

**ESTUDIO DEL CAUCHO TRITURADO, MATERIALES RECICLABLES  
COMO AGREGADO EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**



**UNIVERSIDAD MILITAR  
NUEVA GRANADA**

**AUTORES**

**CARLOS JEFFERSON JEREZ CABALLERO  
JULIAN DAVID OSSA MONTILLA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**INGENIERIA CIVIL**

Director:

**ING. JAIRO DÍAZ VILLARRAGA  
Topog. I.C MSc Infraestructura Vial**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE DE 2021**

**ESTUDIO DEL CAUCHO TRITURADO, MATERIALES RECICLABLES  
COMO AGREGADO EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO**



**UNIVERSIDAD MILITAR  
NUEVA GRANADA**

**CARLOS JEFFERSON JEREZ CABALLERO  
d7303215  
JULIAN DAVID OSSA MONTILLA  
d7303459**

**Propuesta de grado presentada como requisito parcial para optar al Título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**ING. JAIRO DÍAZ VILLARRAGA  
Topog. I.C MSc Infraestructura Vial**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE DE 2021**

Bogotá, D.C., 16 septiembre de 2021

Señores:

**COMITÉ DE OPCIÓN DE GRADO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA  
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**  
Ciudad. - Bogota D.C

**Ref.:** Presentación propuesta trabajo de grado.

En cumplimiento del reglamento de la Facultad para el desarrollo de la Opción de Grado, me permito presentar para los fines pertinentes la propuesta titulada: **“Estudio del caucho triturado, materiales reciclables como agregado en mezclas de concreto asfáltico”**.

El director es el Ingeniero Jairo Díaz Villarraga

Atentamente;

---

**Carlos Jefferson Jerez Caballero**  
Código: d7303215  
Estudiante de Ingeniería Civil



Handwritten signature of Julian David Ossa Montilla, with the identification number 1114.388.866 written below it.

---

**Julian David Ossa Montilla**  
Código: d7303459  
Estudiante de Ingeniería Civil

## **APROBACIÓN**

La propuesta de grado titulada **““Estudio del caucho triturado, materiales reciclables como agregado en mezclas de concreto asfáltico”**, opción de grado: trabajo de grado, presentada por los estudiantes Carlos Jefferson Jerez Caballero y Julian David Ossa Montilla en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de “Ingeniero Civil” fue aprobada por el director:

---

**Ing. Jairo Díaz Villarraga**  
Director de Proyecto de Grado  
Universidad Militar Nueva Granada

## CONTENIDO

	Pag.
<b>Resumen</b> .....	11
<b>1. Título</b> .....	12
<b>2. Objetivo General</b> .....	13
2.1 Objetivos Específicos.....	13
<b>3. Planteamiento del problema</b> .....	13
<b>4. Marco Teórico</b> .....	14
<b>5. Composición de los Neumáticos</b> .....	14
<b>6. Problemas Ambientales de Contaminación</b> .....	15
<b>7. Uso del Grano de Caucho Reciclado en la Mezcla de Concreto Asfáltico</b> .....	17
<b>7.1 Proceso para la Obtención del Caucho</b> .....	18
<b>8. Material de Caucho Reciclado que se Emplea en el Ensayo</b> .....	20
<b>9. Cemento Asfáltico</b> .....	20
<b>10. Aspectos de la Investigación</b> .....	22
10.1 Peso Específico.....	22
10.2 Reducción de Muestras a Tamaño de Ensayo .....	22
10.3 Gránulometría.....	22
10.4 Resistencia a la Abrasión.....	22
10.5 Muestreo Asfáltico .....	23
10.6 Ablandamiento.....	23
10.7 Penetración .....	23
10.8 Módulo Dinámico y Leyes de Fatiga .....	23
<b>11. Marco Teórico Ensayo Marshall para Muestras en Caliente</b> .....	23
<b>12. Desarrollo - Ensayo Marshall</b> .....	24
12.1 Agregados Empleados para los Ensayos .....	24
12.2 Gránulometría por Tamizado.....	25
12.2.1 <i>En Base a la Norma NTC 77</i> .....	26
<b>13. Gránulometría del GCR (Grano de Caucho Reciclado)</b> .....	27
<b>14. Procedimiento Laboratorio Ensayo Marshall</b> .....	29
14.1 Gránulometría del Agregado en Laboratorio.....	30
14.2 Porcentajes de Asfalto Empleados .....	30
14.3 Material Real Empleado en la Mezcla.....	31
14.4 Procedimiento de Mezcla y Compactación en Laboratorio.....	34
14.5 Resultados y Datos de Laboratorio.....	36

14.5.1 Mediciones sin Agregado de Caucho Reciclado (0% GCR) .....	36
14.5.2 Mediciones con Agregado de Caucho Reciclado (1% GCR) .....	37
14.5.3 Mediciones con Agregado de Caucho Reciclado (2% GCR) .....	38
<b>15.    Calculos del Laboratorio.....</b>	<b>39</b>
<b>15.1 Pesos de las Muestras .....</b>	<b>39</b>
15.2 Estabilidad Corregida .....	40
15.3 Gravedad Bulk.....	43
<b>15.4 Gravedad Especifica Máxima de la Muestra (Máxima Teórica).....</b>	<b>43</b>
<b>15.5 Densidad o Masa Unitaria .....</b>	<b>44</b>
15.6 Porcentajes de vacío de la muestra .....	44
15.7 Tablas de Resultados Ensayos Marshall.....	44
15.8 Gráficos Cálculos del Ensayo Marshall.....	45
15.9 Porcentaje de Vacíos de los Agregados Minerales (VMA).....	48
<b>16.    Diseño Óptimo.....</b>	<b>48</b>
<b>16.1 Diseño Óptimo mezcla tipo MDC-25 Porcentajes de GCR (0%, 1% y 2%)49</b>	<b>49</b>
16.1.1 <i>Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 0%</i> .....	49
16.1.2 <i>Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 1%</i> .....	49
16.1.3 <i>Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 2%</i> .....	50
<b>17.    Análisis de Resultados .....</b>	<b>51</b>
17.1 Resultado General de la Investigación .....	51
<b>17.2    Conclusiones de los Resultados .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>54</b>
<b>Glosario.....</b>	<b>56</b>
<b>Normas.....</b>	<b>57</b>
<b>Anexos de Registro Fotográfico de los Equipos Empleados.....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE CUADROS

Pag.

<b>Cuadro 1.</b> Implicaciones ambientales en el manejo y aprovechamiento de las llantas usadas en Santa Fe de Bogotá.....	17
<b>Cuadro 2.</b> Ventajas y Desventajas uso de Material Caucho Reciclado.....	18
<b>Cuadro 3.</b> Componentes que pueden contribuir a un mejor desempeño de asfalto .....	20
<b>Cuadro 4.</b> Propiedades del Cemento Asfáltico de Barrancabermeja .....	21
<b>Cuadro 5.</b> Tipo de Cemento Asfáltico empleado en la Mezcla en Caliente.....	21
<b>Cuadro 6.</b> Especificaciones del cemento asfáltico .....	21
<b>Cuadro 7.</b> Criterios para diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente Según las Especificaciones de INVIAS .....	24
<b>Cuadro 8.</b> Terminología Asociada con el uso del GCR en Mezclas Asfálticas .....	24
<b>Cuadro 9.</b> Gránulometría establecida por INVIAS .....	25
<b>Cuadro 10.</b> Tabla de Gránulometría del Material. ....	27
<b>Cuadro 11.</b> Gránulometría del Caucho Reciclado a Emplear .....	28
<b>Cuadro 12.</b> Gránulometría y Material Real por Porcentaje de Asfalto .....	30
<b>Cuadro 13.</b> Porcentaje de Asfalto, Agregado y CGR Empleado en los Ensayos.....	31
<b>Cuadro 14.</b> Material Real por Tamiz de los Agregados .....	32
<b>Cuadro 15.</b> Datos de las Mediciones sin Agregados de GCR.....	36
<b>Cuadro 16.</b> Datos de Laboratorio con 0% de GCR.....	37
<b>Cuadro 17.</b> Datos de las Mediciones con Agregados de GCR del 1%.....	37
<b>Cuadro 18.</b> Datos de Laboratorio con 1% de GCR .....	38
<b>Cuadro 19.</b> Datos de las Mediciones con Agregados de GCR del 2%.....	38
<b>Cuadro 20.</b> Datos de Laboratorio con 2% de GCR.....	39
<b>Cuadro 21.</b> Resultados de los Datos Pesos de las Muestras sin GCR.....	39
<b>Cuadro 22.</b> Resultados de los Datos Pesos de las Muestras con el 1% de GCR.....	40
<b>Cuadro 23.</b> Resultados de los Datos Pesos de las Muestras con el 1% de GCR.....	40
<b>Cuadro 24.</b> Tabla de Corrección de la Estabilidad según la Norma INV E – 748-13 ....	41
<b>Cuadro 25.</b> Estabilidad Corregida ( <b>GCR - 0%</b> ) Agregado de Caucho Reciclado. ....	42
<b>Cuadro 26.</b> Estabilidad Corregida ( <b>GCR - 1%</b> ) Agregado de Caucho Reciclado .....	42
<b>Cuadro 27.</b> Estabilidad Corregida ( <b>GCR - 2%</b> ) Agregado de Caucho Reciclado. ....	43
<b>Cuadro 28.</b> Tabla de Datos Correspondientes a ( <b>GCR 0%</b> ).....	44
<b>Cuadro 29.</b> Tabla de Datos Correspondientes a ( <b>GCR 1%</b> ).....	45
<b>Cuadro 30.</b> Tabla de Datos Correspondientes a ( <b>GCR 2%</b> ).....	45
<b>Cuadro 31.</b> Cálculos Gráfica Porcentaje de Vacíos .....	48
<b>Cuadro 32.</b> Comparación de los Parámetros Volumétricos Estimados.....	50
<b>Cuadro 33.</b> Resumen de los Resultados .....	51

## LISTA DE IMAGENES

	Pag.
<b>Imagen 1.</b> Secado del Material para Posterior Tamizar.....	25
<b>Imagen 2.</b> Material Tamizado en Laboratorio .....	26
<b>Imagen 3.</b> GCR Empleado en los Ensayos .....	28
<b>Imagen 4.</b> Material empleado en las mezclas sin agregar GCR .....	29
<b>Imagen 5.</b> Horno Empleado para el Secado de Material .....	33
<b>Imagen 6.</b> Preparación de las Mezclas en cada uno de los Porcentajes.....	34
<b>Imagen 7.</b> Compactación de las Briquetas en Laboratorio – Parte 1 .....	34
<b>Imagen 8.</b> Compactación de las Briquetas en Laboratorio – Parte 2.....	35
<b>Imagen 9.</b> Toma de Medidas Briquetas Laboratorio .....	35
<b>Imagen 10.</b> Probetas de Prueba.....	35
<b>Imagen 11.</b> Equipos de Laboratorio Utilizados en la Investigación – Primera Parte ....	58
<b>Imagen 12.</b> Equipos de Laboratorio Utilizados en la Investigación – Segunda Parte ...	59

## LISTA GRÁFICAS

	Pag.
<b>Gráfica 1.</b> Gránulometría INVIAS, gránulometría material de ensayo.....	27
<b>Gráfica 2.</b> Gránulometría Caucho Reciclado Empleado .....	28
<b>Gráfica 3.</b> Resultados Correspondientes a <b>(GCR 0%)</b> .....	46
<b>Gráfica 4.</b> Resultados Correspondientes a <b>(GCR 1%)</b> .....	46
<b>Gráfica 5.</b> Resultados Correspondientes a <b>(GCR 2%)</b> .....	47
<b>Gráfica 6.</b> Corresponde a la Comparativa de los Datos con los Diferentes Porcentajes de GCR (0%, 1% y 2%) Respectivamente.....	47
<b>Gráfica 7.</b> Porcentaje de Vacíos en los Agregados Minerales Vs Porcentaje de Asfalto .....	48
<b>Gráfica 8.</b> Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (0%) .....	49
<b>Gráfica 9.</b> Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (1%) .....	49
<b>Gráfica 10.</b> Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (2%) .....	50

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
<b>Ilustración 1.</b> Composición del Neumático.....	15
<b>Ilustración 2.</b> Tratamiento de neumaticos usados .....	19
<b>Ilustración 3.</b> Triturado de llantas y ¿Qué hay en una llanta?.....	19

## **Resumen**

Dentro de la investigación, se busca analizar y comparar las propiedades físicas y mecánicas entre una mezcla de asfalto normal estipuladas en las normas vigente en el país y una modificada con elementos reciclados de origen plástico (elastómero) material de triturado de neumáticos desechados como parte de sus agregados, mediante la implementación de ensayos de laboratorio para determinar las características del material utilizado como agregado mediante las normas ASTM, haciendo comparación del rendimiento y comportamiento de las mezclas, mediante el ensayo del Método Marshall, con la granulometría del ensayo C 136-06, peso específico y penetración nos darán el insumo comparativo necesario para medir el rendimiento, con el respectivo apoyo de la Universidad en la utilización de las instalaciones de laboratorio y con la consecución de materiales generalmente utilizados en las obras del departamento de Cundinamarca, se espera tener una alternativa con la utilización de un porcentaje de los agregados de las mezclas de asfalto, que sea amigable con el medio ambiente y con la descomposición demasiado tardía del material en estudio.

**1. Título**

***CAUCHO TRITURADO, MATERIALES RECICLABLES COMO AGREGADO EN  
MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO.***

\* CARLOS J. JEREZ CABALLERO1

\* JULIAN D. OSSA MONTILLA2

## **2. Objetivo General**

Evaluar e identificar las propiedades del gránulo de caucho triturado reciclado (GCR) como agregado en mezclas asfálticas en caliente tipo (MDC-25).

### **2.1 Objetivos Específicos**

- a. Comparar las propiedades y características de las mezclas asfálticas neutras tipo MDC-25 (Sin modificar) y modificadas con GCR, mediante la aplicación ensayos utilizando las normas ASTM e INVIAS.
- b. Identificar los parámetros físicos y mecánicos de la mezcla base y modificada con GCR, con el fin de comparar los resultados obtenidos entre ellas, determinando, si las mezclas asfálticas modificadas con GCR, mejoran o mantiene las propiedades del material constructivo.
- c. Analizar y comparar cada uno de los resultados de los ensayos realizados con la mezcla base tipo (MDC-25) y mezcla modificada tipo (MDC-25 con GCR), y su comparación con los parámetros establecidos por la normatividad INVIAS vigente.

## **3. Planteamiento del problema**

La contaminación producida por residuos plásticos o materiales con diferentes tipos de polímeros naturales y/o sintéticos a sido uno de los problemas ambientales y sociales mas importantes que a afectado al planeta tierra en la actualidad. La revolución industrial en conjunto con el desarrollo de la económica y la evolución de la tecnología, han formado esenarios ideales donde proliferan sociedades y culturas de consumo masivo. De hecho, y según lo informa la organización ambiental Greenpeace, (Greenpeace.org, 2020).

En países en via de desarrollo como colombia, el tema social y ambiental producto del consumo y manejo que se le da a este tipo de materiales es mas preocupante, ya que, en la mayoría de estas regiones, no se cuenta con una cultura responsable de consumo, no se brinda educación edecuada para mitigar este tipo de problemas, y los recursos estatales destinados para la solución de estos, a veces son escasos o inexistentes.

Para tener una idea de la problemática que esto representa en el país, y para dar un enfoque puntual a la problemática que quiere abordar esta investigación, en Colombia, según cifras de la dirección de impuestos y aduanas nacionales (DIAN) en el año 2020 se incorporaron 1.350.000 llantas al mercado nacional, de las cuales solo un 29% fueron reutilizadas, el porcentaje excedente fueron desechadas incorrectamente o almacenadas en centros de acopio (Semana, 2021).

Con este tipo de iniciativas, se busca incorporar estos elementos que no se están reciclando, como materia prima en proyectos de infraestructura vial, ayudando con esto, a su reutilización y disposición final del mismo.

#### 4. Marco Teórico

Dentro de las investigaciones realizadas en el marco de la ingeniería de vías, se encontró diversos estudios frente al empleo de Caucho reciclado como agregado en mezclas de concreto asfáltico, en sus inicios con nulos beneficios e incluso con sobrecostos y calidades deficientes que limitaban el uso de materiales alternos en el diseño de mezclas asfálticas.

Esto ha ido cambiando con el tiempo debido a diversas investigaciones realizadas por diferentes instituciones a nivel mundial, donde se evidencia que es posible hoy en día utilizar materiales de origen reciclado de diferentes orígenes, que ayuden a mantener las características técnicas y mecánicas de los diseños, enfocados a la aplicación de los mismo en mezclas asfálticas como es el caso del desarrollo de esta investigación.

El uso de caucho triturado reciclado como componente en el diseño de mezclas asfálticas no es algo nuevo, sin embargo es importante el estudio constante a través de los años del uso de este material en este tipo de aplicaciones, la industria automotriz cambia y renueva sus diseños constantemente a medida que avanza la tecnología, lo que conlleva que las investigaciones y los resultados obtenidas de las mismas pueden variar en el transcurso del tiempo, por lo cual se hace necesario la aplicación e investigación constante de estas prácticas de manera regular.

En la actualidad, ciudades como bogota, incentivan el uso de granulo de cacucho reciclado (GCR) en sus proyectos de infraestructura vial, por lo cual, la alcaldía de distrito en conjunto con el instituto de desarrollo urbano (IDU), destinaron recursos para la investigación del uso de estos elementos, la cual fue realizada por la universidad de los andes bajo el contrato IDU-366-01, llamado “Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas” (Instituto de Desarrollo Urbano, 2002).

#### 5. Composición de los Neumáticos

Es importante conocer la composición fisicoquímica de los neumáticos para identificar cuáles podrían ser los beneficios que estos nos podrían aportar en el uso de GCR dentro de la mezcla del concreto asfáltico. Y entender si la resistencia climatológica de los neumáticos puede ser aprovechada en cierto porcentaje en el concreto asfáltico.

Ya que las composiciones físicas de los mismos varían según las fábricas de manufactura, aun así, se presentan materiales similares entre sí como son los cauchos naturales y sintéticos (SBS, SBR), acero, textiles y aditivos que en GCR presentan comportamientos similares en el uso como agregados en el concreto asfáltico. Es así como en la **Ilustración 1**, se podrá detallar la composición de un neumático de una mejor forma.

### **Ilustración 1.** Composición del Neumático



**Nota:** Esta Ilustración muestra la composición en capas de un neumático. Por: Neumáticos Torrevieja. [En línea]. Disponible en: <https://neumaticos Torrevieja.es/composicion-de-un-neumatico/?hcb=1>

La industria manufacturera de neumático consume el 70% del caucho natural mundial, que en su gran mayoría es producido por Malasia, Indonesia y Tailandia (OCU, 2013).

La fabricación de los neumáticos se hace con caucho natural y sintético. Tanto el petróleo como los árboles naturales forman parte de la materia prima empleada. El primer elemento como material sintético y el segundo elemento como material natural el cual compone un 18 % del peso de un neumático aproximadamente.

En la fabricación de los neumáticos, se utilizan hasta 200 compuestos químicos diferentes, entre ellos encontramos materiales como el caucho natural como el principal componente, además están los cauchos sintéticos, el negro de humo, los agentes químicos (azufre, óxido de zinc, Cadmio y aditivos), los aceites minerales y las fibras reforzantes (hilos de acero y textiles). Asimismo, los cauchos sintéticos más utilizados en la actualidad son estireno butadieno (SBR), polispermos sintéticos (IR) y polibutadienos (BR) (López, López-Delgado, Alguacil, & Manso, 2009, pág. 4).

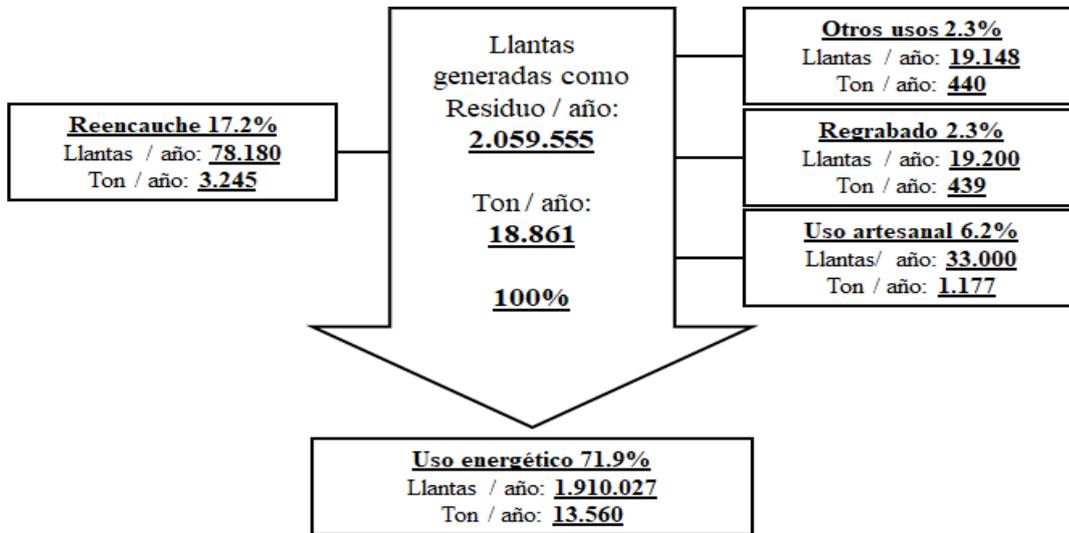
### **6. Problemas Ambientales de Contaminación**

El desecho de los neumáticos fuera de uso (NFU) se encuentra entre los de primer orden a nivel mundial, ya que la producción y demanda desmedida supera los procesos de reciclaje que en la actualidad existe.

Las problemáticas ambientales resultantes del almacenamiento desmedido de este elemento son diversas, entre las cuales esta la contaminación con agentes químicos tóxicos por la descomposición del mismo, generando lixiviación en el suelo y el agua, peligro de incendio al estar compuesto en su mayoría de elementos altamente inflamables, enfermedades y plagas que puede generar la acumulación de dichos neumáticos, generando espacios adecuados donde puedan proliferar zancudos o roedores que puedan transmitir enfermedades como el Chikungunya, Dengue y Fiebre Amarilla entre otras (ECO GREEN, 2018).

Tomando como referencia un estudio realizado en la ciudad de Bogotá por “Unión Temporal OCADE LTDA / SANIPLAN / AMBIENTAL S.A” (2018). Se puede observar como en la **Figura 1** se pueden detallar los porcentajes por tonelada de aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión.

**Figura 1.** Distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión



**Nota:** Porcentajes del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá. Por: Unión Temporal (Ocade Ltda. (Colombia), Saniplan (R.J.-Brasil) Y Ambiental S.A. (Argentina)). [En línea]. Disponible: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

De igual forma en el **Cuadro 1** se puede evidenciar todas las implicaciones ambientales y ocupacionales que se ocasionan por el manejo y reutilización de los neumáticos usados en el distrito capital.

**Cuadro 1.** Implicaciones ambientales en el manejo y aprovechamiento de las llantas usadas en Santa Fe de Bogotá.

Etapa de la cadena		Implicaciones	
Recuperación Transporte Acopio		Implicaciones menores Emisión de vehículos Visual Espacio público	
Aprovechamiento	Artesanal	No existe	
	Regrabado	No existe	
	Energético	Aire	SOx, NOx, CO, COVs, Contaminantes carcinogénos y mutagénicos
		Agua	S.S Depositados en el agua, escorrentia de cenizas y escoria a las aguas
		Suelo	Cenizas y escoria en zonas no autorizadas
		Biótico	Plantas y animales de la zona de influencia.
		Paisaje	Deterioro del entorno
Reencauche	No hay implicaciones ambientales representativas		

**Nota:** Implicaciones ambientales en el manejo y aprovechamiento de los neumáticos. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá. Por: Unión Temporal (Ocade Ltda. (Colombia), Saniplan (R.J.-Brasil) Y Ambiental S.A. (Argentina)). [En línea]. Disponible: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

Este estudio muestra cuál es el proceso del manejo y aprovechamiento de los neumáticos usados, con la consideración de aspectos tan importantes como su implementación, el medio ambiente e incluso la salud de quienes manipulan dichos componentes, ya que el uso del GCR como suministro de materia prima es el mas se emplea para estos materiales. Lo cuál indica que el uso de este material (GCR) está contemplado como agregado dentro de las mezclas asfálticas en caliente.

## 7. Uso del Grano de Caucho Reciclado en la Mezcla de Concreto Asfáltico.

Dentro del proceso planteado en la investigación, se busca conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica con el uso del GCR en el proceso seco usándolo como parte del agregado fino, con la finalidad de obtener una mezcla asfáltica mejorada con caucho.

En Colombia la implementación de caucho reciclado para proyectos de infraestructura vial es un tema que se ha venido tratando años atrás, en 2015 el ministerio de medio ambiente en conjunto con la vicepresidencia de la republica se hablo de la implementación de GCR en los proyectos viales primarios, y en las obras 4G que actualmente se vienen construyendo en el país (Minambiente, 2015), sin embargo, no se encuentra documentación oficial donde se especifica que esto si fue implementado.

Según INVIAS por cada kilometro de via construida con asfalto modificado en el territorio nacional, se implementarían unas 2260 llantas, que equivaldrían a unas 45 toneladas aproximadamente (INVÍAS, 2016).

En países como Estados Unidos y Argentina, se han realizado estudios para conocer el porcentaje ideal para el GCR en la mezcla asfáltica pasando de un 5% a 20%, considerando condiciones como la temperatura y el comportamiento de la plasticidad del

asfalto frente a la misma, teniendo en cuenta el paso de las cuatro estaciones del año. Dicha condición es una variable que a Colombia no le podría afectar de manera considerable como ha estos países, ya que sería mucho más fácil el planear y anticipar las condiciones meteorológicas casi constantes en las diferentes regiones del país.

Los porcentajes de caucho reciclado empleados en diferentes países varían desde el 5% al 20 %, con el fin de realizar estudios de comportamiento en diferentes climas y condiciones de los pavimentos en estas regiones. Es por eso, que dentro del **Cuadro 2** titulado ventajas y desventajas en el uso del material caucho reciclado, se puede analizar las siguientes variables.

**Cuadro 2.** Ventajas y Desventajas uso de Material Caucho Reciclado

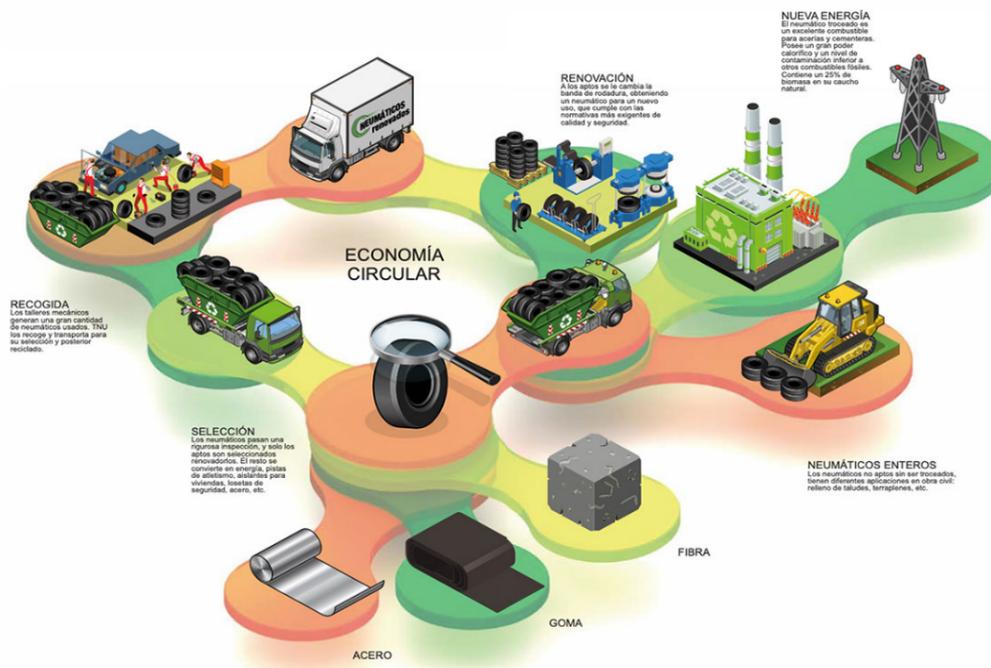
<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>● Por las características de vulcanizado presenta una mayor resistencia al calor y al sobrecalentamiento.</li><li>● No presenta estado de solubilidad.</li><li>● por sus propiedades dentro de la mezcla resulta más resistente al fisuramiento.</li><li>● por las propiedades mismas del caucho de llantas ayuda como refuerzo del ligante y aumenta la vida útil del pavimento.</li><li>● Ayuda al empleo de materiales que generan contaminación ambiental.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Debido a los aceites se puede presentar que la mezcla sea muy blanda y delicada.</li><li>● Al presentar incremento en la viscosidad no permite que la mezcla se emplee en las condiciones que se requiere que el ligante sea bien fluido, pero esta desventaja se puede solucionar con el uso de kerosén.</li></ul>

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 7.1 Proceso para la Obtención del Caucho.

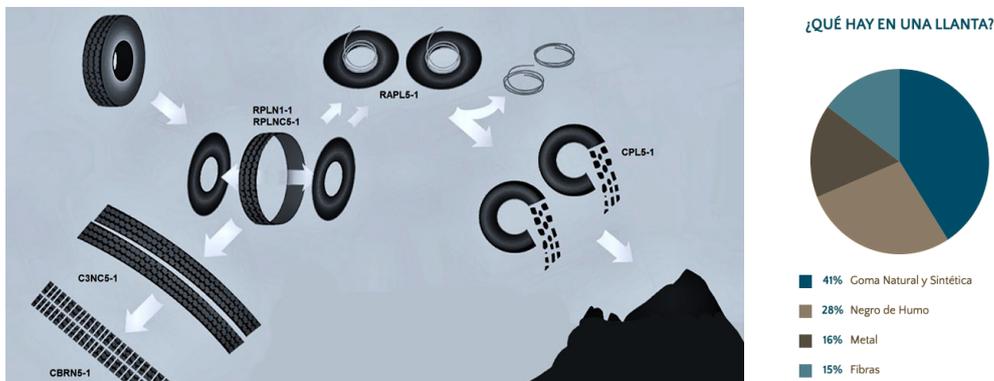
Desarrollo del proceso ambiental para el triturado del caucho de llantas usadas.

## Ilustración 2. Tratamiento de neumáticos usados



**Nota:** Tratamiento de neumáticos usados. Por: TNU. [En línea]. Disponible: [Gestión y tratamiento de los NFU - TNU](#)

## Ilustración 3. Triturado de llantas y ¿Qué hay en una llanta?



**Nota:** Triturado de llantas y ¿Qué hay en una llanta?. Por: Zerman. [En línea]. Disponible: <https://tritradoradellantas.com/>

En el material de Caucho de neumático reciclado, encontramos algunos componentes que pueden contribuir a un mejor desempeño de asfalto, asimismo en el **Cuadro 3** se puede observar estas características.

**Cuadro 3.** Componentes que pueden contribuir a un mejor desempeño de asfalto

<p><b>Humo Negro.</b></p> <p>Antioxidante, aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayudar a disminuir su envejecimiento.</p>	<p>Estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros de butadieno, en el momento de la preparación, y cuando se usan de este modo se denominan estabilizadores. el GCR contiene más del 20 por ciento de este compuesto.</p>
<p><b>Aminas.</b></p> <p>Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.</p>	<p><b>Aceites aromáticos.</b></p> <p>estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho.</p>

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 8. Material de Caucho Reciclado que se Emplea en el Ensayo

El grano de caucho reciclado (GCR) que se utilizó en los ensayos, fueron producto de llantas usadas que cumplieron su ciclo de vida útil, estas se conseguieron en la empresa Renovadora de Llantas Ltda Renoboy.

Procedimiento de la renovadora de llantas para obtener el material (GCR):

- Materia prima llantas usadas las cuales se raspan con cuchillas que giran en sentido contrario al movimiento de rotación normal de la llanta, obteniéndose partículas que van desde tamaños de 2.38 mm a 74  $\mu\text{m}$ , libre de fibras y metales. Las partículas superiores a 2 mm son de forma alargada, lo que requiere de un proceso adicional de molienda para lograr un grano (Instituto de Desarrollo Urbano, 2002, pág. 19).

### 9. Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico es un producto bituminoso semisólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno (Instituto de Desarrollo Urbano, 2011, pág. 1).

Las propiedades del cemento asfáltico empleado en la investigación es el de la refinería de Barrancabermeja. Esto se puede analizar en el **Cuadro 4**.

**Cuadro 4.** Propiedades del Cemento Asfáltico de Barrancabermeja

Refinería de Barrancabermeja				
Asfalto 70/90				
Propiedad	Método ASTM	Unidad	Máx.	Min.
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s	D 5	mm/10	70	90
Punto de ablandamiento	D 36	°C (°F)	42 (108)	53 (127)
Punto de inflamación	D 92	°C (°F)	232 (450)	

**Nota:** Propiedades del cemento asfáltico de Barrancabermeja. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Ecopetrol. Adaptado de: Instituto de Desarrollo Urbano. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

Siguiendo los parámetros establecidos por INVIAS “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos” (Instituto de Desarrollo Urbano, 2002, pág. 45)

**Cuadro 5.** Tipo de Cemento Asfáltico empleado en la Mezcla en Caliente

Tránsito de diseño 10 <sup>6</sup> ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24 °C +	15-24 °C	15 °C
5 +	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

**Nota:** Propiedades del cemento asfáltico de Barrancabermeja. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Invias. Adaptado de: Instituto de Desarrollo Urbano. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

**Cuadro 6.** Especificaciones del cemento asfáltico

CARACTERISTICA	Norma de ensayo INV	60-70		80-100		
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Pérdida por calentamiento en película delgada (163 °C, 5h)	%	E-721	-	1.0	-	1.0
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada, % de la penetración original	%		52	-	48	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2

**Nota:** Propiedades del cemento asfáltico de Barrancabermeja. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Invias. Adaptado de: Instituto de Desarrollo Urbano. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

## **10. Aspectos de la Investigación.**

Se buscó adelantar un proceso seco para incorporar las partículas de GCR a la mezcla asfáltica caliente, como parte de un porcentaje de los agregados finos. En otras investigaciones se identifica que debe tener entre el 1% y 3% del total de los agregados de la mezcla. Como ventaja en el proceso, es que no se requiere de equipos especiales para realizar la incorporación de dicho compuesto a la mezcla, más que hacerlo en el momento exacto de la temperatura adecuada y antes de adicionar el ligante a la mezcla (Instituto de Desarrollo Urbano & Universidad de los Andes, 2000).

El uso de la granulometría en los laboratorios de la universidad nos permitirá tener certeza del tamaño del material empleado en los ensayos de laboratorio. El método propuesto puede ser empleado para mezclas asfálticas en caliente con granulometrías densas. Dentro de la investigación se busca realizar los siguientes ensayos.

### **10.1 Peso Específico**

Este método de prueba cubre la determinación de la densidad relativa y la densidad del ligante asfáltico semisólido mediante el uso de un picnómetro.

### **10.2 Reducción de Muestras a Tamaño de Ensayo**

Con el objeto de verificar el cumplimiento de las especificaciones de los áridos se debe solicitar la ejecución de algunas pruebas que requieren de una muestra de material para ensayo. Las muestras grandes obtenidas en campo (ASTM D 75) son representativas del suministro total, por lo tanto, deben ser reducidas a un tamaño conveniente para realizar un determinado número de ensayos. Este ensayo con el fin de tener la cantidad determinada para la realización de los ensayos.

### **10.3 Granulometría**

El análisis granulométrico es la determinación de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra de suelo, y aunque no es de utilidad por sí solo, se emplea junto con otras propiedades del suelo para clasificarlo, a la vez que nos auxilia para la realización de otros ensayos. Dentro de los ensayos propuestos usaremos esta herramienta para que los materiales empleados (los agregados) tengan el tamaño exacto.

### **10.4 Resistencia a la Abrasión**

La prueba de abrasión de Los Ángeles (ASTM C131), evalúa la tenacidad y la resistencia a la abrasión de los agregados. En esta prueba, una muestra de agregados mezclados con una distribución de tamaño fijo se coloca en un gran tambor de acero con bolas de acero de tamaño estándar que actúan como carga abrasiva. El tambor se hace girar normalmente durante 500 revoluciones. Después, el material se extrae de la máquina y se pasa a través de un tamiz que retiene todo el material original.

### **10.5 Muestreo Asfáltico**

Esta práctica se aplica al muestreo de materiales asfálticos en los puntos de fabricación, almacenamiento o entrega, con el fin analizar y comparar los dos tipos de muestras, la modificada y la estándar.

### **10.6 Ablandamiento**

Se utiliza para determinar el valor promedio de las temperaturas a las cuales el material bituminoso se ablanda por acción de la temperatura. Elementos del equipo fabricados con el material y dimensiones de acuerdo con las normas del ensayo. Esto debido a que el GCR podría ser un material maleable a los cambios de temperatura por lo cual podrían cambiar las características físicas del asfalto.

### **10.7 Penetración**

Determinar la consistencia del asfalto, clasificar al asfalto según su grado de penetración, determinar el grado de viscosidad del asfalto.

### **10.8 Módulo Dinámico y Leyes de Fatiga**

Este ensayo permite evaluar la tenacidad y la resistencia a la figuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fractura. Además, permite obtener una serie de parámetros que describen el comportamiento mecánico de las mezclas, entre los que destacan la carga máxima a tracción,  $F_{max}$ , el desplazamiento a carga máxima,  $AF_{max}$ , el desplazamiento de rotura,  $AR$ , el índice de rigidez a tracción,  $IRT$ , y la energía disipada en el proceso de figuración,  $GD$ .

## **11. Marco Teórico Ensayo Marshall para Muestras en Caliente**

Los ensayos de laboratorio por el método de Marshall es uno de los métodos más utilizados para la elaboración y análisis de mezclas asfálticas preparadas en caliente hoy en día, fue desarrollado por el Ing. Bruce Marshall y fue utilizado en sus inicios por el cuerpo de ingenieros del ejército norteamericano (ASPHAL INSTITUTE, 2021). Este método puede aplicarse también para mezclas asfálticas en frío, sin embargo, se debe tener en cuenta algunas consideraciones especiales de curación y compactación.

El ensayo Marshall busca determinar una mezcla asfáltica óptima, donde se intenta determinar la cantidad correcta de asfalto en la mezcla, donde se establecen valores de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos en muestras bituminosas compactadas con tamaño máximo de agregado de 25 mm (Pavement Interactive, 2021).

Es importante esclarecer que los valores resultantes esperados pueden variar dependiendo de la normativa vigente de cada país, en este caso se utilizarán los procedimientos y valores dictaminados por la norma colombiana **INV E 748-13** (Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall).

**Cuadro 7.** Criterios para diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente Según las Especificaciones de INVIAS

Características	Tránsito de diseño (N) - Ejes equivalentes de 80 kN		
	$> 5 \times 10^6$	$5 \times 10^5 - > 5 \times 10^6$	$< 5 \times 10^5$
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima [kg]	750	650	500
Flujo [mm]	2 – 3.5	2 – 4	2 – 4
Vacíos con aire:			
- Capa de rodadura	4 – 6	3 – 5	3 – 5
- Base asfáltica	4 – 8	3 – 8	3 – 8
Vacíos mínimos en agregados minerales			
- Granulometría MDC-1	14	14	14
- Granulometría MDC-2	15	15	15
- Granulometría MDC-3	16	16	16

**Nota:** Criterios para diseño de mezcla asfáltica en caliente según las especificaciones de INVIAS. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Invias. Adaptado de: Instituto de Desarrollo Urbano. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

## 12. Desarrollo - Ensayo Marshall

- *Proceso por vía seca.*

**Cuadro 8.** Terminología Asociada con el uso del GCR en Mezclas Asfálticas

MATERIAL	PROCESO	TECNOLOGIA	PRODUCTO
GCR	Húmedo	Bachadas	Asfalto modificado con caucho ó Asfalto-caucho
		Continua	
		Terminal	
	Seco	PlusRide	Mezcla asfáltica mejoradas con caucho
		Genérica	
		Convencional	

**Nota:** Terminología asociada con el uso del GCR en mezclas asfálticas. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Instituto de Desarrollo Urbano. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

### 12.1 Agregados Empleados para los Ensayos

Para la realización de los ensayos se toman agregados de tipo denso con el fin de estar acorde con la granulometría establecida por INVIAS (Art. 450- 496). Para el material empleado en el ensayo tenemos la siguiente granulometría (Instituto Nacional de Vías, 2014):

### Cuadro 9. Gránulometría establecida por INVIAS

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Normal	Alternativo	MDC-1	MDC-2
20.0 mm	12	100	/
19.0 mm	3/4"	80-100	100
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88
4.75 mm	No.4	43-54	51-68
2.00 mm	No.10	29-45	38-52
425 µm	No.40	14-25	17-28
180 µm	No.80	8-17	8-17
74 µm	No.200	4-8	4-8

**Nota:** Gránulometría establecida por INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Artículo 450. Por: Instituto Nacional de Vías. [En línea]. Disponible: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

### 12.2 Gránulometría por Tamizado

Primero se toma la muestra del material la cual se seca del horno, se disgrega y todo el conjunto se seca. Seguidamente se pasa el material por los diferentes tamices dispuestos de mayor a menor abertura mediante agitación, el material retenido en cada tamiz se pesa, ya que se debe conocer el peso inicial de la muestra, para determinar el porcentaje de material retenido en cada tamizado de datos, que permitira construir la curva gránulométrica y establecer que este dentro de los parámetros establecidos por INVIAS.

#### Imagen 1. Secado del Material para Posterior Tamizar



**Fuente:** Fotografía propia

### ***12.2.1 En Base a la Norma NTC 77***

La distribución de los tamaños de las partículas que constituyen los agregados. El cual se determinó mediante el análisis granulométrico, donde se dividió una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. Dichas mediciones a cada fracción se denomina granulometría (Sánchez de Gúzman, 2001, pág. 72).

Esto se realiza con el fin de no alterar los resultados de la granulometría establecidos por INVIAS. Por eso se utilizó el punto medio de los diferentes tamaños y en la realización de los diferentes porcentajes de mezclas mejoradas con el gránulo de caucho reciclado se reemplazó el porcentaje de porción fina que corresponde a los agregados hasta el tamaño máximo indicado.

la curva granulométrica obtenida se encuentra dentro de los parámetros permitidos por invias como se evidencia en la siguiente tabla y gráfica

- ***Tamizado del material.***

**Imagen 2.** Material Tamizado en Laboratorio



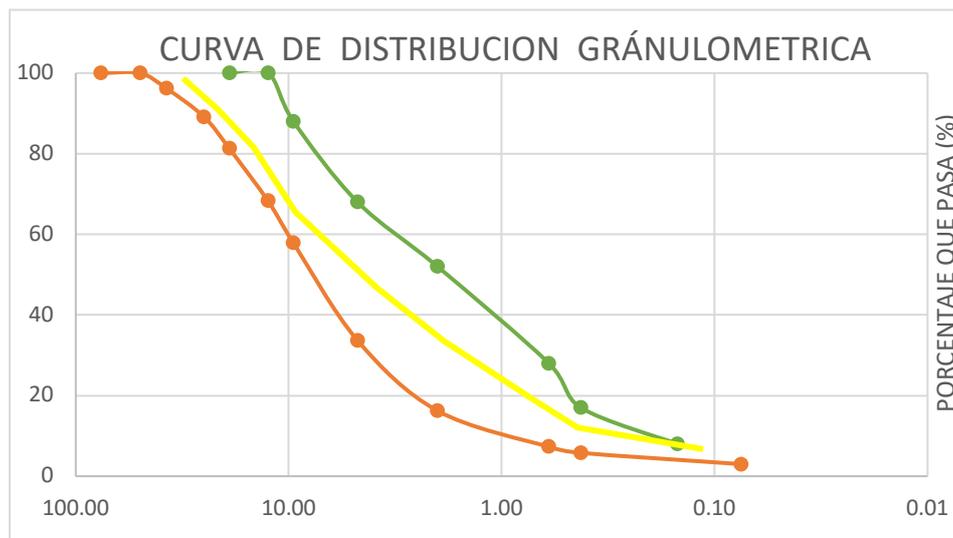
**Fuente:** Fotografía propia

**Cuadro 10.** Tabla de Gránulometría del Material.

TABLA GRÁNULOMETRICA MDC				
TAMIZ	% PASA	% PROM	% RET ACUM	% RET
1"	100	100	0	0
3/4"	80-95	87.5	12.5	12.5
1/2"	67-85	76	24	11.5
3/8"	60-70	68.5	31.5	7.5
N:4	43-59	51	49	17.5
N:8	29-45	37	63	14
N:40	14-25	19.5	80.5	17.5
N: 80	8-17	12.5	87.5	7
N:200	4-8	6	94	6.5
FONDO		0	6	6

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 1.** Gránulometría INVIAS, gránulometría material de ensayo



**Nota:** Gránulometría INVIAS, gránulometría material de ensayo. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Invias. Adaptado por: Los investigadores de este estudio. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

### 13. Gránulometría del GCR (Grano de Caucho Reciclado)

La gránulometría del GCR empleado en los ensayos fue conseguido en triturado de caucho Bogotá. Debido a la forma que toma la partícula se utiliza material granular de caucho reciclado con tamaño inferior al tamiz No. 1.

**Imagen 3.** GCR Empleado en los Ensayos



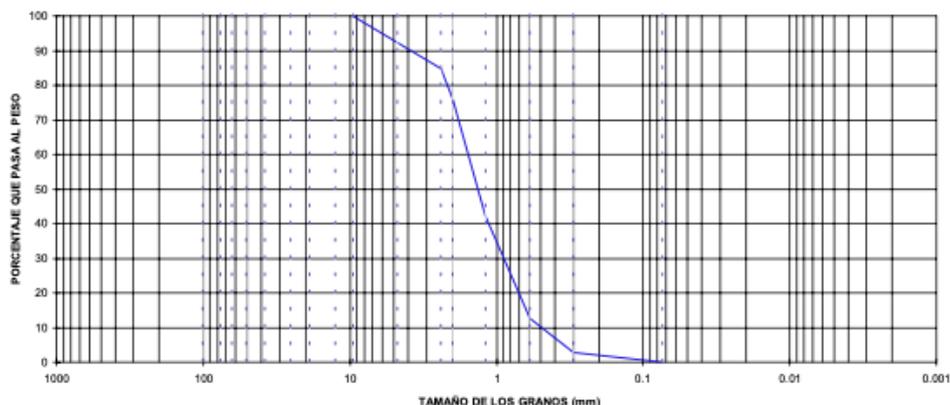
**Fuente:** Fotografía propia

**Cuadro 11.** Gránulometría del Caucho Reciclado a Emplear

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	
9.51 mm	3/8"	100.00
2.38 mm	No. 8	84.75
2.00 mm	No. 10	76.23
1.19 mm	No. 16	42.16
595 µm	No. 30	12.56
297 µm	No. 50	2.85
74 µm	No. 200	0.00

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 2.** Gránulometría Caucho Reciclado Empleado



**Nota:** Gránulometría caucho reciclado empleado. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Por: Invias. Adaptado por: Los investigadores de este estudio. 2002. [En línea]. Disponible: [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

## 14. Procedimiento Laboratorio Ensayo Marshall

Se desarrolló la investigación, con la metodología y características de los materiales descritos para tal fin, siempre enmarcados dentro de las normas técnicas dispuestas para Colombia frente a la materia, de igual manera, se revisó estudios realizados por la Alcaldía Mayor de Bogotá en conjunto con el Instituto de Desarrollo Urbano y la Universidad de los Andes frente al uso de material reciclado de caucho de llantas en desuso (Instituto de Desarrollo Urbano & Universidad de los Andes, 2000).

- ***Ensayo Marshall***

El desarrollo de la metodología Marshall en la investigación, permitió determinar el contenido óptimo de asfalto dentro de las mezclas asfálticas en caliente. Además, en el desarrollo de esta metodología, se pudieron estudiar ítems como la Estabilidad y Flujo Marshall, para poder establecer el volumen más preciso de asfalto basándose en el análisis de los vacíos de aire en la mezcla diseñada.

Dentro de los ensayos realizados para el diseño MDC-1 sin caucho, se realizó la preparación de probetas con los siguientes contenidos de cemento asfáltico: 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%. ya que, para la realización de estas, se hicieron 3 probetas de cada porcentaje con el fin de promediar los resultados de estas.

**Imagen 4.** Material empleado en las mezclas sin agregar GCR



**Fuente:** Fotografía propia

Con la finalidad de obtener el porcentaje correcto de cada uno de los tamices para la mezcla, se realizó el siguiente procedimiento de cálculo.

## 14.1 Gránulometría del Agregado en Laboratorio

**Cuadro 12.** Gránulometria y Material Real por Porcentaje de Asfalto

TABLA GRÁNULOMETRICA AGREGADOS											
TAMIZ	% PASA	% PROM	% RET ACUM	% RET	% ASF	MAT ( g ) 4.0 %	MAT (g) 4.5 %	MAT (g) 5.0 %	MAT(g) 5.5 %	MAT(g) 6.0 %	MAT (g) 6.5 %
1"	100	100	0	0							
3/4"	80-95	87,5	12,5	12,5	4,0	144	143,2	142,5	141,7	141	140,1
1/2"	67-85	76	24	11,5	4,5	132,5	131,7	131,1	130,4	129,7	129
3/8"	60-70	68,5	31,5	7,5	5,0	86,4	85,9	85,5	85	84,6	84,1
N:4	43-59	51	49	17,5	5,5	201,6	200,5	199,5	198,4	197,4	196,3
N:8	29-45	37	63	14	6,0	161,3	160,4	159,6	158,7	157,9	157,1
N:40	14-25	19,5	80,5	17,5	6,5	201,6	200,5	199,5	198,4	197,4	196,3
N: 80	8-17	12,5	87,5	7		80,64	80,2	79,8	79,3	78,9	78,5
N:200	4-8	6	94	6,5		74,88	74,5	74,1	73,7	73,3	72,9
FONDO		0	6	6		69,12	68,8	68,4	68	67,6	67,3
						1152,04	1145,7	1140	1133,6	1127,8	1121,6

**Fuente:** Elaboración propia

## 14.2 Porcentajes de Asfalto Empleados

Al determinar el empleo de seis porcentajes de asfalto (4.0 %, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%) y con la finalidad de conocer las cantidades de material real a utilizar, según el porcentaje que pasa por los diferentes tamices. Se toma como referencia 1200 gramos de material total de la briqueta, se quita el porcentaje de asfalto que llevaría la briqueta según la cantidad de asfalto del ensayo y se multiplica por el porcentaje de retenido en cada tamiz para obtener la cantidad de material en gramos para cada ensayo. Ejemplo para porcentaje de 4.0 % de asfalto.

- Calculamos la cantidad de material real quitando el porcentaje de asfalto.

$$1200 \text{ gramos} * 0.04 = 1152 \text{ gramos}$$

- Con el resultado del material real en este caso de 1152, se saca la cantidad de material según el porcentaje retenido en cada tamiz, en este ejemplo para el tamiz de 3/4".

$$(1152 \text{ gramos} * 12.5) / 100 = 144 \text{ gramos}$$

Este ejercicio se realizó con cada uno de los porcentajes de asfalto a utilizar, con la finalidad de conocer la cantidad de material real en gramos a emplear con las briquetas de ensayo.

Para los diferentes porcentajes de asfalto también se realizó los diferentes ensayos con porcentajes de 1% y 2% de agregado de CGR como se establece en la siguiente **Cuadro 13**.

**Cuadro 13.** Porcentaje de Asfalto, Agregado y CGR Empleado en los Ensayos

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
% agregado	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00	93.50
% GCR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Diseño Marshall con 0% de GCR</b>						
Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	-
% agregado	95.05	94.55	94.06	93.56	93.07	-
% GCR	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	-
<b>Diseño Marshall con 1% de GCR</b>						
Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	-
% agregado	94.12	93.63	93.14	92.65	92.16	-
% GCR	1.88	1.87	1.86	1.85	1.84	-
<b>Diseño Marshall con 2% de GCR</b>						

**Fuente:** Elaboración propia

Conociendo los respectivos porcentajes que se emplean en las diferentes briquetas, se realizó los cálculos para conocer las cantidades de material tanto de agregado como de gránulo de caucho reciclado (GCR).

Cálculo de las cantidades según porcentaje de GCR (1% y 2%) en los diferentes porcentajes de asfalto (4.0 %, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%).

### 14.3 Material Real Empleado en la Mezcla

*Material real de cada tamiz = Material en cada tamiz – % de GRC empleado ejemplo.*

- para 1%. 144 gramos – (1.44 gramos) = 142.5 gramos

**Cuadro 14.** Material Real por Tamiz de los Agregados

	1 % =				1 % =				
	TAMIZ	GCR	MAT = REAL		TAMIZ	GCR	MAT = REAL		
% de asfalto = 4,0	1"	0	0	% de asfalto = 4,5	1"	0	0		
	3/4"	144g	1,44g		142,5g	3/4"	143,5g	1,43g	142,1g
	1/2"	132,5g	1,33g		131,2g	1/2"	131,7g	1,32g	130,4g
	3/8"	86,4g	0,86g		85,54g	3/8"	85,9g	0,86g	85,4g
	N: 4	201,6g	2,01g		199,6g	N:4	200,5g	2g	198,5g
	N: 10	161,2g	1,61g		159,6g	N:10	160,4g	1,6g	158,8g
	N: 40	201,6	2,01g		199,6g	N:40	200,5g	2,1g	198,4g
	N: 80	80,6g	0,80g		79,84g	N:80	80,2g	0,80g	79,4g
	N: 200	74,8g	0,74g		74,14g	N:200	74,5g	0,74g	73,8g
FONDO	69,1g	0,69g	68,43g	FONDO	68,5g	0,69g	67,8g		
	<b>1151,8g</b>	<b>11,49g</b>	<b>1140,45g</b>		<b>1146g</b>	<b>11,54g</b>	<b>1,134,6g</b>		

	1 % =				1 % =				
	TAMIZ	GCR	MAT = REAL		TAMIZ	GCR	MAT = REAL		
% de asfalto = 5,0	1"	0		% de asfalto = 5,5	1"	0			
	3/4"	142,5g	1,43g		141,1g	3/4"	141,7g	1,42g	140,3g
	1/2"	131,1g	1,31g		129,8g	1/2"	130,4g	1,30g	129,1g
	3/8"	85,5g	0,85g		84,6g	3/8"	85,0g	0,85g	84,1g
	N:4	199,5g	2,0g		197,5g	N:4	198,4g	1,98g	196,4g
	N:10	159,6g	1,6g		158g	N:10	158,7g	1,59g	157,1g
	N:40	199,5g	2,0g		195,5g	N:40	198,4g	1,98g	196,4g
	N:80	79,8g	0,79g		79,0g	N:80	79,3g	0,79g	78,5g
	N:200	74,1g	0,74g		73,4g	N:200	73,7g	0,74g	73g
FONDO	68,4g	0,68g	67,7g	FONDO	68,0g	0,68g	67,3g		
	<b>1140g</b>	<b>11,4g</b>	<b>1126,6g</b>		<b>1133,6g</b>	<b>11,33g</b>	<b>1122,2g</b>		

	TAMIZ		1 % = GCR	MAT = REAL		TAMIZ		1 % = GCR	MAT = REAL
% de asfalto = 6,0	1"	0			% de asfalto = 6,5	1"	0		
	3/4"	141g	1,41g	139,6g		3/4"	140,1g	1,4g	138,7g
	1/2"	129,7g	1,29g	128,4g		1/2"	129,0g	1,29g	127,7g
	3/8"	84,6g	0,84g	83,8g		3/8"	84,1g	0,84g	83,3g
	N:4	197,4g	1,98g	195,4g		N:4	196,3g	1,96g	194,3g
	N:10	157,9g	1,58g	156,3g		N:10	157,1g	1,57g	155,5g
	N:40	197,4g	1,97g	195,4g		N:40	196,3g	1,96g	194,3g
	N:80	78,9g	0,79g	78,1g		N:80	78,5g	0,78g	77,7g
N:200	73,3g	0,73g	72,6g	N:200	72,9g	0,73g	72,2g		
FONDO	67,6g	0,68g	66,9g	FONDO	67,3g	0,67g	66,6g		
		<b>1127,8g</b>	<b>11,27g</b>	<b>1116,5g</b>			<b>1121,6g</b>	<b>11,20g</b>	<b>1110,3g</b>

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el respectivo secado del material de agregados en el horno de la universidad durante un periodo de 16 horas a 110 grados centígrados, se pasó al tamizado y toma de datos descritos en la **Cuadro 14**.

**Imagen 5.** Horno Empleado para el Secado de Material



Fuente: Fotografía propia

#### 14.4 Procedimiento de Mezcla y Compactación en Laboratorio

**Imagen 6.** Preparación de las Mezclas en cada uno de los Porcentajes



**Fuente:** Fotografía propia

Sin perder la temperatura requerida del material y las briquetas empleadas para los ensayos, estas se llevarán a la estufa con el propósito de resolver el uso del termómetro ya que el horno se encontraba en la temperatura requerida de 170 grados centígrados, además con el uso de elementos de protección como los guantes, se ubican las briquetas en el pedestal, con el fin de aplicar el desmoldante. Asimismo, se introduce el material en las briquetas, se punzan con una espátula unas 15 veces y posteriormente se dan 75 golpes por cada lado, por último se deja enfriar para poder sacar el material con la ayuda de un gato hidráulico.

**Imagen 7.** Compactación de las Briquetas en Laboratorio – Parte 1



**Fuente:** Fotografía propia

**Imagen 8.** Compactación de las Briquetas en Laboratorio – Parte 2



**Fuente:** Fotografía propia

Información de las briquetas utilizadas en los ensayos, como se mencionó anteriormente, se realiza la medición en tres oportunidades para promediar la información obtenida.

**Imagen 9.** Toma de Medidas Briquetas Laboratorio



**Fuente:** Fotografía propia

De igual forma, se realizó la medición de las briquetas con el peso en el aire, peso en inmersión y por último peso después de inmersión.

**Imagen 10.** Probetas de Prueba



**Fuente:** Fotografía propia

## 14.5 Resultados y Datos de Laboratorio

Las mediciones se realizaron tanto para la muestra tipo **MDC-25** con porcentajes de asfalto sin agregado de GCR, como también con los porcentajes de 1% y 2% así:

Datos de las tomas de muestra en el laboratorio:

### 14.5.1 Mediciones sin Agregado de Caucho Reciclado (0% GCR)

**Cuadro 15.** Datos de las Mediciones mezcla tipo MDC-25 sin Agregados de GCR.

	DIÁMETROS y ALTURAS BRIQUETAS		PESOS EN EL AIRE BRIQUETAS (g)	PESO EN INMERSIÓN BRIQUETA (g)	PESO DESPUÉS DE INMERSIÓN BRIQUETAS (g)
	D (mm)	AT (mm)			
4.0	101.3	65.1	1195.43	666.31	1208.62
	101.2	64.8	1168.66	641.86	1188.54
	101.1	64.9	1115.41	625.86	1189.11
4.5	101.3	64.7	1171.37	660.42	1186.89
	101.1	65.1	1112.58	618.55	1183.52
	101.1	64.8	1171.77	668.43	1179.78
5.0	101.2	65.2	1196.99	669.89	1225.41
	101.1	64.7	1182.45	664.12	1221.23
	101.3	64.4	1198.25	668.71	1220.92
5.5	101.2	64.9	1137.45	642.05	1196.75
	101.1	65.1	1182.71	682.17	1192.88
	101.3	64.7	1191.29	671.01	1193.92
6.0	101.3	64.3	1182.69	673.14	1199.76
	101.2	64.8	1199.12	688.26	1206.03
	101.1	64.5	1184.01	671.01	1207.44
6.5	101.2	64.6	1099.61	620.89	1115.97
	101.1	64.5	1109.5	621.75	1116.87
	101.2	64.2	1122.52	638.09	1123.81

**Fuente:** Elaboración propia

**Cuadro 16.** Estabilidad y flujo mezcla tipo MDC-25 (GCR 0%)

DATOS DE LABORATORIOS GCR 0%				
ESTABILIDAD Y FUJO		Probeta #1	Probeta #2	Probeta #3
4.0	ESTAB (Kgf)	1077.3	988.8	1034.3
	FLUJO (mm)	4.3	3.9	4.7
4.5	ESTAB (Kgf)	1165.4	1082.0	1108.7
	FLUJO (mm)	4.9	4.8	4.3
5.0	ESTAB (Kgf)	1242.1	1341.7	1323.8
	FLUJO (mm)	4.9	4.3	4.7
5.5	ESTAB (Kgf)	982.2	920.1	1022.8
	FLUJO (mm)	5.7	6.0	5.9
6.0	ESTAB (Kgf)	829.1	869.6	958.9
	FLUJO (mm)	6.6	5.9	6.4
6.5	ESTAB (Kgf)	682.7	556.8	731.0
	FLUJO (mm)	8.3	9.1	8.6

Fuente: Elaboración propia

#### 14.5.2 Mediciones con Agregado de Caucho Reciclado (1% GCR)

**Cuadro 17.** Datos de las Mediciones mezcla tipo MDC-25 con (GCR 1%)

	DIÁMETROS y ALTURAS BRIQUETAS		PESOS EN EL AIRE BRIQUETAS (g)	PESO EN INMERSIÓN BRIQUETA (g)	PESO DESPUÉS DE INMERSIÓN BRIQUETAS (g)
	D (mm)	AT (mm)			
4.0	101.6	73.4	1198.05	632.83	1228.32
	101.3	71	1191.14	628.99	1222.18
	101.2	70.5	1188.69	631.48	1226.72
4.5	101.5	71.6	1190.21	629.41	1220.32
	101.6	72.2	1181.08	622.44	1214.47
	101.5	72.4	1186.46	627.79	1213.24
5.0	101.2	68.7	1186.42	641.59	1212.16
	101.4	70	1185.49	640.75	1215.14
	101.1	68.9	1189.73	637.92	1208.53
5.5	101.6	69.1	1176.65	640.69	1202.55
	101.1	68.1	1180.41	637.24	1204.31
	101.2	68	1186.74	635.78	1198.07
6.0	101.7	68.2	1186.37	638.12	1203.38
	103	67.7	1189.5	641.01	1195.61
	101.9	66.3	1187.74	637.98	1197.88
6.5	101.6	69.2	1191.1	633.11	1201.06
	101.3	68.9	1189.25	636.47	1197.22
	101.8	68.1	1192.05	628.96	1194.83

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 18.** Estabilidad y flujo mezcla tipo MDC-25 (GCR 1%)

DATOS DE LABORATORIOS GCR 1%				
ESTABILIDAD Y FUJO		Probeta #1	Probeta #2	Probeta #3
4.0	ESTAB (Kgf)	1164.7	1224.9	1120.6
	FLUJO (mm)	6.4	6.8	6.7
4.5	ESTAB (Kgf)	1297.9	1428.9	1343.1
	FLUJO (mm)	6.3	6.7	6.4
5.0	ESTAB (Kgf)	1444.0	1538.9	1452.0
	FLUJO (mm)	5.8	5.2	5.6
5.5	ESTAB (Kgf)	562.1	572.8	662.4
	FLUJO (mm)	6.2	6.0	5.9
6.0	ESTAB (Kgf)	504.1	576.3	521.2
	FLUJO (mm)	7.3	6.4	6.7
6.5	ESTAB (Kgf)	439.6	398.7	389.7
	FLUJO (mm)	8.1	7.8	7.7

Fuente: Elaboración propia

#### 14.5.3 Mediciones con Agregado de Caucho Reciclado (2% GCR)

**Cuadro 19.** Datos de las Mediciones mezcla tipo MDC-25 con (GCR 2%)

	DIÁMETROS y ALTURAS BRIQUETAS		PESOS EN EL AIRE BRIQUETAS	PESO DESPUÉS DE INMERSIÓN BRIQUETAS (g)	PESO EN INMERSIÓN BRIQUETA (g)
	D (mm)	AT (mm)			
4.0	101.2	72.3	1199.11	634.23	1218.88
	101.5	71.1	1194.50	630.20	1221.44
	101.1	69.2	1191.53	633.58	1224.66
4.5	101.7	68.1	1191.89	631.89	1217.11
	103.1	68.1	1184.11	625.10	1211.56
	101.9	72.5	1188.49	629.35	1213.33
5.0	101.2	72.4	1188.32	642.89	1213.36
	101.5	73.5	1189.45	641.78	1210.52
	101.1	69.0	1190.54	638.99	1199.89
5.5	101.6	69.3	1177.52	642.88	1200.82
	101.4	72.5	1183.48	639.55	1197.69
	101.2	68.8	1188.44	635.79	1198.31
6.0	101.31	70.1	1188.41	639.13	1203.75
	101.23	70.1	1190.13	643.51	1195.88
	101.10	68.8	1188.65	638.88	1196.80
6.5	101.27	70.1	1193.51	635.63	1199.15
	101.19	68.9	1190.15	638.55	1201.55
	101.21	68.2	1194.88	629.90	1196.87

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 20.** Estabilidad y flujo mezcla tipo MDC-25 (GCR 2%)

DATOS DE LABORATORIOS GCR 2%				
ESTABILIDAD Y FUJO		Probeta #1	Probeta #2	Probeta #3
4.0	ESTAB (Kgf)	1144.5	1213.5	1102.7
	FLUJO (mm)	6.2	6.3	6.5
4.5	ESTAB (Kgf)	1285.8	1417.9	1337.0
	FLUJO (mm)	6.1	6.4	6.0
5.0	ESTAB (Kgf)	1446.1	1539.9	1456.8
	FLUJO (mm)	5.5	5.0	5.4
5.5	ESTAB (Kgf)	563.0	579.0	663.7
	FLUJO (mm)	6.0	5.8	5.7
6.0	ESTAB (Kgf)	501.1	568.3	516.2
	FLUJO (mm)	7.1	6.0	6.2
6.5	ESTAB (Kgf)	431.6	389.7	381.5
	FLUJO (mm)	7.8	7.5	7.2

Fuente: Elaboración propia

## 15. Calculos del Laboratorio

### 15.1 Pesos de las Muestras

Se procede a realizar el pesaje de las muestras con las diferentes condiciones:

- Peso de la muestra en seco ( $W_s$ ).
- Peso de la muestra saturada y superficialmente seca ( $W_{sss}$ ).
- Peso de la muestra en inmersión ( $W_{sum}$ ).

Los resultados de las muestras ya se encuentran promediados con los valores de las 3 probetas para cada (%) de asfalto, arrojando los siguientes resultados:

**Cuadro 21.** Resultados de los Pesos de las Muestras tipo MDC-25 (GCR 0%)

% Asfalto	Peso en el aire ( $W_s$ )	Peso saturado, superficialmente seco ( $W_{sss}$ )	Peso en Inmersión ( $W_{sum}$ )
<b>G.C.R. = 0 %</b>			
4%	1159.83	1195.42	644.68
4.5%	1151.91	1183.40	649.13
5.0%	1192.56	1222.52	667.57
5.5%	1170.48	1194.52	665.08
6.0%	1188.61	1204.41	677.47
6.5%	1110.54	1118.88	626.91

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 22.** Resultados de los Pesos de las Muestras tipo MDC-25 (GCR 1%)

% Asfalto	Peso en el aire (Ws)	Peso saturado, superficialmente seco (Wsss)	Peso en Inmersión (Wsum)
<b>G.C.R. = 1 %</b>			
4%	1192.63	1225.74	631.10
4.5%	1185.92	1216.01	626.55
5.0%	1187.21	1211.94	640.09
5.5%	1181.27	1201.64	637.90
6.0%	1187.87	1198.96	639.04
6.5%	1190.80	1197.70	632.85

**Fuente:** Elaboración propia

**Cuadro 23.** Resultados de los Pesos de las Muestras tipo MDC-25 (GCR 2%)

% Asfalto	Peso en el aire (Ws)	Peso saturado, superficialmente seco (Wsss)	Peso en Inmersión (Wsum)
<b>G.C.R. = 2 %</b>			
4%	1195.05	1221.66	632.67
4.5%	1188.16	1214.00	628.78
5.0%	1189.44	1207.92	641.22
5.5%	1183.15	1198.94	639.41
6.0%	1189.06	1198.81	640.51
6.5%	1192.85	1199.19	634.69

**Fuente:** Elaboración propia

## 15.2 Estabilidad Corregida

Se procede a corregir los valores de estabilidad arrojados por el ensayo Marshall, según lo indica la norma, **INV E-748-13**, donde se le aplicarán factores de corrección a las probetas con espesores diferentes a 63.5 mm.

Para el caso de esta investigación, se aplicaron los factores de conversión a todas las muestras del ensayo según como lo indican los Cuadros del 17 al 20, arrojando los siguientes resultados.

**Cuadro 24.** Tabla de Corrección de la Estabilidad según la Norma INV E – 748-13

TABLA CORRECCIÓN ESTABILIDAD INV E-748-13			
Volumen de probeta Cm <sup>3</sup>	Espesor de probeta		Factor de Corrección
	mm	pg	
200 a 213	25,40	1,00	5,56
214 a 225	27,00	1,06	5,00
226 a 237	28,60	1,12	4,55
238 a 250	30,20	1,19	4,17
251 a 264	31,80	1,25	3,85
265 a 276	33,30	1,31	3,57
277 a 289	34,90	1,38	3,33
290 a 301	36,50	1,44	3,03
302 a 316	38,10	1,50	2,78
317 a 328	39,70	1,56	2,50
329 a 340	41,30	1,62	2,27
341 a 353	42,90	1,69	2,08
354 a 367	44,40	1,75	1,92
368 a 379	46,00	1,81	1,79
380 a 392	47,60	1,88	1,67
393 a 405	49,20	1,94	1,56
406 a 420	50,80	2,00	1,47
421 a 431	52,40	2,06	1,39
432 a 443	54,00	2,12	1,32
444 a 456	55,60	2,19	1,25
457 a 470	57,20	2,25	1,19
471 a 482	58,70	2,31	1,14
483 a 495	60,30	2,38	1,09
496 a 508	61,90	2,44	1,04
509 a 522	63,50	2,50	1,00
523 a 535	65,10	2,56	0,96
536 a 546	66,70	2,62	0,93
547 a 559	68,30	2,69	0,89
560 a 573	69,80	2,75	0,86
574 a 585	71,40	2,81	0,83
586 a 598	73,00	2,88	0,81
599 a 610	74,60	2,94	0,78
611 a 626	76,20	3,00	0,76

**Nota:** Factor de Corrección de la Estabilidad Medida. Sección 700 y 800 – Materiales y Mezclas Asfálticas y Protección de Pavimentos (Primera Parte). Por: Invías. Adaptado: por los investigadores del estudio. 2012. Pág. 489. [en línea]. Disponible: <https://inteinsapavimentos.com.co/wp-content/uploads/2020/07/SECCIONES-700-Y-800-primera-parte.pdf>

**Cuadro 25.** Estabilidad Corregida mezcla tipo **MDC-25 (GCR - 0%)** Agregado de Caucho Reciclado.

<b>DATOS DE LABORATORIOS GCR 0% (ESTABILIDAD CORREGIDA)</b>					
<b>ESTABILIDAD Y FUJO</b>	<b>PROMEDIO FLUJO (mm)</b>	<b>PROMEDIO EST. (Kgf)</b>	<b>PROMEDIO EST. (Newton)</b>	<b>Factor de corrección según (INV E-748-13)</b>	<b>Estabilidad corregida Newtons</b>
4.0	4.3	1033.5	10135.0	0.898	9101.2
4.5	4.7	1118.7	10970.7	0.877	9621.3
5.0	4.6	1302.6	12773.6	0.898	11470.7
5.5	5.9	975.0	9561.6	0.877	8385.6
6.0	6.3	885.9	8687.6	0.877	7619.0
6.5	8.7	656.8	6441.3	0.839	5404.3

**Fuente:** Elaboración propia

**Cuadro 26.** Estabilidad Corregida mezcla tipo **MDC-25 (GCR - 1%)** Agregado de Caucho Reciclado

<b>DATOS DE LABORATORIOS GCR 1% (ESTABILIDAD CORREGIDA)</b>					
<b>ESTABILIDAD Y FUJO</b>	<b>PROMEDIO FLUJO (mm)</b>	<b>PROMEDIO EST. (Kgf)</b>	<b>PROMEDIO EST. (Newton)</b>	<b>Factor de corrección según (INV E-748-13)</b>	<b>Estabilidad corregida Newtons</b>
4.0	6.6	1170.1	11474.3	0.839	9626.9
4.5	6.5	1356.6	13303.9	0.877	11667.5
5.0	5.5	1478.3	14496.8	0.897	13003.6
5.5	6.0	599.1	5875.0	0.898	5275.7
6.0	6.8	533.9	5235.3	0.877	4591.4
6.5	7.9	409.4	4014.3	0.839	3368.0

**Fuente:** Elaboración propia

**Cuadro 27.** Estabilidad Corregida mezcla tipo **MDC-25 (GCR - 2%)** Agregado de Caucho Reciclado.

DATOS DE LABORATORIOS GCR 2% (ESTABILIDAD CORREGIDA)					
ESTABILIDAD Y FUJO	PROMEDIO FLUJO (mm)	PROMEDIO EST. (Kgf)	PROMEDIO EST. (Newton)	Factor de corrección segun (INV E-748-13)	Estabilidad corregida Newtons
4.0	6.3	1153.6	11312.6	0.898	10158.7
4.5	6.2	1346.9	13208.5	0.876	11570.7
5.0	5.3	1480.9	14522.8	0.899	13056.0
5.5	5.8	601.9	5902.5	0.898	5300.5
6.0	6.4	528.5	5183.1	0.839	4348.6
6.5	7.5	400.9	3931.8	0.839	3298.8

Fuente: Elaboración propia

### 15.3 Gravedad Bulk

Se realizó el cálculo de la gravedad Bulk, según lo indica la norma **INV E-733-07**.

*Formula.*

$$Gb = Ws / (Wsss - Wsum)$$

Donde:

**Ws** = Peso de la muestra en seco.

**Wsss** = Peso de la muestra saturada y superficialmente seca.

**Wsum** = Peso de la muestra en inmersión.

### 15.4 Gravedad Específica Máxima de la Muestra (Máxima Teórica)

Se realizó el cálculo de la gravedad específica máxima de la muestra, según lo indica la norma **INV E-735-07**.

*Formula.*

$$Gmm = Ws / (Ws - Wsum)$$

Donde:

**Ws** = Peso de la muestra en seco.

**Wsum** = Peso de la muestra en inmersión.

### 15.5 Densidad o Masa Unitaria

Se realiza el cálculo de la densidad o masa unitaria, según lo indica la norma INV E-733-07.

*Formula.*

$$Densidad = Gb * 997$$

Donde:

997 = Densidad del agua a 25 °C, Kg/m<sup>3</sup>

\* El resultado se obtiene en unidades de Kg/m<sup>3</sup>.

### 15.6 Porcentajes de vacío de la muestra

Se realiza el cálculo de los porcentajes de vacíos de las muestras, según lo indica la norma INV E-736-07.

*Formula.*

$$\%v = (Gmm - Gb / Gmm) x 100$$

Donde:

**Gmm** = Gravedad específica máxima de la muestra (Máxima Teórica)

**Gb** = Gravedad Bulk.

### 15.7 Tablas de Resultados Ensayos Marshall

Se presentan los datos obtenidos posterior a los cálculos, donde se aplican las fórmulas a todos los porcentajes de GCR empleados.

**Cuadro 28.** Tabla de Datos Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 0%)

Tablas de resultados ensayo Marshall (GCR 0%)						
% Asfalto	Flujo (mm)	Estabilidad Corregida (N)	Gravedad específica Bulk (Gb)	Gravedad específica máxima de la muestra (Gmm)	Densidad ó masa unitaria (Kg/m <sup>3</sup> )	% de vacíos de la muestra
4	4.3	9101.2	2.11	2.25	2099.61	6.46%
4.5	4.7	9621.3	2.16	2.29	2149.60	5.89%
5	4.6	11470.7	2.15	2.27	2142.52	5.40%
5.5	5.9	8385.6	2.21	2.32	2204.16	4.54%
6	6.3	7619.0	2.26	2.33	2248.91	3.00%
6.5	8.7	5404.3	2.26	2.30	2250.55	1.70%

**Fuente:** Elaboración propia

**Cuadro 29.** Tabla de Datos Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 1%)

Tablas de resultados ensayo Marshall (GCR 1%)						
% Asfalto	Flujo (mm)	Estabilidad Corregida (N)	Gravedad específica Bulk (Gb)	Gravedad específica máxima de la muestra (Gmm)	Densidad ó masa unitaria (Kg/m3)	% de vacíos de la muestra
4	6.6	9626.9	2.01	2.12	1999.61	5.57%
4.5	6.5	11667.5	2.01	2.12	2005.82	5.11%
5	5.5	13003.6	2.08	2.17	2069.84	4.32%
5.5	6.0	5275.7	2.10	2.17	2089.12	3.61%
6	6.8	4591.4	2.12	2.16	2115.14	1.98%
6.5	7.9	3368.0	2.11	2.13	2101.82	1.22%

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 30.** Tabla de Datos Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 2%)

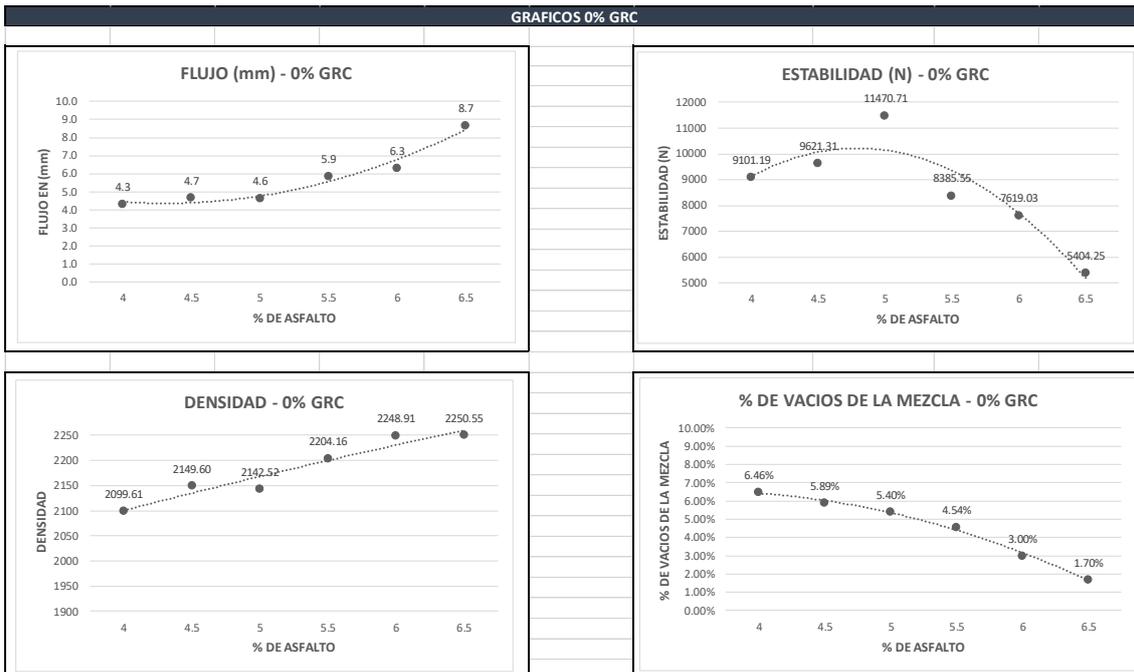
Tablas de resultados ensayo Marshall (GCR 2%)						
% Asfalto	Flujo (mm)	Estabilidad Corregida (N)	Gravedad específica Bulk (Gb)	Gravedad específica máxima de la muestra (Gmm)	Densidad ó masa unitaria (Kg/m3)	% de vacíos de la muestra
4	6.3	10158.7	2.03	2.12	2022.89	4.52%
4.5	6.2	11570.7	2.03	2.12	2024.19	4.41%
5	5.3	13056.0	2.10	2.17	2092.57	3.26%
5.5	5.8	5300.5	2.11	2.18	2108.18	2.82%
6	6.4	4348.6	2.13	2.17	2123.39	1.75%
6.5	7.5	3298.8	2.11	2.14	2106.78	1.12%

Fuente: Elaboración propia

### 15.8 Gráficos Cálculos del Ensayo Marshall

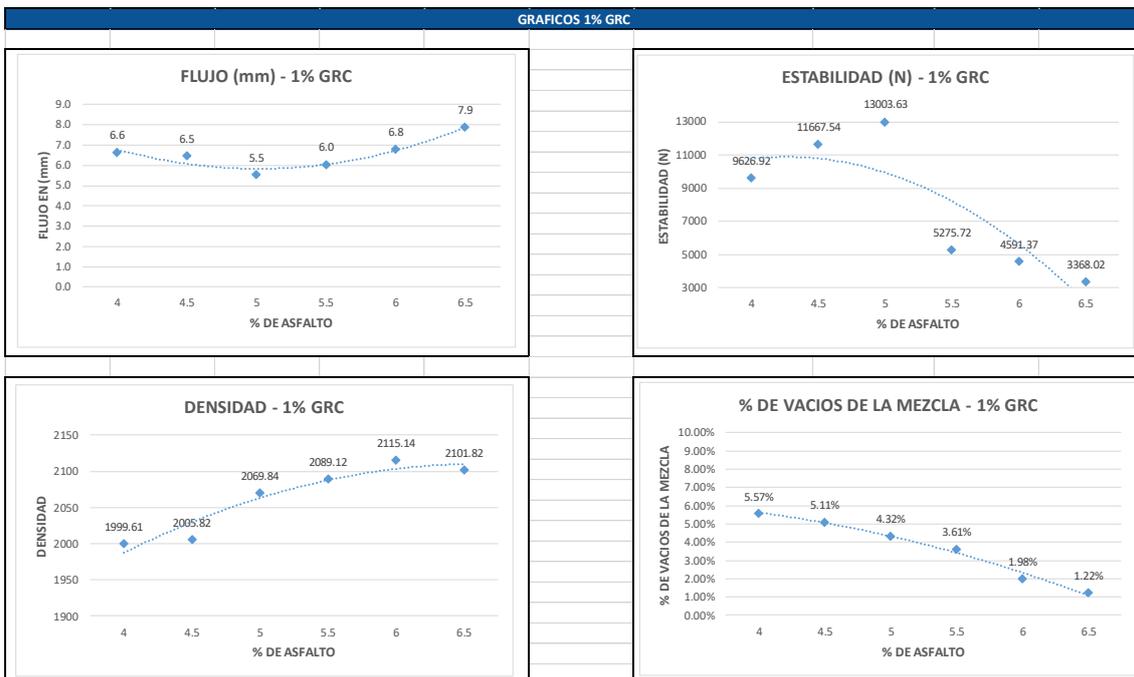
Se gráficán los resultados obtenidos en laboratorio con respecto a los porcentajes de asfalto, donde se representa el Flujo, Estabilidad, Densidad y porcentajes de vacíos de los ensayos.

**Gráfica 3. Resultados Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 0%)**



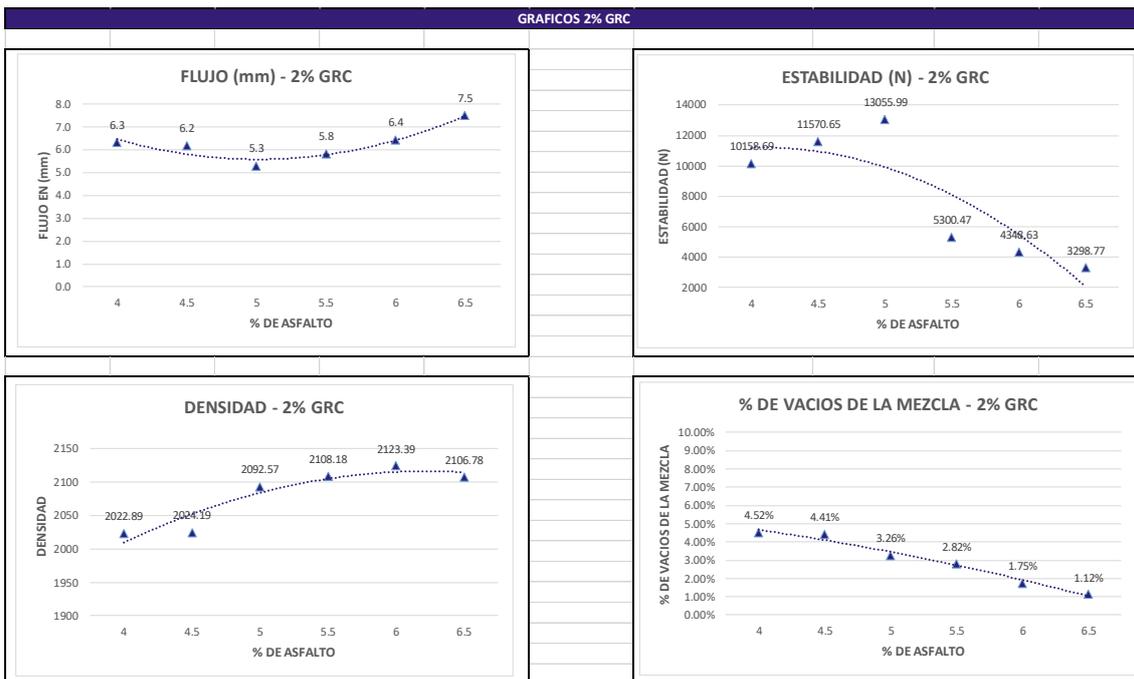
Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4. Resultados Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 1%)**



Fuente: Elaboración propia

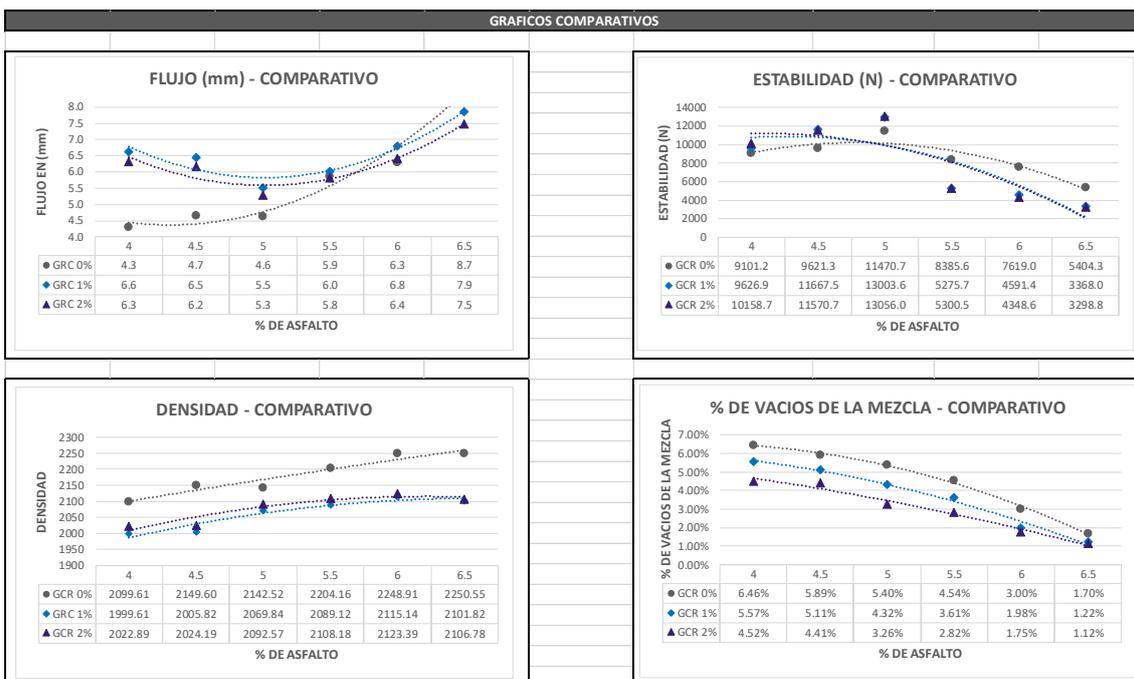
**Gráfica 5.** Resultados Correspondientes a mezcla tipo MDC-25 (GCR 2%)



**Fuente:** Elaboración propia

Asimismo se presentan las Gráficas comparativas, donde se muestran los datos obtenidos en laboratorio con los diferentes porcentajes de GCR.

**Gráfica 6.** Corresponde a la Comparativa de las diferentes muestras realizadas en el laboratorio, teniendo como base la mezcla base tipo MDC-25, la cual no se le añadieron porcentajes de granulo de caucho reciclado (GCR 0%), en correlación con mezclas tipo MDC-25 modificadas con 1% y 2% de GCR.



**Fuente:** Elaboración propia

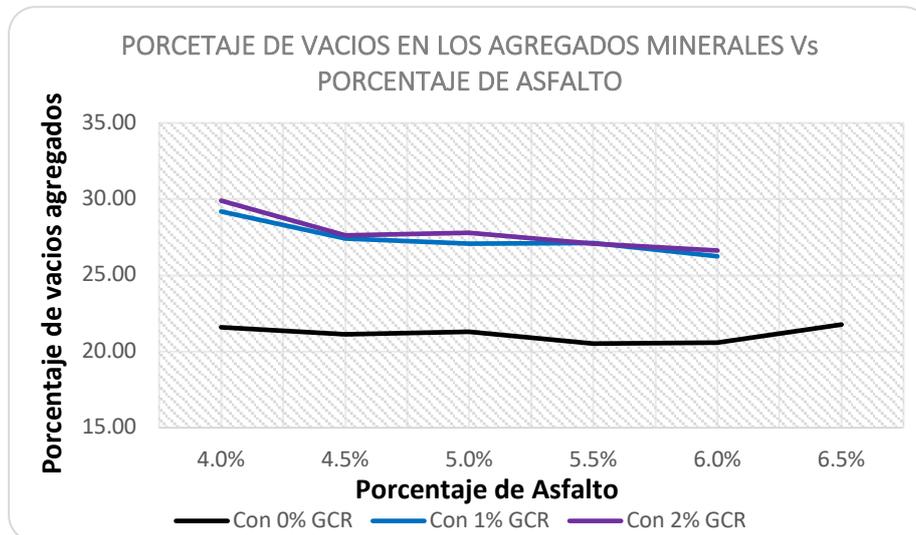
## 15.9 Porcentaje de Vacíos de los Agregados Minerales (VMA)

**Cuadro 31.** Cálculos gráfica porcentaje de vacíos de los minerales

Cálculos Gráfica Porcentaje de Vacíos						
% Asfalto	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
Mezclas						
Con 0% GCR	21.57	21.12	21.29	20.52	20.57	21.77
Con 1% GCR	29.19	27.41	27.07	27.11	26.25	-
Con 2% GCR	29.90	27.61	27.81	27.09	26.63	-

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 7.** Porcentaje de Vacíos en los Agregados Minerales Vs Porcentaje de Asfalto



**Fuente:** Elaboración propia

En la **Gráfica 8** se puede evidenciar que los vacíos en los agregados minerales de las mezclas asfálticas con agregado de **GCR**, tiene un aumento proporcional con respecto a las mezclas asfálticas sin agregado **GCR**.

## 16. Diseño Óptimo

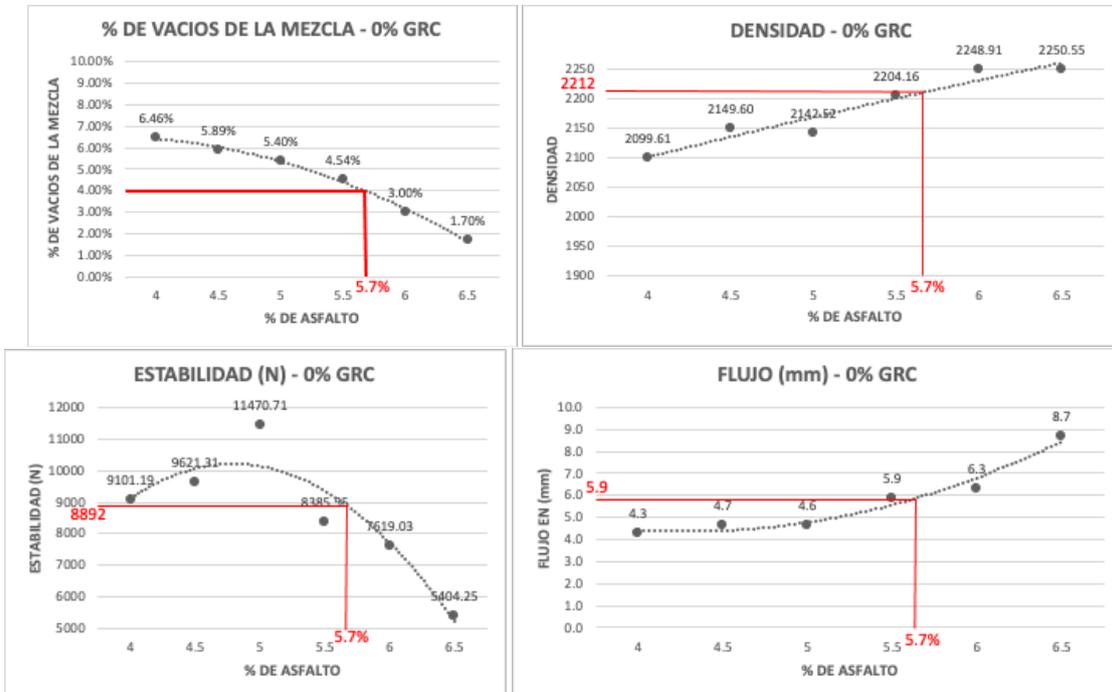
Con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto, se halló este factor con base a la gráfica de porcentaje de vacíos, donde se determina un valor de **4%** de porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que este representa el valor promedio requerido por la normativa de Invías según lo indica el **ART-450-13** de la misma, en el cual se determina dicho valor promedio para mezclas asfálticas diseñadas para tráfico tipo medio/alto o (**NT3**), destinadas a las carpetas de rodadura en proyectos viales con pavimentos flexibles.

Teniendo claro lo anterior, se procedió a encontrar el porcentaje óptimo de asfalto en cada uno de los ensayos con los diferentes porcentajes de GCR.

## 16.1 Diseño Óptimo mezcla tipo MDC-25 Porcentajes de GCR (0%, 1% y 2%)

### 16.1.1 Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 0%

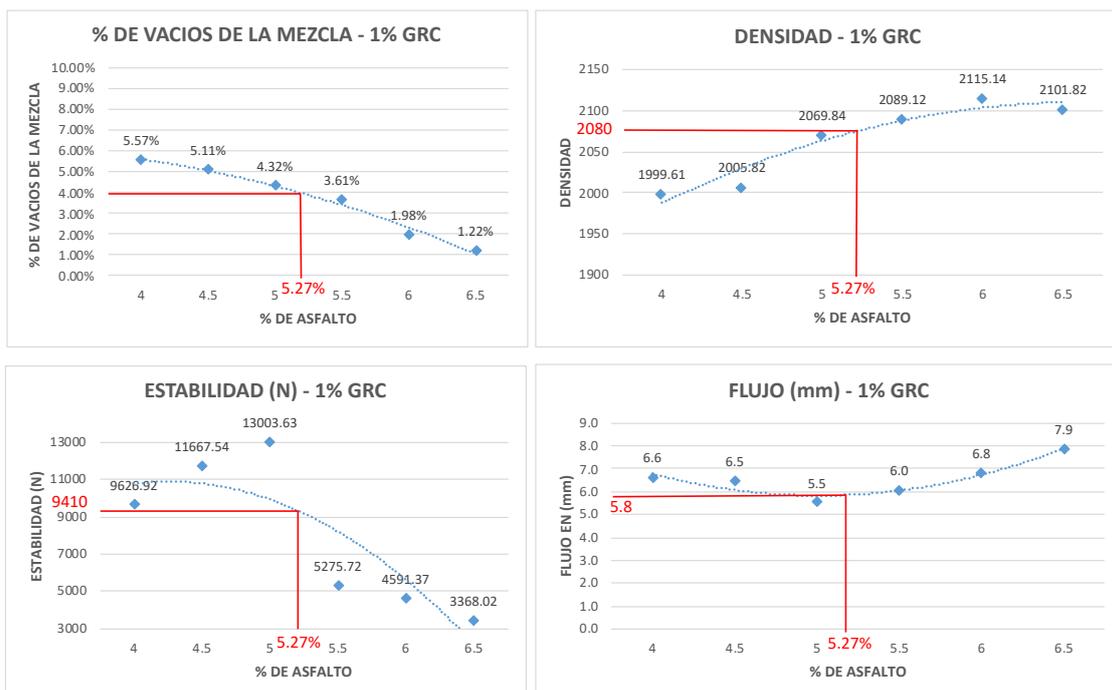
Gráfica 8. Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (0%)



Fuente: Elaboración propia

### 16.1.2 Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 1%

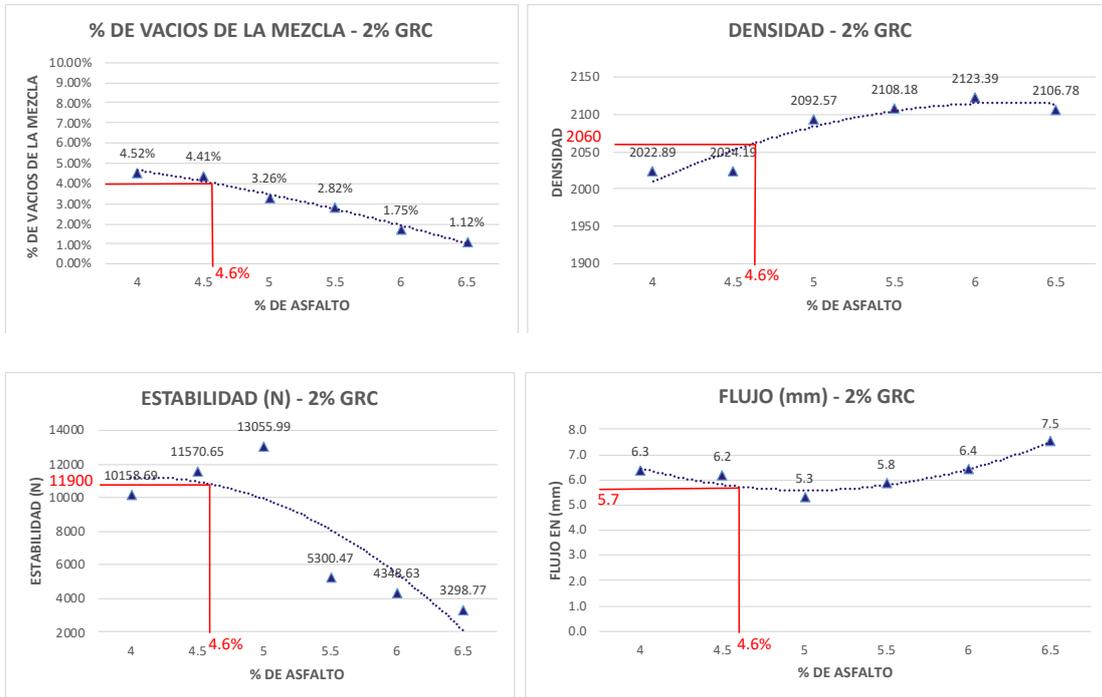
Gráfica 9. Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (1%)



Fuente: Elaboración propia

### 16.1.3 Diseño Óptimo Porcentajes de GCR 2%

Gráfica 10. Resultados del Diseño Óptimo de Procentaje de GCR (2%)



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 32. Comparación de los Parámetros Volumétricos Estimados

Comparación Parámetros volumetricos estimados			
Parametros	0 % GRC	1 % GRC	2 % GRC
% Asfalto optimo	5.7	5.27	4.6
Densidad	2212	2080	2060
Estabilidad	8892	9410	11900
Flujo	5.9	5.8	5.7

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 33 titulado resumen de los resultados, se encuentran los valores obtenidos de los ensayos y se correlacionan con los valores especificados por INVÍAS en su ART-450-13, para diseños de mezclas asfálticas de tráfico medio alto, empleados para la capa de rodadura de la sección.

**Cuadro 33.** Resumen de los Resultados

Ensayo	% vacíos de la mezcla	% Óptimo de asfalto	Estabilidad	Flujo	Densidad
	[ % ]	[ % ]	[ N ]	[ mm ]	[ g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Norma</b>	INV E-736	-	INV E-748	INV E-748	INV E-733
<b>Especificación según ART-450-13 (INVIAS)</b>	4 - 6	-	min. 7500	2 - 3.5	-
<b>0% GCR</b>	4,0	5,7	8892	5,9	2212
<b>1% GCR</b>	4,0	5,3	9410	5,8	2080
<b>2% GCR</b>	4,0	4,6	11900	5,7	2060

**Fuente:** Elaboración propia

## 17. Analisis de Resultados

### 17.1 Resultado General de la Investigación

Este trabajo de investigación tuvo como finalidad determinar los comportamientos físicos y mecánicos de las muestras, mediante ensayos de laboratorio de estabilidad, densidad y flujo de las mezclas asfálticas modificadas con gránulos de caucho reciclado, comparada con una mezcla base tipo invias (MDC-25) sin modificar, identificando con esto el mejor comportamiento de dichas muestras.

Como resultado general, se evidencia que el uso de granulo de caucho reciclado implementado como agregado en mezclas asfálticas en caliente, puede incrementar considerablemente la capacidad portante del pavimento, sin embargo, los resultados también contienen variables (como el flujo) cuyos valores obtenidos en los ensayos, en ninguno de los casos, cumplen con los parámetros establecidos por la normativa implementada.

### 17.2 Conclusiones de los Resultados

En los análisis de laboratorio realizados y los calculos obtenidos, vemos que para todas las muestras ensayadas (GCR del 0%, 1% y 2%), los límites de flujo establecidos en el ART INVIAS 450-13 no se encuentran dentro de los parámetros establecidos dicha norma, identificando también que este parámetro disminuye de manera significativa con los porcentajes de 1% y 2% de GRC, sin embargo esta variable no perjudica los valores de estabilidad de la mezcla, por lo cual no se considera un factor diferenciador significativo entre mezclas.

Las mezclas modificadas tienden a tener una ligera disminución del parametro de flujo, lo que se hace poco adecuado para vías con cargas altas, pero a su vez vemos valores de estabilidad altos – esto indicaría que este tipo de mezclas si bien es cierto no resiste cargas maximas altas, es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas.

Según los resultados obtenidos en los ensayos Marshall, la estabilidad en las muestras modificadas con GCR, cumplen según lo establecido por el ART INVIAS 450-13 para el diseño de capas de rodadura para vías de tránsito medio (Tipo N2), sin embargo, solo la muestra con 2% de GRC, cumple con lo establecido por dicha norma para diseño de vías de tránsito alto (Tipo N3) donde según la norma, la estabilidad para este tipo de tránsito es de mínimo 9000 newtons.

Las mezclas modificadas con GCR, al tener parámetros de estabilidad altas y al ser utilizada en vías de tránsito medio - alto (Tipo N2 – N3), ayudaría a aumentar la vida útil del pavimento flexible, ya que al tener estos parámetros altos podría evitar problemas comunes en el pavimento como ahuellamientos, ondulaciones o inestabilidad de este en comparación con las mezclas no modificadas con GCR.

Se identificó en la investigación que las mezclas asfálticas modificadas con gránulos de caucho reciclado manifiestan un resultado de estabilidad alto, generando mayor rigidez al igual que mayor fragilidad a las cargas altas por su grado mayor de flujo, lo que nos permite concluir que estas mezclas podrían tener un mejor comportamiento en climas calidos.

Estas mezclas modificadas con GCR pueden llegar a tener un mejor rendimiento en la durabilidad de las vías con tránsitos medio – alto (N2 y N3), aún cuando el costo podría llegar a ser un poco mayor, más aún cuando no existen grandes proveedores de dicho material reciclable.

Cuando se utiliza el gránulo de caucho reciclado (GCR) como agregado de la mezcla asfáltica, ayudamos a la disminución de emisión de materiales orgánicos volátiles al medio ambiente. – Por la parte técnica, la elaboración de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho reciclado, ayudarían a las plantas de producción a que no requieran de cambios significativos en sus maquinarias, siendo este proceso de mezclado de forma sencilla, ya que al realizarse de esta manera aportaría grandes beneficios al medio ambiente.

Al tener materiales mejorados, que ayuden a mejorar el comportamiento del pavimento asfáltico, también se podría ver reflejado la rentabilidad del tramo vial en cuanto al mantenimiento que a este se le pueda prestar por parte del municipio o la concesión.

El uso de GCR como material en proyectos de infraestructura vial, se debe emplear de manera responsable, realizando los estudios ambientales necesarios que ayuden a dimensionar el impacto de su uso en dichas obras de infraestructura, ya que muchas veces las malas prácticas en el procesamiento de estos elementos pueden generar más contaminación que si no se utilizará, generando un problema ecológico que pudo ser evitado con anterioridad.

Desde un punto de vista ambiental en general, el aprovechamiento de manera adecuada de los residuos sólidos que contaminen el medio ambiente es una buena práctica para tener en cuenta, ya que actualmente es un tema importante al que se debería prestar más atención. Según una publicación de la revista *International Journal of Environmental Research and Public Health*, en un estudio realizado en 2017 por Pieter Jan Kole, se estima que un 10% de los micro plásticos encontrados en los mares del mundo provienen de residuos de llantas o neumáticos ya usados (National Geographic, 2019), lo que nos lleva a evaluar que un mejor aprovechamiento o reusó de estos elementos puede ser de manera considerable beneficioso para el medio ambiente.

## Bibliografía

- Alphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods* (Séptima ed.).  
Mustansiriyh: Asphalt Institute.
- ASPHAL INSTITUTE. (2021). *Bruce G. Marshall*. Obtenido de Biografía:  
<https://www.asphaltinstitute.org/timeline/roh-1992-bruce-g-marshall/>
- ECO GREEN. (22 de 1 de 2018). *¿Conoces cuales peligros pueden ocasionar los Neumáticos Fuera de Uso (NFU)?* Obtenido de [www.ecogreenequipment.com](http://www.ecogreenequipment.com):  
<https://ecogreenequipment.com/es/conoce-cuales-peligros-pueden-ocacionar-los-neumaticos-fuera-de-uso-nfu/>
- Greenpeace.org. (22 de 01 de 2020). *Greenpeace.org*. Obtenido de  
<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>
- Instituto de Desarrollo Urbano & Universidad de los Andes. (2000). *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá*. Bogotá D.C: Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2002). *Estudio de las mejores mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Universidad de los Andes, Bogotá D.C.  
Obtenido de  
[https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2011). *SECCIÓN 200-11 - CEMENTO ASFALTICO*. Obtenido de Ficha Técnica: <https://www.idu.gov.co/web/content/7596/200-11.pdf>
- Instituto Nacional de Vías. (15 de 8 de 2014). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Obtenido de Artículo 450: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INVÍAS. (29 de 1 de 2016). *INVÍAS pone en marcha uso de neumáticos en obras de mantenimiento y rehabilitación de vías*. Obtenido de Noticia:  
<https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/2484-invias-pone-en-marcha-uso-de-neumaticos-en-obras-de-mantenimiento-y-rehabilitacion-de-vias>
- López, F., López-Delgado, A., Alguacil, F., & Manso, J. (23 de 10 de 2009). Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas*, 25. Obtenido de  
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/17979/1/NFU%27s\\_revision.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/17979/1/NFU%27s_revision.pdf)
- Minambiente. (10 de 6 de 2015). *El Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) proveniente de las llantas usadas, será utilizado en la construcción de vías en el territorio nacional*. Obtenido de [minambiente.gov.co](http://minambiente.gov.co):  
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-asuntos-ambientales/1847-el-granulo-de-caucho-reciclado-gcr-proveniente-de-las-llantas-usadas-sera-utilizado-en-la-construccion-de-vias-en-el-territorio-nacional>
- National Geographic. (24 de 9 de 2019). *Los neumáticos son una gran fuente de contaminación por plástico*. Obtenido de Medio Ambiente:  
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/09/neumaticos-gran-fuente-contaminacion-plastico>

- OCADE LTDA, SANIPLAN & AMBIENTAL S.A. (2018). *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá*. Obtenido de Secretaría Distrital de Ambiente: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>
- OCU. (9 de 4 de 2013). *¿Cómo se producen los neumáticos?* Obtenido de Informe: <https://www.ocu.org/coches/neumaticos/informe/neumaticos-produccion>
- Pavement Interactive. (2021). *Método Marshall*. Obtenido de Información: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/marshall-method/>
- Sánchez de Gúzman, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero* (Quinta ed.). Bogotá D.C, Colombia: Bhandar Ediciones Ltda.

## Glosario

- **Caucho modificador:** Denominado GCR, grano de caucho reciclado, caucho del triturado de llamas de vehículos en empleado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y otras aplicaciones de pavimentación.
- **Asfaltos modificados:** Aquellos asfaltos mezclados con sustancias diferentes a minerales finos o aditivos de adhesividad.
- **Mezcla asfáltica:** Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.
- **Pavimento:** Sistema de capas superpuestas, de diferentes materiales, y compactadas en forma adecuada.
- **Método Marshall:** Análisis y estudio de estabilidad y vacíos de la mezcla.
- **Gránulometría:** Es la distribución por tamaños de las partículas de un árido. Para conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de árido se separan estos mediante cedazos o tamices.
- **Estabilidad:** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Depende de la y trabazón entre agregados.
- **Estabilidad Marshall:** Es la carga máxima que se requiere para producir la rotura de la probeta; esta se mide en Newton (N).
- **Fluidez:** Es la deformación que se produce en la carga máxima, se mide 0,25 mm.
- **Densidad Efectiva (pE):** Es el cociente entre la masa del árido y su volumen a una temperatura especificada. El volumen excluye los poros permeables al asfalto.
- **Huecos en la Mezcla ó Vacíos de aire (Va):** Es el volumen total de pequeñas bolsas de aire entre partículas de agregado cubiertos con asfalto, expresado como porcentaje de volumen total de mezcla compactada.
- **Densidad (G):** La densidad de la mezcla compactada se define como la masa de un volumen específico de mezcla.
- **Vacíos en el Agregado Mineral (VAM):** Es el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen
- **Polímero:** un polímero es un compuesto formado por adición sucesiva de unidades químicas, moléculas, denominados monómeros. Los materiales plásticos y las gomas son ejemplos de polímeros.

- **Mezcla asfáltica:** Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.

## **Normas**

Normas técnicas estudiadas y tomadas como referencia para el desarrollo de los procedimientos dentro de los ensayos.

### **a. Normas ínvias**

INV E-748-07  
INV E-724  
INV E-748  
INV E-754

### **b. Normas AASHTO**

T-301-95 Elastic recovery test of bituminous materials by means of a ductilometer.

### **c. Normas ASTM**

D 4402-87 Standard test method for viscosity determinations of unfilled asphalts using the Brookfield thermosel apparatus.

### Anexos de Registro Fotográfico de los Equipos Empleados

Los equipos empleados en la realización del ensayo Marshall fueron utilizados del laboratorio de pavimentos de la sede de calle 100, los cuales cuentan con los respectivos certificados de calidad y calibración.

**Imagen 11.** Equipos de Laboratorio Utilizados en la Investigación – Primera Parte



**Fuente:** Fotografía propia

**Imagen 12.** Equipos de Laboratorio Utilizados en la Investigación – Segunda Parte



**Fuente:** Fotografía propia