

**CARACTERIZACION DE DISEÑO MEZCLA ASFALTICO MDC-19, MEZCLA  
ASFÁLTICA ASFALTO MODIFICADO CON GRANO CAUCHO DE LLANTA GRC Y  
MEZCLA ASFALTICA GRC CON POLIMEROS**

NANCY JANETH BARRETO RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA PAVIMENTOS  
BOGOTA D.C., CUNDINAMARCA

2016

**CARACTERIZACION DE DISEÑO MEZCLA ASFALTICO MDC-19, MEZCLA  
ASFÁLTICA ASFALTO MODIFICADO CON GRANO CAUCHO DE LLANTA GRC Y  
MEZCLA ASFALTICA GRC CON POLIMEROS**

NANCY JANETH BARRETO RODRIGUEZ

Trabajo de Grado para optar al título de  
Especialista en ingeniería de pavimentos

Director

Ing. Cesar Palomino Saavedra

Ingeniero civil

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA PAVIMENTOS  
BOGOTA D.C., CUNDINAMARCA

2016

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| 1. Introducción .....  | 7  |
| 1.1. Objetivos.....  | 8  |
| 1.1.1. Objetivo general.....   | 8  |
| 2. Localización Del Proyecto .....   | 9  |
| 2.1. Fuentes De Materiales .....   | 11 |
| 3. Diseño De La Estructura De Pavimento .....  | 14 |
| 3.1. Metodología de Diseño .....   | 14 |
| 3.2. Propuesta De Intervención.....  | 16 |
| 4. Producción De Los Agregados.....  | 18 |
| 4.1. Descripción del proceso de producción de la mezcla asfáltica .....  | 20 |
| 5. Caracterización Del Material Ligante .....  | 21 |
| 6. Caracterización De Los Agregados De Las Mezclas Asfálticas MDC19, Asfalto Modificado Con Grano Caucho De Llanta GRC, Mezcla GRC Con Polímeros ..... | 23 |
| 6.1. Granulometría de los materiales pétreos y el llenante mineral .....   | 24 |
| 7. Diseño MARSHALL Mezcla Asfálticas MDC19, Mezcla Asfalto Modificado CON Grano Caucho De Llanta GRC, Mezcla GRC Polímeros.....                        | 30 |
| 7.1. Mezcla MDC-19.....  | 30 |
| 7.1.1. Graficas diseño MARSHALL MDC 19.....  | 32 |
| 7.1.2. Formula de trabajo .....  | 34 |
| 7.2. Caracterización de la mezcla asfáltica modificada con grano caucho de llanta GRC.....   | 34 |
| 7.2.1. Graficas diseño MARSHALL asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC .....  | 35 |
| 7.2.2. Formula de trabajo .....  | 37 |
| 7.3. Mezcla asfáltica GRC + POLIMERO .....   | 37 |
| 7.3.1. Graficas diseño MARSahal GRC con Polímeros. ....  | 38 |
| 7.3.2. Formula de trabajo .....  | 40 |
| 8. Caracterización dinámica de las mezclas asfálticas MDC19, asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, mezcla GRC Con polímeros.....          | 40 |
| 8.1. Módulos dinámicos.....  | 40 |
| 8.1.1. MDC 19.....   | 40 |
| 8.1.2. Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC.....  | 42 |
| 8.1.3. GRC+POLIMEROS .....   | 43 |
| 8.2. Ley de fatiga.....  | 45 |
| 8.2.1. MDC 19.....   | 46 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 8.2.2. | <i>Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC</i> .....   | 47 |
| 8.2.3. | <i>GRC+POLIMEROS</i> .....   | 47 |
| 8.3.   | <i>DEFORMACIONES</i> .....   | 48 |
| 8.3.1. | <i>MDC 19</i> .....  | 48 |
| 8.3.2. | <i>Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC</i> .....   | 49 |
| 8.3.3. | <i>Asfalto caucho GRC+ POLIMEROS</i> .....   | 49 |
| 9.     | <i>ANALISIS DE RESULTADOS</i> .....  | 50 |
| 9.1    | <i>Análisis de resultados de Mecánicas de las Mezclas MDC 19, GRC. GRC+POLIMEROS</i> .....   | 50 |
| 9.1.1. | <i>Porcentaje de Asfalto</i> .....   | 50 |
| 9.1.2. | <i>Estabilidad Marshall</i> .....  | 51 |
| 9.1.3. | <i>Flujo Marshall</i> .....  | 52 |
| 9.1.4. | <i>Vacios con aire Va</i> .....  | 52 |
| 9.3.   | <i>Análisis de Resultados de las propiedades dinámicas de las Mezclas MDC 19, asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, GRC+POLIMEROS</i> ..... | 53 |
| 9.3.1. | <i>Módulo Dinámico</i> .....   | 53 |
| 9.3.2  | <i>Fatiga</i> .....  | 54 |
| 9.3.3  | <i>Deformaciones</i> .....   | 55 |
|        | <i>CONCLUSIONES</i> .....  | 56 |
|        | <i>BIBLIOGRAFIA</i> .....  | 57 |

### **Lista De Graficas**

|                       |  |    |
|-----------------------|--|----|
| <b>Grafica N° 1.</b>  | <i>Combinación de granulometrías MDC19</i> .....   | 25 |
| <b>Grafica N° 2.</b>  | <i>Combinación de granulometrías GRC</i> .....   | 26 |
| <b>Grafica N° 3.</b>  | <i>Granulometría mezcla GRC +POLIMEROS</i> .....   | 27 |
| <b>Grafica N° 4.</b>  | <i>Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto</i> .....                                | 32 |
| <b>Grafica N° 5.</b>  | <i>Estabilidad Vs % de asfalto, Vacíos Vs % de asfalto</i> .....                                 | 32 |
| <b>Grafica N° 6.</b>  | <i>Vacios en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto</i> .... | 33 |
| <b>Grafica N° 7.</b>  | <i>Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto</i> .....                                | 35 |
| <b>Grafica N° 8.</b>  | <i>Estabilidad Vs % de asfalto, Vacíos Vs % de asfalto</i> .....                                 | 35 |
| <b>Grafica N° 9.</b>  | <i>Vacios en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto</i> .... | 36 |
| <b>Grafica N° 10.</b> | <i>Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto</i> .....                                | 38 |
| <b>Grafica N° 11.</b> | <i>Estabilidad Vs % de asfalto, Vacíos Vs % de asfalto</i> .....                                 | 38 |
| <b>Grafica N° 12.</b> | <i>Vacios en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto</i> ..   | 39 |
| <b>Grafica N° 13.</b> | <i>Modulo dinámico</i> .....   | 41 |
| <b>Grafica N° 14.</b> | <i>Curva maestra</i> .....   | 41 |
| <b>Grafica N° 15.</b> | <i>Módulo dinámico</i> .....   | 42 |
| <b>Grafica N° 16.</b> | <i>Curva maestra</i> .....   | 43 |
| <b>Grafica N° 17.</b> | <i>Modulo dinámico Vs Temperatura</i> .....  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Grafica N° 18.</b> Modulo dinámico Vs Frecuencia .....  | 44 |
| <b>Grafica N° 19.</b> Modulo dinámico – (Mpa).....   | 45 |
| <b>Grafica N° 20.</b> Ley de fatiga atracción directa. ....  | 46 |
| <b>Grafica N° 21.</b> Ley de fatiga a tracción indirecta. ....                                     | 47 |
| <b>Grafica N° 22.</b> Ley de fatiga.....   | 48 |
| <b>Grafica N° 23.</b> Resistencia a la deformación plástica. MDC – 19. ....                        | 48 |
| <b>Grafica N° 24.</b> Resistencia a la deformación plástica. Asfalto modificado GRC.....           | 49 |
| <b>Grafica N° 25 .</b> Resistencia a la deformación plástica. Asfalto caucho GRC + POLIMEROS. .... | 49 |
| <b>Grafica N° 26.</b> Contenido de asfalto VS MDC 19 – GRC – GRC + POLIMEROS.....                  | 50 |
| <b>Grafica N° 27.</b> Estabilidad para cada tipo de mezcla. ....                                   | 51 |
| <b>Grafica N° 28.</b> Flujo para cada tipo de mezcla.....  | 52 |
| <b>Grafica N° 29.</b> Vacíos con aire para cada tipo de mezcla. ....                               | 52 |
| <b>Grafica N° 30.</b> Módulo dinámico para cada tipo de mezcla. ....                               | 53 |
| <b>Grafica N° 31.</b> Leyes de fática para cada tipo de mezcla.....                                | 54 |
| <b>Grafica N° 32.</b> Resistencia a la deformación plástica para cada mezcla. ....                 | 55 |

### **Lista De Tablas**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla N° 1.</b> Canteras utilizadas para la caracterización de materiales.....  | 11 |
| <b>Tabla N° 2.</b> Proyecciones de los ejes equivalentes en el carril de diseño. ....  | 14 |
| <b>Tabla N° 3.</b> Coeficiente estructural y coeficiente de drenaje .....  | 15 |
| <b>Tabla N° 4.</b> Módulo resiliente de diseño para los tramos de construcción.....  | 16 |
| <b>Tabla N° 5.</b> Tipo de intervención.....   | 16 |
| <b>Tabla N° 6.</b> Alternativa 1– tramo de rehabilitación- sector 1 (K24+450+K34+657), carretera K15 a Tierralta .....             | 16 |
| <b>Tabla N° 7.</b> Alternativa 1– tramo de ampliación- sector 1 (K24+450+K34+657), carretera K15 a Tierralta .....                 | 17 |
| <b>Tabla N° 8.</b> Alternativa 2 tramos de reconstrucción y ampliación- sector 2 (K34+657+K44+900), carretera K15 a Tierralta..... | 18 |
| <b>Tabla N° 9.</b> Propiedades fisicoquímicas del asfalto.....   | 21 |
| <b>Tabla N° 10.</b> Especificaciones asfaltos GRC tipo I.....  | 22 |
| <b>Tabla N° 11.</b> Especificaciones asfaltos modificados .....  | 23 |
| <b>Tabla N° 12.</b> Granulometría de los materiales pétreos MDC 19.....  | 24 |
| <b>Tabla N° 13.</b> Granulometría de los materiales pétreos modificado con grano caucho de llanta GRC. ...                         | 25 |
| <b>Tabla N° 14.</b> Granulometría mezcla GRC +POLIMEROS .....  | 26 |
| <b>Tabla N° 15.</b> Pesos específicos de los agregados empleados en la mezcla. ....  | 27 |
| <b>Tabla N° 16.</b> Requisitos agregados grueso mezcla asfáltica.....  | 29 |
| <b>Tabla N° 17.</b> Requisitos agregado fino.....  | 30 |
| <b>Tabla N° 18.</b> Parámetros óptimos de diseño mezcla asfáltica MDC 19.....  | 31 |
| <b>Tabla N° 19.</b> Características de mezcla asfáltica modificada con GRC. ....   | 34 |
| <b>Tabla N° 20.</b> Parámetros mezclas asfáltica GRC + POLIMEROS.....  | 37 |
| <b>Tabla N° 21.</b> Datos para cálculo de Modulo dinámico .....  | 40 |
| <b>Tabla N° 22.</b> Datos para cálculo de Modulo dinámico .....  | 42 |
| <b>Tabla N° 23.</b> Datos para cálculo de Modulo dinámico .....  | 44 |
| <b>Tabla N° 24.</b> Resultados análisis de ley de fatiga MDC – 19.....   | 46 |
| <b>Tabla N° 25.</b> Constantes de ecuación de Ley de Fatiga .....  | 46 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabla N° 26. Resultados del análisis de Ley de fatiga GRC.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>Tabla N° 27. Resultados de la ley de fatiga GRC+POLIMEROS .....</b>   | <b>47</b> |
| <b>Tabla N° 28. Comparación de diseño MARSHALL mezcla asfáltica MDC 19, GRC TIPO I, GRC TIPO I + POLIMEROS. ....</b> | <b>50</b> |

### **Lista de Figuras**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura N° 1. Localización del proyecto. ....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Figura n° 2. Estado de la vía antes y después de la intervención k26+450 – k27+350 fisuras longitudinales de borde por falla del hombro del terraplén. ....</b> | <b>10</b> |
| <b>Figura n° 3. Estado de la vía antes y después de la intervención k28+150 – k28+450 fisuras longitudinales de borde por falla del hombro del terraplén. ....</b> | <b>10</b> |
| <b>Figura N° 4. Estado de la vía K34+370 – K37+600 Fisuras Longitudinales de Borde Desgaste Superficial. ....</b>  | <b>11</b> |
| <b>Figura N° 5. Cantera gallo crudo. ....</b>  | <b>12</b> |
| <b>Figura N° 6. Cantera el volador.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>Figura N° 7. Localización de las diferentes canteras. ....</b>  | <b>13</b> |
| <b>Figura N° 8. Alternativa 1 rehabilitación .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>Figura N° 9. Alternativa 1 ampliación. ....</b>   | <b>18</b> |
| <b>Figura N° 10. Esquema de producción de materiales.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>Figura N° 11. Trituradora primaria - cono clasificador.....</b>   | <b>19</b> |
| <b>Figura N° 12. Impactor .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>Figura N° 13. Acopio material mezcla. ....</b>  | <b>20</b> |
| <b>Figura N° 14. Planta Asfalto Ciber producción continua.....</b>   | <b>20</b> |

## **1. Introducción**

En el presente documento son objeto de la caracterización del diseño de mezclas asfálticas MDC - 19 con asfalto original 60 -70 , mezcla asfáltica con caucho asfáltico de llanta GRC y mezcla asfáltica con GRC con polímeros al 10% caucho y 5% polímeros. A las tres mezclas se les realizara su respectiva caracterización fisicoquímica del material ligante utilizando asfalto 60-70 de la refinería de Barrancabermeja. Se realizara la caracterización fisico-mecánica de los agregados pétreos, las mezclas se diseñaran por medio de las metodologías del “Método Marshall” se llega al óptimo de asfalto analizando las propiedades volumétricas de la mezcla y se realizara la caracterización dinámica con las pruebas de modulo dinámico, ley de fatiga y deformación permanente

La caracterización de las mezclas se realizará con los materiales que se están utilizando por la construcción del corredor "K15-Tierralta-San Pedro de Urabá", iniciando en el K24 hacia el municipio de Tierralta (PR 24+450-PR 63+848).

## **1.1.Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

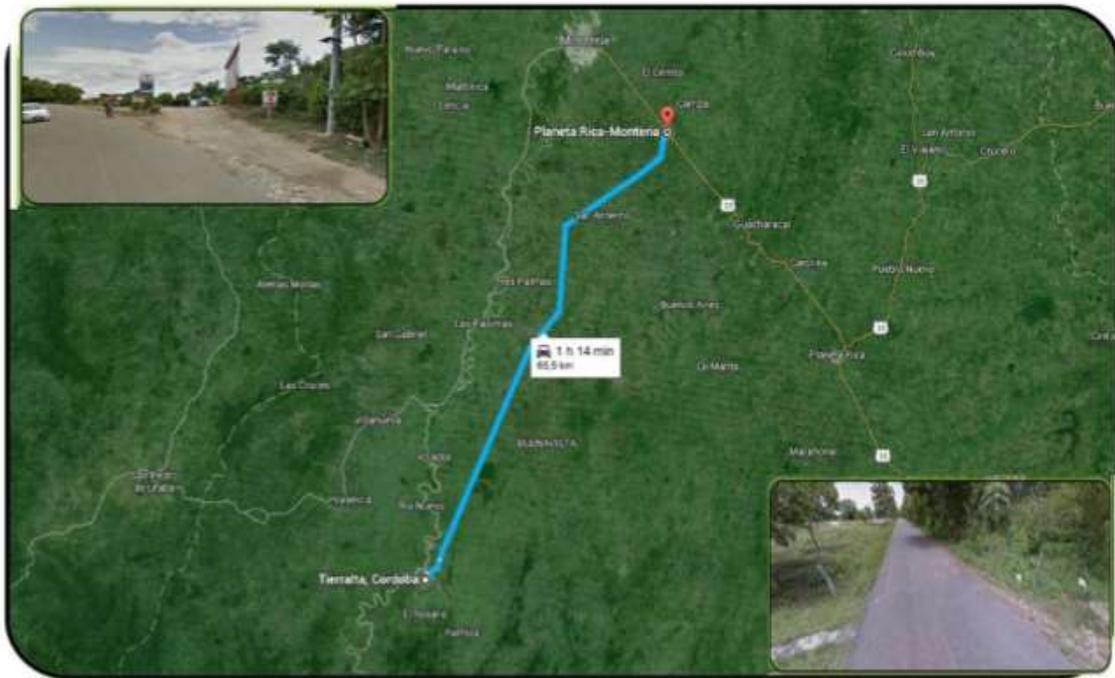
Comparar los resultados obtenidos al realizar el diseño de mezclas asfálticas MDC-19, Mezcla asfáltica con caucho asfáltico de llanta GRC y mezcla asfáltica con GRC con polímeros mediante las metodologías Marshall

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Realizar los diseños de mezcla asfáltica por lo métodos Marshall, con asfalto original, asfalto modificado con llantas GRC y asfalto modificado con llantas y polímeros
- Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas, de acuerdo con las características propias de cada método de diseño
- Caracterización de las propiedades dinámicas, tales como módulos dinámicos, ley de fatiga y deformación permanente, de las mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall

## 2. Localización Del Proyecto

La caracterización de los materiales que se utilizarán para este trabajo de grado corresponde al corredor desarrollado en "K15-Tierralta-San Pedro de Urabá", iniciando en el K24 hacia el municipio de Tierralta (PR 24+450-PR 63+848). El corredor en estudio se desarrolla sobre terreno plano, con pendientes longitudinales muy bajas y una geometría horizontal y vertical de buenas características, el tramo se encuentra conformado principalmente por terraplenes de préstamo lateral, con alturas que oscilan entre los 0.5 y 4 m de altura. Su sección transversal con ancho de calzada variable y angosta, no posee bermas, no tiene señalización horizontal y vertical



*Figura N° 1. Localización del proyecto.*

*Fuente: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co), Google earth.*

Se encuentra ubicado en la región del Caribe Colombiano, en la zona sur del departamento de El Departamento de Córdoba se encuentra situado en el norte del país, en la región de la llanura del Caribe con una latitud norte  $09^{\circ}26'16''$  y  $07^{\circ}22'05''$  y una longitud oeste  $74^{\circ}47'43''$  y  $76^{\circ}30'01''$ . Cuenta con una superficie de 23.980 km cuadrados lo cual representa el 2.1 % del territorio nacional. Limita por el Norte con el Mar Caribe y el departamento de Sucre, por el Este con los departamentos de Sucre, Bolívar y Antioquia; por el Sur con el departamento de Antioquia y por el Oeste con el departamento de Antioquia y el Mar Caribe. Según el DANE cuenta con una población de aproximadamente 1'396.764 Habitantes, dentro de los 28 municipios que hacen parte de su extensión territorial.

La principal fuente de la economía del departamento es la ganadería, siendo uno de los más importantes centros ganaderos del país. La agricultura cuenta con regiones aptas para explotación en los valles del río Sinú y San Jorge. Los principales cultivos son el maíz tradicional, maíz tecnificado, algodón, sorgo, arroz seco manual, arroz seco, arroz riego, yuca, plátano y ñame. En cuanto a la producción minera en el territorio del departamento de Córdoba se encuentran yacimientos de caliza, carbonato de calcio, oro, plata, platino, carbón y gas natural; igualmente ofrece posibilidades petrolíferas. A su vez, se inició la construcción de la represa de Urrá en el Alto Sinú, de multipropósito: generación de energía eléctrica, desarrollo piscícola y conservación de bosques, entre otros. El sector industrial y minero se concentra en la producción de ferróniquel en Cerromatoso (municipio de Montelíbano).

En general el estado actual de la vía K15-Tierralta es muy malo, debido a la presencia de hundimientos importantes de la banca y pérdidas de la estructura del pavimento, que exigen la reconstrucción como se visualiza en la figura a continuación

*ANTES INTERVENCION*



*DESPUES INTERVENCION*



**Figura n° 2.** Estado de la vía antes y después de la intervención  $k26+450 - k27+350$  fisuras longitudinales de borde por falla del hombro del terraplén.

**Fuente:** Propia.



**Figura n° 3.** Estado de la vía antes y después de la intervención  $k28+150 - k28+450$  fisuras longitudinales de borde por falla del hombro del terraplén.

**Fuente:** Propia.



**Figura N° 4.** Estado de la vía K34+370 – K37+600 Fisuras Longitudinales de Borde Desgaste Superficial.

**Fuente:** Propia.

Con la ejecución de las obras en este corredor se pretende mejorar la transitabilidad de personas y productos de la región con vocación agrícola y ganadera, especialmente en plátano, banano y productos maderables fortaleciendo los corredores de comercialización.

### 2.1. Fuentes De Materiales

Para la extracción de materiales que se utilizaran para la construcción Mezcla asfáltica MDC 19, Mezclas GRC y Mezcla GRC con polímeros, se cuenta con las siguientes fuentes de materiales las cuales se encuentra entre 48 km y 30 km a la planta de producción:

| <b>NOMBRE DE LA CANTERA</b>        | <b>DISTANCIA CENTRO DE GRAVEDAD<br/>km</b> | <b>LICENCIA AMBIENTAL</b>                     |
|------------------------------------|--|---|
| <i>Cantera villa Carmen</i>        | 45.5                                       | <i>Resolución 13502 de 2009</i>               |
| <i>Cantera Loma Grande</i>         | 48.2                                       | <i>Resolución 00404 de 1996</i>               |
| <i>Cantera la Siberia</i>          | 29.3                                       | <i>Aprobación PMA del 16 de julio de 2006</i> |
| <i>Cantera Gallo Crudo</i>         | 32   | <i>Resolución 3338 de 2002</i>                |
| <i>Fuente Rio Nuevo</i>            | 32   | <i>Resolución 14670 de 2010</i>               |
| <i>Cantera el Arbolito Volador</i> | 30   | <i>Resolución 13502 de 2009</i>               |

**Tabla N° 1.** Canteras utilizadas para la caracterización de materiales.

**Fuente:** Propia.

Las fuentes que se utilizaran en la explotación de los agregados para las mezclas asfálticas MDC 19, GRC y GRC con polímeros son Gallo crudo, el Volador - fuente rio nuevo

EXPLOTACION GALLO CRUDO :

La cantera Gallo Crudo se encuentra ubicada en el departamento de Montería, su localización corresponde a coordenadas 8°33'13.46" N; 75° 57' 45.39" O. Esta fuente de material tiene un área de 99.595 m<sup>2</sup> y los tipos de producto que se explotan son materiales de construcción y materiales calcáreos triturados.



*Figura N° 5. Cantera gallo crudo.*

*Fuente: Propia.*

#### EXPLOTACION CANTERA EL VOLADOR:

La cantera el Volador se encuentra ubicada en el departamento de Montería, su localización corresponde a coordenadas 8°33'13.46" N; 75° 57' 45.39" O. Esta fuente de material tiene un área de 23.595 m<sup>2</sup> y los tipos de producto que se explotan sobre las vegas del río Sinú. El material extraído de allí es piedra china, arenas y algunos cantos.



*Figura N° 6. Cantera el volador.*

*Fuente: Propia.*

## EXPLOTACION CANTERA RIO NUEVO:

La cantera Rio Nuevo se encuentra ubicada en el departamento de Montería, su localización corresponde a coordenadas  $8^{\circ}33'13.46''$  N;  $75^{\circ}57'45.39''$  O. Esta fuente de material tiene un área de 23.595 m<sup>2</sup> y los tipos de producto que se explotan sobre las vegas del río Sinú. El material extraído de allí es piedra china, arenas y algunos cantos.

## CANTERA RIO NUEVO MATERIAL ALUVIAL

La ruta para acceder a esta fuente, a partir del punto de referencia K24+450 de la carretera del K15 a Tierralta.

La localización de las diferentes canteras se muestra en el siguiente mapa



**Figura N° 7.** Localización de las diferentes canteras.

**Fuente:** Google Earth.

A partir del análisis de las características de las fuentes encontradas, se ejecutaron pruebas de verificación o caracterización de los materiales, de acuerdo a las especificaciones vigentes del INVIAS 2014

### 3. Diseño De La Estructura De Pavimento

De conformidad a los Estudios y Diseños que se realizaron para la rehabilitación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Transito

De acuerdo con la información secundaria (Estudio de tránsito, gica s.a.s, gestión en ingeniería civil y ambiental, Medellín, versión 0, 2013), se realizaron las proyecciones año a año hasta el escenario futuro en 20 años, tomado como año base el año 2016, en el cual se prevé el inicio de las obras de mejoramiento.

|                | NEE              |
|----------------|------------------|
| 5 AÑOS         | 3,107,975        |
| 10 AÑOS        | 6,952,155        |
| <b>12 AÑOS</b> | <b>8,695,578</b> |
| 15 AÑOS        | 11,531,080       |
| 20 AÑOS        | 16,844,568       |

*Tabla N° 2. Proyecciones de los ejes equivalentes en el carril de diseño.*

*Fuente: Volumen viii informe final ejecutivo sonacol sas – apc/ resultados obtenidos por gica s.a.s, gestión en ingeniería civil y ambiental, estudio de tránsito, Medellín, versión 0, 2013*

- Clima y Temperatura

El clima y la humedad que predominan en la región donde es presentada la propuesta de intervención de la estructura de pavimento tienen gran importancia en el funcionamiento de éste. Las condiciones climáticas de la región en que se encuentra la carretera en estudio son:

Temperatura media del corredor: La temperatura media del es de 27 °C.

La precipitación se encuentra entre 2200 mm/año.

#### 3.1. Metodología de Diseño

Para el diseño de la estructura de pavimento flexible se siguen los lineamientos establecidos en el manual para el diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías- INVIAS, en donde se utilizaron los métodos AASHTO/93 y racional (mecánico- empírico), la cual correlaciona el número estructural requerido (que se encuentra en función del tránsito de diseño, la capacidad de soporte de la subrasante, el nivel de confiabilidad, la desviación estándar entre otros) y el número estructural efectivo definido como el

aporte estructural de cada una de las capas de pavimento (se encuentran en función de la calidad, condiciones de drenaje y espesor), estableciendo los espesores de pavimento necesarios según las variables de diseño.

- Periodo de análisis

El período de análisis para el diseño de las estructuras de pavimento es de 12 años.

- Confiabilidad

Se determina como un 90% de acuerdo a las características del proyecto y las recomendaciones establecidas por la metodología de diseño (Manual de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito, INVIAS 1998).

- Error estándar (SO)

Error estándar SO: 0.45 valor para tramos en construcción

Error estándar SO: 0.49 valor para rehabilitación (Volumen viii informe final ejecutivo sonacol sas – apc)

- Serviciabilidad

El índice de Servicio presente (PSI) varía entre 0 (carretera imposible) y 5 (Carretera perfecta). Teniendo en cuenta lo anterior, y acorde a lo establecido por la metodología de diseño, se adopta un  $P_0 = 4.2$  y  $P_t = 2.0$  para obtener un  $\Delta PSI$  de 2.2.

Valor índice inicial de servicio: Valor Índice inicial de servicio :4,2 valor estimado de acuerdo a las recomendaciones del Manual de Diseño de Pavimentos en vías con medios y altos volúmenes de Tránsito

Valor Índice final de servicio: 2,0

- Características de las capas

En aplicación a la metodología de diseño adoptada (AASHTO/93), se presenta a continuación los coeficientes estructurales de los materiales asfálticos y granulares, empleados para la modelación de la estructura de pavimento, los cuales tienen como referencia ( la Guía para diseño de estructuras de pavimento de AASHTO/93 numeral 2.3.5 ) los cuales se ven en la siguiente tabla:

**Tabla N° 3.** Coeficiente estructural y coeficiente de drenaje

**Fuente:** Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.

| TIPO DE MATERIAL   | SIMBOLOGÍA     | COEFICIENTE ESTRUCTURAL | COEFICIENTE DE DRENAJE |
|--|----------------|-------------------------|------------------------|
| MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE NUEVA                                     | MDC-19/ MDC-25 | 0.30 (*)                | 1.0                    |
| BASE GRANULAR  | BG-25,         | 0.14                    | 0.9                    |
|  | TIPO A y B     |                         |                        |
| SUBBASE GRANULAR   | SBG-50,        | 0.12                    | 0.9                    |
|  | TIPO A y B     |                         |                        |
| GRANULAR REMANENTE   | GRAN REM       | 0.08                    | 0.8                    |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE (Material Tipo Pedraplén, Espesor Mínimo de 40cm) | MEJ-STE        |                         | 0.9                    |

- Módulo resiliente

| SECTOR | ABSCISA INICIAL | ABSCISA FINAL | TIPO DE INTERVENCIÓN        | PROMEDIO DE CBR EN INMERSIÓN (%) | MODULO RESILIENTE-MR (psi) | MODULO RESILIENTE-MR (MPa) |
|--------|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1      | K24+450         | K34+657       | Rehabilitación y Ampliación | 1,5                              | 6714                       | 47                         |
| 2      | K34+657         | K44+900       | Reconstrucción y Ampliación | 1,8                              | 8142                       | 57                         |

**Tabla N° 4.** Módulo resiliente de diseño para los tramos de construcción.

*Fuente:* Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS - APC

### 3.2. Propuesta De Intervención

La rehabilitación, ampliación y construcción de pavimentos se realizará en dos tramos

| SECTOR | ABSCISA INICIAL | ABSCISA FINAL | TIPO DE INTERVENCIÓN        |
|--------|-----------------|---------------|-----------------------------|
| 1      | K24+450         | K34+657       | Rehabilitación y Ampliación |
| 2      | K34+657         | K44+900       | Reconstrucción y Ampliación |

**Tabla N° 5.** Tipo de intervención

*Fuente:* Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.

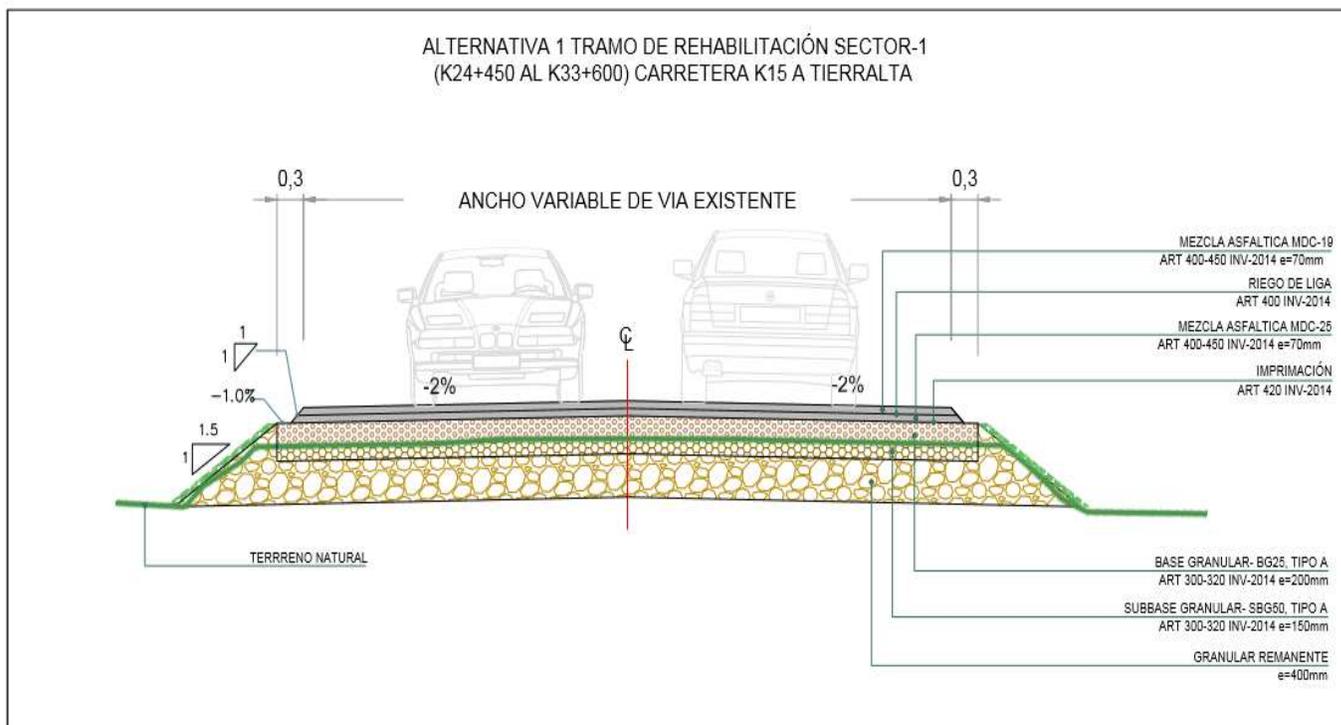
#### TRAMO 1

- Rehabilitación

| CAPA                            | ESPECIFICACIÓN       | ESPESOR | MÓDULO | SN        | SN        |
|---------------------------------|----------------------|---------|--------|-----------|-----------|
|                                 |                      | (mm)    | (MPa)  | REQUERIDO | CALCULADO |
| MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19         | ART 400-450 INV-2014 | 70      | 1500   | 4.26      | 4.29      |
| RIEGO DE LIGA                   | ART 400 INV-2014     |         |        |           |           |
| MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25         | ART 400-450 INV-2014 | 70      | 1500   |           |           |
| IMPRIMACIÓN                     | ART 420 INV-2014     |         |        |           |           |
| BASE GRANULAR- BG25 TIPO A      | ART 300-320 INV-2014 | 200     | 214    |           |           |
| SUBBASE GRANULAR- SBG50, TIPO A | ART 300-320 INV-2014 | 150     | 117    |           |           |
| GRANULAR REMANENTE              |                      | 400     |        |           |           |

**Tabla N° 6.** Alternativa 1– tramo de rehabilitación- sector 1 (K24+450+K34+657), carretera K15 a Tierralta

*Fuente:* Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.



**Figura N° 8. Alternativa 1 rehabilitación**

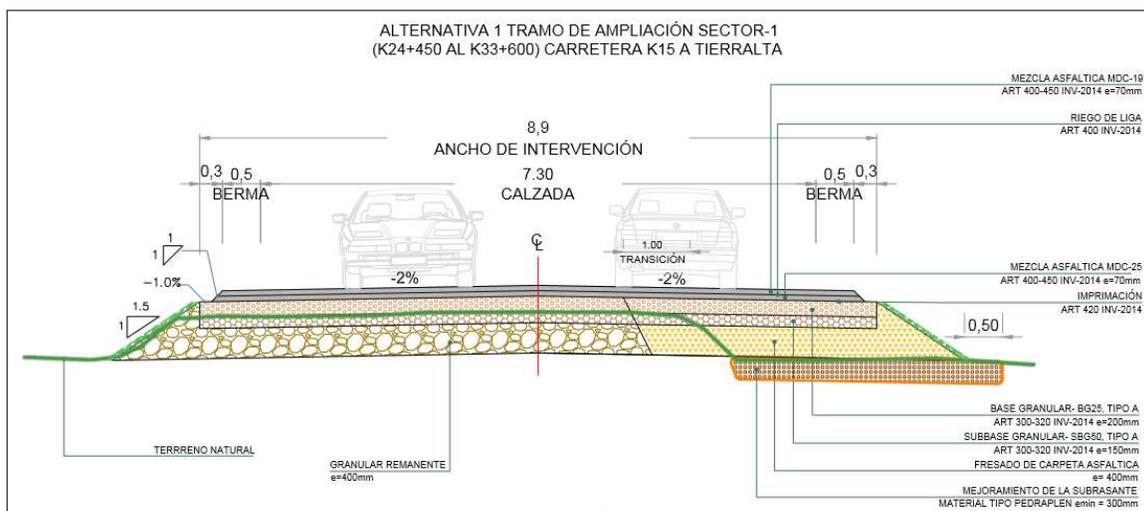
**Fuente:** Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.

- Ampliación

| CAPA  | ESPECIFICACIÓN   | ESPESOR          | MÓDULO | SN        | SN        |
|---|--|------------------|--------|-----------|-----------|
|   |  | (mm)             | (MPa)  | REQUERIDO | CALCULADO |
| MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19                     | ART 400-450 INV-2014                                     | 70               | 1500   | 4.70      | 5.05      |
| RIEGO DE LIGA                               | ART 400 INV-2014   |                  |        |           |           |
| MEZCLA ASFÁLTICA MDC-25                     | ART 400-450 INV-2014                                     | 70               | 1500   |           |           |
| IMPRIMACIÓN                                 | ART 420 INV-2014   |                  |        |           |           |
| BASE GRANULAR- BG25 TIPO A                  | ART 300-320 INV-2014                                     | 200              | 214    |           |           |
| SUBBASE GRANULAR- SBG50, TIPO A             | ART 300-320 INV-2014                                     | 150              | 117    |           |           |
| MATERIAL SELECCIONADO                       | Relleno con material seleccionado ó producto del fresado | Espesor variable |        |           |           |
| MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE (Espesor mínimo) | Material Tipo Pedraplen                                  | 400              |        |           |           |

**Tabla N° 7. Alternativa 1– tramo de ampliación- sector 1 (K24+450+K34+657), carretera K15 a Tierralta**

**Fuente:** Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.



**Figura N° 9.** Alternativa 1 ampliación.

**Fuente:** Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.

## TRAMO 2

- Reconstrucción

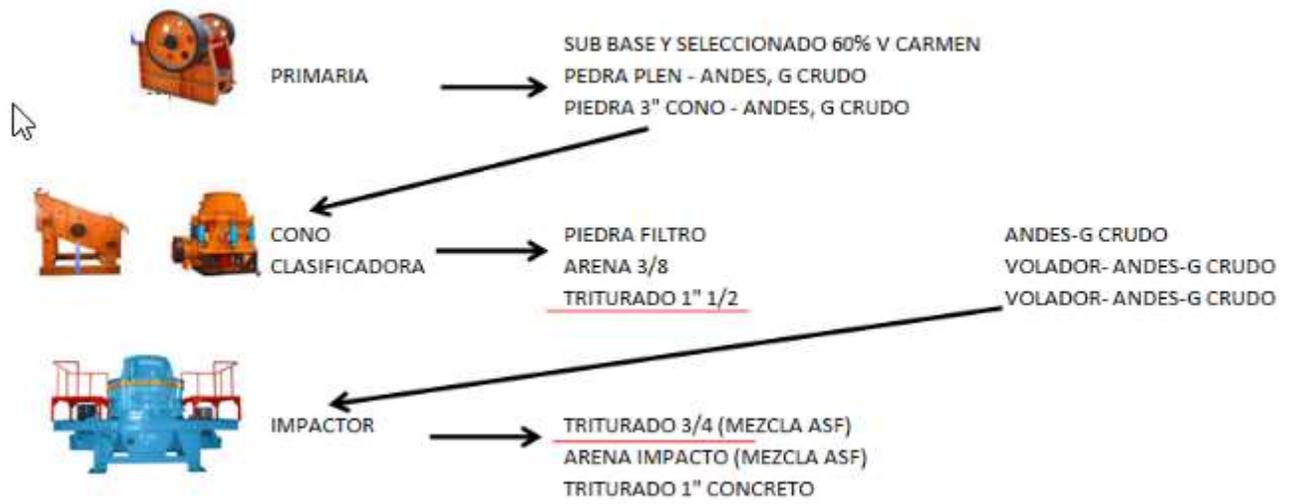
| CAPA  | ESPECIFICACIÓN        | ESPEJOR | MÓDULO | SN        | SN        |
|---|-----------------------|---------|--------|-----------|-----------|
|   |                       | (mm)    | (MPa)  | REQUERIDO | CALCULADO |
| MEZCLA ASFÁLTICA MDC-19   | ART. 400-450 INV-2014 | 80      | 1500   | 4,42      | 4,50      |
| RIEGO DE LIGA   | ART 400 INV-2014      |         |        |           |           |
| MEZCLA ASFÁLTICA MD-25  | ART 400-450 INV-2014  | 80      | 1500   |           |           |
| IMPRIMACIÓN   | ART. 420-INV-2014     |         |        |           |           |
| BASE GRANULAR, BG-25, TIPO A  | ART. 300-330INV-2014  | 270     | 214    |           |           |
| SUBBASE GRANULAR, SBG-50, TIPO A  | ART. 300-320INV-2014  | 300     | 117    |           |           |
| MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE, MATERIAL TIPO PEDRAPLEN (Espesor mínimo) | ART. 230-INV-2014     | 400     | 57     |           |           |

**Tabla N° 8.** Alternativa 2 tramos de reconstrucción y ampliación- sector 2 (K34+657+K44+900), carretera K15 a Tierralta.

**Fuente:** Volumen viii informe final ejecutivo SONACOL SAS – APC.

## 4. Producción De Los Agregados

Para la producción de la grava y la arena de trituración se utiliza el impactar vertical VSI, el cual permite obtener un material con menor forma geométrica (esférica subangular), con menor índice de aplanamiento, alargamiento, mayor índice de fracturación y mejores propiedades de desempeño ante las exigencias de esfuerzo.



*Figura N° 10. Esquema de producción de materiales*

*Fuente: Propia.*



*Figura N° 11. Trituradora primaria - cono clasificador.*

*Fuente: Propia.*



*Figura N° 12. Impactor*

*Fuente: Propia.*



*Figura N° 13. Acopio material mezcla.*

*Fuente: Propia.*

Los materiales procesados por los equipos son separados con el fin de ajustar y mejorar los porcentajes de plasticidad, desgaste y caras fracturadas, una vez procesados se da inicio a la mezcla de los mismos en proporciones definidas por el área de calidad. Los sub productos en mezcla son:  
Triturado 3/4 asfalto - Triturado 1" 1/2 volador  
Arena impactar asfalto - Triturado 1" 1/2 volador

#### **4.1. Descripción del proceso de producción de la mezcla asfáltica**

- MEZCLA ASFALTICA MDC 19

Para la producción de la mezcla asfáltica se cuenta con la planta marca CIBER modelo VACF INOVA 1200 P1 con una capacidad de producción de 120 Ton/hora del tipo producción continua y sistema de secad de agregados en contraflujo. Esta planta cuenta con un sistema de proporcionamiento de agregados por caudal controlado en cada tolva y un control de caudal para el asfalto lo cual garantiza la uniformidad de la granulometría y del porcentaje de asfalto de la mezcla



*Figura N° 14. Planta Asfalto Ciber producción continua.*

*Fuente: Propia.*

- MEZCLA ASFÁLTICA ASFALTO MODIFICADO CON GRANO CAUCHO DE LLANTA GRC

El asfalto modificado con grano de Caucho reciclado de llantas, se fabricará en una planta adecuada para tal fin que permita la incorporación precisa del grano de caucho al asfalto en contenidos comprendidos entre el 15% y 20%. La planta debe contar con equipos que incorporen el grano de caucho al asfalto virgen en el porcentaje elegido de forma automática de acuerdo con la fase de experimentación realizada a nivel de laboratorio. Este equipo debe contar con un tanque de reacción adecuado con calentamiento y agitación para mantener la mezcla asfalto caucho homogénea y a la temperatura requerida para que se produzca una reacción adecuada. La planta debe contar con un sistema de calentamiento independiente de las bombas, accesorios y tuberías. Además de un intercambiador de calor que lleve el asfalto virgen hasta la temperatura requerida para realizar la incorporación del caucho. Se deberá contar con bomba capaz de realizar la recirculación e inyección del asfalto desde la planta asfalto caucho a la planta de preparación de mezcla.

## 5. Caracterización Del Material Ligante

- Propiedades fisicoquímicas asfalto 60-70

Los valores de las propiedades fisicoquímicas del asfalto se presentan en la siguiente tabla, comparados con los valores exigidos por el INVIAS Artículo 410-13:

| ESPECIFICACIÓN INVIAS ART.410-13, TABLA 410-1  |                   |                |               |      |           |
|--|-------------------|----------------|---------------|------|-----------|
| CARACTERÍSTICA   | UNIDADES          | NORMAS ENSAYOS | ASFALTO 60/70 |      | RESULTADO |
|  |                   |                | MIN.          | MAX. |           |
| Penetración (25°C, 100 g, 5)   | 0,1mm             | E-706          | 60            | 70   | 64.6      |
| Punto de Ablandamiento.  | °C                | E-712          | 48            | 54   | 48.6      |
| Índice de Penetración  | -                 | E-724          | -1.2          | 0.6  | -0.96     |
| Viscosidad absoluta (60 °C)  | P                 | E-717          | 1500          | -    | 2300      |
| Ductilidad 25 °C   | cm                | E-702          | 100           | -    | >100      |
| Solubilidad en Tricloroetileno   | %                 | E-713          | 99            | -    | 99.99     |
| Contenido de Agua  | %                 | E-704          | -             | 0.2  | 0         |
| Punto de Ignición mediante copa abierta de Cleveland   | °C                | E-709          | 230           | -    | 239       |
| Contenido de Parafinas   | %                 | E-718          | -             | 3    | 1.988     |
| Peso Especifico 15 °C  | kg/m <sup>3</sup> | E-707          | -             | -    | 1023.8    |
| Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163 °C, 85 minutos)                         | %                 | E-720          | -             | 0.8  | 0.17      |
| Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original.          | %                 | E-706          | 50            | -    | 52.32     |
| Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento. | °C                | E-712          | -             | 9    | 7.2       |
| Índice de Envejecimiento   | -                 | E-716/717      | -             | 4    | 3.5       |
| Temperatura de mezcla °C   | °C                | ASTM D 2493    | VER CURVA     |      | 150-154   |
| Temperatura de Compactacion °C   | °C                | ASTM D 2493    | VER CURVA     |      | 138-142   |

**Tabla N° 9.**  
*Propiedades fisicoquímicas del asfalto.*

**Fuente** Reporte técnico HQ.

- Propiedades fisicoquímicas asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC

El material bituminoso para elaborar la mezcla en caliente tipo GRC con asfalto modificado con caucho de llanta deberá cumplir con los requerimientos de la especificación INVIAS 413-13

| <b>ESPECIFICACIONES ASFALTOS GRC TIPO I</b>  |  |  |            |                  |
|--|--|--|------------|------------------|
| <b>Características</b>   | <b>Norma Ensayos</b>   | <b>Especificación Asfalto Modificado GRC</b> |            | <b>Resultado</b> |
|  |  | <b>Min</b>                                   | <b>Max</b> |                  |
| <i>Viscosidad aparente a 175 C(pas)</i>  | <i>ASTM D 2196<br/>Método A<br/>Modificado A<br/>según ASTM D-6114</i> | <i>1.5</i>                                   | <i>5</i>   | <i>2.8</i>       |
| <i>Penetracion (25 C, 100g, 5S)(0.1mm)</i>   | <i>INV E-706</i>   | <i>25</i>                                    | <i>75</i>  | <i>62</i>        |
| <i>Penetracion (4 C, 200g, 60S)(0.1mm)</i>   | <i>INV E-706</i>   | <i>10</i>                                    |            | <i>35</i>        |
| <i>Punto de Ablandamiento ©</i>  | <i>INV E-712</i>   | <i>57</i>                                    |            | <i>65.5</i>      |
| <i>Resiliencia a 25 C</i>  | <i>ASTM D5329</i>  | <i>25</i>                                    |            | <i>30</i>        |
| <i>Punto de ignicion mediante copa abierta de Cleveland</i>                              | <i>INV E-709</i>   | <i>232</i>                                   |            | <i>282</i>       |
| <i>Temperatura de Mezclado ©</i>   | <i>ASTM D2493</i>  | <i>REPORTAR</i>                              |            |                  |
| <i>Temperatura de Compactación ©</i>   | <i>ASTM D2493</i>  | <i>REPORTAR</i>                              |            |                  |
| <b>RESIDUO DEL ENSAYO DE PERDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO</b> |  |  |            |                  |
| <i>Penetración del residuo en % de la penetración original (%)</i>                       | <i>INV E-706</i>   | <i>&gt;75%</i>                               |            | <i>79</i>        |

**Tabla N° 10.** Especificaciones asfaltos GRC tipo I

**Fuente** Reporte técnico MPI

- Propiedades fisicoquímicas asfalto GRC CON POLIMEROS

| <b>ESPECIFICACIONES ASFALTOS MODIFICADOS</b>         |   |  |            |                  |
|--|---|--|------------|------------------|
| <b>Características</b>                               | <b>Norma Ensayos</b>  | <b>Especificación Asfalto Modificado GRC+Polimeros</b> |            | <b>Resultado</b> |
|  |   | <i>Min</i>   | <i>Max</i> |                  |
| Viscosidad aparente a 175 C(pas)                     | ASTM D 2196<br>Método A<br>Modificado A<br>según ASTM<br>D-6114 | 1.5  | 5          | 1.53             |
| Penetración (25 C, 100g, 5S)(0.1mm)                  | INV E-706   | 25   | 75         | 42.3             |
| Penetración (4 C, 200g, 60S)(0.1mm)                  | INV E-706   | 10   |            | 21.5             |
| Punto de Ablandamiento ©                             | INV E-712   | 57   |            | 67               |
| Resiliencia a 25 C                                   | ASTM D5329  | 25   |            | 65               |
| Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland | INV E-709   | 230  |            | 302              |
| Temperatura de Mezclado ©                            | ASTM D2493  | REPORTAR   |            |                  |
| Temperatura de Compactación ©                        | ASTM D2493  | REPORTAR   |            |                  |

**RESIDUO DEL ENSAYO DE PERDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO**

|   |           |      |      |
|---|-----------|------|------|
| Penetración del residuo en % de la penetración original (%) | INV E-706 | >75% | 77.6 |
|---|-----------|------|------|

**ENSAYOS COMPLEMENTARIOS**

|  |             |       |       |
|--|-------------|-------|-------|
| Grado de Desempeño PG Asfalto Original 60/70                 | AASHTO M320 | 64-22 | 64-22 |
| Grado de Desempeño PG Asfalto Modificado con GRC y polímeros | AASHTO M320 |       | 88-22 |
| Incremento en el rango PG ©                                  | AASHTO M320 | >6    | 18    |

*Tabla N° 11. Especificaciones asfaltos modificados*

*Fuente Reporte técnico HQ*

6. **Caracterización De Los Agregados De Las Mezclas Asfálticas MDC19, Asfalto Modificado Con Grano Caucho De Llantta GRC, Mezcla GRC Con Polímeros**

De acuerdo con los requerimientos del Artículo 450 de las especificaciones Generales de Construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS. Para la elaboración del diseño Marshall, se utilizaron los materiales procedentes de la fuente El Volador, los cuales fueron procesados en planta de trituración, el asfalto utilizado corresponde al tipo grado 60-70 de Barranca aditivado al 0.5%. Para la realización del diseño se siguió la metodología dada en las Normas de ensayo del Instituto Nacional de Vías INVIAS norma INV E-748-13 y la norma INV E-799-13 “Análisis Volumétrico, haciendo incrementos de 0.5%, entre el 3.5% y 5.5% respectivamente de mezclas asfálticas compactadas en caliente”. El acomodamiento de los materiales pétreos en la gradación de diseño ha sido verificado mediante los parámetros del Método Bailey, además teniendo en cuenta adicionalmente los requerimientos de SUPERPAVE en cuanto al control de segregación y rigidez de la mezcla

Los materiales pétreos para la elaboración de mezclas asfálticas, son explotados de los depósitos aluviales de la fuente El Volador, que luego son triturados por los equipos de trituración primaria, secundaria y terciaria a fin de lograr una geometría de partículas adecuada para la producción de la mezcla.

### 6.1. Granulometría de los materiales pétreos y el llenante mineral

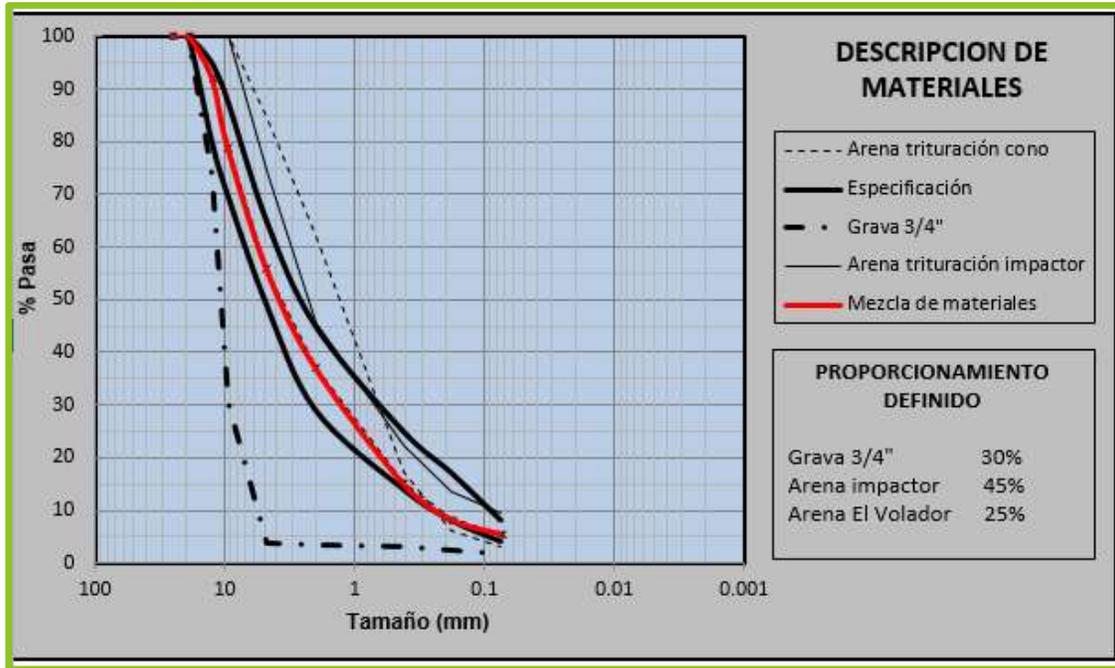
De acuerdo con la norma de ensayo aplicable se obtiene la granulometría de los materiales antes mencionados para la preparación de la mezcla de MDC19, Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, GRC y POLIMEROS. En la siguiente tabla y grafica se pueden apreciar los resultados obtenidos MDC -19

| TAMAÑO | MATERIAL 1 | MATERIAL 2 | MATERIAL 3 | MEZCLA | NORMA   |         |
|--------|------------|------------|------------|--------|---------|---------|
|        |            |            |            |        | LIM INF | LIM SUP |
| 25.4   | 100        | 100        | 100        | 100    | 100     | 100     |
| 19.1   | 100        | 100        | 100        | 100    | 100     | 100     |
| 12.5   | 73.7       | 100        | 100        | 92.1   | 80      | 95      |
| 9.5    | 30.3       | 100        | 100        | 79.1   | 70      | 88      |
| 4.75   | 3.8        | 74.5       | 84.6       | 55.8   | 49      | 65      |
| 2      | 3.4        | 45.7       | 62.1       | 37.1   | 29      | 45      |
| 0.425  | 3.1        | 22.3       | 17.3       | 15.3   | 14      | 25      |
| 0.18   | 2.6        | 13.5       | 6.1        | 8.4    | 8       | 17      |
| 0.075  | 1.8        | 9.5        | 3.2        | 5.6    | 4       | 8       |

| DESCRIPCION DE LOS MATERIALES   | % A MEZCLAR |
|---------------------------------|-------------|
| GRAVA TRITURADA 3/4" IMPACTOR   | 30          |
| ARENA DE TRITURACION IMPACTADOR | 45          |
| ARENA DE TRITURACION CON CONO   | 25          |

**Tabla N° 12.** Granulometría de los materiales pétreos MDC 19

Fuente: Propia.



Grafica N° 1. Combinación de granulometrías MDC19

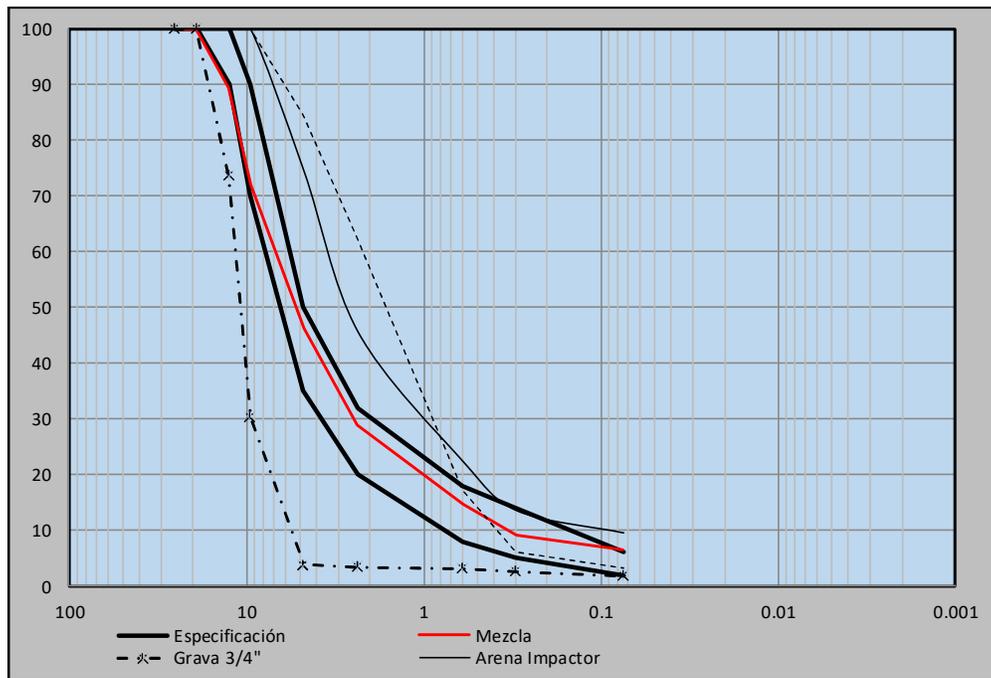
Fuente: Propia.

| TAMIZ  | TAMAÑO | MATERIAL 1 | MATERIAL 2 | MATERIAL 3 | MEZCLA | NORMA   |         |
|--------|--------|------------|------------|------------|--------|---------|---------|
|        |        |            |            |            |        | LIM INF | LIM SUP |
| 1"     | 25.4   | 100        | 100        |            | 100    | 100     | 100     |
| 3/4"   | 19.1   | 100        | 100        |            | 100    | 100     | 100     |
| 1/2"   | 12.5   | 73.7       | 100        |            | 89.5   | 90      | 95      |
| 3/8"   | 9.5    | 30.3       | 100        |            | 72.1   | 70      | 90      |
| No 4   | 4.75   | 3.78       | 74.5       |            | 46.2   | 35      | 50      |
| No 10  | 2      | 3.4        | 45.7       |            | 28.8   | 20      | 32      |
| No 40  | 0.425  | 3.1        | 22.3       |            | 14.6   | 8       | 18      |
| No 80  | 0.18   | 206        | 13.5       |            | 9.1    | 5       | 14      |
| No 200 | 0.075  | 1.8        | 9.5        |            | 6.4    | 2       | 6       |

| DESCRIPCION DE LOS MATERIALES   | % MEZCLAR |
|---------------------------------|-----------|
| GRAVA TRITURADA 3/4" IMPACTOR   | 40        |
| ARENA DE TRITURACION IMPACTADOR | 60        |
|                                 |           |

Tabla N° 13. Granulometría de los materiales pétreos modificado con grano caucho de llanta GRC.

Fuente: Propia.



Gráfica N° 2. Combinación de granulometrías GRC

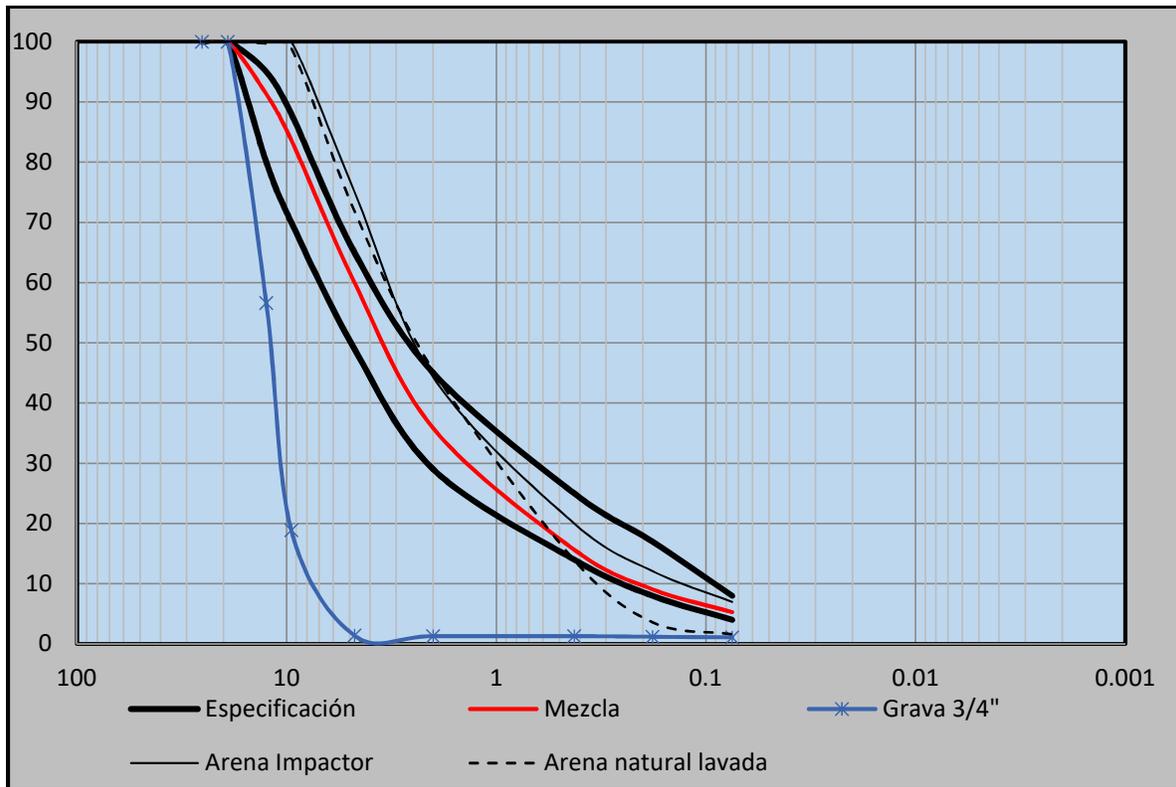
Fuente: Propia.

| TAMAÑO | MATERIAL 1 | MATERIAL 2 | MATERIAL 3 | MEZCLA | NORMA   |         |
|--------|------------|------------|------------|--------|---------|---------|
|        |            |            |            |        | LIM INF | LIM SUP |
| 25.4   |            |            |            |        |         |         |
| 19.1   | 100        | 100        | 100        | 100    | 100     | 100     |
| 12.5   | 56.6       | 100        | 99.7       | 91.3   | 80      | 95      |
| 9.5    | 18.9       | 100        | 98.9       | 83.7   | 70      | 88      |
| 4.75   | 1.4        | 75.1       | 71.9       | 60.1   | 49      | 65      |
| 2      | 1.3        | 44.3       | 45.4       | 35.8   | 29      | 45      |
| 0.425  | 1.3        | 20         | 13.9       | 15.6   | 14      | 25      |
| 0.18   | 1.2        | 12.1       | 3.6        | 9.1    | 8       | 17      |
| 0.075  | 1.1        | 7          | 1.6        | 5.3    | 4       | 8       |

| DESCRIPCION DE LOS MATERIALES   | % MEZCLA |
|---------------------------------|----------|
| GRAVA TRITURADA 3/4" IMPACTOR   | 20       |
| ARENA DE TRITURACION IMPACTADOR | 70       |
| ARENA DE TRITURACION CON CONO   | 10       |

Tabla N° 14. Granulometría mezcla GRC +POLIMEROS

Fuente: Propia.



Gráfica N° 3. Granulometría mezcla GRC + POLIMEROS

• Fuente: Propia.

- Limite líquido e Índice de Plasticidad

El material pasante el tamiz N° 40 no presenta plasticidad N.P.

- Propiedades gravimétricas de los agregados y pesos específicos de los agregados grueso y fino

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de los pesos específicos correspondientes a cada uno de los agregados empleados en la mezcla:

| MATERIAL                       | Gravedad específica Bulk (k/m <sup>3</sup> ) | Absorción de agua (%) |
|--------------------------------|--|-----------------------|
| Grava triturada ¾" La Española | 2.675  | 1.674                 |
| Arena de trituración Española  | 2.593  | 3.142                 |
| Arena El Volador               | 2.595  | 1.954                 |

Tabla N° 15. Pesos específicos de los agregados empleados en la mezcla.

Fuente: Propia.

- Equivalente de Arena evalúan la limpieza de los agregados

Al ensayar la fracción menor a 4.75 mm de acuerdo con la norma de ensayo INV E-133-13, se obtiene un porcentaje de 60% que supera el mínimo establecido por la especificación.

- Contenido de impurezas

Los valores correspondientes al contenido de impurezas del agregado grueso es del 0.34%, el cual satisface los requerimientos de la especificación.

- Solidez en sulfato de sodio

Los resultados de las pérdidas por el ensayo de solidez en sulfato de magnesio para la combinación de agregados en el diseño son:

- Desgaste en máquina de los Ángeles

El valor obtenido al realizar la prueba de desgaste por abrasión en la máquina de los Ángeles teniendo en cuenta la gradación B, es del 19.8% en seco a 500 revoluciones y de 2.7 en seco a 100 revoluciones.

- Evaluación de la resistencia al desgaste del agregado grueso

Utilizando el equipo Micro-Deval Al realizar esta prueba se obtuvo una pérdida del 5.7%, teniendo en cuenta las condiciones relacionadas a continuación

Gradación A

Revoluciones/ minuto =  $100 \pm 5$

Tiempo de rotación:  $120 \pm 1$  min

- Evaluación de la resistencia mecánica del agregado grueso por el método de 10% de finos

Los resultados del ensayo de 10% de finos realizado al material en estado seco y después de 48 horas de Inmersión fueron los siguientes:

Carga en estado seco 249.9 kN

Relación húmeda/seco = 88

- Ensayos que evalúan la forma de los agregados pétreos Porcentaje de caras fracturadas:

Los porcentajes de caras fracturadas correspondientes al agregado grueso de la mezcla (grava  $\frac{3}{4}$ " ) fueron del 88.5% para 1 cara y del 72.5% para dos caras.

- Angularidad del Agregado Fino :

El valor correspondiente al porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar fue del 46.7% en promedio, lo cual satisface el requerimiento establecido por la norma.

- Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Riedel-Weber):

De acuerdo con la prueba realizada en el laboratorio del proveedor de asfaltos HQ TRANSPORTES, el índice de adhesividad del asfalto con los agregados finos se encuentra es de 7, el cual supera el mínimo establecido en la especificación.

- Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta:

El valor de resistencia retenida a la tracción indirecta correspondiente a la prueba realizada es del 82.1%, el cual cumple con los requerimientos de la norma.

- Efecto del agua sobre mezclas asfálticas sueltas (Método rápido de campo):

De acuerdo con la prueba realizada se puede apreciar que el cubrimiento de las partículas de agregado es superior al 95% especificado en la norma

| Ensayo  | Norma de ensayo   | Norma de ensayo | Requisitos | Grava 3/4"  |
|---|---|-----------------|------------|-------------|
| <b>Dureza</b>   |   |                 |            |             |
| Desgaste Los Ángeles<br>(Gradación B)                   | Capas de Rodadura<br>- En seco, 500 revoluciones, % máximo                        | INV E-218       | 25         | 19,8        |
|   | - En seco, 100 revoluciones, % máximo   |                 | 5          | 2,7         |
| Micro Deval, % máximo (FT)                              | - Capas de Rodadura   | INV E-238       | 20         | 5,7         |
| 10% de finos  | - Capas de Rodadura<br>Valor en seco, kN mínimo<br>Relación húmedo/seco, % mínimo | INV E-224       | 110<br>75  | 249,9<br>88 |
| <b>Durabilidad</b>                                      |   |                 |            |             |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo     | - Sulfato de Magnesio   | INV E-220       | 18         | 0,6         |
| <b>Limpieza</b>   |   |                 |            |             |
| Contenido de Impurezas, % máximo                        |   | INV E-237       | 0.5        | 0,34        |
| <b>Geometría de las Partículas</b>                      |   |                 |            |             |
| Partículas Fracturadas mecánicamente, % mínimo          | - 1 cara  | INVE-227        | 85         | 88,5        |
|   | - 2 caras   |                 | 70         | 72,5        |
| Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%) |   | INV E-240       | 10         | 0           |

*Tabla N° 16. Requisitos agregados grueso mezcla asfáltica.*

*Fuente: Propia.*

|               |  |  |  |
|---------------|--|--|--|
| <b>Ensayo</b> |  |  |  |
|---------------|--|--|--|

|   | <b>Norma de Ensayo</b>             | <b>Requisito Norma</b> | <b>Agregado Fino</b> |
|---|------------------------------------|------------------------|----------------------|
| <b>Durabilidad</b>                                  |                                    |                        |                      |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo | - Sulfato de Magnesio<br>INV E-220 | 18                     | 2,6                  |
| <b>Limpieza</b>                                     |                                    |                        |                      |
| Índice de Plasticidad, % máximo                     | INV E-126                          | No plástico            | 0                    |
| Equivalente de Arena, % mínimo                      | INV E-133                          | 50                     | 60                   |
| Valor de Azul de Metileno, % máximo                 | INV E-235                          | 10                     | NA                   |
| <b>Geometría de las Partículas</b>                  |                                    |                        |                      |
| Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)        | -Capas de Rodadura<br>INV E-239    | 45                     | 46,7                 |

*Tabla N° 17. Requisitos agregado fino*

*Fuente: propia*

## **7. Diseño MARSHALL Mezcla Asfálticas MDC19, Mezcla Asfalto Modificado CON Grano Caucho De Llanta GRC, Mezcla GRC Polímeros**

Caracterización de la mezcla asfáltica

### **7.1. Mezcla MDC-19**

| <b>CARACTERISTICA</b>                   | <b>Norma de Ensayo</b> | <b>Requisito</b> | <b>Valor obtenido</b> |
|---|------------------------|------------------|-----------------------|
| Compactación (Golpes/cara)              | INV E-748              | 75               | 75                    |
| Estabilidad mínima (N)                  | INV E-748              | 9000             | 10052                 |
| Flujo (mm)                              | INV E-748              | 2 – 3.5          | 2.45                  |
| Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)      | INV E-748              | 3 - 6            | 5.0                   |
| Vacíos con aire (Va) (%)                | INV E-736              | 4 – 6            | 4.2                   |
| Vacíos en agregados minerales (VAM) (%) | INV E-799              | >15              | 15.1                  |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)      | INV E-799              | 65 a 75          | 67                    |

|  |           |               |        |
|--|-----------|---------------|--------|
| Relación llenante/ligante efectivo en peso                     | INV E-799 | 0.8 – 1.2     | 1.2    |
| Concentración de llenante, valor máximo                        | INV E-745 | Valor crítico | 0.31   |
| Evaluación de propiedades de empaquetamiento por método Bailey |           | Reportar      | Cumple |
| Espesor promedio de Película de asfalto, mínimo $\mu\text{m}$  | INV E-741 | 7,5           | 8.234  |

**Tabla N° 18.** Parámetros óptimos de diseño mezcla asfáltica MDC 19.

**Fuente:** propia

- Cálculo del espesor promedio de película de asfalto (IPA)

El Índice de Película de Asfalto se determina de la siguiente manera (procedimiento de cálculo Austroads AGPT/T327):

$$IPA = \frac{P_{be}}{100 - P_{bt}} \times \frac{G_{s-g}}{2.65 \times S_e} \times \frac{10^3}{G_{s-b}}$$

Dónde:

IPA = Índice de película de asfalto

Pbe = asfalto efectivo, % en peso de la mezcla

Pbt = asfalto total, % en peso de la mezcla

Gs\_g = peso específico aparente del agregado combinado

Gs\_b = peso específico del asfalto

Se = Superficie específica del agregado, m<sup>2</sup>/kg

La superficie específica (Se) del agregado se determina de la siguiente manera:

$$S_e = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.30e + 0.60f + 1.60g) \times 0.20482$$

Dónde:

a = % pasa tamiz 4.75 mm

b = % pasa tamiz 2.36 mm

c = % pasa tamiz 1.18 mm

d = % pasa tamiz 0.60 mm

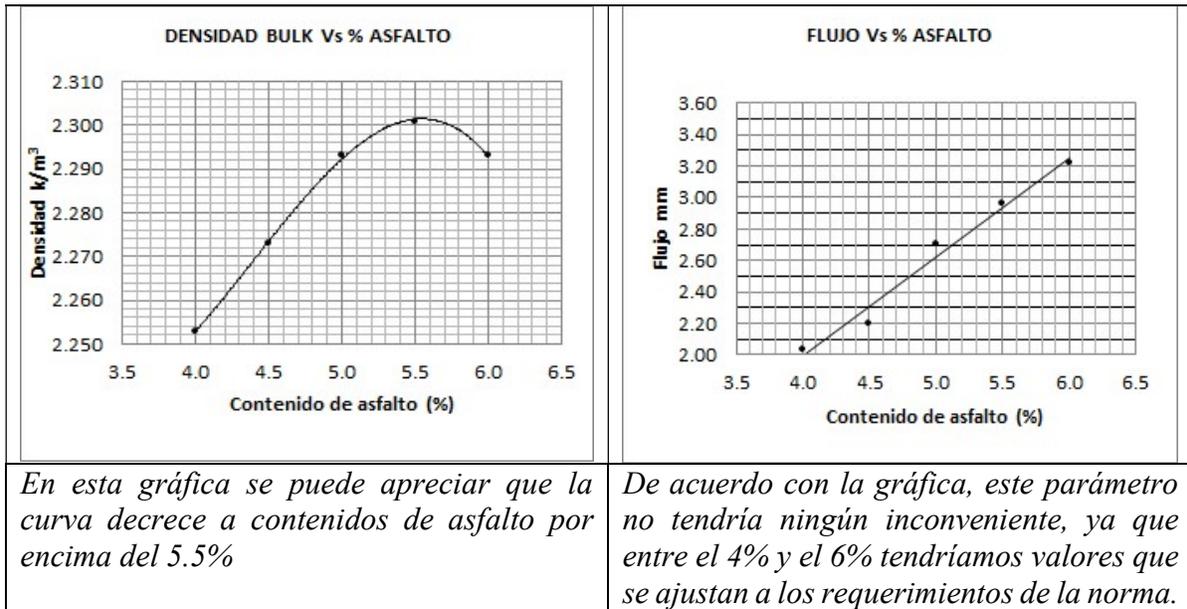
e = % pasa tamiz 0.30 mm

f = % pasa tamiz 0.15 mm

g = % pasa tamiz 0.075 mm

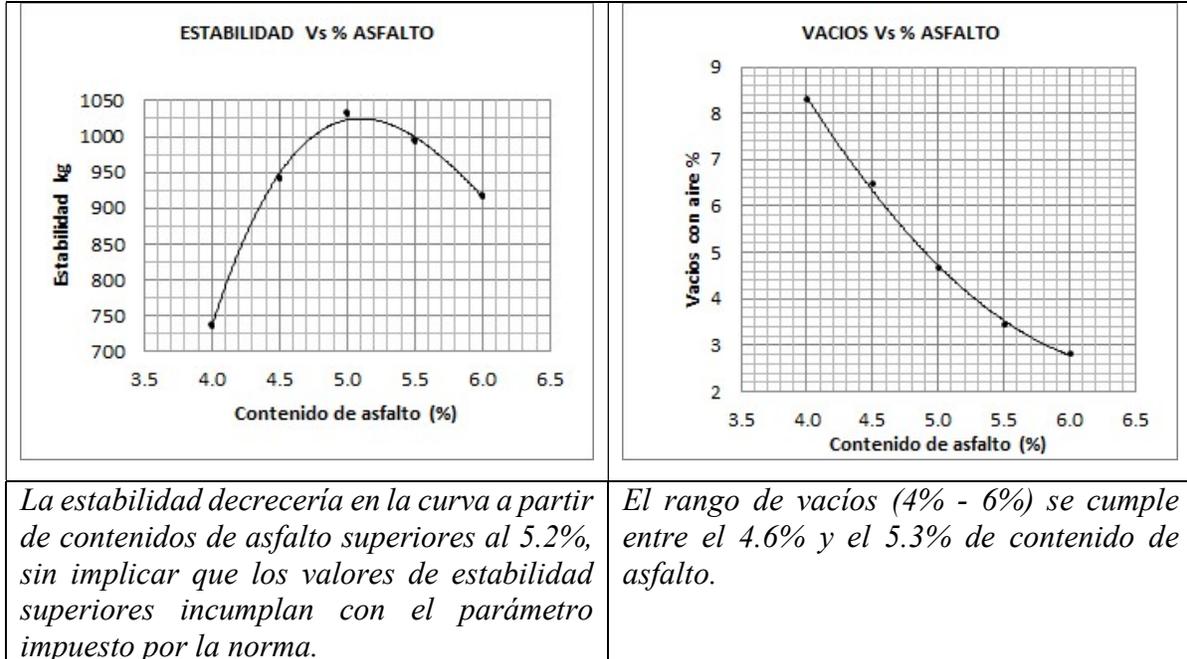
De acuerdo con las ecuaciones anteriores se obtiene un: **IPA = 8.243  $\mu\text{m}$**

### 7.1.1. Gráficas diseño MARSHALL MDC 19



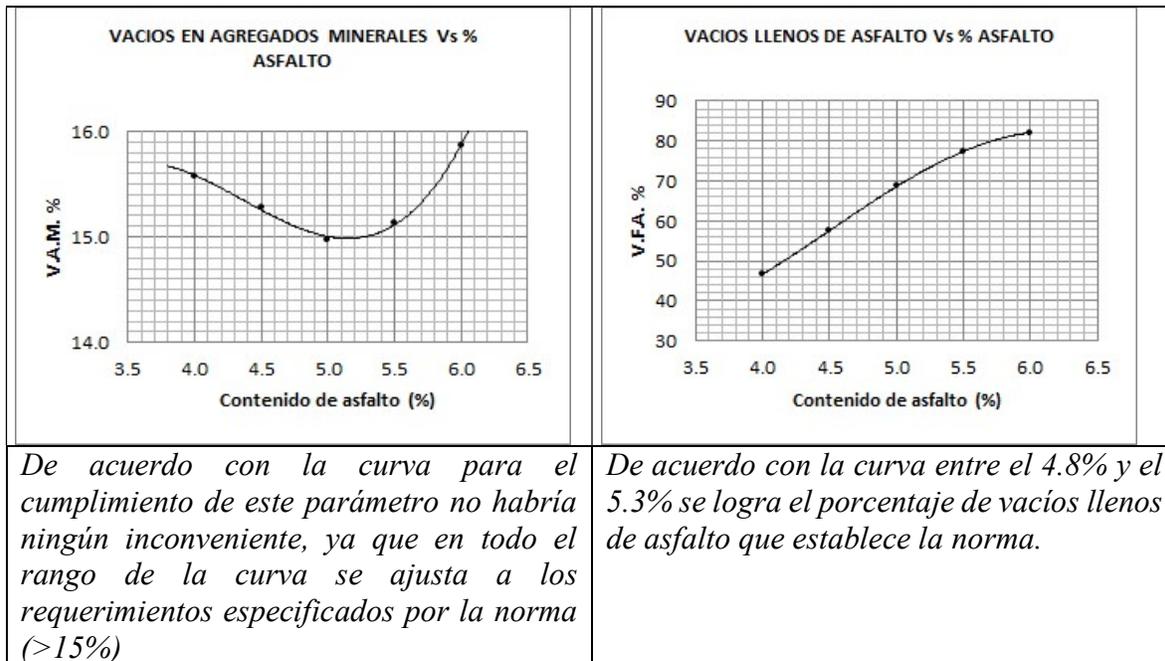
**Grafica N° 4. Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto**

*Fuente: propia*



**Grafica N° 5. Estabilidad Vs % de asfalto, Vacíos Vs % de asfalto.**

*Fuente: propia*



**Grafica N° 6.** Vacíos en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto

*Fuente: propia*

- SELECCIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO ÓPTIMO

Teniendo en cuenta el criterio del Instituto del Asfalto para la selección del contenido óptimo de asfalto, en función de los parámetros volumétricos y de resistencia, tendríamos:

- Vacíos con aire (Va)

Con el 4.9%, se tendría un 5% de vacíos con aire Va, con el cual se satisface el requerimiento para el tipo de tránsito

- Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Se lograría un porcentaje de vacíos llenos de asfalto del 67%, con el cual se satisfacen los requerimientos establecidos por la norma (65% – 70%)

- Vacíos en los Agregados Minerales (VAM)

El porcentaje de vacíos en los agregados minerales sería del 15.1%, con el cual se satisface el requerimiento de que estos sean mayores al 15%.

- Estabilidad (kgf)

De acuerdo con la curva, se tendría que para un 4.9% el valor de estabilidad sería de 1025 kgf con el cual se satisface el requerimiento de estabilidad mínimo para la mezcla asfáltica.

- Flujo (mm)

De acuerdo con la curva obtenida en el diseño Marshall, tendríamos que con el porcentaje de asfalto óptimo adoptado (4.9%), el valor de flujo sería de 2.45 mm, con el cual se satisfacen los requerimientos de la norma.

- Densidad Bulk ( $k/m^3$ )

El valor de densidad Bulk correspondiente al 4.9% de asfalto es de 2290  $kg/m^3$ .

### 7.1.2. Formula de trabajo

Con base en el diseño realizado la fórmula de trabajo quedaría de acuerdo como se muestra a continuación:

GRAVA TRITURADA ¾" EL VOLADOR: 30%  
 ARENA DE TRITURACION EL VOLADOR: 45%  
 ARENA EL VOLADOR: 25%  
 ASFALTO OPTIMO: 4.9% DE BARRANCABERMEJA ADITIVADO AL 0.5% CON PROMOTOR DE ADHERENCIA.

TEMPERATURA DE COMPACTACION ENSAYO MARSHALL °C: 142°C – 146°C

TEMPERATURA DE MEZCLA: 152°C – 158°C

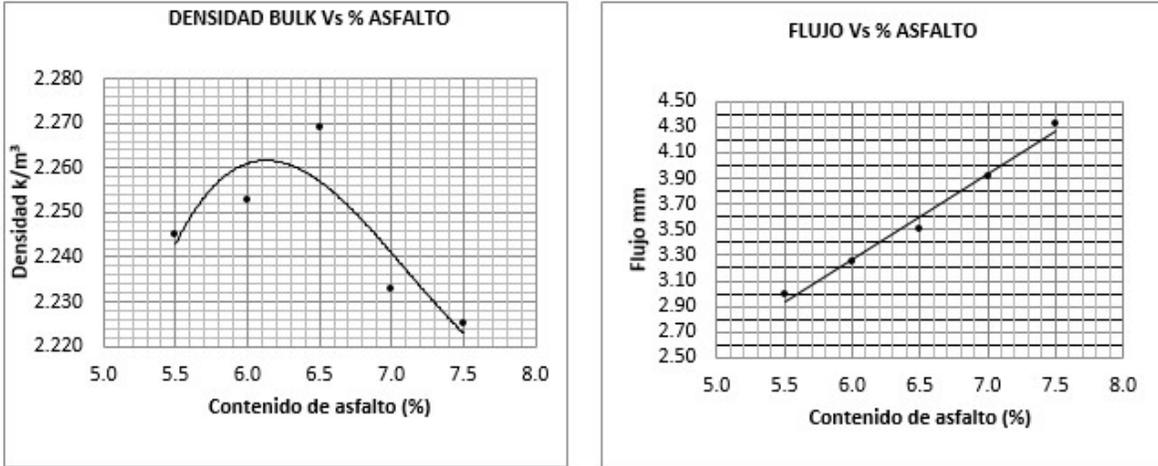
### 7.2. Caracterización de la mezcla asfáltica modificada con grano caucho de llanta GRC

| CARACTERISTICA                             | Norma de Ensayo | Requisito | Valor obtenido |
|--|-----------------|-----------|----------------|
| Compactación (Golpes/cara)                 | INV E-748       | 75        | 75             |
| Contenido de Asfalto-Caucho %              |                 | 6-9       | 7.3            |
| Estabilidad mínima (N)                     | INV E-748       | 8250      | 8826           |
| Flujo (mm)                                 | INV E-748       | 2.5 – 5.5 | 4.11           |
| Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)         | INV E-748       | 3-6       | 2.1            |
| Vacíos con aire (Va) (%)                   | INV E-736       | 3-5       | 3              |
| Vacíos en agregados minerales (VAM) (%)    | INV E-799       | >15       | 17.5           |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)         | INV E-799       | Reportar  | 82.3           |
| Relación llenante/ligante efectivo en peso | INV E-799       | Reportar  | 0.68           |

*Tabla N° 19. Características de mezcla asfáltica modificada con GRC.*

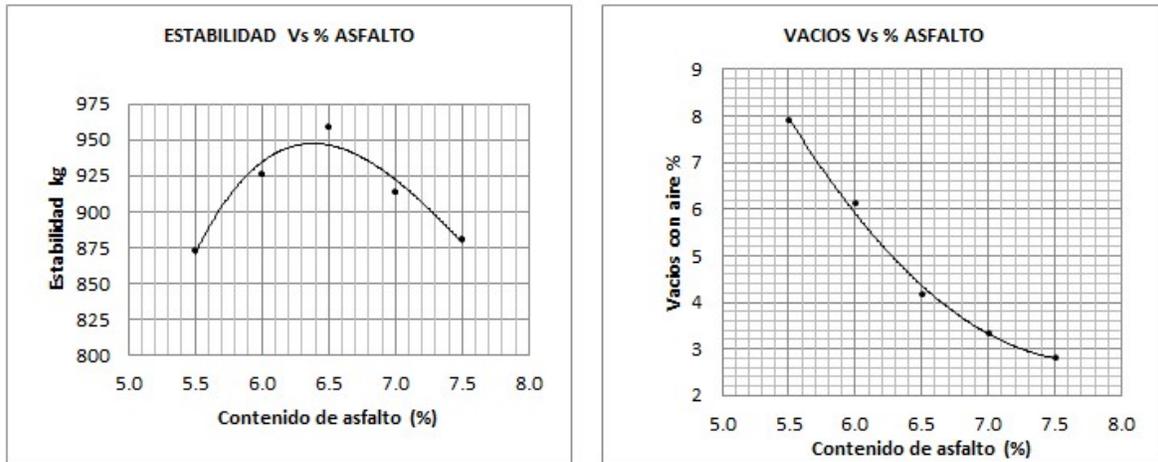
*Fuente: propia*

**7.2.1. Graficas diseño MARSHALL asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC**



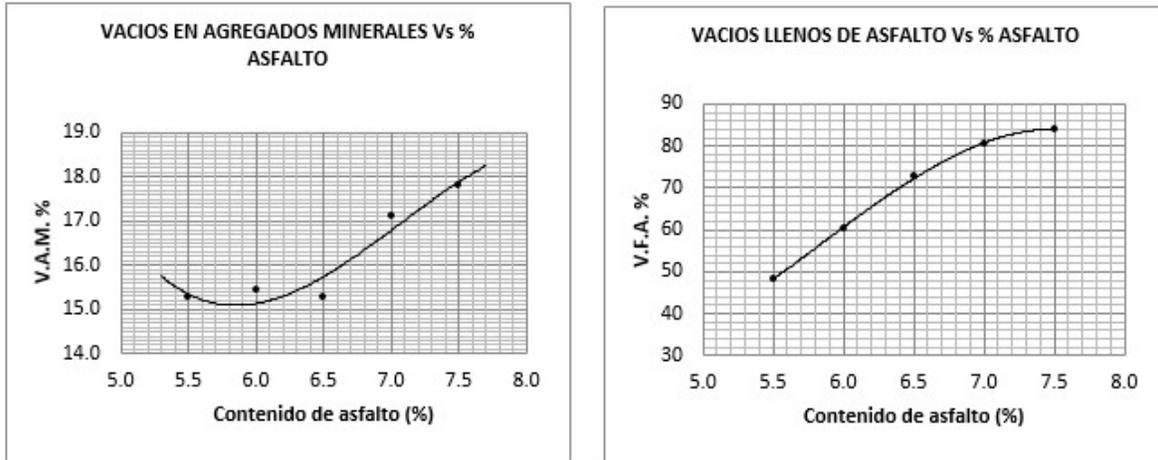
*Grafica N° 7. Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto*

*Fuente: propia*



*Grafica N° 8. Estabilidad Vs % de asfalto, Vacios Vs % de asfalto.*

*Fuente: propia*



**Grafica N° 9.** Vacíos en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto.

*Fuente: propia*

- SELECCIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO ÓPTIMO

Teniendo en cuenta el criterio del Instituto del Asfalto para la selección del contenido óptimo de asfalto, en función de los parámetros volumétricos y de resistencia, tendríamos:

- Vacíos con aire (Va)

Con el 7.3%, se tendría un 3% de vacíos con aire Va, con el cual se satisface el requerimiento para el tipo de tránsito

- Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Se lograría un porcentaje de vacíos llenos de asfalto del 82.3%, el cual se reporta conforme a lo solicitado por la especificación.

- Vacíos en los Agregados Minerales (VAM)

El porcentaje de vacíos en los agregados minerales sería del 17.5%, con el cual se satisface el requerimiento de que estos sean mayores al 15%.

- Estabilidad (kgf)

De acuerdo con la curva, se tendría que para un 7.3% el valor de estabilidad sería de 8826 (N) con el cual se satisface el requerimiento de estabilidad mínimo para la mezcla asfáltica.

- Flujo (mm)

De acuerdo con la curva obtenida en el diseño Marshall, tendríamos que con el porcentaje de asfalto óptimo adoptado (7.3%), el valor de flujo sería de 4.11 mm, con el cual se satisfacen los requerimientos de la norma.

### 7.2.2. Formula de trabajo

Con base en el diseño realizado la fórmula de trabajo quedaría de acuerdo como se muestra a continuación:

GRAVA TRITURADA ¾" EL VOLADOR: 40%

ARENA DE TRITURACION EL VOLADOR: 60%

ASFALTO OPTIMO: MDC 19 + GRC 7.3% DE BARRANCABERMEJA

Temperaturas de mezclado y compactación: Se aplicarían las que se determinen en la curva reológica con el suministro del asfalto para la producción.

### 7.3. Mezcla asfáltica GRC + POLIMERO

| CARACTERISTICA   | Norma de Ensayo | Requisito | Valor obtenido  |
|--|-----------------|-----------|-----------------|
| Compactación (Golpes/cara)                                     | INV E-748       | 75        | 75              |
| Contenido de Asfalto-Caucho %                                  |                 | 6-9       | 6               |
| Estabilidad mínima (N)   | INV E-748       | 8250      | 18654           |
| Flujo (mm)   | INV E-748       | 2.5 – 5.5 | 3.2             |
| Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)                             | INV E-748       | 3-6       | 5.9             |
| Vacios con aire (Va) (%)                                       | INV E-736       | 3-5       | 5               |
| Vacios en agregados minerales (VAM) (%)                        | INV E-799       | >15       | 16.5            |
| Vacios llenos de asfalto (VFA) (%)                             | INV E-799       | 65 a 75   | 69.7            |
| Relación llenante/ligante efectivo en peso                     | INV E-799       | Reportar  | 1               |
| Concentración de llenante, valor máximo                        | INV E-745       | Reportar  | $\leq C_s 0.34$ |
| Evaluación de propiedades de empaquetamiento por método Bailey |                 | Reportar  | cumple          |
| Espesor promedio de Película de asfalto, mínimo $\mu\text{m}$  | INV E-741       | 7,5       | 8.8             |

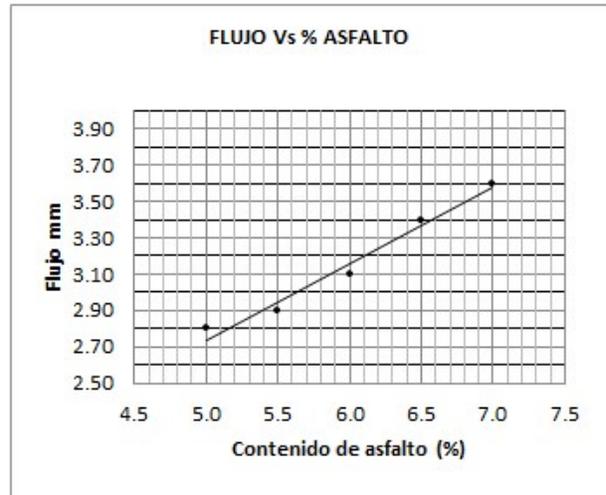
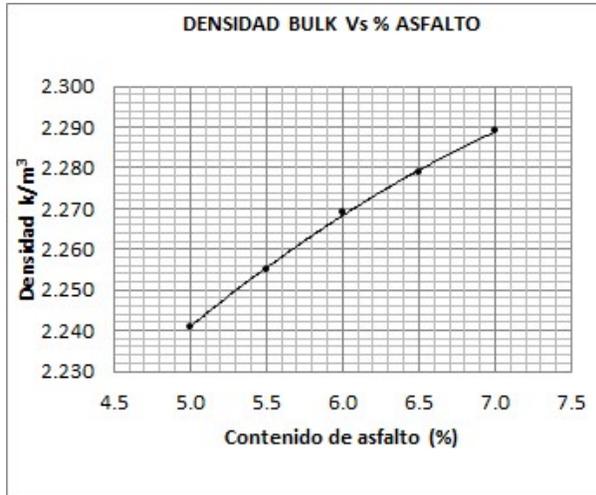
*Tabla N° 20. Parámetros mezclas asfáltica GRC + POLIMEROS.*

*Fuente: propia*

El valor  $C_s$  hace referencia a la concentración crítica del llenante.

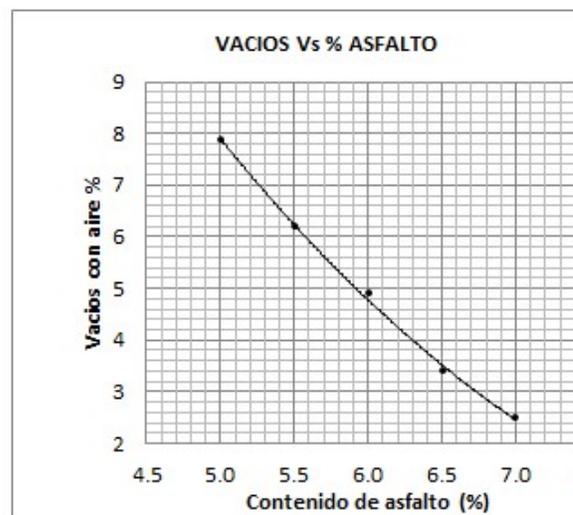
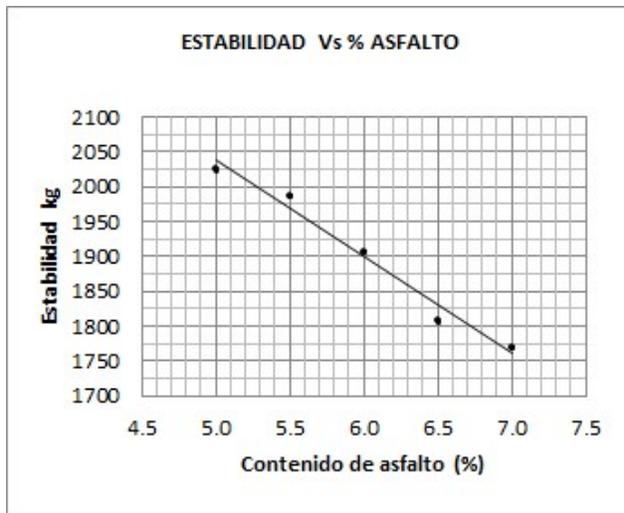
### 7.3.1. Graficas diseño MARSAHAL GRC con Polímeros.

*Grafica N° 11. Estabilidad Vs % de asfalto, Vacios Vs % de asfalto.*

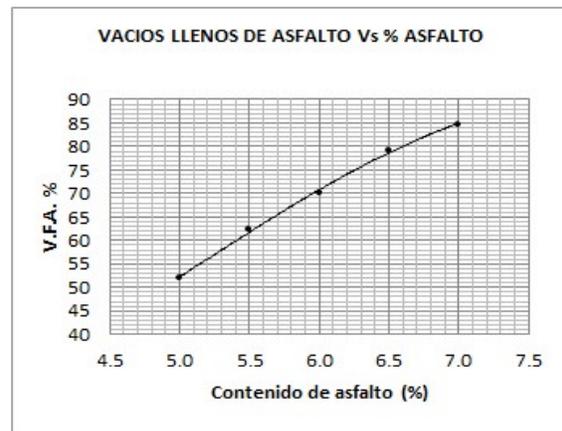
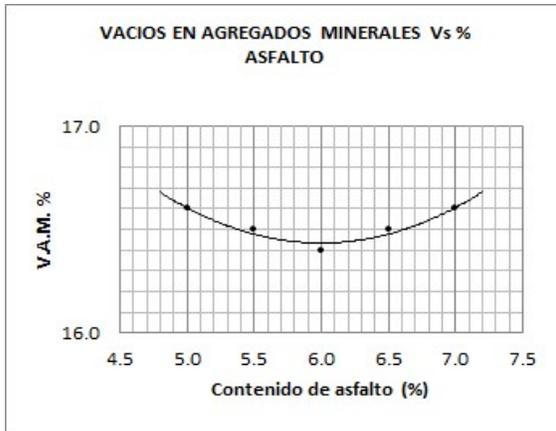


*Grafica N° 10. Densidad Bulk Vs % de asfalto, Flujo Vs % de asfalto*

*Fuente: propia*



*Fuente: propia*



**Grafica N° 12.** Vacíos en agregados minerales Vs % asfalto, Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto.

*Fuente: propia.*

- SELECCIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO ÓPTIMO

Teniendo en cuenta el criterio del Instituto del Asfalto para la selección del contenido óptimo de asfalto, en función de los parámetros volumétricos y de resistencia, tendríamos:

- Vacíos con aire (Va)

Con el 6%, se tendría un 5% de vacíos con aire Va, con el cual se satisface el requerimiento para el tipo de tránsito

- Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Se lograría un porcentaje de vacíos llenos de asfalto del 70%, con el cual se satisfacen los requerimientos establecidos por la norma (65% – 70%)

- Vacíos en los Agregados Minerales (VAM)

El porcentaje de vacíos en los agregados minerales sería del 16.4%, con el cual se satisface el requerimiento de que estos sean mayores al 15%.

- Estabilidad (kgf)

De acuerdo con la curva, se tendría que para un 6.0% el valor de estabilidad sería de 18624 kgf con el cual se satisface el requerimiento de estabilidad mínimo para la mezcla asfáltica.

- Flujo (mm)

De acuerdo con la curva obtenida en el diseño Marshall, tendríamos que con el porcentaje de asfalto óptimo adoptado (6%), el valor de flujo sería de 3 mm, con el cual se satisfacen los requerimientos de la norma.

- Densidad Bulk (k/m<sup>3</sup>)

El valor de densidad Bulk correspondiente al 6% de asfalto es de 2270 kg/m<sup>3</sup>.

### 7.3.2. Formula de trabajo

Con base en el diseño realizado la fórmula de trabajo quedaría de acuerdo como se muestra a continuación:

GRAVA TRITURADA ¾" EL VOLADOR: 20%  
ARENA DE TRITURACION EL VOLADOR: 70%  
ARENA NATURAL: 10%  
ASFALTO OPTIMO 6% DE BARRANCABERMEJA MDC 19 GRC + POLIMEROS

## 8. Caracterización dinámica de las mezclas asfálticas MDC19, asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, mezcla GRC Con polímeros

### 8.1. Módulos dinámicos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, utilizando la norma de ensayo AASHTO T342 para la "Determinación del Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en Caliente (Antes AASHTO TP 62-03(2005)); adoptada por la NCHRP proyecto-28A (Equivalente parcialmente con INV-E-754-07) y la Norma AASHTO R62-13 "Desarrollo de la Curva Maestra del Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas". Las frecuencias son: 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 5Hz, 10Hz y 25Hz. Para la Mezcla Asfáltica en Caliente tipo MDC-19

Modificado GCR Tipo I, GRC + POLIMEROS

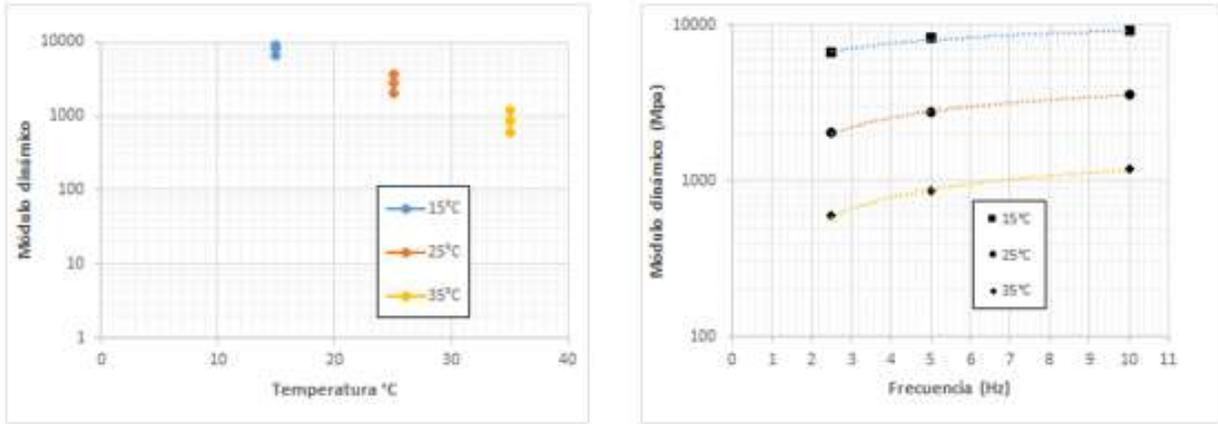
#### 8.1.1. MDC 19

Calculo de Módulo Dinámico según curva maestra

| BRIQUETA | TEMP.<br>(°C) | FRECUENCIA<br>(Hz) | Módulo promedio<br>(Mpa) | Densidad<br>(kg/m3) |
|----------|---------------|--------------------|--------------------------|---------------------|
| 10       | 15            | 10                 | 9138                     | 2321                |
| 10       | 15            | 5                  | 8208                     |                     |
| 10       | 15            | 2.5                | 6718                     |                     |
| 10       | 25            | 10                 | 3586                     | 2321                |
| 10       | 25            | 5                  | 2758                     |                     |
| 10       | 25            | 2.5                | 2038                     |                     |
| 10       | 35            | 10                 | 1188                     | 2321                |
| 10       | 35            | 5                  | 859                      |                     |
| 10       | 35            | 2.5                | 600                      |                     |

**Tabla N° 21.** Datos para cálculo de Modulo dinámico

*Fuente: propia*



**Grafica N° 13. Modulo dinámico.**

*Fuente: propia*

A continuación se presenta la curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada, teniendo 21.1 °C como temperatura de referencia (TR). De esta forma se podrá obtener el valor del módulo de la mezcla en diferentes condiciones.



**Grafica N° 14. Curva maestra.**

*Fuente: propia*

De la curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada, teniendo 25 °C como temperatura de referencia (TR). De esta forma se podrá obtener el valor del módulo de la mezcla, para las siguientes condiciones:

f = 7 Hz Condiciones de análisis

T = 27°C Condiciones de análisis

Tc= 25 °C Temperatura de referencia del reporte de ensayo – Curva maestra

$$Y=73.823X^2+591.37x+1434.2$$

X= 1.45

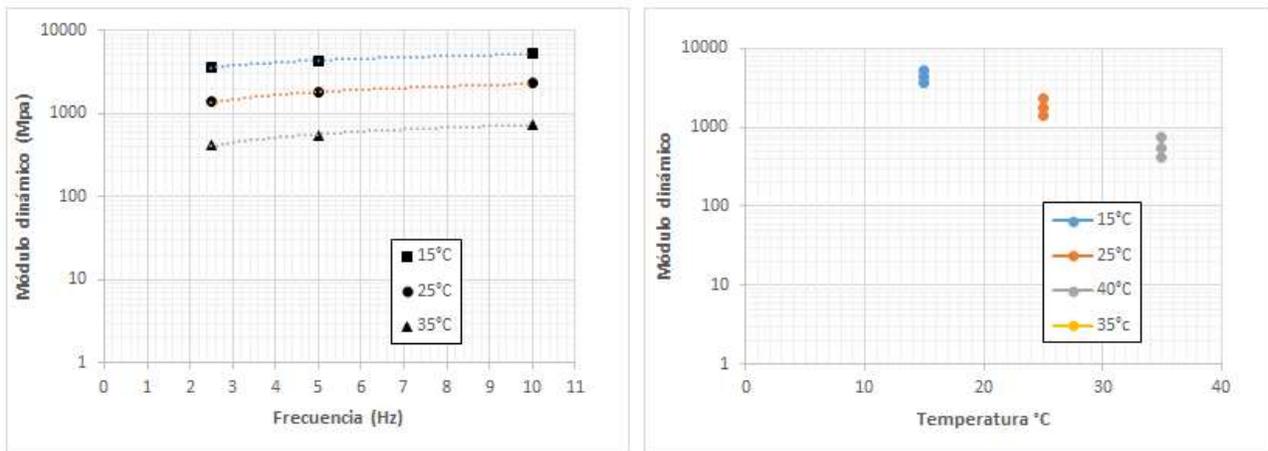
Se obtiene Modulo 2448 Mpa.

### 8.1.2. Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC

| BRIQUETA | TEMP. (°C) | FRECUENCIA (Hz) | Módulo promedio (Mpa) | Densidad (kg/m3) |
|----------|------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| 10       | 15         | 10              | 5227                  | 2192             |
| 10       | 15         | 5               | 4314                  |                  |
| 10       | 15         | 2.5             | 3641                  |                  |
| 8        | 25         | 10              | 2300                  | 2192             |
| 8        | 25         | 5               | 1789                  |                  |
| 8        | 25         | 2.5             | 1383                  |                  |
| 5        | 35         | 10              | 748                   | 2155             |
| 5        | 35         | 5               | 534                   |                  |
| 5        | 35         | 2.5             | 422                   |                  |

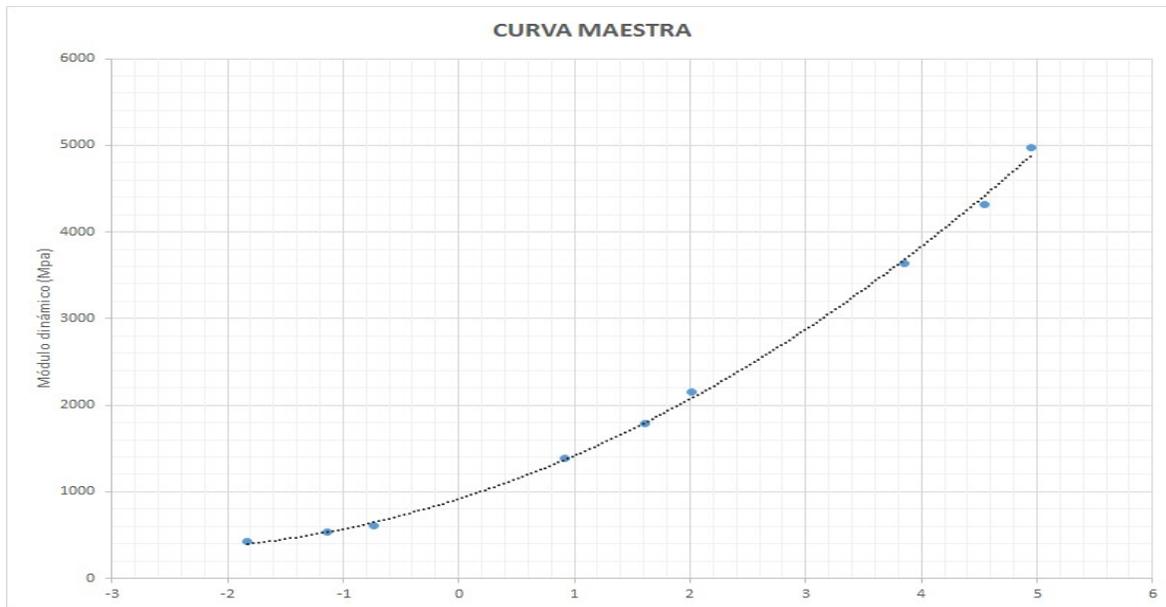
*Tabla N° 22. Datos para cálculo de Modulo dinámico*

*Fuente: propia*



*Grafica N° 15. Módulo dinámico*

*Fuente: propia*



**Grafica N° 16. Curva maestra.**

*Fuente: propia*

De la curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada, teniendo 25 °C como temperatura de referencia (TR). De esta forma se podrá obtener el valor del módulo de la mezcla Para las siguientes condiciones:

f = 7 Hz Condiciones de análisis

T = 27°C Condiciones de análisis

Tc= 25 °C Temperatura de referencia del reporte de ensayo – Curva maestra

$$Y=76.171X^2+423.79+919.86$$

$$X= 1.45$$

Se obtiene Modulo 1696 Mpa

### 8.1.3. GRC+POLIMEROS

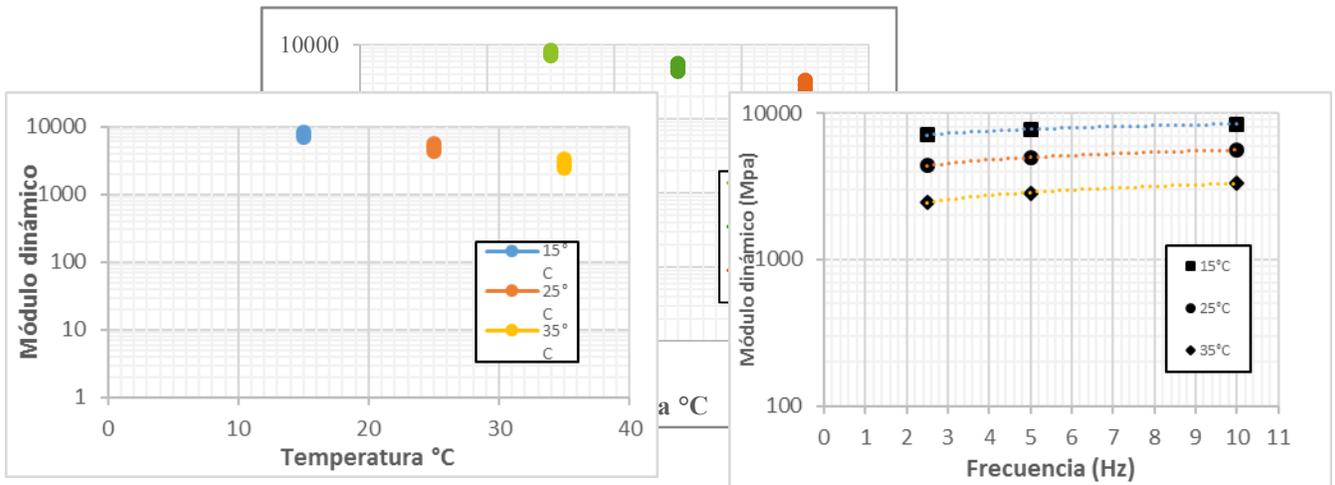
Calculo de Módulo Dinámico según curva maestra

| BRIQUETA | TEMP. (°C) | FRECUENCIA (Hz) | Módulo promedio (Mpa) | Densidad (kg/m3) |
|----------|------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| 10       | 15         | 10              | 8438                  | 2134             |
| 10       | 15         | 5               | 7772                  |                  |
| 10       | 15         | 2.5             | 7099                  |                  |
| 10       | 25         | 10              | 5618                  | 2134             |

|    |    |     |      |      |
|----|----|-----|------|------|
| 10 | 25 | 5   | 4983 | 2134 |
| 10 | 25 | 2.5 | 4379 |      |
| 10 | 35 | 10  | 3319 |      |
| 10 | 35 | 5   | 2857 |      |
| 10 | 35 | 2.5 | 2461 |      |

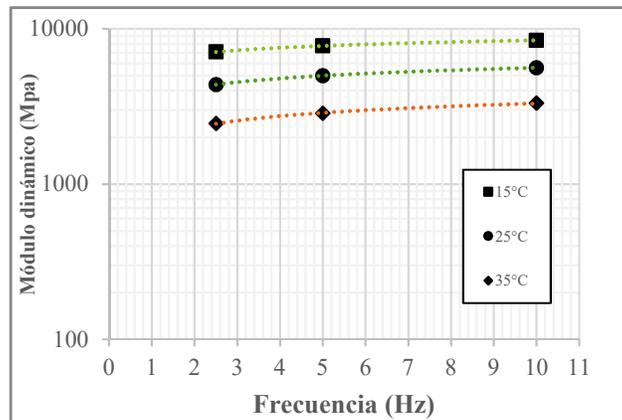
**Tabla N° 23.** Datos para cálculo de Modulo dinámico

*Fuente: propia*



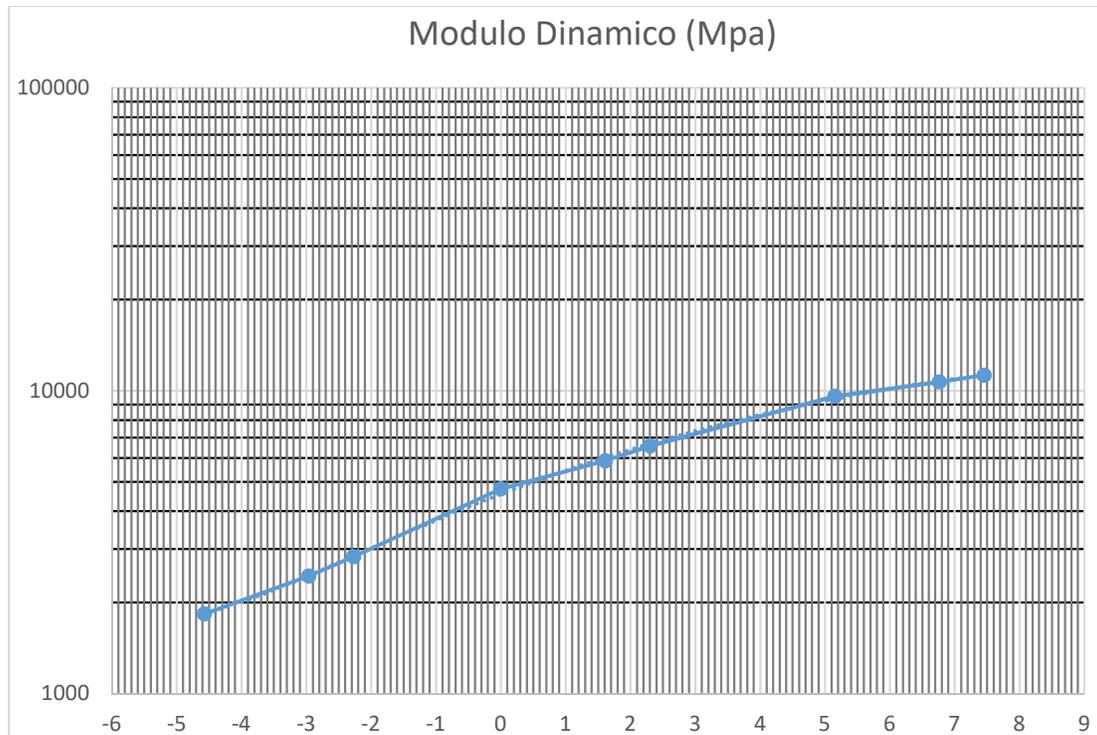
**Grafica N° 17.** Modulo dinámico Vs Temperatura

*Fuente: propia*



**Grafica N° 18.** Modulo dinámico Vs Frecuencia

*Fuente: propia*



**Grafica N° 19. Modulo dinámico – (Mpa)**

*Fuente: propia*

De la curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada, teniendo 25 °C como temperatura de referencia (TR). De esta forma se podrá obtener el valor del módulo de la mezcla Para las siguientes condiciones:

f = 7 Hz Condiciones de análisis

T = 27°C Condiciones de análisis

Tc = 25 °C Temperatura de referencia del reporte de ensayo – Curva maestra

$$Y = -4.4451x^3 + 38.361x^2 + 861.5x + 4552.8$$

$$X = 0.33$$

Se obtiene Modulo 4828 Mpa

## 8.2. Ley de fatiga

Las probetas aserradas fueron ensayadas en el equipo de 4 puntos. Las condiciones de ensayo son 10 Hz y 20°C de temperatura. El criterio de falla elegido es la reducción del valor del módulo inicial al 50%. El ensayo se realiza a deformación controlada por lo que se hizo la Ley de fatiga a diferentes niveles de deformación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de Viga de Flexión Repetida, para diferentes amplitudes de deformación controlada: (350  $\mu$  strain, 300  $\mu$  strain, 270  $\mu$  strain y 215  $\mu$ strain), para la Mezcla Asfáltica en caliente tipo MDC-19 , GRC Tipo I, GRC+polímeros

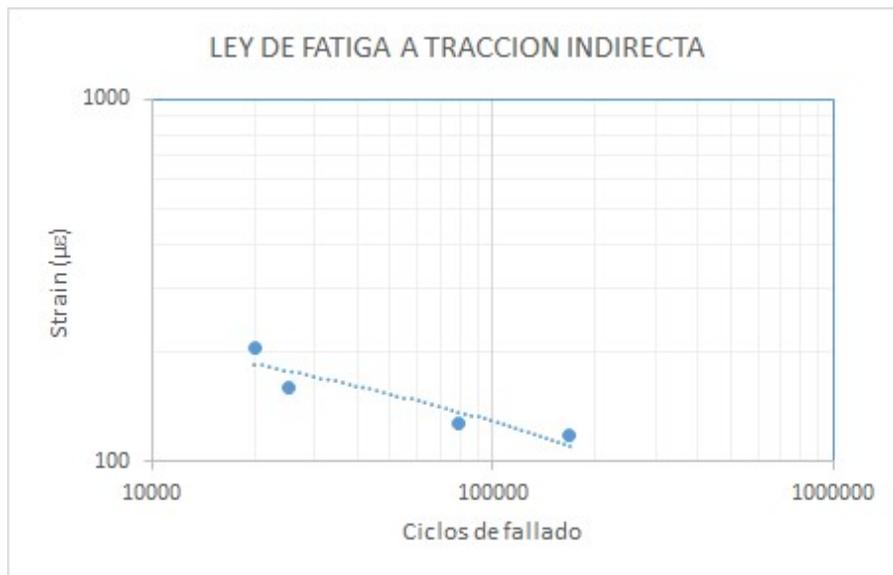
### 8.2.1. MDC 19

**Resultados del análisis de Ley de Fatiga MDC-19**

| Probeta | $\sigma_{xmax}$<br>(KPa) | Módulo **<br>(Mpa) | No. CICLOS | Strain ( $\mu\epsilon$ ) | No. CICLOS |
|---------|--------------------------|--------------------|------------|--------------------------|------------|
| 8       | 300                      | 5190               | 167226     | 119.1                    | 167226     |
| 9       | 350                      | 5599               | 79566      | 128.1                    | 79566      |
| 4       | 400                      | 5108               | 25146      | 160.5                    | 25146      |
| 5       | 450                      | 4486               | 19976      | 205.6                    | 19976      |

**Tabla N° 24.** Resultados análisis de ley de fatiga MDC – 19.

*Fuente: propia*



**Grafica N° 20.** Ley de fatiga atracción directa.

*Fuente: propia*

| a      | b      | R <sup>2</sup> |
|--------|--------|----------------|
| -27.46 | 444.52 | 0.94           |

**Tabla N° 25.** Constantes de ecuación de Ley de Fatiga

*Fuente: propia*

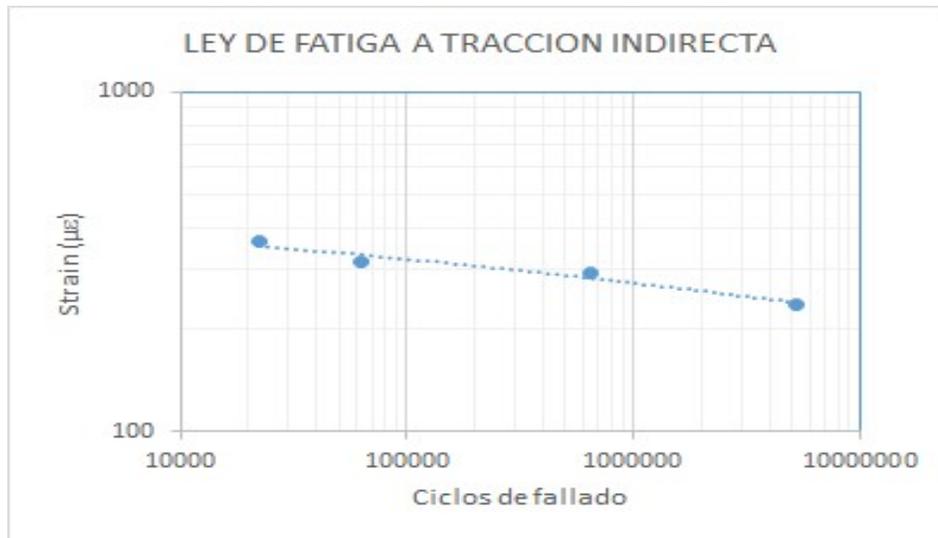
### 8.2.2. Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC

| Probeta | $\sigma_{xmax}$<br>(KPa) | Módulo **<br>(Mpa) | No.<br>CICLOS | Strain ( $\mu\sigma$ ) | No.<br>CICLOS |
|---------|--------------------------|--------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 8       | 300                      | 4965               | 5235654       | 236                    | 5235654       |
| 9       | 350                      | 4873               | 654325        | 295                    | 654325        |
| 4       | 400                      | 4820               | 62154         | 315                    | 62154         |
| 5       | 450                      | 4654               | 22316         | 364                    | 22316         |

\*\* *Módulo dinámico a esfuerzo controlado*

**Tabla N° 26.** Resultados del análisis de Ley de fatiga GRC.

*Fuente: propia*



**Gráfica N° 21.** Ley de fatiga a tracción indirecta.

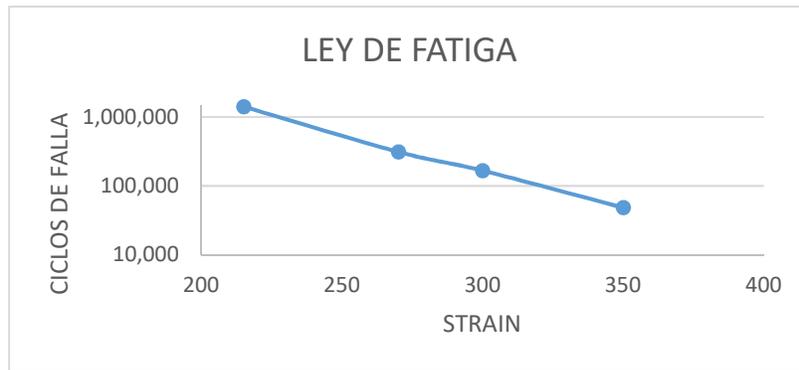
*Fuente: propia*

### 8.2.3. GRC+POLIMEROS

| PROBETA | DEFORMACION<br>(UE) | MOD INICIAL<br>(Mpa) | CICLOS  | ENERGIA DISIPADA<br>ACUMULADA(J/M3) |
|---------|---------------------|----------------------|---------|-------------------------------------|
| 1       | 350                 | 3784                 | 48211   | 9711                                |
| 2       | 300                 | 4415                 | 166538  | 43101.79                            |
| 3       | 270                 | 4251                 | 312185  | 57718.16                            |
| 4       | 215                 | 4371                 | 1413500 | 152847.7                            |

**Tabla N° 27.** Resultados de la ley de fatiga GRC+POLIMEROS

*Fuente: propia*



**Grafica N° 22. Ley de fatiga**

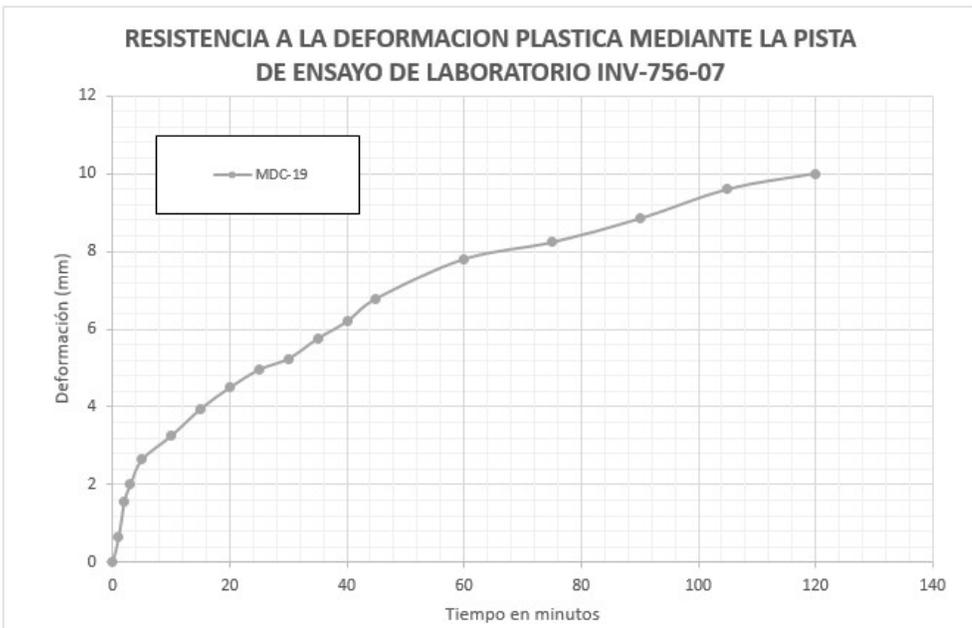
*Fuente: propia*

### 8.3.DEFORMACIONES

La deformación permanente total máxima permitida por la especificación técnica de la prueba es de 12,50 mm. Además la mezcla asfáltica **NO** presenta susceptibilidad a la humedad (Stripping). Correlacionando este resultado con la Resistencia a la Deformación Plástica en pista de Laboratorio según lo norma INV E-756-13, se obtienen los siguientes resultados:

#### 8.3.1. MDC 19

| PASADA No. | TIEMPO (min) | DEFORMACION ACUMULADA (mm) |
|------------|--------------|----------------------------|
|            |              | MDC-19 (60/70)             |
| 0          | 0            | 0                          |
| 54         | 1            | 0.65                       |
| 107        | 2            | 1.58                       |
| 61         | 3            | 2                          |
| 268        | 5            | 2.65                       |
| 536        | 10           | 3.26                       |
| 804        | 15           | 3.95                       |
| 1072       | 20           | 4.5                        |
| 1340       | 25           | 4.96                       |
| 1608       | 30           | 5.24                       |
| 1876       | 35           | 5.76                       |
| 2144       | 40           | 6.2                        |
| 2412       | 45           | 6.79                       |
| 3216       | 60           | 7.8                        |
| 4020       | 75           | 8.23                       |
| 4824       | 90           | 8.84                       |
| 5628       | 105          | 9.6                        |
| 6432       | 120          | 10                         |

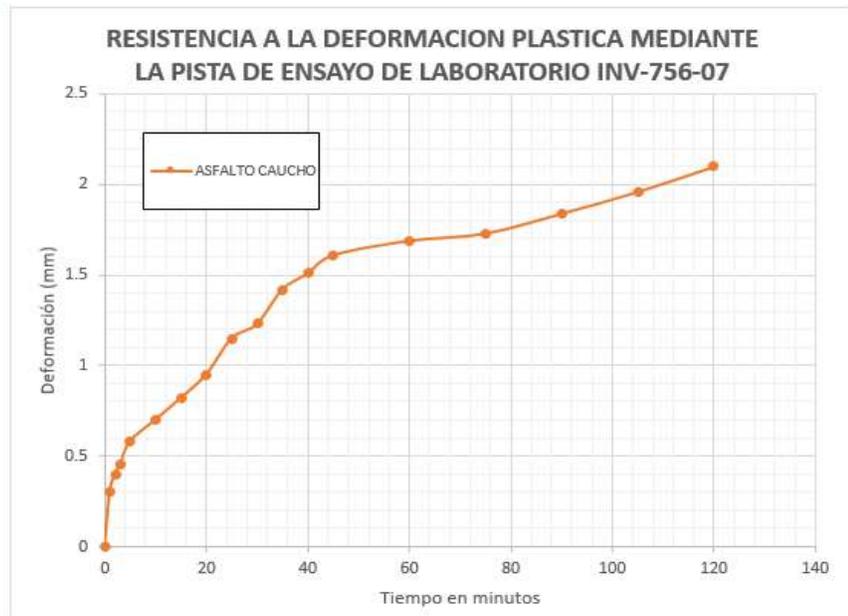


**Grafica N° 23. Resistencia a la deformación plástica. MDC – 19.**

*Fuente: propia*

### 8.3.2. Asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC

| PASADA No. | TIEMPO (min) | DEFORMACION ACUMULADA (mm) |
|------------|--------------|----------------------------|
|            |              | ASFALTO CAUCHO             |
| 0          | 0            | 0                          |
| 54         | 1            | 0.3                        |
| 107        | 2            | 0.4                        |
| 61         | 3            | 0.45                       |
| 268        | 5            | 0.58                       |
| 536        | 10           | 0.7                        |
| 804        | 15           | 0.82                       |
| 1072       | 20           | 0.95                       |
| 1340       | 25           | 1.15                       |
| 1608       | 30           | 1.23                       |
| 1876       | 35           | 1.42                       |
| 2144       | 40           | 1.51                       |
| 2412       | 45           | 1.61                       |
| 3216       | 60           | 1.69                       |
| 4020       | 75           | 1.73                       |
| 4824       | 90           | 1.84                       |
| 5628       | 105          | 1.96                       |
| 6432       | 120          | 2.1                        |

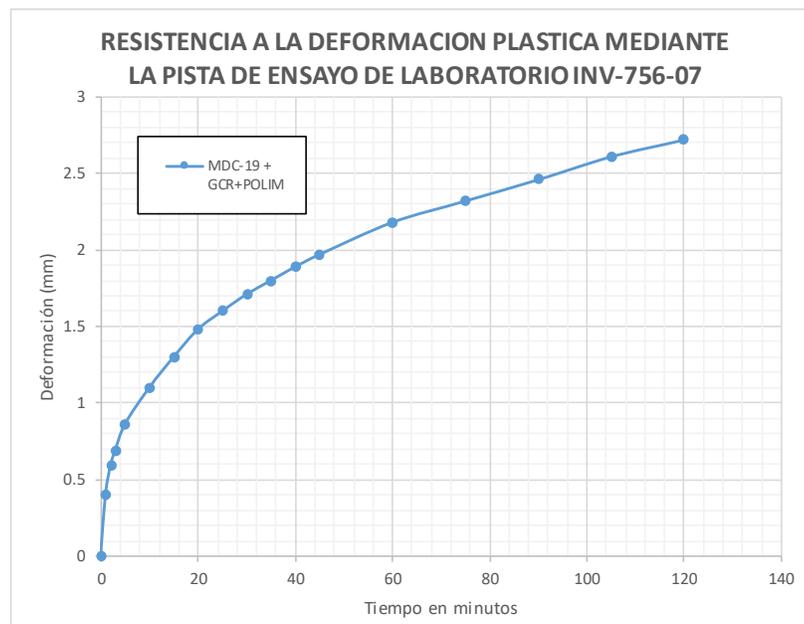


*Grafica N° 24. Resistencia a la deformación plástica. Asfalto modificado GRC.*

*Fuente: propia*

### 8.3.3. Asfalto caucho GRC+ POLIMEROS

| PASADA No. | TIEMPO (min) | DEFORMACION ACUMULADA (mm) |
|------------|--------------|----------------------------|
|            |              | MDC-19+GCR+POLIM           |
| 0          | 0            | 0                          |
| 54         | 1            | 0.4                        |
| 107        | 2            | 0.59                       |
| 61         | 3            | 0.69                       |
| 268        | 5            | 0.86                       |
| 536        | 10           | 1.1                        |
| 804        | 15           | 1.3                        |
| 1072       | 20           | 1.48                       |
| 1340       | 25           | 1.6                        |
| 1608       | 30           | 1.71                       |
| 1876       | 35           | 1.8                        |
| 2144       | 40           | 1.89                       |
| 2412       | 45           | 1.97                       |
| 3216       | 60           | 2.18                       |
| 4020       | 75           | 2.32                       |
| 4824       | 90           | 2.46                       |
| 5628       | 105          | 2.61                       |
| 6432       | 120          | 2.72                       |



*Grafica N° 25. Resistencia a la deformación plástica. Asfalto caucho GRC + POLIMEROS.*

*Fuente: propia*

## 9. ANALISIS DE RESULTADOS

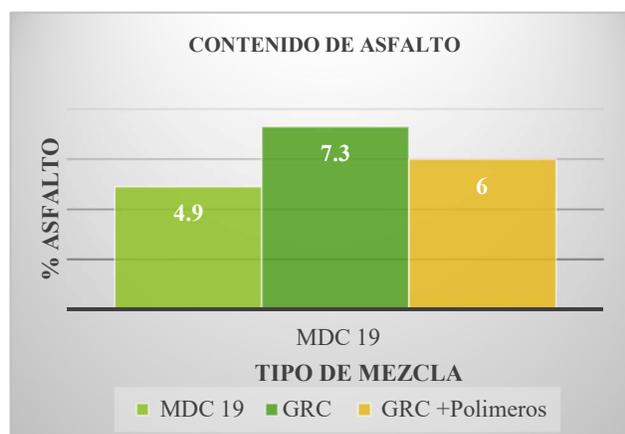
### 9.1 Análisis de resultados de Mecánicas de las Mezclas MDC 19, GRC. GRC+POLIMEROS

| CARACTERISTICA                             | MDC 19 | GRC  | GRC +Polímeros |
|--|--------|------|----------------|
| Compactación (Golpes/cara)                 | 75     | 75   | 75             |
| Contenido de asfalto %                     | 4.9    | 7.3  | 6              |
| Estabilidad mínima (N)                     | 10052  | 8826 | 18654          |
| Flujo (mm)                                 | 2.45   | 4.11 | 3.2            |
| Relación Estabilidad/Flujo (KN/mm)         | 5      | 2.1  | 5.9            |
| Vacíos con aire (Va) (%)                   | 4.2    | 3    | 5              |
| Vacíos en agregados minerales (VAM) (%)    | 15.1   | 17.5 | 16.5           |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)         | 67     | 82.3 | 69.7           |
| Relación llenante/ligante efectivo en peso | 1.2    | 0.68 | 1              |

*Tabla N° 28. Comparación de diseño MARSHALL mezcla asfáltica MDC 19, GRC TIPO I, GRC TIPO I + POLIMEROS.*

*Fuente: propia*

#### 9.1.1. Porcentaje de Asfalto



*Grafica N° 26. Contenido de asfalto VS MDC 19 – GRC – GRC + POLIMEROS.*

*Fuente: propia*

Con base en la gráfica de porcentaje de asfalto Vs Tipo de mezcla, se puede apreciar que la mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, presenta un mayor contenido de asfalto optimo; esto debido a que la distribución granulométrica presenta una discontinuidad que provee mayor volumen dentro de la estructura graular para la ocupación del asfalto, en este contenido asfalto de (7.3%) se encuentra contenido también el grano de caucho. En cuanto a la mezcla tipo asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC + polímeros, se puede apreciar que el porcentaje de asfalto óptimo del 6.0%, este se atribuye a que la distribución granulométrica configura una gradación densa por lo cual el espacio disponible para la ocupación del asfalto es menor que en una mezcla tipo asfalto caucho GRC. Cabe anotar que dicho porcentaje se compone de asfalto, grano de caucho y polímeros. La mezcla tipo MDC-19 con asfalto 60-70 presenta un contenido de asfalto óptimo de 4.9%, el cual al compararlo con los demás tipos de mezcla es el menor. Dicha variación en los porcentajes obedece principalmente al tipo de granulometría y agente modificador utilizado y a las propiedades que se busquen para cada tipo de estas mezclas.

### 9.1.2. Estabilidad Marshall

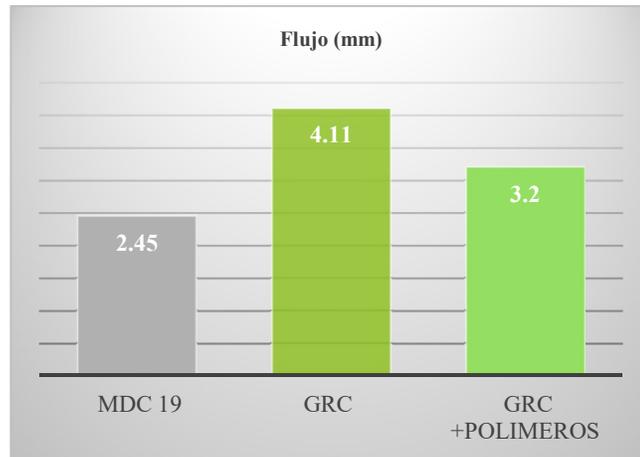


**Grafica N° 27.** Estabilidad para cada tipo de mezcla.

*Fuente: propia*

Al analizar los resultados de estabilidad se puede apreciar que la mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC presenta la menor estabilidad con respecto a la mezcla tipo MDC-19 con asfalto 60-70 y la mezcla tipo asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC + polímeros; esto debido al comportamiento de los componentes del asfalto caucho en el cual difiere el comportamiento del asfalto con el del grano de caucho ya que este tiene un comportamiento elastomérico y el MDC-19 adopta un comportamiento visco elástico, por lo que al aplicar la carga a la temperatura de ensayo (60°C) se obtiene inicialmente deformación de la mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC que del asfalto.

### 9.1.3. Flujo Marshall

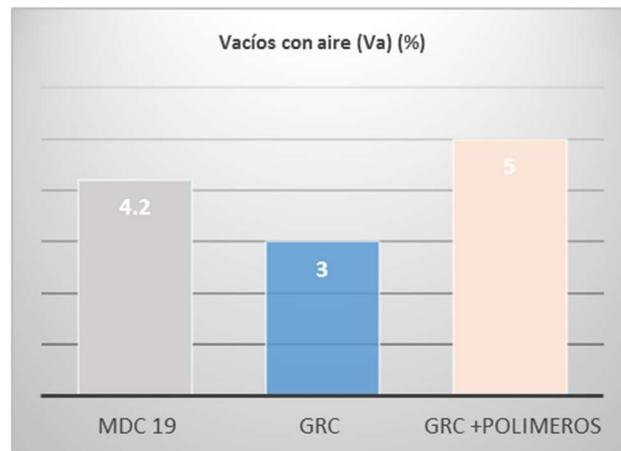


*Grafica N° 28. Flujo para cada tipo de mezcla.*

*Fuente: propia*

En la mezcla con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, se presentan mayores flujos debido a la alta deformación del grano de caucho, al igual que en la mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC con polímeros dado el comportamiento similar que adopta este constituyente.

### 9.1.4. Vacíos con aire Va



*Grafica N° 29. Vacíos con aire para cada tipo de mezcla.*

*Fuente: propia*

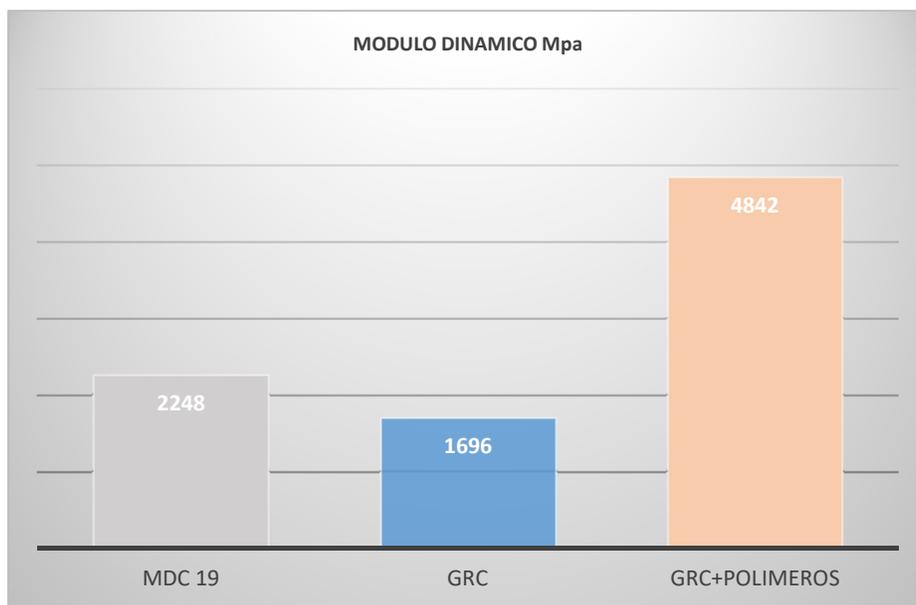
El porcentaje de vacíos con aire es menor en la mezcla con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC debido a que el porcentaje de asfalto es mayor que en la mezcla tipo MDC-19. Dado que el caucho en las condiciones de temperatura de mezcla (180°C), adopta el mismo

comportamiento del asfalto (viscosidad), este también ocupa los vacíos que dispone la estructura granular en la mezcla.

### 9.3. Análisis de Resultados de las propiedades dinámicas de las Mezclas MDC 19, asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, GRC+POLIMEROS.

#### 9.3.1. Módulo Dinámico

Con las condiciones de temperatura y velocidad del proyecto en el cual se realizará el tramo de prueba con estas tres mezclas, se encontraron los siguientes módulos al interpolar con los parámetros de reducción de la curva maestra, se obtienen los valores de módulos dinámicos:



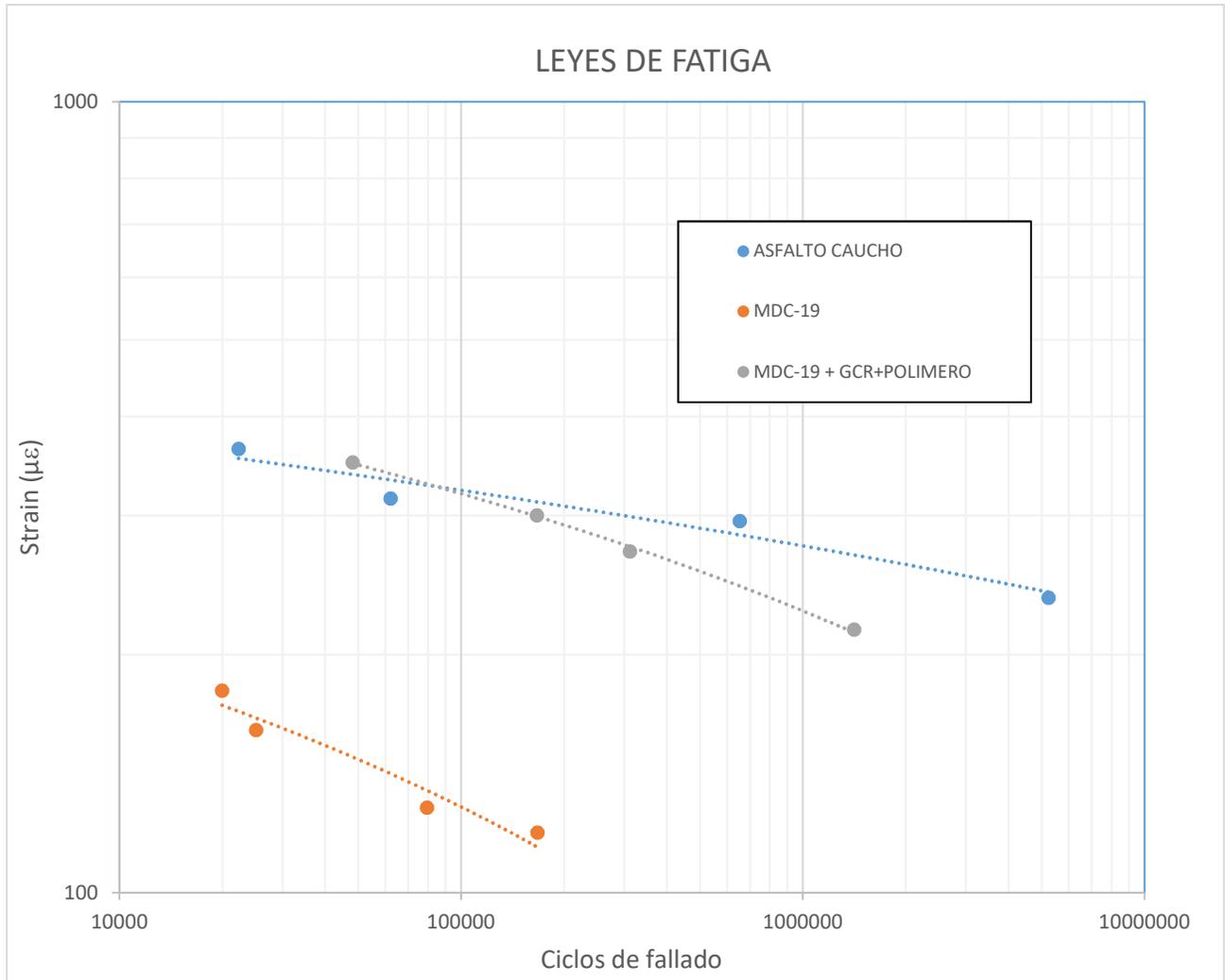
*Gráfica N° 30. Módulo dinámico para cada tipo de mezcla.*

*Fuente: propia*

Teniendo en cuenta los módulos anteriores, se puede apreciar que el comportamiento de la mezcla tipo asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, el módulo dinámico es menor comparada con una mezcla tipo MDC-19 con asfalto 60-70, el anterior comportamiento se puede atribuir a la respuesta dada por el grano de caucho ante la aplicación del esfuerzo, el cual presenta mayores deformaciones a la acción de carga, generando la pérdida de resistencia de este tipo de mezcla.

Al analizar los módulos se puede notar que: a bajas temperaturas el módulo dinámico más alto lo presentan las mezclas asfálticas GRC+POLIMEROS. El menor módulo lo presenta la mezcla con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, los cuales presentan valores de módulos muy cercanos entre sí con la mezcla MDC -19, en las mezclas asfálticas modificadas con grano caucho de llanta GRC van a tener un comportamiento bajo a las deformaciones ante altas temperaturas.

### 9.3.2 Fatiga

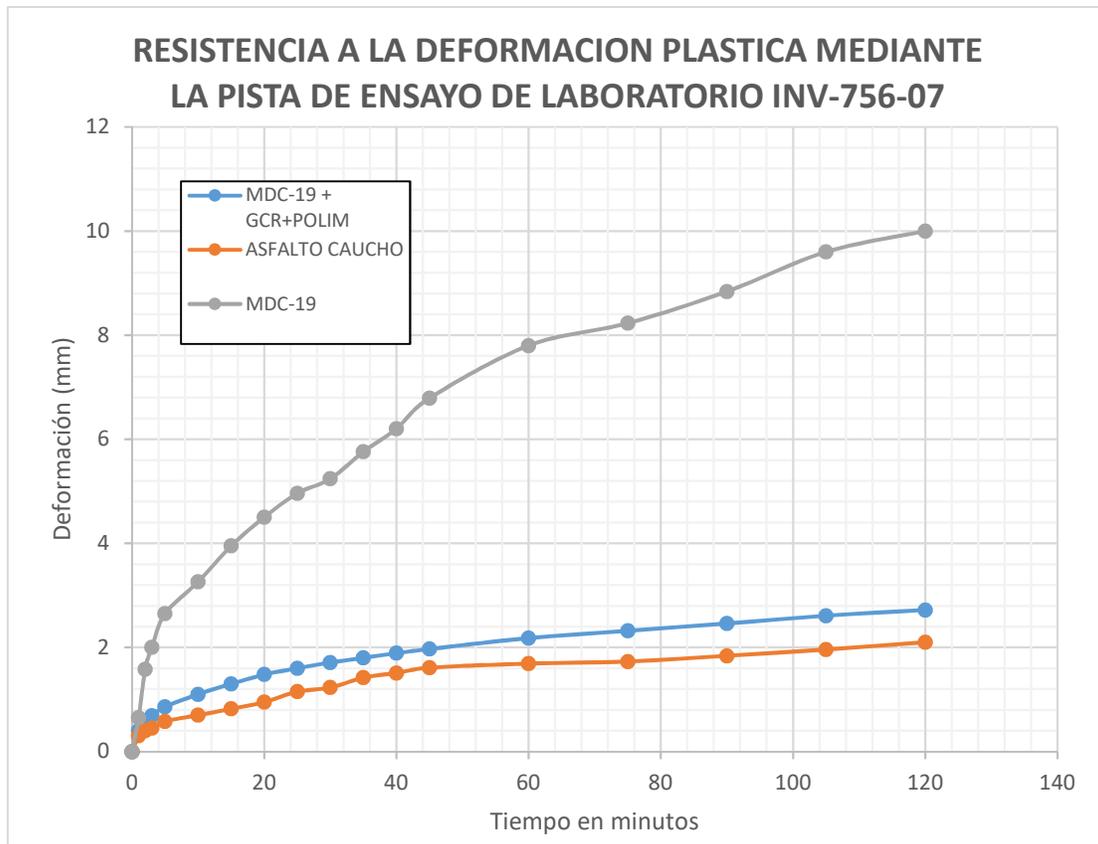


**Grafica N° 31.** Leyes de fática para cada tipo de mezcla.

**Fuente:** propia

Se muestra que la mezcla asfáltica MDC 19 tiene una menor resistencia entre las mezclas con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC y GRC+POLIMEROS. Es más resistente a presentar falla por ahuellamiento las mezcla asfáltica GRC , seguido por GRC+POLIMEROS. La mezcla con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC y GRC+POLIMEROS son más resistentes a la fatiga con respecto al MDC 19. Esto podría tener gran beneficio para las mezclas tipo asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC, serían más durables porque tendrían mejor desempeño ante las solicitudes de carga.

### 9.3.3 Deformaciones



**Grafica N° 32.** Resistencia a la deformación plástica para cada mezcla.

*Fuente: propia*

De acuerdo a las curvas de ahuellamiento se puede decir que el asfalto que presenta una mayor resistencia al ahuellamiento es el asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC , luego le sigue GRC+ POLIMEROS, Los asfaltos modificado con grano caucho de llanta GRC y GRC+ POLIMEROS presentan entre si un comportamiento muy cercano, son más resistentes al ahuellamiento que los asfaltos MDC 19. En este análisis se encuentra el efecto de las variaciones de propiedades de los asfaltos, siendo la mezcla tipo MDC 19 muy poco resistentes al ahuellamiento.

A través de esta gráfica se puede observar que los asfaltos modificados con grano caucho de llanta GRC y los GRC+POLIMNEROS presentan velocidades de deformación menores, esto puede ser debido a la estructura interna del material alcanzada por medio del proceso de modificación, la cual tiene una estructura reforzada que ayuda a distribuir con mayor eficiencia los esfuerzos aplicados al material, resultando en velocidades de deformación menores.

## CONCLUSIONES

- La mezcla con asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC y GRC+POLIMEROS son más resistentes a la fatiga con respecto al MDC 19. Esto tiene un gran beneficio ya que serían más durables y tendrían mejor desempeño ante las cargas aplicadas
- Los asfaltos modificados con grano caucho de llanta GRC y GRC+ POLIMEROS son más resistentes al ahuellamiento que los asfaltos MDC 19
- Los valores de estabilidad y rigidez Marshall de la mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC presenta la menor estabilidad con respecto a la mezcla tipo MDC-19 con asfalto 60-70 y la mezcla tipo asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC + POLÍMEROS; esto debido al comportamiento elastómero de los componentes del asfalto caucho
- La mezcla asfalto modificado con grano caucho de llanta GRC y las mezclas GRC con POLÍMEROS tiene valores muy similares mejorando la resistencia a la fatiga en comparación a la mezcla MDC 19.
- Los valores de módulos dinámicos señalan menos susceptibilidad térmica de la mezcla con asfalto modificado con grano caucho GRC lo cual favorece a que no haya riesgo de deformabilidad a elevadas temperaturas. En cuanto a la mezcla MDC 19, esta presenta un módulo mayor a la mezcla con asfalto modificado con grano caucho llanta GCR con una mayor deformación, se deduce que la mezcla MDC-19 puede presentar una deformación acumulada en menor tiempo que un tipo GRC, indicando una menor durabilidad durante el servicio.
- La mezcla con asfalto modificado con grano caucho GRC y GRC mas Polímeros los valores de ligante aumenta en el punto de ablandamiento, y disminuye la ductilidad y la penetración con respecto al ligante de la mezcla MDC 19 este aspecto éste relacionado con el incremento de la viscosidad
- El contenido de asfalto óptimo para la mezclas con asfalto modificado con grano caucho GRC y GRC mas Polímeros, los cuales se encuentra ente el 6% y 7.3% son más altos que la mezcla MDC 19 que está en 4.9%, el incremento del porcentaje de asfalto aumenta en las mezclas modificadas debido a la absorción de ligante que éste produce al adicionarle el grano caucho GRC
- Las mezclas asfalto caucho GCR resultan desempeñarse mejor, incluso si se comparan con el tipo MDC19 ante las repeticiones de carga, lo cual indica que este tipo de mezcla serían mucho más durables, dada su capacidad de tener baja deformación y resistir más ciclos de repetición de carga. Lo anterior se tiene de los resultados de deformación y leyes de fatiga.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Bogotá D.C – Colombia (2013), INVIAS – Instituto Nacional de Vías.
- Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C – Colombia. (2007) INVIAS – Instituto Nacional de Vías.