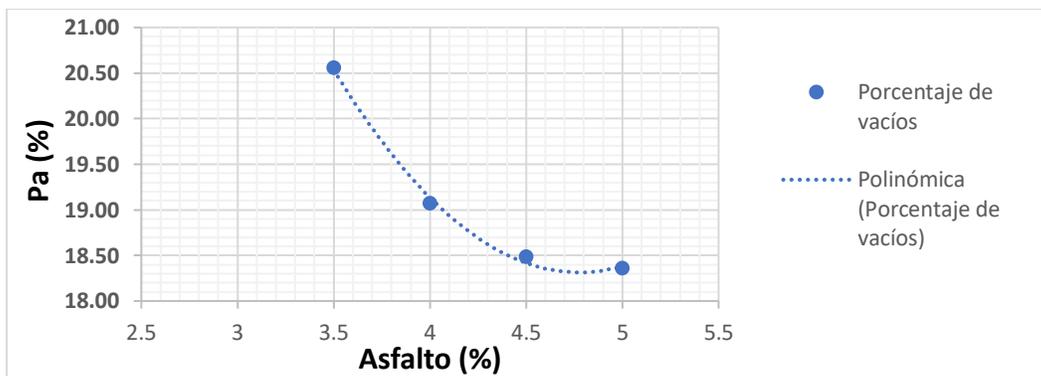


Ilustración 3.63. Porcentaje de vacíos total vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

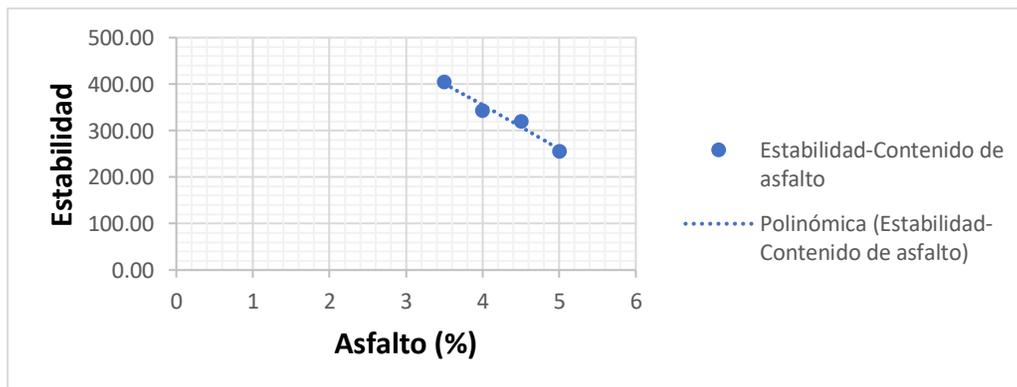


Ilustración 3.64. Estabilidad vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

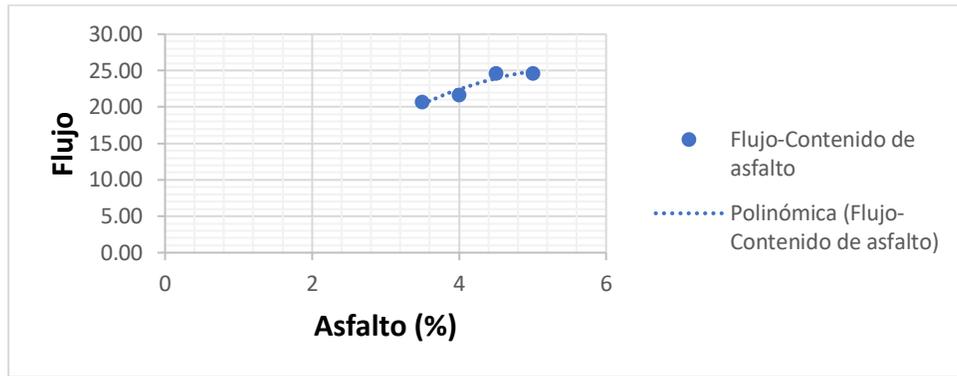


Ilustración 3.65. Flujo vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

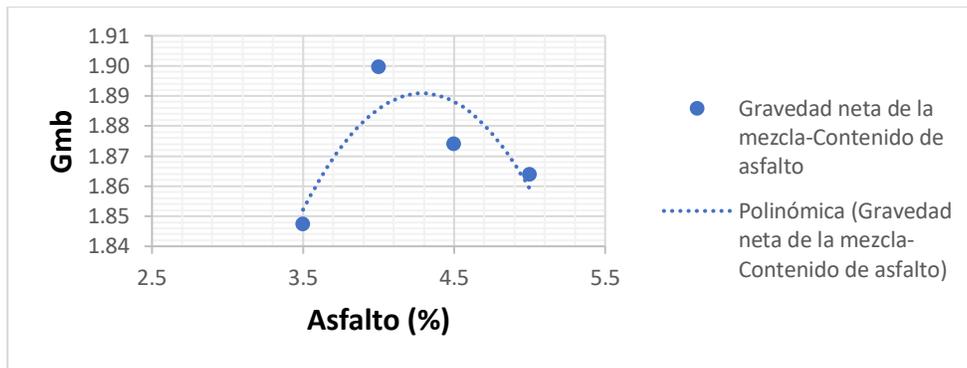


Ilustración 3.66. Gravedad neta de la mezcla vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

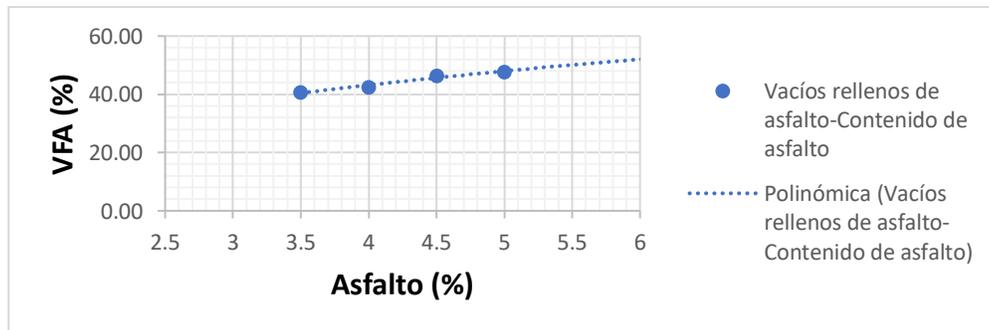


Ilustración 3.67. Vacíos rellenos de asfalto vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes).

Fuente: Elaboración propia.

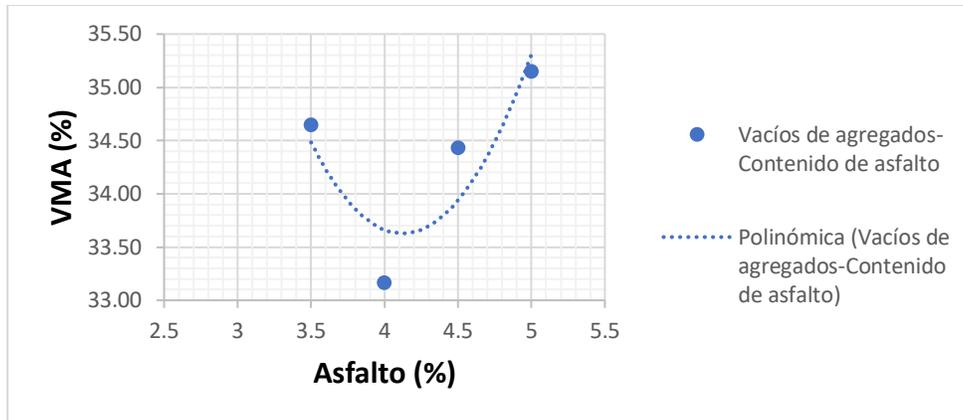


Ilustración 3.68. Vacíos de agregado mineral vs. Contenido de asfalto (5% de polímero 25 golpes). Fuente: Elaboración propia.

<b>ESTABILIDAD</b>	<b>FLUJO</b>
MARSHALL	(1/100")
750 Lbs. min	5-18

Tabla 3.29. Tabla 404-3.2. (NEVI, 2012).

Una vez terminado el ensayo de comprobación final se ha podido observar que al colocar un porcentaje similar o igual tanto de asfalto como de polímero la estabilidad es demasiado baja en comparación con el mínimo especificado en la norma (NEVI, 2012) que se indica en la tabla 3.29, haciendo que misma no sea útil para ningún tipo de estructura asfáltica. En cuanto al flujo se puede observar una mayor deformación la cual también perjudica a la mezcla como estructura asfáltica. En tanto al porcentaje de vacíos se puede ver un aumento y cumplimiento del porcentaje de vacíos para una mezcla porosa pero la mezcla ya no es útil por el resto de sus características.

#### 4 CONCLUSIONES

Una vez concluido este proyecto con la dosificación propuesta en el mismo hemos podido llegar a las siguientes conclusiones finales.

La primera es mencionar que con la dosificación propuesta no fue posible llegar a los porcentajes de vacíos requeridos. Sin provocar afecciones en la parte de estabilidad y flujo de cada uno de los ensayos.

Se debe mencionar que al momento de proponer dicha dosificación no se había realizado un proyecto de estas características en la zona es por ello que al momento de inicio del proyecto se tenía muy poca o nada de información sobre una mezcla porosa. Es por esta razón que se decidió proponer estos porcentajes que se pensó llegarían a cumplir las propiedades necesarias.

Se ha podido demostrar que los materiales existentes en la zona sirven de manera óptima en la consecución de la granulometría para una mezcla de carpeta asfáltica porosa.

El método que entrega mejores resultados al momento de mezclado para este tipo de asfalto poroso es el de la mezcla húmeda ya que permite mejor interacción con los materiales, al diluirse el neumático se fusiona con el asfalto dándole al mismo una propiedad adherente extra, la misma que permite usar menor cantidad de asfalto favoreciendo a los vacíos que son claves en este tipo de pavimento.

El neumático triturado usado en cantidades proporcionales junto con el asfalto actúa de manera favorable en la consecución de vacíos dentro de la mezcla. Lo que a su vez genera mayor porosidad. Si se usa en porcentajes dispares la mezcla se ve afectada en los puntos de estabilidad y flujo los mismos que son demasiado bajos impidiendo que la mezcla pueda usarse en cualquier tipo de proyecto.

Para este tipo de pavimentos se debe utilizar una compactación de 50 golpes por cara al momento de realizar la briqueta ya que al realizarse de esta manera la estabilidad y el flujo son favorables en comparación con la compactación de 25 golpes por cara.

Usar aditivos adherentes da a la mezcla un mejor porcentaje de vacíos que si se usa tan solo el neumático como un aditivo adherente, esto genera un costo extra al momento de la adquisición de dichos aditivos.

La mezcla antes de realizar las respectivas briquetas debe estar correctamente mezclada, la mezcla debe ser uniforme y estar cubierta en su totalidad por el asfalto ya que si este punto no se cumple de manera efectiva el producto que se obtiene al final no adquiere las propiedades adecuadas y mucha de las veces deben ser desechados.

La dosificación propuesta no fue la óptima para obtener los porcentajes de vacíos es por esta razón se propuso una dosificación extra aumentando el polímero la misma que permitió conseguir los vacíos, pero afecto a la estabilidad y flujo de forma considerable.

## **5 RECOMENDACIONES**

La utilización de pavimentos porosos debe realizarse en zonas de tráfico medio y en zonas urbanas donde no se produzcan gran acumulación de sedimentos los cuales afecten la porosidad del pavimento reduciendo su capacidad de filtración.

Para encontrar mayor porosidad en las mezclas asfálticas se necesita aumentar el porcentaje de polímeros en la mezcla asfáltica y adicionar un aditivo de adherencia que ayude a aumentar la estabilidad de la misma.

Al momento de realizar mezclas asfálticas con polímeros se necesita tener un estricto control, manejar temperaturas y tiempos determinados para realizar la mezcla sin que esta sufra alteraciones.

Los áridos utilizados en las mezclas asfálticas porosas no tienen que estar contaminados ya que la presencia de partículas de arcillas afecta las características de la mezcla.

En este trabajo se encontraron limitación en lo que tiene que ver con normativas en el país en donde se especifique el diseño de pavimentos asfálticos porosos, por lo que se sugiere que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) desarrolle una sección en la normativa actual para pavimentos porosos en donde se especifique la forma correcta de la realización de los mismos.

Este estudio busca establecer las bases para futuros proyectos con los cuales se determinará una mezcla de asfalto poroso que busca dar una solución medioambiental con la reutilización del caucho de neumáticos y además ser un sistema de drenaje eficiente, la cual a futuro sea utilizada en la ciudad y en el país.

Se sugiere analizar un criterio para determinar la estabilidad permisible en mezclas asfálticas porosas ya que actualmente se pose estos límites para mezclas tradicionales.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Alibaba.com. (2022). Alibaba.com. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Lab-Instrument-Asphalt-Marshall-Stability-Testing-60830483949.html>
- Ambiente, M. d. (30 de Septiembre de 2015). Ambiente.gob.ec. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-098.pdf>
- Arce, M., Elizondo, F., Jimenez, M., & Ramirez Castro, L. (2005). Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/722/Mezclas%20drenantes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ASTM D 1559, & AASHTO T 225. (s.f.). DISEÑO DE MEZCLAS METODO MARSHAL E INTERPRETACION DE RESULTADOS. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/astm-d-1559-3-pdf-free.html>
- Ayala, K., & Heredia, J. (2019). MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO DE LLANTAS AÑADIDO POR VÍA SECA. Obtenido de UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13840/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-317.pdf>
- Campaña, K., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Obtenido de [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/513/pdf](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/513/pdf)
- Campos Canessa, J. (2008). SEGUIMIENTO Y COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE TRAMOS CON MEZCLA DRENANTE, SEGÚN ZONA GEOGRÁFICA Y CONDICIONES LOCALES. Santiago de Chile, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. Obtenido de [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103220/campos\\_jc.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103220/campos_jc.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

- Castro, L., & Diaz, C. (2017). Universidad Santo Tomas. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>
- Dirección de Comunicación Ministerio del Ambiente y Agua. (2021). Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/2-203-neumaticos-se-recolectaron-durante-la-campana-llantaton-2021/>
- fabiequipos S.A.S. (2022). fabiequipos. Obtenido de <https://ravego1972.wixsite.com/fabiequipos/laboratorio-de-asfaltos>
- Ferguson, B. (2005). Porous Pavements.
- Gallego, J., & Prieto, J. (2004). TIPOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON CAUCHO DE NEUMÁTICOS. EXPERIENCIA ESPAÑOLA EN LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/27655081/tipos-de-mezclas-bituminosas-con-caucho-crp>
- Garcia Haba, E. (2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos. Universidad Politecnica de Valencia.
- Go Green. (2019). Obtenido de <http://www.ezpaving.net/porous-pavement-project/go-green-black-porous-asphalt-project-in-suzhou.html>
- Green Counsel. (2006). Obtenido de [https://nylawline.typepad.com/greencounsel/2006/09/they\\_paved\\_para\\_1.html](https://nylawline.typepad.com/greencounsel/2006/09/they_paved_para_1.html)
- IMCYC. (2003). Pavimentos Permeables. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 3-5.
- INVIAS Artículo 400. (2012). INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Colombia. Obtenido de <http://gerconcesion.co/invias2013/400%20DISPOSICIONES%20GENERALES.pdf>
- INVIAS Artículo 453. (2012). MEZCLA DRENATE. Colombia: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14348/3/Anexo%20E.%20Norma%20INVIAS%20-%20Capitulo%204.pdf>

- Israel, C. N. (Septiembre de 2013). Dspace Universidad Politecnica Salesiana con sede en Cuenca Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8971/1/UPS-CT005253.pdf>
- LanammeUCR, U. d. (2021). Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2224/guía%20sobrecapas.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Sobrecapa%20de%20mezcla%20asfáltica%3A%20consiste,espesor%20de%20una%20capa%20existente.>
- Made-in-China. (2022). Made-in-China. Obtenido de [https://es.made-in-china.com/co\\_testing-eqpt/product\\_Stsmj-1-Marshall-Compactor-Manual-4in-Mold\\_uosrngnug.html](https://es.made-in-china.com/co_testing-eqpt/product_Stsmj-1-Marshall-Compactor-Manual-4in-Mold_uosrngnug.html)
- Meneses, J., & Paez, D. (2017). MEZCLA ASFÁLTICA PERMEABLE COMO PARTE DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO A PARTIR DEL USO Y MODIFICACIÓN DE UNA MEZCLA DRENANTE APLICADO A VÍAS RURALES. Bogota, Colombia: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5374/P%C3%A1ezBocanegraDiegoAlberto2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- METODO MARSHALL (ASTM D-1559). (2016). DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE. 1Library.Co, 123-137. Obtenido de <https://1library.co/article/metodo-marshall-astm-d-dise%C3%B1o-mezcla-asf%C3%A1ltica-caliente.q5w3pdwq>
- MOP. (2002). obraspublicas.gob.ec. Obtenido de [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR\\_Chimborazo\\_Cumanda\\_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf)
- Moscoso, & Paredes. (2010). Uazuay.edu.ec. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/625/1/07920.pdf>
- NEVI. (2012). Obras públicas. Obtenido de [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013\\_Manual\\_NEVI-12\\_VOLUMEN\\_3.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf)

- Ramirez, Ladino, & Rosas. (2014). Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://1library.co/document/yngn6e0z-diseno-mezcla-asfaltica-asfalto-caucho-tecnologia-graded-bogota.html>
- Ramirez, N. (2006). ESTUDIO DE LA UTILIZACION DE CAUCHO DE NEUMATICOS EN MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE MEDIANTE PROCESO SECO. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Rodriguez Hernandez, J. (2008). ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS. Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Obtenido de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/10711;jsessionid=6E5625B6F9004CBB773EC84584D2E4BC#page=1>
- Ruiz, S. (2014). Día Mundial del Medio Ambiente y disposición de Neumáticos (Llantas) Usados. Obtenido de <https://2012profeciasmayasfindelmundo.wordpress.com/2014/06/05/dia-mundial-del-medio-ambiente-y-disposicion-de-neumaticos-llantas-usados/>
- Saucedo Vidal, A. (2012). Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México.
- Solano Mosquera, J. E., & Orellana, J. (17 de Octubre de 2019). Ucuencia. edu.ec. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33528/1/Trabajo%20de%20Titulación.pdf>
- Vega Zurita, D. S. (2016). Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25264/1/Tesis%201113%20-%20Vega%20Zurita%20Danilo%20Sebastián.pdf>
- Vila, S. (27 de 12 de 2021). uppers. Obtenido de [https://www.uppers.es/motor-y-movilidad/que-es-efecto-spray-como-evitarlo-be5m\\_18\\_3247396886.html](https://www.uppers.es/motor-y-movilidad/que-es-efecto-spray-como-evitarlo-be5m_18_3247396886.html)

## 7 ANEXOS

Universidad del Azuay												
Escuela de Ingeniería Civil												
Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas de caucho triturado												
Resultados del ensayo Marshall para mezclas con compactación de 50 golpes y 1% de caucho												
50 golpes	1% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1090	1036	1041	1068	1062	1007	994	1095	1116	1021	1006	1018
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1094	1040	1045	1075	1073	1015	1026	1129	1148	1048	1031	1036
Peso de la muestra en agua (g)	578	550	544	582	579	545	568	615	615	559	548	559
Volumen	516.0 0	490.0 0	501.0 0	493.0 0	494.0 0	470. 00	458.0 0	514.0 0	533.0 0	489.0 0	483.0 0	477.0 0
Gmb=Gravedad específica neta Bulk	2.112	2.114	2.078	2.166	2.150	2.14 3	2.170	2.130	2.094	2.088	2.083	2.134
<b>Promedio Gmb=Gravedad específica neta (Bulk)</b>	<b>2.102</b>			<b>2.153</b>			<b>2.131</b>			<b>2.102</b>		
Gmm=Gravedad específica teórica máxima	<b>2.451</b>			<b>2.451</b>			<b>2.457</b>			<b>2.488</b>		
Gravedad específica del asfalto	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.01 1	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011
% Asfalto	6	6	6	5.5	5.5	5.5	5	5	5	4.5	4.5	4.5
% Agregados	94	94	94	94.5	94.5	94.5	95	95	95	95.5	95.5	95.5

% Vagr= Porcentaje en volumen de los agregados	76.77	76.83	75.51	79.14	78.54	78.2 8	79.71	78.24	76.90	77.09	76.90	78.79
<b>Pa=% de vacíos</b>	<b>13.81</b>	<b>13.73</b>	<b>15.22</b>	<b>11.61</b>	<b>12.29</b>	<b>12.5 8</b>	<b>11.67</b>	<b>13.29</b>	<b>14.78</b>	<b>16.07</b>	<b>16.27</b>	<b>14.21</b>
Va= Volumen de asfalto	9.43	9.43	9.27	9.24	9.17	9.14	8.62	8.46	8.32	6.85	6.83	7.00
VMA=Porcentaje vacíos en los agregados	23.23	23.17	24.49	20.86	21.46	21.7 2	20.29	21.76	23.10	22.91	23.10	21.21
Ven= Volumen efectivo de asfalto	40.57	40.73	37.86	44.31	42.74	42.0 8	42.49	38.90	36.01	29.89	29.57	33.01
Gse= Gravedad específica bulk del agregado	2.70	2.70	2.70	2.67	2.67	2.67	2.66	2.66	2.66	2.67	2.67	2.67
Pba= Asfalto absorbido por el agregado	1.58	1.58	1.58	1.26	1.26	1.26	1.04	1.04	1.04	1.24	1.24	1.24
Ae= Contenido de asfalto efectivo	8.93	8.93	8.93	6.53	6.53	6.53	4.92	4.92	4.92	5.33	5.33	5.33
VFA= Vacíos rellenos de asfalto	40.57	40.73	37.86	44.31	42.74	42.0 8	42.49	38.90	36.01	29.89	29.57	33.01
Ensayo Marshall estabilidad	140.0 0	150.0 0	180.0 0	128.0 0	110.0 0	78.0 0	210.0 0	178.0 0	210.0 0	150.0 0	145.0 0	134.0 0
Estabilidad sin corregir (lbf)	1320. 31	1414. 72	1697. 98	1207. 00	1037. 05	734. 91	1981. 23	1679. 09	1981. 23	1414. 72	1367. 52	1263. 66
Factor de corrección	0.99	1.09	1.04	1.09	1.09	1.21	1.27	0.99	0.95	1.09	1.15	1.15
Estabilidad corregida (lbf)	1307. 09	1542. 19	1765. 96	1315. 77	1130. 53	889. 57	2516. 58	1662. 29	1882. 09	1542. 19	1572. 87	1453. 44
Flujo (in)	20	22	30	45	35	25	27	21	33	15	17	23
Promedio Vacíos Totales (%)	14.25		12.16		13.25		15.51					
Promedio VMA (%)	23.63		21.35		21.72		22.41					
Promedio VFA (%)	39.72		43.04		39.13		30.82					
Promedio Estabilidad (lbf)	1538.41		1111.96		2020.32		1522.83					
Promedio flujo (in)	24.00		35.00		27.00		18.33					

Tabla 7.1. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 50 golpes y 1% de polímero. Fuente: Elaboración propia.

Universidad del Azuay												
Escuela de Ingeniería Civil												
Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas de caucho triturado												
Resultados del ensayo Marshall para mezclas con compactación de 50 golpes y 0% de caucho												
50 golpes	0% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1054	1134	1137	1295	1077	1049	1105	1084	1005	1206	1115	1123
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1075	1165	1174	1318	1095	1059	1136	1105	1016	1228	1136	1151
Peso de la muestra en agua (g)	585	631	627	723	591	573	619	598	551	669	612	625
Volumen	490.0 0	534.0 0	547.0 0	595.0 0	504.0 0	486.0 0	517.0 0	507.0 0	465.0 0	559.0 0	524.0 0	526.0 0
Gmb=Gravedad específica neta Bulk	2.15	2.12	2.08	2.18	2.14	2.16	2.14	2.14	2.16	2.16	2.13	2.13
<b>Promedio Gmb=Gravedad específica neta (Bulk)</b>	<b>2.12</b>			<b>2.16</b>			<b>2.15</b>			<b>2.14</b>		
Gmm=Gravedad específica teórica máxima	<b>2.41</b>			<b>2.49</b>			<b>2.46</b>			<b>2.54</b>		
Gravedad específica del asfalto	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011
%Asfalto	5	5	5	4.5	4.5	4.5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
%Agregados	95	95	95	95.5	95.5	95.5	96	96	96	96.5	96.5	96.5
% Vagr= Porcentaje en volumen de los agregados	79.00	77.99	76.34	80.36	78.90	79.69	79.32	79.35	80.21	80.49	79.38	79.65
<b>Pa=% de vacíos</b>	<b>10.73</b>	<b>11.87</b>	<b>13.74</b>	<b>12.51</b>	<b>14.10</b>	<b>13.23</b>	<b>13.22</b>	<b>13.19</b>	<b>12.25</b>	<b>15.21</b>	<b>14.46</b>	<b>14.17</b>
Va= Volumen de asfalto	10.27	10.14	9.92	7.14	7.01	7.08	7.45	7.45	7.53	4.30	6.16	6.18

VMA=Porcentaje vacíos en los agregados	21.00	22.01	23.66	19.64	21.10	20.31	20.68	20.65	19.79	19.51	20.62	20.35
Ven= Volumen efectivo de asfalto	48.89	46.06	41.93	36.34	33.21	34.85	36.04	36.10	38.08	22.04	29.86	30.35
Gse= Gravedad específica efectiva del agregado	2.60	2.60	2.60	2.63	2.63	2.63	2.61	2.61	2.61	2.63	2.63	2.63
Pba= Asfalto absorbido por el agregado	0.18	0.18	0.18	0.60	0.60	0.60	0.39	0.39	0.39	0.60	0.60	0.60
Ae= Contenido de asfalto efectivo	0.87	0.87	0.87	2.60	2.60	2.60	1.50	1.50	1.50	2.01	2.01	2.01
VFA= Vacíos rellenos de asfalto	48.89	46.06	41.93	36.34	33.21	34.85	36.04	36.10	38.08	22.04	29.86	30.35
Ensayo Marshall estabilidad	300.0 0	345.0 0	430.0 0	600.0 0	330.0 0	210.0 0	410.0 0	260.0 0	320.0 0	410.0 0	286.0 0	330.0 0
Estabilidad sin corregir (lbf)	2830. 99	3255. 88	4058. 43	5663. 53	3114. 25	1981. 23	3869. 59	2453. 32	3019. 83	3869. 59	2698. 81	3114. 25
Factor de corrección	1.09	0.95	0.9	0.76	1.04	1.09	0.99	1.04	1.21	0.86	0.99	0.95
Estabilidad corregida (lbf)	3085. 92	3093. 00	3652. 43	4303. 92	3238. 88	2159. 68	3830. 88	2551. 52	3654. 32	3327. 63	2671. 81	2958. 46
Flujo (in)	18	19	16	15	15	15	14	14	15	13	11	15
Promedio Vacíos Totales (%)	12.11			13.28			12.89			14.62		
Promedio VMA (%)	22.22			20.35			20.37			20.16		
Promedio VFA (%)	45.63			34.80			36.74			27.42		
Promedio Estabilidad (lbf)	3277.12			3234.16			3345.57			2985.97		
Promedio flujo (in)	17.67			15.00			14.33			13.00		

Tabla 7.2. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 50 golpes y 0% de polímero. Fuente: Elaboración propia.

Universidad del Azuay												
Escuela de Ingeniería Civil												
Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas de caucho triturado												
Resultados del ensayo Marshall para mezclas con compactación de 25 golpes y 1% de caucho												
25 golpes	1% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1142	870	930	980	1177	1096	1040	1049	1028	1043	989	1012
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1165	897	953	1000	1200	1117	1058	1061	1044	1065	1016	1040
Peso de la muestra en agua (g)	606	467	500	534	637	590	567	560	558	565	550	558
Volumen	559.00	430.00	453.00	466.00	563.00	527.00	491.00	501.00	486.00	500.00	466.00	482.00
Gmb=Gravedad específica neta Bulk	2.04	2.02	2.05	2.10	2.09	2.08	2.12	2.09	2.12	2.09	2.12	2.10
<b>Promedio Gmb=Gravedad específica neta (Bulk)</b>	<b>2.04</b>			<b>2.09</b>			<b>2.11</b>			<b>2.10</b>		
Gmm=Gravedad específica teórica máxima	<b>2.43</b>			<b>2.48</b>			<b>2.48</b>			<b>2.46</b>		
Gravedad específica del asfalto	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011
% Asfalto	6	6	6	5.5	5.5	5.5	5	5	5	4.5	4.5	4.5
% Agregados	94	94	94	94.5	94.5	94.5	95	95	95	95.5	95.5	95.5
% Vagr= Porcentaje en volumen de los agregados	74.24	73.53	74.61	76.83	76.38	75.98	77.79	76.90	77.69	77.02	78.36	77.52
<b>Pa=% de vacíos</b>	<b>16.04</b>	<b>16.84</b>	<b>15.62</b>	<b>15.25</b>	<b>15.75</b>	<b>16.19</b>	<b>14.43</b>	<b>15.41</b>	<b>14.54</b>	<b>15.31</b>	<b>13.83</b>	<b>14.76</b>

Va= Volumen de asfalto	9.72	9.63	9.77	7.92	7.87	7.83	7.78	7.69	7.77	7.68	7.81	7.73
VMA=Porcentaje vacíos en los agregados	25.76	26.47	25.39	23.17	23.62	24.02	22.21	23.10	22.31	22.98	21.64	22.48
Ven= Volumen efectivo de asfalto	37.75	36.37	38.48	34.18	33.33	32.61	35.03	33.29	34.82	33.40	36.08	34.36
Gse= Gravedad especifica bulk del agregado	2.70	2.70	2.70	2.67	2.67	2.67	2.66	2.66	2.66	2.67	2.67	2.67
Pba= Asfalto absorbido por el agregado	1.58	1.58	1.58	1.26	1.26	1.26	1.04	1.04	1.04	1.24	1.24	1.24
Ae= Contenido de asfalto efectivo	8.93	8.93	8.93	6.53	6.53	6.53	4.92	4.92	4.92	5.33	5.33	5.33
VFA= Vacíos rellenos de asfalto	37.75	36.37	38.48	34.18	33.33	32.61	35.03	33.29	34.82	33.40	36.08	34.36
Ensayo Marshall estabilidad	120.00	45.00	22.00	50.00	145.00	100.00	68.00	67.00	48.00	125.00	70.00	98.00
Estabilidad sin corregir (lbf)	1131.47	423.34	206.17	470.54	1367.52	942.63	640.50	631.05	451.66	1178.68	659.38	923.75
Factor de corrección	0.86	1.42	1.27	1.21	0.86	0.95	1.09	1.04	1.09	1.04	1.21	1.15
Estabilidad corregida (lbf)	972.85	601.79	262.26	569.68	1175.85	895.43	698.28	656.36	492.45	1225.89	798.17	1062.55
Flujo (in)	14	24	18	16	17	20	12	15	14	16	17	17
Promedio Vacíos Totales (%)	14.63		14.79		15.73		16.17					
Promedio VMA (%)	25.88		23.60		22.54		22.37					
Promedio VFA (%)	37.53		33.37		34.38		34.61					
Promedio Estabilidad (lbf)	612.30		880.32		615.70		1028.87					
Promedio flujo (in)	18.67		17.67		13.67		16.67					

Tabla 7.3. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 1% de polímero. Fuente: Elaboración propia.

Universidad del Azuay										 <b>UNIVERSIDAD DEL AZUAY</b>		
Escuela de Ingeniería Civil												
Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas de caucho triturado												
Resultados del ensayo Marshall para mezclas con compactación de 25 golpes y 0% de caucho												
25 golpes	0% de caucho											
	5% de asfalto			4.5% de asfalto			4% de asfalto			3.5% de asfalto		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso aire (g)	1024	1059	1020	1051	1042	1048	1040	1073	1103	1044	1050	1001
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1043	1083	1045	1071	1064	1074	1057	1094	1123	1071	1093	1033
Peso de la muestra en agua (g)	562	586	558	587	580	586	586	601	600	576	590	567
Volumen	481.0 0	497.0 0	487. 00	484.0 0	484.0 0	488.0 0	471.0 0	493.0 0	523.0 0	495.0 0	503. 00	466.0 0
Gmb=Gravedad especifica neta Bulk	2.13	2.13	2.09	2.17	2.15	2.15	2.21	2.18	2.11	2.11	2.09	2.15
<b>Promedio Gmb=Gravedad especifica neta (Bulk)</b>	<b>2.12</b>			<b>2.16</b>			<b>2.16</b>			<b>2.11</b>		
Gmm=Gravedad especifica teórica máxima	<b>2.47</b>			<b>2.46</b>			<b>2.48</b>			<b>2.50</b>		
Gravedad especifica del asfalto	1.011	1.011	1.01 1	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.01 1	1.011
%Asfalto	5	5	5	4.5	4.5	4.5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
%Agregados	95	95	95	95.5	95.5	95.5	96	96	96	96.5	96.5	96.5
% Vagr= Porcentaje en volumen de los agregados	78.19	78.26	76.9 2	80.17	79.49	79.29	81.95	80.78	78.27	78.68	77.8 8	80.14
<b>Pa=% de vacíos</b>	<b>13.78</b>	<b>13.70</b>	<b>15.1 7</b>	<b>11.62</b>	<b>12.38</b>	<b>12.60</b>	<b>11.01</b>	<b>12.29</b>	<b>15.01</b>	<b>15.57</b>	<b>16.4 4</b>	<b>14.01</b>

Va= Volumen de asfalto	8.03	8.04	7.90	8.21	8.14	8.12	7.04	6.93	6.72	5.74	5.68	5.85
VMA=Porcentaje vacíos en los agregados	21.81	21.74	23.08	19.83	20.51	20.71	18.05	19.22	21.73	21.32	22.12	19.86
Ven= Volumen efectivo de asfalto	36.82	36.97	34.24	41.39	39.67	39.19	38.98	36.08	30.93	26.94	25.69	29.45
Gse= Gravedad especifica efectiva del agregado	2.60	2.60	2.60	2.63	2.63	2.63	2.61	2.61	2.61	2.63	2.63	2.63
Pba= Asfalto absorbido por el agregado	0.18	0.18	0.18	0.60	0.60	0.60	0.39	0.39	0.39	0.60	0.60	0.60
Ae= Contenido de asfalto efectivo	0.87	0.87	0.87	2.60	2.60	2.60	1.50	1.50	1.50	2.01	2.01	2.01
VFA= Vacíos rellenos de asfalto	36.82	36.97	34.24	41.39	39.67	39.19	38.98	36.08	30.93	26.94	25.69	29.45
Ensayo Marshall estabilidad	140.00	112.00	88.00	129.00	133.00	127.00	128.00	125.00	130.00	118.00	75.00	97.00
Estabilidad sin corregir (lbf)	1320.31	1055.94	829.33	1216.45	1254.21	1197.56	1207.00	1178.68	1225.89	1112.59	706.59	914.31
Factor de corrección	1.15	1.09	1.09	1.15	1.15	1.09	1.09	1.04	1.09	1.04	1.21	1.15
Estabilidad corregida (lbf)	1518.58	1151.11	904.11	1399.15	1442.58	1305.48	1315.77	1225.89	1336.36	1157.15	855.30	1051.69
Flujo (in)	14	25	28	18	18	29	19	14	19	20	14	17
Promedio Vacíos Totales (%)	14.22		12.20		12.77		15.34					
Promedio VMA (%)	22.21		20.35		19.67		21.10					
Promedio VFA (%)	36.01		40.08		35.33		27.36					
Promedio Estabilidad (lbf)	1191.27		1382.40		1292.67		1021.38					
Promedio flujo (in)	22.33		21.67		17.33		17.00					

Tabla 7.4. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 0% de polímero. Fuente: Elaboración propia.

Universidad del Azuay										 <b>UNIVERSIDAD DEL AZUAY</b>		
Escuela de Ingeniería Civil												
Diseño de pavimento flexible poroso con inclusión de partículas de caucho triturado												
Resultados del ensayo Marshall para mezclas con compactación de 25 golpes y 5% de caucho												
<b>25 golpes</b>	<b>5% de caucho</b>											
	<b>5% de asfalto</b>			<b>4.5% de asfalto</b>			<b>4% de asfalto</b>			<b>3.5% de asfalto</b>		
	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
Peso aire (g)	1067	992	1026	1064	1074	1057	1104	1103	1106	1086	1135	1108
Peso de la muestra en aire en estado SSS (g)	1096	1028	1063	1093	1108	1096	1125	1124	1127	1130	1181	1142
Peso de la muestra en agua (g)	529	495	508	529	531	532	545	539	548	541	564	546
Volumen	567.0 0	533.0 0	555.0 0	564.0 0	577.0 0	564.0 0	580.0 0	585.0 0	579.0 0	589.0 0	617.0 0	596.0 0
Gmb=Gravedad específica neta Bulk	1.88	1.86	1.85	1.89	1.86	1.87	1.90	1.89	1.91	1.84	1.84	1.86
<b>Promedio Gmb=Gravedad específica neta (Bulk)</b>	<b>1.86</b>			<b>1.87</b>			<b>1.90</b>			<b>1.85</b>		
Gmm=Gravedad específica teórica máxima	<b>2.28</b>			<b>2.30</b>			<b>2.35</b>			<b>2.33</b>		
Gravedad específica del asfalto	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011
% Asfalto	5	5	5	4.5	4.5	4.5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
% Agregados	90	90	90	90.5	90.5	90.5	91	91	91	91.5	91.5	91.5
% Vagr= Porcentaje en volumen de los agregados	65.48	64.76	64.32	66.00	65.12	65.57	66.96	66.33	67.20	65.22	65.07	65.76
<b>Pa=% de vacíos</b>	<b>17.58</b>	<b>18.48</b>	<b>19.03</b>	<b>17.94</b>	<b>19.03</b>	<b>18.48</b>	<b>18.91</b>	<b>19.68</b>	<b>18.63</b>	<b>20.72</b>	<b>20.90</b>	<b>20.06</b>
Va= Volumen de asfalto	16.95	16.76	16.65	16.06	15.84	15.95	14.12	13.99	14.17	14.06	14.03	14.18
VMA=Porcentaje vacíos en los agregados	34.52	35.24	35.68	34.00	34.88	34.43	33.04	33.67	32.80	34.78	34.93	34.24

Ven= Volumen efectivo de asfalto	49.09	47.56	46.66	47.24	45.43	46.34	42.75	41.55	43.21	40.43	40.16	41.41
Gse= Gravedad especifica efectiva del agregado	2.60	2.60	2.60	2.63	2.63	2.63	2.61	2.61	2.61	2.63	2.63	2.63
Pba= Asfalto absorbido por el agregado	0.18	0.18	0.18	0.60	0.60	0.60	0.39	0.39	0.39	0.60	0.60	0.60
Ae= Contenido de asfalto efectivo	0.83	0.83	0.83	2.46	2.46	2.46	1.42	1.42	1.42	1.91	1.91	1.91
VFA= Vacíos rellenos de asfalto	49.09	47.56	46.66	47.24	45.43	46.34	42.75	41.55	43.21	40.43	40.16	41.41
Ensayo Marshall estabilidad	55.00	20.00	18.00	55.00	38.00	28.00	44.00	55.00	33.00	62.00	46.00	54.00
Estabilidad sin corregir (lbf)	517.7 5	187.2 9	168.4 1	517.7 5	357.2 4	262.8 2	413.8 9	517.7 5	310.0 3	583.8 5	432.7 8	508.3 1
Factor de corrección	0.86	0.95	0.86	0.86	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.76	0.79
Estabilidad corregida (lbf)	445.0 5	177.8 5	144.6 1	445.0 5	296.2 5	217.8 8	343.2 7	429.4 7	257.0 7	484.3 3	328.5 4	401.2 4
Flujo (in)	22	24	28	23	25	26	20	19	26	20	21	21
Promedio Vacíos Totales (%)	18.36		18.48		19.07		20.56					
Promedio VMA (%)	35.15		34.43		33.17		34.65					
Promedio VFA (%)	47.77		46.34		42.50		40.67					
Promedio Estabilidad (lbf)	255.84		319.73		343.27		404.70					
Promedio flujo (in)	24.67		24.67		21.67		20.67					

Tabla 7.5. Resultados de ensayo Marshall para compactación de 25 golpes y 5% de polímero. Ensayo de comprobación final. Fuente:

Elaboración propia.

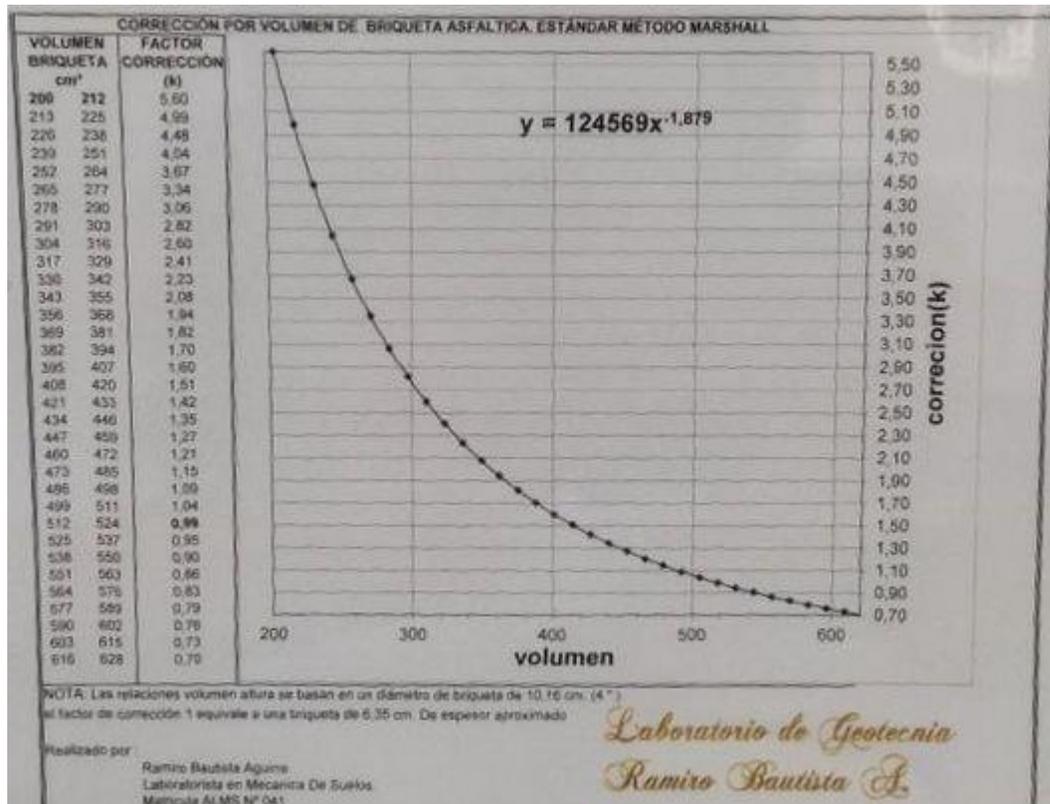


Ilustración 7.1. Corrección por volumen de briquea asfáltica estándar método Marshall.

Fuente: Ramiro Bautista.

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA		50 GOLPES								25 GOLPES								25 GOLPES			
		1% de caucho				0% de caucho				1% de caucho				0% de caucho				5% de caucho			
		Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto	Muestra 1 5% de asfalto	Muestra 2 4.5% de asfalto	Muestra 3 4% de asfalto	Muestra 4 3.5% de asfalto
<b>A</b>	PESO DE LA MEZCLA (g)	1794	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	672	1000	1000	1000	1000
<b>D</b>	PESO DEL PICNOMETRO + AGUA A 25 C (g)	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454	7454
<b>E</b>	PESO DEL PICNOMETRO CON MEZCLA AFORADA A 25 C (g)	8516	8046	8047	8052	8039	8052	8048	8061	8043	8051	8050	8048	8049	8047	8051	7857	8016	8019	8028	8024
<b>RICE</b> <b>Gmm=A/(A +D-E)</b>	GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA, Gmm:	2.45	2.45	2.46	2.49	2.41	2.49	2.46	2.54	2.43	2.48	2.48	2.46	2.47	2.46	2.48	2.50	2.28	2.30	2.35	2.33

Tabla 7.6. Resultados de ensayo RICE. Fuente: Elaboración propia.