

**EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA (MDC-19)  
CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO**

**JOSE ELVERT RUBIO TAFUR**

**HERNÁN CAMILO MORENO CHAPARRO**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ D.C**

**2017**

**EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA (MDC-19)  
CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO**

**JOSE ELVERT RUBIO TAFUR**

**HERNÁN CAMILO MORENO CHAPARRO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Asesor Disciplinar**

**I.C., Esp., M.Ic. HERMES ARIEL VACCA GAMEZ**

**Asesor metodológico**

**LIC. LAURA MILENA CALA CRISTANCHO**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERIA CIVIL**

**BOGOTÁ D.C**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Damos gracias a Dios por darnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado y darnos las fuerzas necesarias para culminar con éxito nuestra profesión.

A nuestras familias por brindarnos apoyo incondicional en los momentos difíciles.

A nuestro asesor disciplinar el Ingeniero Hermes Ariel Vacca, al brindarnos la oportunidad de recurrir a su experiencia y conocimiento para guiarnos a lo largo de esta investigación. De igual manera a nuestra asesora metodológica, la Lic. Laura Milena Cala, quien siempre estuvo interesada en compartir su experiencia y nos orientó para concluir esta investigación.

Al Ingeniero Yezid Alexander Alvarado Vargas, jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá por permitirnos hacer uso de las instalaciones y el equipo necesario para esta investigación.

De igual manera agradecemos a la Universidad la Gran Colombia y al cuerpo de docentes en cabeza del decano de la facultad de ingeniería civil, Doctor Mario Camilo Torres por orientarnos a lo largo de este proceso de formación.

## CONTENIDO

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                                                                                                                                               | 11 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                                                                                                                                                | 13 |
| 3. JUSTIFICACIÓN.....                                                                                                                                                                                              | 15 |
| 4. OBJETIVOS .....                                                                                                                                                                                                 | 16 |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL .....                                                                                                                                                                                        | 16 |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                                                                                                                                                    | 16 |
| 5. MARCO REFERENCIAL .....                                                                                                                                                                                         | 17 |
| 5.1. ANTECEDENTES.....                                                                                                                                                                                             | 17 |
| 5.2. MARCO CONCEPTUAL.....                                                                                                                                                                                         | 23 |
| 5.2.1. Caracterización de cemento asfáltico .....                                                                                                                                                                  | 23 |
| 5.2.2. Caracterización de agregado pétreo.....                                                                                                                                                                     | 29 |
| 4.2.3. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino .....                                                                                                                                                | 39 |
| 4.2.4. Diseño Superpave .....                                                                                                                                                                                      | 40 |
| 4.2.5. Ensayos para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica. ....                                                                                                                                         | 44 |
| 5.3. MARCO LEGAL .....                                                                                                                                                                                             | 48 |
| 6. DISEÑO METODOLÓGICO.....                                                                                                                                                                                        | 49 |
| 6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....                                                                                                                                                                                 | 49 |
| 6.2. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....                                                                                                                                                         | 49 |
| 6.3. DISEÑO EXPERIMENTAL .....                                                                                                                                                                                     | 50 |
| 6.4. FASES DE LA INVESTIGACIÓN .....                                                                                                                                                                               | 51 |
| 6.5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....                                                                                                                                                                                | 52 |
| 6.6. PRESUPUESTO.....                                                                                                                                                                                              | 53 |
| 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....                                                                                                                                                                                     | 54 |
| 7.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE<br>LOS AGREGADOS NATURALES, RECICLADOS Y EL CEMENTO ASFÁLTICO,<br>TOMANDO DE REFERENCIA LAS ESPECIFICACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL<br>DE VÍAS..... | 54 |
| 7.1.1. Caracterización del cemento asfáltico .....                                                                                                                                                                 | 55 |
| 7.1.2. Caracterización agregado natural y agregado reciclado. ....                                                                                                                                                 | 62 |

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL (MDC-19) CON AGREGADO NATURAL .....                                                                                                     | 66 |
| 7.2.1. Obtención del porcentaje de asfalto inicial, Pb estimado.....                                                                                                                     | 66 |
| 7.2.2. Porcentajes de asfalto y niveles de compactación. ....                                                                                                                            | 68 |
| 7.2.3. Contenido óptimo de asfalto.....                                                                                                                                                  | 72 |
| 7.2.4. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta. ....                                                    | 77 |
| 7.2.5. Elaboración y compactación de mezclas dosificadas con agregado reciclado                                                                                                          | 80 |
| 7.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA (MDC-19) CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE Y DEFORMACIÓN PERMANENTE. | 82 |
| 7.3.1. Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas.....                                                                                       | 82 |
| 7.3.2. Ensayo de resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida ....                                                                                                        | 88 |
| 8. CONCLUSIONES.....                                                                                                                                                                     | 91 |
| 9. RECOMENDACIONES.....                                                                                                                                                                  | 92 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                                                                                                                                        | 93 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Marco legal.....                                                                            | 48 |
| Tabla 2. Definición y operacionalización de las variables.....                                       | 49 |
| Tabla 3. Fases de la investigación.....                                                              | 51 |
| Tabla 4. Cronograma de actividades.....                                                              | 52 |
| Tabla 5. Presupuesto.....                                                                            | 53 |
| Tabla 6. Resumen caracterización del cemento asfáltico.....                                          | 55 |
| Tabla 7. Resumen de resultados caracterización agregados naturales y reciclados .....                | 62 |
| Tabla 8. Análisis granulométrico por tamices.....                                                    | 63 |
| Tabla 9. Franja granulométrica para mezclas asfálticas en caliente (MDC-19) gradación continua ..... | 64 |
| Tabla 10. Dosificaciones utilizadas en el diseño de la mezcla asfáltica MDC-19 .....                 | 65 |
| Tabla 11. Contenidos de asfalto a utilizar. ....                                                     | 69 |
| Tabla 12. Dosificación para diseño de mezcla. ....                                                   | 69 |
| Tabla 13. Resultados gravedad específica bulk y gravedad específica máxima. ....                     | 71 |
| Tabla 14. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas a Ndis.....                            | 73 |
| Tabla 15. Resumen resultados de diseño mezcla asfáltica convencional (MDC-19) .....                  | 79 |
| Tabla 16. Dosificaciones para mezclas con adición de agregado reciclado. ....                        | 80 |
| Tabla 17. Resultados de compactación de mezclas asfálticas con agregado reciclado.....               | 81 |
| Tabla 18. Resultados Modulo Resiliente.....                                                          | 82 |
| Tabla 19. Resultados resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida. ....               | 88 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Composición de residuos de construcción y demolición. ....                                      | 11 |
| Ilustración 2. Generadores de RCD en Bogotá.....                                                               | 13 |
| Ilustración 3. Módulos Dinámicos. ....                                                                         | 17 |
| Ilustración 4. Resultados de pruebas de susceptibilidad al daño por humedad .....                              | 18 |
| Ilustración 5. Resultados de pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente .....                      | 19 |
| Ilustración 6. Valores de módulo de resiliencia. ....                                                          | 20 |
| Ilustración 7. Resultados de deformación permanente en el ensayo de simulación de tráfico en laboratorio. .... | 20 |
| Ilustración 8. Promedio MR Vs. Ciclos de carga.....                                                            | 21 |
| Ilustración 9. Promedio MR Normalizado Vs. Promedio invariante de esfuerzos. ....                              | 22 |
| Ilustración 10. Deformación permanente Vs. Numero de muestras.....                                             | 22 |
| Ilustración 11. Especificaciones del cemento asfáltico .....                                                   | 24 |
| Ilustración 12. Reómetro de corte dinámico .....                                                               | 25 |
| Ilustración 13. Equipo de penetración .....                                                                    | 25 |
| Ilustración 14. Horno rotatorio de película delgada. ....                                                      | 26 |
| Ilustración 15. Aparato de anillo y bola.....                                                                  | 27 |
| Ilustración 16. Equipo de la copa abierta de Cleveland .....                                                   | 28 |
| Ilustración 17. Viscosímetro rotacional.....                                                                   | 29 |
| Ilustración 18. Máquina de los ángeles .....                                                                   | 31 |
| Ilustración 19. Equipo Micro-Deval .....                                                                       | 32 |
| Ilustración 20. Conjunto de acero para el ensayo 10% de finos .....                                            | 32 |
| Ilustración 21. Máquina de pulimiento acelerado.....                                                           | 33 |
| Ilustración 22. Ensayo azul de metileno.....                                                                   | 35 |
| Ilustración 23. Determinación de la masa de la muestra sumergida.....                                          | 38 |
| Ilustración 24. Agregado con humedad superficial.....                                                          | 38 |
| Ilustración 25. Límites para la granulometría con tamaño máximo de agregados de 19 mm.....                     | 40 |
| Ilustración 26. Niveles de diseño de mezclas superpave .....                                                   | 41 |
| Ilustración 27. Parámetros de la mezcla asfáltica.....                                                         | 42 |
| Ilustración 28. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada.....                                | 43 |
| Ilustración 29. Ensayo de tracción indirecta .....                                                             | 46 |
| Ilustración 30. Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas .....                  | 47 |
| Ilustración 31. Diagrama del mecanismo del NAT .....                                                           | 47 |
| Ilustración 32. Esfuerzo de compactación giratoria de Superpave.....                                           | 68 |
| Ilustración 33. Compactador giratorio Pontificia Universidad Javeriana. ....                                   | 70 |
| Ilustración 34. Probetas de mezcla asfáltica convencional compactadas .....                                    | 71 |
| Ilustración 35. Probetas compactadas para ensayo TSR.....                                                      | 79 |

---

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 36. Probetas de mezcla con agregado reciclado compactadas. .... | 81 |
| Ilustración 37. Ensayo de tensión indirecta .....                           | 87 |
| Ilustración 38. Ensayo de deformación permanente bajo carga repetida. ....  | 90 |

## LISTA DE GRÁFICAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 1. Valores de $G^*/\sin(\delta)$ para el cemento asfáltico original y envejecido en RTFOT a diferentes temperaturas. ....                                                                                                                                                                                                    | 58 |
| Gráfica 2. Valores de $G^*.\sin(\delta)$ para el cemento asfáltico envejecido en PAV a diferentes temperaturas. ....                                                                                                                                                                                                                 | 58 |
| Gráfica 3. Evolución del Angulo de fase evaluado a la temperatura PG intermedia. A) Cemento asfáltico original y envejecido RTOFT, B) Cemento asfáltico envejecido PAV. ..                                                                                                                                                           | 59 |
| Gráfica 4. Variación del módulo complejo $G^*$ para las temperaturas de ensayo A) Cemento Asfáltico original y Envejecido en RTFOT, B) Cemento asfáltico envejecido en PAV. ....                                                                                                                                                     | 60 |
| Gráfica 5. Variación del ángulo de fase $\delta$ para las temperaturas de ensayo A) Cemento Asfáltico original y Envejecido en RTFOT, B) Cemento asfáltico envejecido en PAV. ....                                                                                                                                                   | 61 |
| Gráfica 6. Representación gráfica análisis granulométrico por tamices. ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 63 |
| Gráfica 7. Representación gráfica análisis granulométrico para mezclas asfálticas en caliente (MDC-19) gradación continua. ....                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| Gráfica 8. Carta de Viscosidad - Temperatura para el cemento asfáltico. ....                                                                                                                                                                                                                                                         | 70 |
| Gráfica 9. A) Curvas de compactación de la mezcla asfáltica MDC-19, B) Variación del porcentaje de vacíos con el número de giros. ....                                                                                                                                                                                               | 71 |
| Gráfica 10. A) Curva de vacíos con aire para la mezcla MDC-19, B) Curva de vacíos en el agregado mineral para la mezcla MDC-19, C) Curva de vacíos llenos de asfalto par la mezcla MDC-19, D) Curva de grado de compactación $G_{mm@Nini}$ para la mezcla MDC-19, E) Curva de compactación $G_{mm@Nmax}$ para la mezcla MDC-19. .... | 74 |
| Gráfica 11. Curva de Proporción de llenante para la mezcla MDC-19 .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 77 |
| Gráfica 12. Compactación ensayo TSR. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 78 |
| Gráfica 13. A) Curvas de compactación de las mezclas asfálticas con adición de agregado reciclado, B) Variación del porcentaje de vacíos con el número de giros. ....                                                                                                                                                                | 81 |
| Gráfica 14. A) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 10°C, B) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 20 °C, C) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 30°C .....                                                                                         | 85 |
| Gráfica 15. A) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 10 °C, B) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 20 °C, C) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 30 °C .....                                             | 85 |
| Gráfica 16. A) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 2,5 Hz, B) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 5 Hz, C) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 10 Hz. ....                                                                                                               | 86 |
| Gráfica 17. A) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 2,5 Hz, B) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 5 Hz, C) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 10 Hz. ....                                             | 87 |

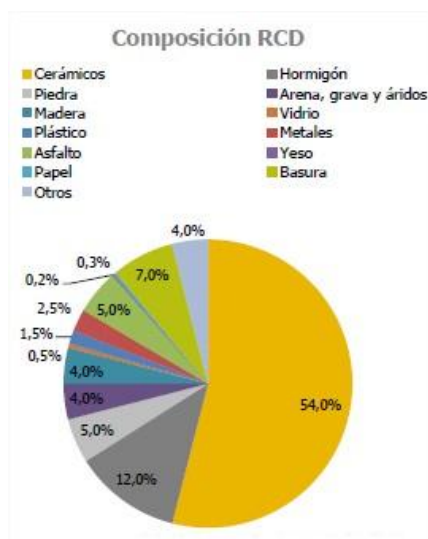
|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 18. Evolución de la deformación con el número de pulsos de carga para las mezclas con agregado reciclado..... | 89 |
| Gráfica 19. Deformación Axial frente al porcentaje de agregado reciclado. ....                                        | 89 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son residuos sólidos sobrantes de las actividades propias de construcción, reparación o demolición de obras civiles o de otras actividades conexas, complementarias o análogas. Estos son considerados inertes y poseen alta susceptibilidad de ser aprovechados mediante transformación y reincorporación como materia prima de agregados en la fabricación de nuevos productos. Para el caso local, en Bogotá se producen, cerca de 15 millones de ton/año de RCD<sup>1</sup>, una cifra alarmante, incluso por encima de grandes ciudades en el mundo y convirtiéndose en uno de los principales problemas que impactan el ambiente de la ciudad.

De forma general, los RCD se componen de agregados pétreos, tejas, concretos, ladrillos, asfalto, madera, metal, morteros, entre otros. La mayoría de estos materiales pueden recuperarse con el fin de incluirse de nuevo en el proceso constructivo.

Ilustración 1. Composición de residuos de construcción y demolición.



Fuente: JORGE SALVANY, Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, 2012.

Esta investigación pretendió mostrar el aporte que ofrecen estos residuos en el comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19). Se realizó la caracterización del agregado pétreo y el cemento asfáltico con el fin de conocer si cumplen con los requisitos mínimos de calidad para ser parte constituyente de la mezcla asfáltica. Por otra parte, se diseñó la mezcla asfáltica MDC-19 bajo los lineamientos de la

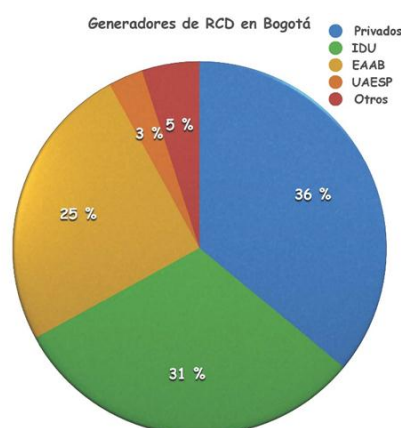
<sup>1</sup>Secretaría Distrital de Ambiente, Resolución 01115. Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital, Bogotá, 2012.

metodología Superpave para mostrar con mejor certeza el comportamiento de la mezcla. Finalmente, se evaluó el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica mediante ensayos de laboratorio como lo son módulo resiliente y deformación permanente bajo carga repetida. Estos ensayos se realizaron bajo los lineamientos correspondientes a la normatividad del Instituto Nacional de vías (Invías), presentando como alternativa la adición de diferentes porcentajes de concreto hidráulico reciclado en la mezcla asfáltica, buscando la reutilización de materiales y mitigando el impacto ambiental producto de este tipo de desechos de la construcción.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector de la construcción en Bogotá ha crecido de forma constante en los últimos años, concentrando entre el 20 y 30 % del PIB de la construcción colombiana<sup>2</sup> y con esto se ha venido incrementado la producción de residuos generados. De este gran volumen de RCD que se producen en Bogotá, los mayores productores son el IDU, las construcciones privadas y la EAAB, como se observa en la ilustración 2, en muchos casos, los residuos no tienen un adecuado proceso y van a parar a sitios no autorizados, alterando el paisaje, contaminando suelos y acuíferos de la ciudad.

Ilustración 2. Generadores de RCD en Bogotá.



Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente, Bogotá, 2012.

La preocupación, es la problemática generada por el agotamiento de los sitios de vertido autorizados. El reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) como agregados es una práctica, relativamente difundida en los países desarrollados, para prevenir la contaminación ambiental y disminuir el impacto de la extracción de agregados vírgenes. En Colombia, es un objetivo novedoso que se han venido trazando las entidades públicas encargadas de gestionar la construcción y el medio ambiente.

Debido a la influencia mundial, la Ciudad de Bogotá ha adelantado proyectos que se enfocan en gestionar el uso de material proveniente de la construcción, mediante la resolución 01115 de 2012<sup>3</sup> la Secretaria Distrital de Ambiente obliga a que las constructoras bogotanas aprovechen los residuos de sus obras, evitando así que lleguen a humedales, ríos, quebradas o al espacio público. Esta medida contempla gradualidad, puesto que el porcentaje de RCD a reutilizar inicialmente exigido es del 5 % y cada año los porcentajes serán incrementados en cinco unidades hasta alcanzar un 25 %.

<sup>2</sup> CAMACOL, Construcción en cifras, Bogotá, 2017.

<sup>3</sup> SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, Resolución 01115. Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital, Bogotá, 2012.

Por otra parte, estudios realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, indican que en el 2011 se produjeron en las ciudades de Bogotá, Medellín, Santiago de Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés más de 22 millones de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición - RCD. Es por ello que el Ministerio de Ambiente reglamentó mediante la Resolución 472<sup>4</sup> del 28 de febrero de 2017 el manejo y la disposición de residuos de construcción y escombros, de acuerdo con la norma la meta consiste en que los grandes generadores de residuos aprovechables de construcción y demolición utilicen un porcentaje no inferior al 2% del peso total de los materiales usados en una obra.

Diferentes investigaciones a nivel mundial, han mostrado la factibilidad técnica del uso de residuos de construcción y demolición en las diferentes capas de un pavimento flexible (carpeta asfáltica, base, sub-base y subrasante). Teniendo en cuenta lo anterior, el problema que se analizó es cuál es el comportamiento del módulo resiliente de una mezcla densa en caliente al utilizar agregado reciclado de concreto hidráulico, para reemplazar parcialmente el agregado convencional.

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿CUÁL ES EL COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO RESILIENTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO?

---

<sup>4</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 472, por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición, Colombia, 2017.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos tiempos el incremento descontrolado del flujo vehicular obligo al gobierno nacional plantear la construcción de nueva infraestructura vial mediante las llamadas vías de cuarta generación (4G), las cuales pretenden mejorar la capacidad y el nivel de servicio de la malla vial, lo cual se traduce en un progreso en la política económica del país, y con miras en la integración regional.

La construcción de estos proyectos 4G requieren de una inversión económica considerable, además del impacto ambiental que puede generar proyectos de esta magnitud. Por lo anterior es necesario implementar propuestas que permitan la optimización de recursos y en lo posible mitigación del impacto ambiental en los proyectos definidos como 4G, ya sea implementando nuevas técnicas o tecnologías, procesos o materiales.

La mezcla asfáltica es el componente principal de la estructura de un pavimento flexible, desde el punto de vista de costos, es requerimiento fundamental optimizar por medio de metodologías apropiadas la selección y dosificación de materiales constituyentes de la mezcla asfáltica.

La adición de agregado reciclado como reemplazo del agregado convencional puede reducir significativamente los costos que implica el diseño de una mezcla asfáltica, además de mitigar el impacto ambiental generado por los residuos de construcción y demolición.

Debido a la demanda de recursos naturales y a la escasez generada por su sobreexplotación, se han buscado materiales alternativos que permitan reemplazar los agregados pétreos sin alterar la calidad y funcionalidad de las diferentes estructuras. En la actualidad, los residuos de construcción y demolición (RCD), se han convertido en una alternativa técnicamente viable para la construcción de capas granulares de pavimentos flexibles.

Esta investigación, pretende evaluar el aporte que ofrece un agregado reciclado de concreto hidráulico, en una mezcla densa en caliente tipo MDC-19. Remplazando parte del agregado convencional, con el fin de analizar su comportamiento dinámico. Finalmente se busca promover el aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, para mitigar el impacto ambiental generado por estos materiales.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el módulo resiliente de una mezcla asfáltica (MDC-19) con adición de concreto hidráulico reciclado.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

4.2.1 Caracterizar propiedades físicas y mecánicas de los agregados naturales, reciclados y el cemento asfáltico, tomando de referencia las especificaciones del Instituto Nacional de Vías.

4.2.2 Diseñar una mezcla asfáltica convencional (MDC-19) con agregado natural.

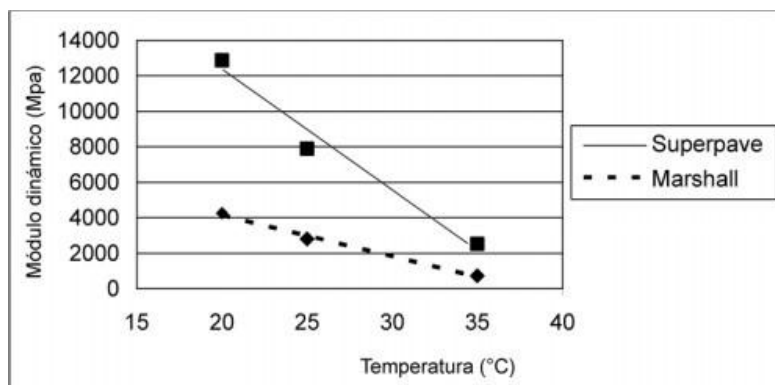
4.2.3 Evaluar el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica (MDC-19) con adición de concreto hidráulico reciclado mediante ensayos de módulo resiliente y deformación permanente.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. ANTECEDENTES

Uno de los ensayos más utilizados para determinar el comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica es el de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente o módulo dinámico, los autores Marín y Guzmán<sup>5</sup>, presentan una investigación en la cual realizan una comparación de módulos dinámicos medidos en probetas elaboradas por el método Marshall y por el método Superpave. En esta investigación los autores realizaron los diseños de mezcla utilizando una estructura granulométrica para una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-2), la comparación entre los módulos dinámicos para ambos métodos se puede evidenciar en la ilustración 3.

Ilustración 3. Módulos Dinámicos.



Fuente: MARÍN URIBE, Carlos. GUZMÁN MELÉNDEZ, María. Comparación de módulos dinámicos de probetas elaboradas por el método Marshall y por el método Superpave. 2007.

En la ilustración 3 se observa claramente como los valores de módulo dinámico obtenidos de las muestras elaboradas por el método Superpave superan casi el doble a los obtenidos de las probetas Marshall.

Los autores concluyen que “El aumento significativo del módulo dinámico de la mezcla Superpave se asocia a dos situaciones; estas son: el envejecimiento de la mezcla antes de la compactación y la estructuración del esqueleto del agregado dado por la compactación giratoria que queda en evidencia cuando se comparan los % de VAM alcanzados por las mezclas; la diseñada por el método Superpave tiene un valor más bajo.”

<sup>5</sup>MARIN URIBE, Carlos. Guzmán Meléndez, María. Comparación de módulos dinámicos de probetas elaboradas por el método Marshall y Superpave. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2007, No. 6. p. 67-76

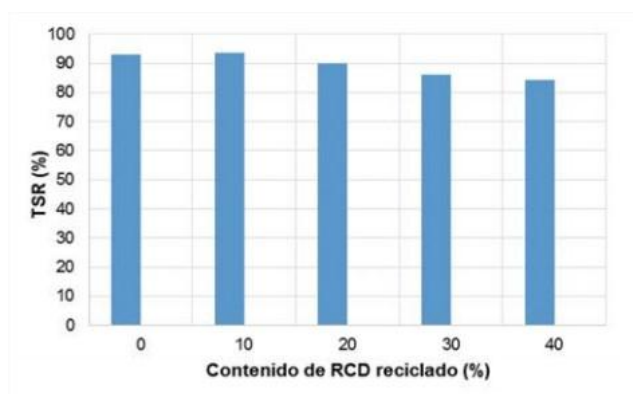
Otro estudio realizado por Ossa y García<sup>6</sup> en el cual utilizan residuos de construcción y demolición (RCD) como complemento de los agregados pétreos en la elaboración de mezclas asfálticas, con el fin de generar una alternativa de mitigación del problema ambiental que se deriva de una gestión inadecuada de estos residuos.

Para el diseño de las mezclas asfálticas se tomaron en cuenta los criterios de diseño de la metodología Superpave. Dado el interés de utilizar agregados producto del reciclaje de RCD en la construcción de carpetas asfálticas para vialidades urbanas de alto tráfico, se definió un tránsito de diseño de 9.5 millones de ejes equivalentes, el cual se clasifica dentro de los niveles 2 de la metodología.

Posteriormente los autores con el fin de evaluar el desempeño de mezclas asfálticas elaboradas con agregados producto del reciclado de RCD, se fabricaron probetas de concreto asfáltico en las que se utilizaron combinaciones de agregado pétreo y reciclado de RCD en proporciones de 100-0, 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40, respectivamente. Los ensayos de desempeño de las mezclas asfálticas incluyeron susceptibilidad al daño por humedad de los diferentes tipos de concreto asfáltico se evaluó a través de la prueba TSR (Tensile Strength Ratio) y susceptibilidad a la deformación permanente la cual se realizó en la prueba de pista tipo B de acuerdo con la normatividad UNE EN 12697- 22.

En las ilustraciones 4 y 5 se muestran los resultados de pruebas de susceptibilidad al daño por humedad y los resultados de pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente respectivamente.

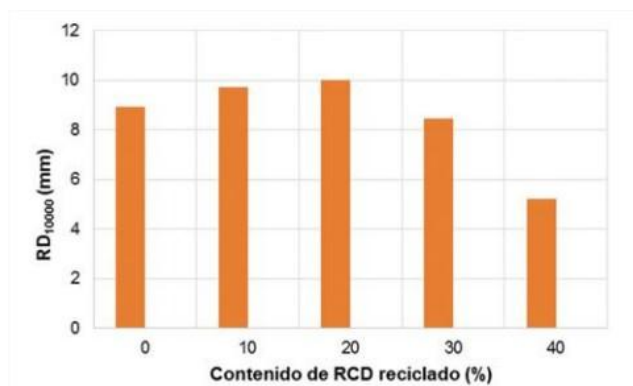
Ilustración 4. Resultados de pruebas de susceptibilidad al daño por humedad



Fuente: OSSA, Alexandra, GARCIA, José Luis. Residuos de construcción y demolición (rcd), una alternativa para la construcción de carpetas asfálticas. En: Gaceta del instituto de ingeniería UNAM. Febrero, 2015, no 107, P. 14-17.

<sup>6</sup>OSSA, Alexandra, GARCIA, José Luis. Residuos de construcción y demolición (rcd), una alternativa para la construcción de carpetas asfálticas. En: Gaceta del instituto de ingeniería UNAM. Febrero, 2015, no 107, P. 14-17.

Ilustración 5. Resultados de pruebas de susceptibilidad a la deformación permanente



Fuente: OSSA, Alexandra, GARCIA, José Luis. Residuos de construcción y demolición (rkd), una alternativa para la construcción de carpetas asfálticas. En: Gaceta del instituto de ingeniería UNAM. Febrero, 2015, no 107, P. 14-17.

Los valores de TSR disminuyen con el contenido de RCD en la mezcla asfáltica. Tomando en cuenta que los valores de TSR no deben exceder el 80 %, se considera que, desde el punto de vista de la susceptibilidad a la humedad, el concreto asfáltico elaborado con agregados producto del reciclado de RCD podría utilizarse en la construcción de carreteras urbanas.

En cuanto a la susceptibilidad a la deformación permanente se observa además cómo este parámetro, en términos generales, tiende a disminuir en la medida que aumentan los porcentajes de agregados producto del reciclado de RCD en la mezcla; esto indica que las mezclas en las que se utilizan dichos agregados son menos susceptibles al fenómeno del ahuellamiento, lo cual podría suceder como consecuencia de un aumento de su angularidad.

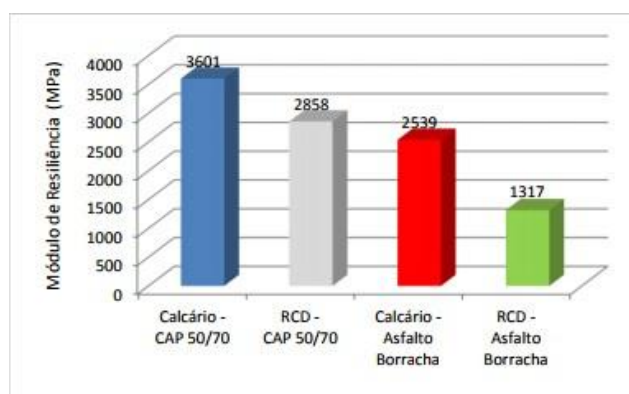
Finalmente, los autores concluyen que “La incorporación de agregados productos del reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) en la elaboración de mezclas de concreto asfáltico es viable desde el punto de vista de la susceptibilidad al daño por humedad y a la deformación permanente. Sin embargo, se deberán realizar estudios adicionales que permitan definir los porcentajes de agregado reciclado adecuados para utilizarse en función de la variabilidad de sus características y propiedades.”

En otra investigación realizada por Quiñones<sup>7</sup>, en la cual se investigó la aplicabilidad de residuos de construcción y demolición (RCD) en conjunto con asfalto-caucho como materiales alternativos para ser usados en mezclas asfálticas densas en caliente. El agregado convencional o calcáreo como se cita en el documento y el ligante asfáltico convencional también se probaron a efectos de comparaciones de referencia.

<sup>7</sup> QUIÑONES, Ferney. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

El agregado calcáreo y el RCD fueron inicialmente caracterizados por medio de ensayos de laboratorio convencionales, tales como granulometría, densidad, absorción y abrasión en la máquina de los Ángeles. El asfalto-caucho se caracterizó por medio de pruebas físicas, químicas y reológicas de la metodología Superpave. Las mezclas asfálticas en caliente fueron dosificadas de acuerdo con el método tradicional de Marshall. Para evaluar las propiedades mecánicas de las muestras compactadas se determinaron utilizando ensayos de resistencia a la tracción indirecta, módulo de resiliencia, fatiga, creep estático y simulación de tráfico en laboratorio.

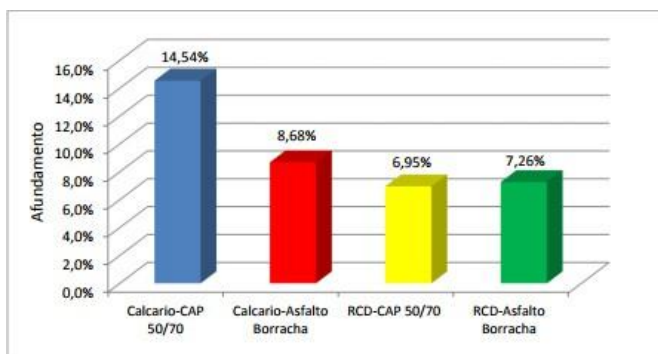
Ilustración 6. Valores de módulo de resiliencia.



Fuente: QUIÑONES, Ferney. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

En la ilustración 6 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de módulo resiliente, el autor menciona que “Las mezclas producidas con RCD presentan menor MR que las mezclas elaboradas con agregado calcáreo, ya que las primeras tienen una adsorción mayor que hace que precisen mayor contenido de asfalto, pero se vuelven más deformables, llevando a menores tensiones absorbidas, reflejándose en módulos de resiliencia menores.”

Ilustración 7. Resultados de deformación permanente en el ensayo de simulación de tráfico en laboratorio.



Fuente: QUIÑONES, Ferney. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

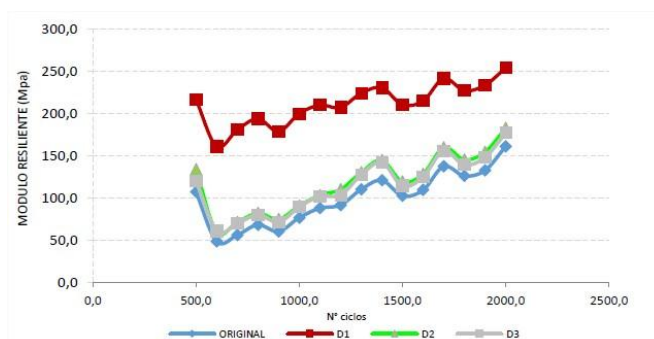
En la ilustración 7 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de deformación permanente en el ensayo de simulación de tráfico en laboratorio, el autor menciona que “Las mezclas elaboradas con agregado reciclado de RCD con ligante convencional o ligante modificado con caucho, mostraron el mejor comportamiento y alcanzaron valores de deformación permanente inferiores al máximo valor admisible (10%). Advirtiendo que las características del agregado RCD en este caso son más influyentes que el tipo de ligante a la hora de evaluar el ahuellamiento utilizando esta metodología”.

Finalmente, el autor concluye que “la variabilidad relativamente baja en el muestreo y en los ensayos elaborados con RCD está relacionada con el hecho de haber utilizado una fuente única. Además, el ligante asfáltico en la mezcla también tiende a reducir la variabilidad, uniformizando las propiedades mecánicas, tal como ocurre en el caso de mortero de cemento Portland y cal.”

Por otra parte, se han realizado investigaciones en las cuales se incorporó agregado reciclado en bases y subbases granulares, un ejemplo de ello es en la investigación realizada por Rodríguez y Fernández<sup>8</sup>, en la cual evalúan el comportamiento del módulo resiliente de una subbase granular con adición de concreto hidráulico reciclado.

En la investigación los autores caracterizaron el material granular denominado material original (D0), y los materiales reciclados. Luego de la caracterización de los materiales granulares fabricaron muestras producto de la combinación de material original y reciclado para evaluar el comportamiento físico y mecánico de las dosificaciones propuestas. La obtención de los diseños experimentales para las granulometrías o dosificaciones evaluadas, fueron acordes a los requerimientos granulométricos de la normatividad del Instituto Nacional de Vías.

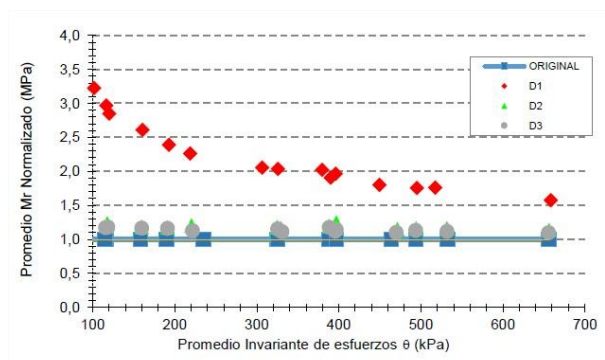
Ilustración 8. Promedio MR Vs. Ciclos de carga.



Fuente: RODRIGUEZ, Oscar, FERNANDEZ, Adriana. Evaluación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado. Universidad La Gran Colombia. Bogotá. 2015.

<sup>8</sup> RODRIGUEZ, Oscar, FERNANDEZ, Adriana. Evaluación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado. Universidad La Gran Colombia. Bogotá. 2015.

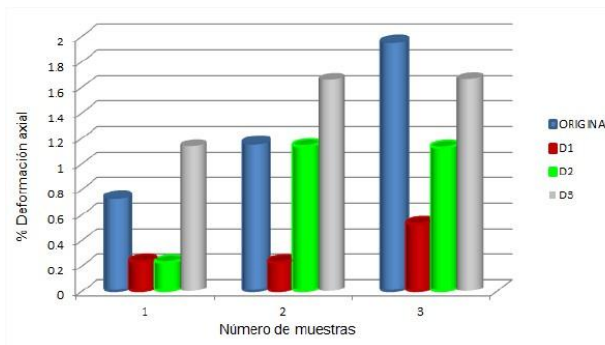
Ilustración 9. Promedio MR Normalizado Vs. Promedio invariante de esfuerzos.



Fuente: RODRIGUEZ, Oscar, FERNANDEZ, Adriana. Evaluación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado. Universidad La Gran Colombia. Bogotá. 2015.

En las ilustraciones 8 y 9 se muestran los resultados de módulo resiliente frente a los ciclos de carga y el promedio de invariante de esfuerzos respectivamente.

Ilustración 10. Deformación permanente Vs. Numero de muestras.



Fuente: RODRIGUEZ, Oscar, FERNANDEZ, Adriana. Evaluación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado. Universidad La Gran Colombia. Bogotá. 2015.

En la ilustración 10 se muestra el aumento de la deformación permanente en el material original con respecto a las dosificaciones D1, D2 y D3. Los autores mencionan que “Se observa una disminución en la deformación permanente (50%) en las probetas evaluadas para las dosificaciones D1 y D2 con respecto al material original, sin embargo, para la dosificación D3 dicho comportamiento aumentó con respecto al original, esto se estima debido a los puntos de discontinuidad en la curva granulométrica definida para esta dosificación.”

Los autores concluyen que: “El MR a partir de las diferentes dosificaciones empleadas y en particular la dosificación D1 compuesta por 45% de material original, 20% de grava de trituración y 35% de arena de trituración, presentó un aumento de tres veces el MR con respecto al material original. Este aumento del MR se evidencia para las dosificaciones de concreto hidráulico restante, pero en menor valor.”

## 5.2. MARCO CONCEPTUAL

### 5.2.1. Caracterización de cemento asfáltico

En el caso de Colombia se deben realizar los ensayos que exigen las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (Invías) con el fin de conocer si el cemento asfáltico cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser parte constituyente de la mezcla asfáltica. Adicionalmente se deben realizar ensayos para la determinación de la durabilidad y propiedades reológicas del cemento asfáltico.

Para la determinación del PG “Grado de desempeño” según la metodología Superpave el cemento asfáltico experimenta envejecimiento a corto y a largo plazo, en el corto plazo se evalúa el cambio que experimenta el cemento asfáltico en sus propiedades físicas y reológicas durante el proceso de fabricación en planta, en el largo plazo se evalúa el efecto de las condiciones del medio ambiente sobre el cemento asfáltico entre 7 a 10 años de servicio de la mezcla asfáltica en el pavimento. Por lo tanto, las propiedades físicas y reológicas de la mezcla son evaluadas sobre el cemento asfáltico con envejecimiento y sin este.<sup>9</sup>

Superpave recomienda evaluar estos fenómenos de envejecimiento a través de dos ensayos: horno rotatorio de película delgada (RTFOT) y vasija de envejecimiento a presión (PAV). En la ilustración 11 se presenta una tabla la cual muestra los ensayos anteriormente mencionados con sus respectivos valores de aceptación.

---

<sup>9</sup>RONDON QUINTANA, Hugo, REYES LIZCANO, Fredy. Pavimentos Mariales, construcción y diseño. Ed. 20. Bogotá. Ecoe Ediciones. 2015. ISBN: 9789587711752.

Ilustración 11. Especificaciones del cemento asfáltico

| CARACTERÍSTICA                                                                                                     | NORMA DE ENSAYO INV | GRADO DE PENETRACIÓN |      |       |      |        |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|------|-------|------|--------|------|
|                                                                                                                    |                     | 40-50                |      | 60-70 |      | 80-100 |      |
|                                                                                                                    |                     | MÍN                  | MÁX  | MÍN   | MÁX  | MÍN    | MÁX  |
| Asfalto original                                                                                                   |                     |                      |      |       |      |        |      |
| Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm                                                                            | E-706               | 40                   | 50   | 60    | 70   | 80     | 100  |
| Punto de ablandamiento, °C                                                                                         | E-712               | 52                   | 58   | 48    | 54   | 45     | 52   |
| Índice de penetración                                                                                              | E-724               | -1.2                 | +0.6 | -1.2  | +0.6 | -1.2   | +0.6 |
| Viscosidad absoluta (60° C), P                                                                                     | E-716 o E-717       | 200 0                | -    | 150 0 | -    | 100 0  | -    |
| Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm                                                                                   | E-702               | 80                   | -    | 100   | -    | 100    | -    |
| Solubilidad en tricloroetileno, %                                                                                  | E-713               | 99                   | -    | 99    | -    | 99     | -    |
| Contenido de agua, %                                                                                               | E-704               | -                    | 0.2  | -     | 0.2  | -      | 0.2  |
| Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C                                                        | E-709               | 240                  | -    | 230   | -    | 230    | -    |
| Contenido de parafinas, %                                                                                          | E-718               | -                    | 3    | -     | 3    | -      | 3    |
| Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720 |                     |                      |      |       |      |        |      |
| Pérdida de masa por calentamiento, %                                                                               | E-720               | -                    | 0.8  | -     | 0.8  | -      | 1.0  |
| Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original                                               | E-706               | 55                   | -    | 50    | -    | 46     | -    |
| Incremento en el punto de ablandamiento, °C                                                                        | E-712               | -                    | 8    | -     | 9    | -      | 9    |
| Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original              | E-716 o E-717       | -                    | 4    | -     | 4    | -      | 4    |

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 410. Instituto Nacional de Vías (2013)

#### 5.2.1.1. Determinación de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico

El ensayo corresponde a la norma INV-E 750-13<sup>10</sup> la cual determina del módulo de corte dinámico y del ángulo de fase de un ligante asfáltico, este método de prueba se usa para determinar las propiedades viscoelásticas de ligantes asfálticos.

El procedimiento se usa para medir el módulo de corte complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) de ligantes asfálticos, usando un reómetro de corte dinámico. El módulo de corte complejo es un indicador de la rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación bajo carga. El módulo de corte complejo y el ángulo de fase definen la resistencia a la deformación de corte de un ligante asfáltico en la región viscoelástica lineal. El módulo complejo y el ángulo de fase se usan para determinar criterios relacionados con el desempeño, de acuerdo con las especificaciones Superpave.

<sup>10</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-750. Colombia.: Invías, 2013

Ilustración 12. Reómetro de corte dinámico



Fuente: Propia

#### 5.2.1.2. Penetración de los materiales bituminosos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 706-13<sup>11</sup>, con el cual se determina la consistencia de los materiales bituminosos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

El procedimiento se realiza dejando derretir una muestra del producto bituminoso, si al inicio se encontraba a temperatura ambiente y se deja enfriar de manera controlada. Posteriormente, empleando un equipo de penetración con una aguja normalizada se penetra la muestra bajo unas condiciones especificadas.

Ilustración 13. Equipo de penetración



Fuente: Propia

<sup>11</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-706. Colombia.: Invías, 2013

#### 5.2.1.3. Efectos del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria

El ensayo corresponde a la norma INV-E 720-13<sup>12</sup>, el cual se emplea para medir el efecto del calor y del aire sobre una lámina delgada de materiales asfálticos semisólidos en movimiento. También se emplea, para determinar el cambio de masa del cemento asfáltico, el cual es una medida de la presencia de productos volátiles.

El procedimiento se realiza cuando una película de material asfáltico en movimiento es calentada durante 85 minutos en un horno a 163° C. Los efectos del calor y del aire sobre el material se determinan a partir de los cambios en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno. Se proporciona un procedimiento opcional para determinar el cambio de masa de la muestra

Ilustración 14. Horno rotatorio de película delgada.



Fuente: Propia

#### 5.2.1.4. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)

El ensayo corresponde a la norma INV-E 712-13<sup>13</sup>, determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157° C, utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada (30 a 80° C) o en glicerina USP (más de 80 hasta 157° C).

El procedimiento se realiza con dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de latón, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan lo suficiente, para que cada bola envuelta en material bituminoso caiga una distancia de 25 mm (1").

<sup>12</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-720. Colombia.: Invías, 2013

<sup>13</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-712. Colombia.: Invías, 2013

Ilustración 15. Aparato de anillo y bola



Fuente: Propia

#### 5.2.1.5. Índice de penetración de los cementos asfálticos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 724-13<sup>14</sup>, el cual determina el índice de penetración, IP, de los cementos asfálticos. Este índice, se calcula a partir de los valores de la penetración a 25° C (norma INV-E 706-13) y del punto de ablandamiento con anillo y bola (norma INV-E 712-13) y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales y de su comportamiento reológico.

#### 5.2.1.6. Ductilidad de los materiales asfálticos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 702-13<sup>15</sup>, el cual determina la ductilidad de los materiales asfálticos de consistencia sólida y semisólida, midiendo la distancia hasta la cual se elonga una probeta hasta alcanzar la rotura, cuando sus dos extremos son separados a una velocidad de  $50 \pm 2.5$  mm por minuto, a una temperatura de  $25 \pm 0.5^\circ$  C.

El procedimiento se realiza al someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones normalizadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua, definiéndose la ductilidad como la longitud máxima, en cm, que se estira la probeta hasta el instante de su rotura.

<sup>14</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-724. Colombia.: Invías, 2013

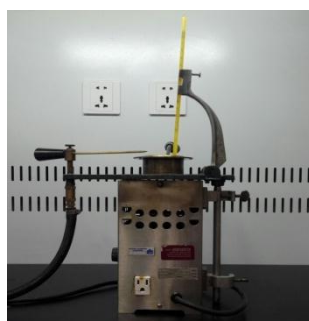
<sup>15</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-702. Colombia.: Invías, 2013

#### 5.2.1.7. Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland

El ensayo corresponde a la norma INV-E 709-13<sup>16</sup>, el cual determina el procedimiento para determinar los puntos de inflamación y de combustión de productos de petróleo, empleando una copa abierta de Cleveland de manejo manual o automático.

La copa del ensayo se llena con la muestra hasta un nivel especificado. Se aumenta la temperatura de la muestra, primero con rapidez y luego constante y lenta, a medida que se aproxima al punto de inflamación. A intervalos de tiempo especificados, se pasa una pequeña llama de ensayo a través de la copa. La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama de ensayo hace que los vapores que se encuentran por encima de la superficie del líquido desprendan una llamarada repentina, se toma como punto de inflamación. Para determinar el punto de combustión, se continúa la aplicación de la llama de ensayo a través de la copa, hasta que haga que el espécimen arda con una llama sostenida, por lo menos durante 5 segundos.

Ilustración 16. Equipo de la copa abierta de Cleveland



Fuente: Propia

#### 5.2.1.8. Determinación de la Viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional

El ensayo corresponde a la norma INV-E 717-13<sup>17</sup>, el cual describe el procedimiento a seguir para medir la viscosidad de un ligante asfáltico a una temperatura elevada, usando un viscosímetro rotacional.

Este método se utiliza para medir la viscosidad del asfalto a las temperaturas de aplicación. Se coloca una pequeña cantidad de muestra de asfalto en un recipiente a temperatura constante. El par de torsión requerido para mantener rotando a velocidad constante un vástago cilíndrico sumergido en la muestra, se utiliza para determinar la

<sup>16</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-709. Colombia.: Invías, 2013

<sup>17</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-717. Colombia.: Invías, 2013

resistencia relativa a la rotación. La viscosidad del ligante en cP, se calcula a partir de los valores de torque y velocidad de rotación.

Se determina la viscosidad del asfalto como el promedio de las mediciones realizadas a 60° C. El índice de envejecimiento se calcula como la relación de viscosidades a 60° C. del asfalto residual y el asfalto original. (Ver Ecuación (1))

$$\text{Índice de envejecimiento} = \frac{\text{Viscosidad del asfalto residual}}{\text{Viscosidad del asfalto original}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Ilustración 17. Viscosímetro rotacional



Fuente: Propia

### 5.2.2. Caracterización de agregado pétreo.

En el caso de Colombia se deben realizar los ensayos que exigen las especificaciones del Invías con el fin de conocer si el agregado pétreo cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser parte constituyente de la mezcla asfáltica. Superpave resalta la determinación del esqueleto granular del agregado pétreo como el parámetro más importante para obtener una mezcla asfáltica más resistente a la deformación bajo carga.

A continuación, se presenta una ilustración que muestra las normas correspondientes a cada ensayo, así como sus valores de referencia para la aceptación o rechazo de este.

Ilustración 16. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente

| CARACTERÍSTICA                                                                             | NORMA DE ENSAYO INV | NIVEL DE TRÁNSITO |                    |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
|                                                                                            |                     | NT1               | NT2                | NT3                   |
| <b>Dureza, agregado grueso (O)</b>                                                         |                     |                   |                    |                       |
| Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)                                          |                     |                   |                    |                       |
| - Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones                                  | E-218               | 25/35/-<br>5/7/-  | 25/35/35<br>5/7/7  | 25 / 35 / 35<br>5/7/7 |
| - Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones                                  |                     |                   |                    |                       |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)                              | E-238               |                   | 25/30/30           | 20/25/25              |
| - Capa de: rodadura / intermedia / base                                                    |                     |                   |                    |                       |
| Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base | E-224               |                   |                    | 110/90/75<br>75/75/75 |
| - Valor en seco, mínimo (kN)                                                               |                     |                   |                    |                       |
| - Relación húmedo/seco, mínima (%)                                                         |                     |                   |                    |                       |
| Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo                                 | E-232               | 0.45              | 0.45               | 0.45                  |
| <b>Durabilidad (O)</b>                                                                     |                     |                   |                    |                       |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)  | E-220               | 18                | 18                 | 18                    |
| <b>Limpieza, agregado grueso (F)</b>                                                       |                     |                   |                    |                       |
| Impurezas en agregado grueso, máximo (%)                                                   | E-237               | 0.5               | 0.5                | 0.5                   |
| <b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>                                                   |                     |                   |                    |                       |
| Índice de plasticidad, máximo (%)                                                          | E-125 y E-126       | NP                | NP                 | NP                    |
| Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)                                                  | E-133               | 50                | 50                 | 50                    |
| Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)                                                 | E-235               | 10                | 10                 | 10                    |
| <b>Geometría de las partículas, agregado grueso (F)</b>                                    |                     |                   |                    |                       |
| Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)                                    | E-240               | 10                | 10                 | 10                    |
| Caras fracturadas, mínimo (%)                                                              |                     |                   |                    |                       |
| - Una cara: rodadura / intermedia / base                                                   | E-227               | 75/60/-<br>-/-/-  | 75/75/60<br>60/-/- | 85/75/60<br>70/-/-    |
| - Dos caras: rodadura / intermedia / base                                                  |                     |                   |                    |                       |
| <b>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</b>                                      |                     |                   |                    |                       |
| Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)                                      | E-239               | 40/35/-           | 45/40/35           | 45/40/35              |
| - Capa de: rodadura / intermedia / base                                                    |                     |                   |                    |                       |
| <b>Adhesividad (O)</b>                                                                     |                     |                   |                    |                       |

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450. Instituto Nacional de Vías (2013)

#### 5.2.2.1. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles

El ensayo corresponde a la norma INV-E 218-13<sup>18</sup>, el cual se usa para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos por medio de la máquina de Los Ángeles.

Este ensayo mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número

<sup>18</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-218. Colombia.: Invías, 2013

determinado de esferas metálicas, el cual depende de la granulometría de la muestra de ensayo.

Ilustración 18. Máquina de los ángeles



Fuente: Propia

#### 5.2.2.2. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando aparato Micro-Deval

El ensayo corresponde a la norma INV-E 238-13<sup>19</sup>, el cual describe un procedimiento para medir la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso utilizando el aparato Micro-Deval.

El ensayo Micro-Deval es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua.

Una muestra con granulometría normalizada se sumerge inicialmente en agua durante una hora. La muestra se coloca en un recipiente de acero de 20 cm de diámetro, con 2.0 litros de agua y una carga abrasiva que consiste en 5000 g de esferas de acero de 9.5 mm de diámetro. Se rotan a 100 rpm hasta por 2 horas, posteriormente, se lava la muestra y se seca en el horno.

<sup>19</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-238. Colombia.: Invías, 2013

Ilustración 19. Equipo Micro-Deval



Fuente: Propia

#### 5.2.2.3. Determinación del valor del 10% de finos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 224-13<sup>20</sup>, el cual evalúa la resistencia mecánica de un agregado grueso al aplastamiento cuando es sometido a un esfuerzo de compresión, determinando la carga necesaria para que el agregado produzca 10 % de finos.

Se compacta en un cilindro metálico una muestra de agregado de tamaño especificado, aplicándole golpes con una varilla. La muestra compactada se somete gradualmente a un esfuerzo de compresión. El procedimiento se realiza con varias cargas de compresión, con el fin de establecer la carga con la cual se produce en el agregado un 10 % de finos.

Ilustración 20. Conjunto de acero para el ensayo 10% de finos



Fuente: Propia

<sup>20</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-224. Colombia.: Invías, 2013

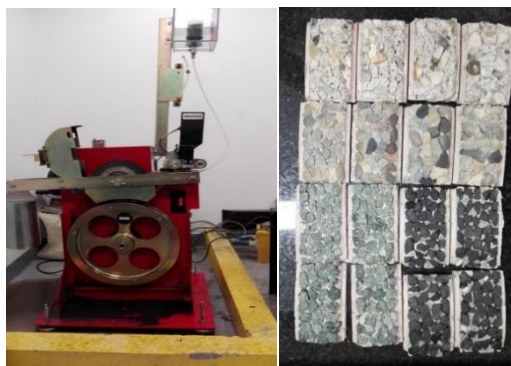
#### 5.2.2.4. Determinación del coeficiente de pulimiento acelerado de las partículas de agregado grueso

El ensayo corresponde a la norma INV-E 232-13<sup>21</sup>, la cual describe el procedimiento de laboratorio para determinar la susceptibilidad de los agregados pétreos al pulimiento, mediante la máquina de pulimiento acelerado.

Este ensayo pretende reproducir, de manera acelerada, el pulimiento que experimenta el agregado bajo la acción del tránsito real cuando forma parte de la capa de rodadura de una vía.

Se montan catorce probetas compuestas por partículas de gravilla sobre una rueda de 40 cm de diámetro, sometiéndolas a la acción de un neumático de 20 cm, cargada de un material abrasivo. La velocidad del neumático es de aproximadamente 24.5 km/h. El estado de pulimento alcanzado por cada probeta después de tratada en la máquina se mide por el coeficiente de fricción entre su superficie y una zapata de caucho de un péndulo, para determinar el coeficiente de pulimento acelerado.

Ilustración 21. Máquina de pulimiento acelerado



Fuente: Propia

#### 5.2.2.5. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio

El ensayo corresponde a la norma INV-E 220-13<sup>22</sup>, la cual describe el procedimiento a seguir para determinar la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones.

<sup>21</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-232. Colombia.: Invías, 2013

<sup>22</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-220. Colombia.: Invías, 2013

Mediante este ensayo se puede obtener información útil para juzgar la resistencia de los agregados a la acción de los agentes atmosféricos, cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas reales de servicio.

#### 5.2.2.6. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso

El ensayo corresponde a la norma INV-E 237-13<sup>23</sup>, la cual describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la limpieza superficial de los agregados, tanto de origen natural como artificial.

El ensayo consiste en separar por lavado, mediante un tamiz de referencia, las partículas menores de 0.5 mm mezcladas o adheridas a la superficie de las partículas del agregado grueso, las cuales se consideran como impurezas.

Se calcula el porcentaje en masa de las impurezas respecto de la masa seca de la muestra total que se denomina coeficiente de limpieza superficial. (ver Ecuación (2)).

$$\text{Coeficiente de limpieza superficial} = \frac{M_{he} - M_{se}}{M_{he}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

#### 5.2.2.7. Equivalente de arena de suelos y agregados finos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 133-13<sup>24</sup>, el cual determina, bajo condiciones normalizadas, las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos.

Un volumen de suelo o de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante se colocan en un cilindro de plástico graduado y se agitan, para que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso o similar. La muestra es posteriormente irrigada, usando cierta cantidad de solución floculante, para forzar al material arcilloso a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas del material arcilloso y fino floculado y de la arena en el cilindro.

El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje. (Ver Ecuación (3)).

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

<sup>23</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-237. Colombia.: Invías, 2013

<sup>24</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-133. Colombia.: Invías, 2013

#### 5.2.2.8. Valor de azul de metileno en agregados finos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 235-13<sup>25</sup>, el cual determina el valor de azul de metileno de la fracción que pasa el tamiz de No. 4 de la mezcla total de agregados.

El ensayo consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua. Después de cada dosis se comprueba la absorción de solución colorante por parte la muestra, realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre.

Una vez confirmada la presencia de colorante libre, se calcula el valor de azul de metileno, expresado en gramos de colorante absorbido por kilogramo de la fracción granulométrica ensayada. (Ver Ecuación (4))

$$VA = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad \text{Ecuación 4}$$

Ilustración 22. Ensayo azul de metileno.



Fuente: Propia

#### 5.2.2.9. Determinación del límite líquido de los suelos, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

Los ensayos corresponden a las normas INV-E 125-13<sup>26</sup> y INV-E 126-13<sup>27</sup> con el cual se caracteriza la fracción fina del suelo calcular su consistencia o índice de liquidez, límite líquido e índice de plasticidad de los suelos, estos límites calculados son los llamados límites de Atterberg, con los cuales se puede ver el comportamiento en diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos, determinar las fronteras y conocer que tan deformables pueden ser, para establecer el desempeño que alcancen ante cualquier obra de ingeniería frente a aplicación de cargas.

<sup>25</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-235. Colombia.: Invías, 2013

<sup>26</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-125. Colombia.: Invías, 2013

<sup>27</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-126. Colombia.: Invías, 2013

El límite líquido se realiza para una porción retenida en tamiz No. 40 y se hace por tanteo en una cazuela de bronce donde se esparce la muestra y con un ranurador se divide, se determina el número de golpes para que las partes fluyan de nuevo, los golpes son provenientes de la caída de la cazuela sobre una base, y determinar el contenido de humedad para el cual el suelo pasa de líquido a plástico.

El límite plástico es la humedad más baja obtenida para que en una porción de suelo húmedo permita formar unos rollos a un determinado diámetro hasta cuando se agrieten y provoque el desmoronamiento de los mismos y determinar el contenido de humedad para que el suelo pase de estado plástico a semi-sólido.

#### 5.2.2.10. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

El ensayo corresponde a la norma INV-E 227-13<sup>28</sup>, el cual determina el porcentaje, en masa o por conteo, de partículas de un agregado grueso que tienen un número especificado de caras fracturadas.

Algunas especificaciones contienen requisitos relacionados con un porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos. Uno de los propósitos de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados.

#### 5.2.2.11. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos

El ensayo corresponde a la norma INV-E 240-13<sup>29</sup>, la cual determina el porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso. Se miden partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico, para determinar las relaciones de ancho/espesor, largo/ancho o largo/espesor.

#### 5.2.2.12. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)

El ensayo corresponde a la norma INV-E 239-13<sup>30</sup>, la cual determina el contenido de vacíos de una muestra de agregado fino no compactada. Cuando se mide en cualquier agregado de gradación conocida, el contenido de vacíos provee una indicación de la angulosidad, la esfericidad y la textura superficial de ese agregado,

<sup>28</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-227. Colombia.: Invías, 2013

<sup>29</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-240. Colombia.: Invías, 2013

<sup>30</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-239. Colombia.: Invías, 2013

que se pueden comparar con las de otros agregados finos ensayados con la misma gradación.

Un recipiente cilíndrico calibrado de 100 ml se llena con un agregado fino, permitiendo que la muestra fluya a través de un embudo desde una altura fija dentro del recipiente. El agregado fino se extrae del recipiente y se pesa para determinar su masa. El contenido de vacíos sin compactar se calcula como la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor. El contenido de vacíos del agregado fino sin compactar se calcula usando la gravedad específica del agregado fino.

Se calcula el porcentaje de vacíos del agregado fino sin compactar para cada determinación así:

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

#### 5.2.2.13. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso

El ensayo corresponde a la norma INV-E 223-13<sup>31</sup>, el cual describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, gravedad específica y la absorción del agregado grueso.

Se sumerge en agua una muestra del agregado durante un período de  $24 \pm 4$  h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, se determina el volumen de la muestra por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca.

<sup>31</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-223. Colombia.: Invías, 2013

Ilustración 23. Determinación de la masa de la muestra sumergida



Fuente: Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-223

#### 5.2.2.14. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino

El ensayo corresponde a la norma INV-E 222-13<sup>32</sup>, el cual describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino, la gravedad específica y la absorción del agregado fino.

Se sumerge en agua una muestra del agregado durante un período de  $24 \pm 4$  h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por el método gravimétrico o el volumétrico. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca.

Ilustración 24. Agregado con humedad superficial



Fuente: Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-222

<sup>32</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-222. Colombia.: Invías, 2013

#### 4.2.3. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino

El ensayo corresponde a la norma INV-E 213-13<sup>33</sup>, con el cual se determina la granulometría de los agregados gruesos y finos de manera cuantitativa sobre los tamaños del material que será utilizado en el diseño de la mezcla asfáltica MDC-19. Una muestra de agregado seco, de masa conocida, se separa a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas, con el fin de determinar la distribución de los tamaños de sus partículas.

Los parámetros para el control y obtención del esqueleto mineral más adecuado son el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado y la gradación del mismo. Por lo tanto, el método superpave recomienda la utilización de agregado pétreo con un  $TMN \leq 9.5 \text{ mm}$  cuando se fabriquen mezclas asfálticas que van a soportar bajos a moderados volúmenes de tránsito, se recomienda un  $TMN \leq 12.5 \text{ mm}$  para volúmenes de tránsito moderados a altos y para el caso de volúmenes altos se recomienda utilizar agregados con un  $TMN > 12.5 \text{ mm}$ .<sup>34</sup>

Superpave no tiene un método formal para hacer la selección de la granulometría de los agregados, recomienda como guía la utilización de granulometrías sugeridas dependiendo del TMN del agregado pétreo.

Según los autores Garnica et al.<sup>35</sup>, para especificar la granulometría de un agregado se utilizan dos conceptos: puntos de control y zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica, y corresponden al tamaño máximo nominal. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4,75, 2,36 mm, y 0,3 mm). Ambas zonas forman una banda por la cual la curva granulométrica no debe pasar.

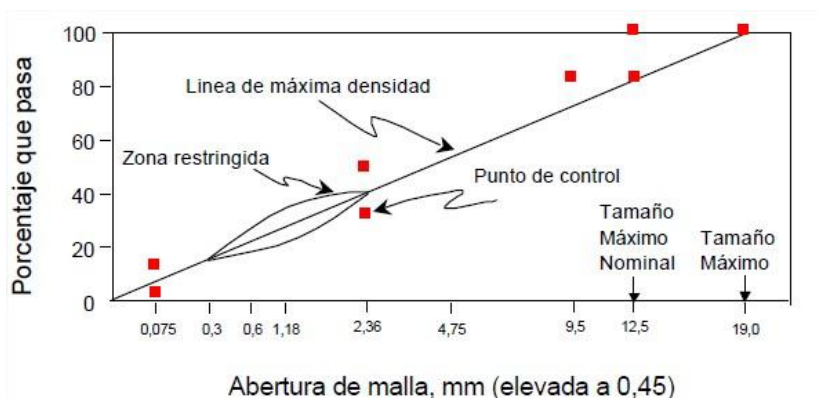
En la ilustración 25 se muestra una gráfica con puntos de control y la zona restringida para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

<sup>33</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-213. Colombia.: Invías, 2013

<sup>34</sup> RONDON QUINTANA, Hugo Alexander, REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos Mariales, construcción y diseño. Ed. 20. Bogotá. Ecoe Ediciones. 2015. ISBN: 9789587711752.

<sup>35</sup> GARNICA ANGAS, Paul et al. Aspectos volumétricos de mezclas asfálticas. México, 2004, No. 246.

Ilustración 25. Límites para la granulometría con tamaño máximo de agregados de 19 mm.



Fuente: GARNICA ANGUAS, Paul. et al. Aspectos volumétricos de mezclas asfálticas. 2004

#### 4.2.4. Diseño Superpave

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema de especificación para materiales asfálticos. El producto final es un sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Este sistema, además de ser una potente herramienta computacional que ayuda en la selección de materiales asfálticos y diseño de la mezcla, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo, bajo la acción vehicular, y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima.<sup>36</sup>

##### 4.2.4.1. Especificaciones superpave para mezclas asfálticas.

El método Superpave, además de incluir un procedimiento más profundo para seleccionar los materiales con base en las condiciones del proyecto, de utilizar un mecanismo de compactación más representativo, inicia el diseño seleccionando la granulometría del agregado. Tanto la selección de la granulometría como el porcentaje de asfalto se hacen utilizando un paquete de especificaciones mucho más completo

<sup>36</sup> GARNICA ANGUAS et al. Op. Cit., p. VII

que el de los otros métodos; incluye especificaciones volumétricas, de relación filler/porcentaje de asfalto efectivo, de susceptibilidad al agua y de requerimientos mecánico o de comportamiento para los niveles II y III. En este método se presentan tres niveles de diseño de mezcla, incluyendo el diseño volumétrico en cada uno de estos niveles.

Los alcances y los ensayos requeridos para los tres niveles se presentan en la ilustración 22:

Ilustración 26. Niveles de diseño de mezclas superpave

| <i>Transito, ESALs</i>                                                                             | <i>Niveles de diseño</i> | <i>Requerimientos de ensayo</i>                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ESALs < 10 <sup>6</sup>                                                                            | 1                        | Diseño volumétrico                                                          |
| 10 <sup>6</sup> < ESALs < 10 <sup>7</sup>                                                          | 2                        | Diseño volumétrico + ensayos de predicción de la performance                |
| ESALs > 10 <sup>7</sup>                                                                            | 3                        | Diseño volumétrico + aumento de los ensayos de predicción de la performance |
| En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad debe ser evaluada usando la norma AASTHO T 283 |                          |                                                                             |

Fuente: Federal Highway Administration. Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. 2001.

#### 4.2.4.2. Parámetros de diseño volumétrico

Un adecuado diseño de una mezcla asfáltica depende principalmente de la selección de los materiales y de las propiedades volumétricas de la mezcla compactada. Los parámetros de mayor influencia son, las densidades del agregado ( $G_{sb}$ ,  $G_{sa}$  y  $G_{se}$ ) y los porcentajes de asfalto y de agregado mineral utilizados.

- Gravedad específica neta ( $G_{sb}$ )

Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable incluyendo vacíos permeables e impermeables del material a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura.

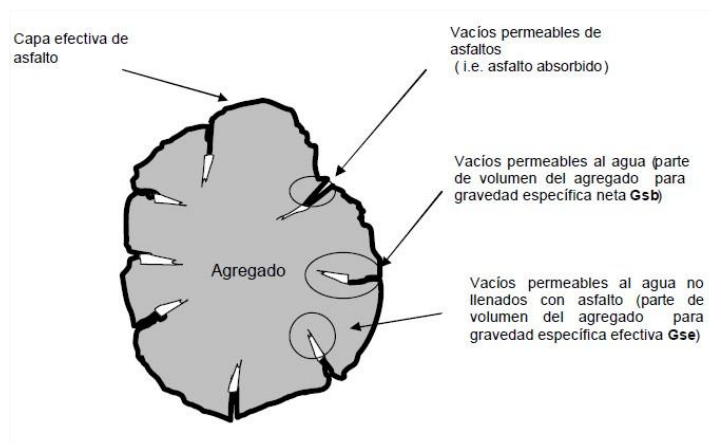
- Gravedad específica aparente ( $G_{sa}$ )

Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

- Gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ )

Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable excluyendo vacíos permeables de asfalto a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura.

Ilustración 27. Parámetros de la mezcla asfáltica



Fuente: GARNICA ANGUAS, Paul. et al. Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. 2005

#### 4.2.4.3. Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica

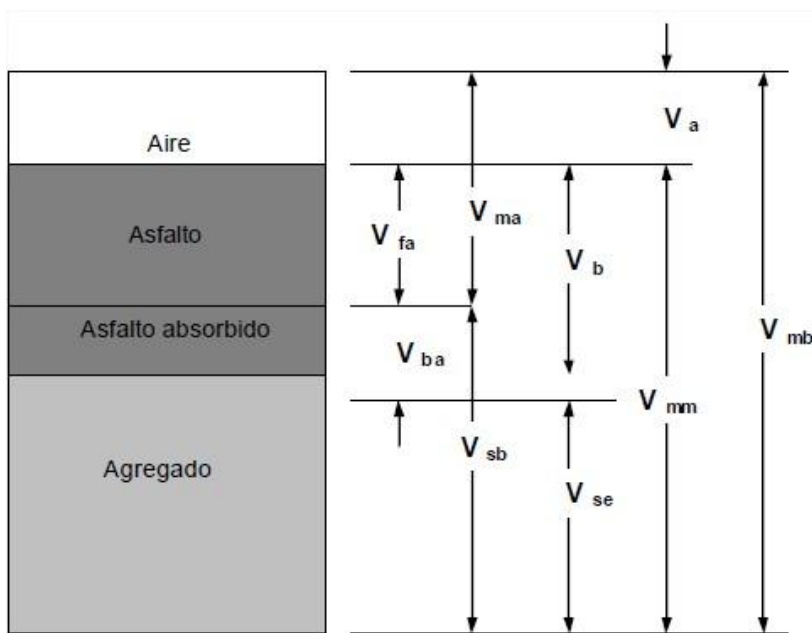
Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire ( $V_a$ ); vacíos en el agregado mineral (VAM); vacíos llenados con asfalto (VFA); proporcionan una indicación del probable comportamiento de la mezcla asfáltica.

El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico. Los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado.

Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene cemento asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de cemento asfáltico efectivo expresado como el porcentaje de VAM.

A continuación, se presenta una ilustración que muestra los componentes de una mezcla asfáltica compactada:

Ilustración 28. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada



Fuente: ANGUAS GARNICA, Paul. et al. Análisis comparativo de los métodos Marshall y superpave para compactación de mezclas asfálticas. 2005

$V_{ma}$  = volumen de vacíos en agregado mineral

$V_{mb}$  = volumen total de la mezcla asfáltica

$V_{mm}$  = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos

$V_{fa}$  = volumen de vacíos llenados con asfalto

$V_a$  = volumen de vacíos de aire

$V_b$  = volumen de asfalto

$V_{ba}$  = volumen de asfalto absorbido

$V_{sb}$  = volumen de agregado mineral (gravidad específica de lamasa)

$V_{se}$  = volumen de agregado mineral (gravidad específica efectiva)

#### 4.2.4.4. Proporción de llenante

Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de llenante; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.

#### 4.2.4.5. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.

El ensayo corresponde a la norma INV-E 725-13<sup>37</sup>, el cual establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta.

La susceptibilidad al daño por humedad se determina preparando un grupo de probetas compactadas en el laboratorio sin aditivos. Las probetas se compactan a manera de obtener un contenido de vacíos con aire entre 6 y 8 %. El grupo se divide en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada probeta debe tener su par en el otro subgrupo. Un subgrupo se mantiene en condición seca, mientras que el otro se satura parcialmente con agua y se acondiciona en un baño de temperatura. La resistencia a la tensión de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad queda indicado por la relación entre las resistencias a la tensión del subgrupo húmedo y las del subgrupo seco.

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.<sup>38</sup>

#### 4.2.5. Ensayos para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica.

De acuerdo con Roberts et al.<sup>39</sup>, las propiedades que se buscan en una mezcla asfáltica cuando es diseñada por Superpave son:

- Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al agrietamiento por baja temperatura.
- Resistencia al envejecimiento a corto y largo plazo.
- Resistencia al fenómeno de stripping.
- Resistencia al daño por humedad.
- Buena fricción y textura superficial.
- Buena trabajabilidad (colocación y compactación de la mezcla).

<sup>37</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-725. Colombia.: Invías, 2013

<sup>38</sup> GARNICA ANGUAS et al. Op. Cit., p. 3

<sup>39</sup> ROBERTS, F.L. et al. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 1996. 2nd ed. Lanham, MD, NAPA Research and Education Foundation.

#### 4.2.5.1. Módulo resiliente.

El módulo resiliente define las propiedades elásticas de un material viscoelástico lineal sometido a una carga sinusoidal y es una medida de la rigidez de las mezclas asfálticas. Se puede considerar como la propiedad más importante debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de las mezclas y hace referencia a la relación entre la deformación del material bajo una carga aplicada y el esfuerzo.

El módulo resiliente de tensión se basa en la deformación recuperable bajo la acción repetida de cargas; y su expresión es la siguiente:

$$MR = \frac{P_{ciclica}}{\delta_h \times t} (l1 - l2 \times \mu) \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

- MR: Módulo resiliente de elasticidad instantáneo o total, MPa, (lbf/pg2);
- h: Deformación horizontal recuperable (instantánea o total), mm (pg.);
- $\mu$ : Relación de Poisson instantánea o total;
- t: Espesor del espécimen, mm (pg.);
- $P_{ciclica} = (P_{m\acute{a}x} - P_{contacto})$ : Carga cíclica aplicada al espécimen, N (lbf);
- $P_{m\acute{a}x}$ : Carga máxima aplicada, N (lbf);
- $P_{contacto}$ : Carga de contacto, N (lbf).

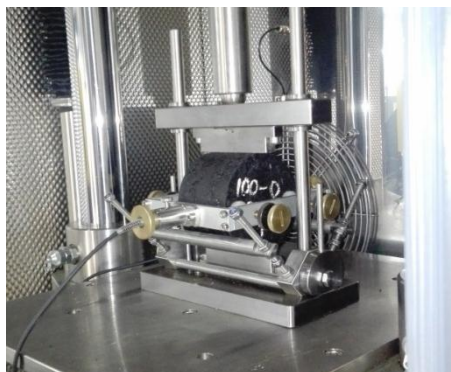
El tipo y duración de las cargas usadas en la prueba de esfuerzo repetido deben simular lo que realmente ocurre en el campo. Cuando la carga de la rueda está a una distancia considerable de un punto dado en el pavimento, el esfuerzo en ese punto es cero. Cuando la carga está directamente sobre el punto dado, la tensión en el punto es máxima.

El ensayo corresponde a la norma INV-E 749-13<sup>40</sup>, se refiere a los procedimientos para preparar y ensayar probetas fabricadas en el laboratorio o recuperadas de mezclas asfálticas de pavimentos, para determinar valores del módulo resiliente, aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida.

La realización de dicho ensayo consiste en aplicar una carga repetida a compresión sobre el espécimen a ensayar, que actúa de forma paralela y a lo largo del plano diametral vertical del espécimen. Esta configuración desarrolla unos esfuerzos a tensión relativamente uniformes que causan la falla a lo largo de dicho plano.

<sup>40</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-749. Colombia.: Invías, 2013

Ilustración 29. Ensayo de tracción indirecta



Fuente: Propia

#### 4.2.5.2. Deformación permanente bajo carga repetida

El fenómeno de ahuellamiento es uno de los principales mecanismos de daño sobre capas asfálticas en estructuras de pavimentos flexibles y semirrígidos. Este fenómeno puede definirse como la deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas. Puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura.<sup>41</sup>

Con base en mediciones realizadas en ensayos de fluencia sobre distintas mezclas asfálticas, han establecido como criterio de falla valores adecuados de rigidez en estos materiales, que permiten evitar el fenómeno de ahuellamiento. (Ver ilustración 30)

<sup>41</sup> RONDÓN QUINTANA, Hugo, et al. Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. Bogotá. Ecoe Ediciones. 2012. ISBN: 978-958-8723-53-2

Ilustración 30. Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas

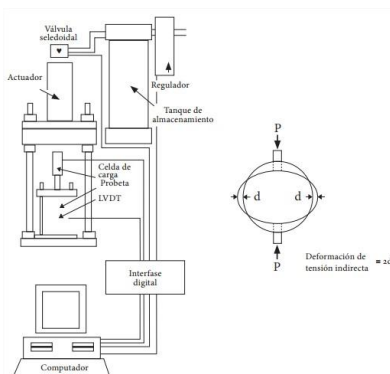
|                      | Factor                 | Cambio en el factor         | Efecto sobre la resistencia al ahuellamiento |
|----------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|
| Agregados pétreos    | Textura superficial    | Liso a rugoso               | Incrementa                                   |
|                      | Forma                  | Redonda a angular           | Incrementa                                   |
|                      | Tamaño                 | Incremento en tamaño máximo | Incrementa                                   |
| Ligante asfáltico    | Rigidez                | Incremento                  | Incrementa                                   |
| Mezcla               | Contenido de ligante   | Incremento                  | Disminuye                                    |
|                      | Contenido de vacíos    | Incremento                  | Disminuye                                    |
|                      | Grado de compactación  | Incremento                  | Incrementa                                   |
| Condiciones de campo | Temperatura            | Incremento                  | Disminuye                                    |
|                      | Esfuerzo o deformación | Incremento                  | Disminuye                                    |
|                      | Repeticiones de carga  | Incremento                  | Disminuye                                    |
|                      | Agua                   | Seco a húmedo               | Disminuye                                    |

Fuente: RONDÓN QUINTANA, Hugo, et al. Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. 2012.

Uno de los equipos más utilizados para realizar ensayos de deformación permanente es el Nottingham Asphalt Tester (NAT). En este equipo puede evaluarse el módulo resiliente y dinámico de mezclas asfálticas y la resistencia a fatiga y al ahuellamiento al mismo tiempo. El principio del NAT es el de someter un espécimen cilíndrico a cargas repetitivas de compresión con una señal de carga a través del plano vertical diametral hasta la falla. Este equipo usa probetas cilíndricas de 10 o 15 cm de diámetro.

Algunos de los equipos más utilizados en el mundo para realizar ensayos de este tipo son el Asphalt Pavement Analyzer (APA), Wheel-Track de Hamburgo y French Pavement Rutting Tester (FPRT).

Ilustración 31. Diagrama del mecanismo del NAT



Fuente: RONDÓN QUINTANA, Hugo, et al. Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. 2012.

### 5.3. MARCO LEGAL

En la tabla 1 se presenta la normativa tomada como referencia para el desarrollo de esta investigación, estas normas son esenciales para el desarrollo de los diferentes ensayos de laboratorio realizados para el diseño de la mezcla asfáltica.

Tabla 1. Marco legal

| <b>Norma</b>                                                                                               | <b>Título</b>                                                                                                            | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>INVIAS</b><br><b>Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras</b><br><b>Artículo 410-13</b> | Suministro de cemento asfáltico.                                                                                         | Esta especificación se refiere al suministro de cemento asfáltico para la fabricación de mezclas asfálticas que se elaboren de conformidad con lo establecido en los artículos correspondientes de estas especificaciones.                                              |
| <b>INVIAS</b><br><b>Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras</b><br><b>Artículo 450-13</b> | Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico).                                               | Especificaciones de mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo) y sus criterios de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall.                                                                                     |
| <b>INV – E 725 - 13</b>                                                                                    | Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta | Esta norma de ensayo establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta.                                                                          |
| <b>INV – E 749– 13</b>                                                                                     | Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas.                                  | Esta norma se refiere a los procedimientos para preparar y ensayar probetas fabricadas en el laboratorio o recuperadas de mezclas asfálticas de pavimentos, para determinar valores del módulo resiliente, aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida. |
| <b>UNE-EN 12697-24</b>                                                                                     | Mezclas bituminosas. métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. parte 24: resistencia a la fatiga.          | Esta norma específica los métodos para caracterizar la fatiga de las mezclas bituminosas mediante ensayos alternativos, incluyendo los ensayos de flexión y los ensayos de tracción directa o indirecta.                                                                |

## 6. DISEÑO METODOLÓGICO

### 6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La presente Investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, el asfalto y la mezcla asfáltica. Además, esta investigación permite una comparación con una mezcla convencional donde se analizó los resultados con el fin de sugerir una mezcla con un porcentaje de agregado reciclado óptimo que cumpla con las especificaciones requeridas.

#### TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio es una investigación de tipo experimental. La cual se realizó al evaluar la influencia en porcentaje que tiene el agregado reciclado en el módulo resiliente de una mezcla asfáltica según la especificación 450-13 del Instituto Nacional de Vías. Para cumplir con los requerimientos impuestos por esta especificación se procedió a caracterizar los agregados y el asfalto mediante ensayos de laboratorio establecidos en las normas del INVIAS. Luego se realizaron las mezclas asfálticas propuestas por el asesor disciplinar y se evaluó el módulo resiliente y la deformación permanente.

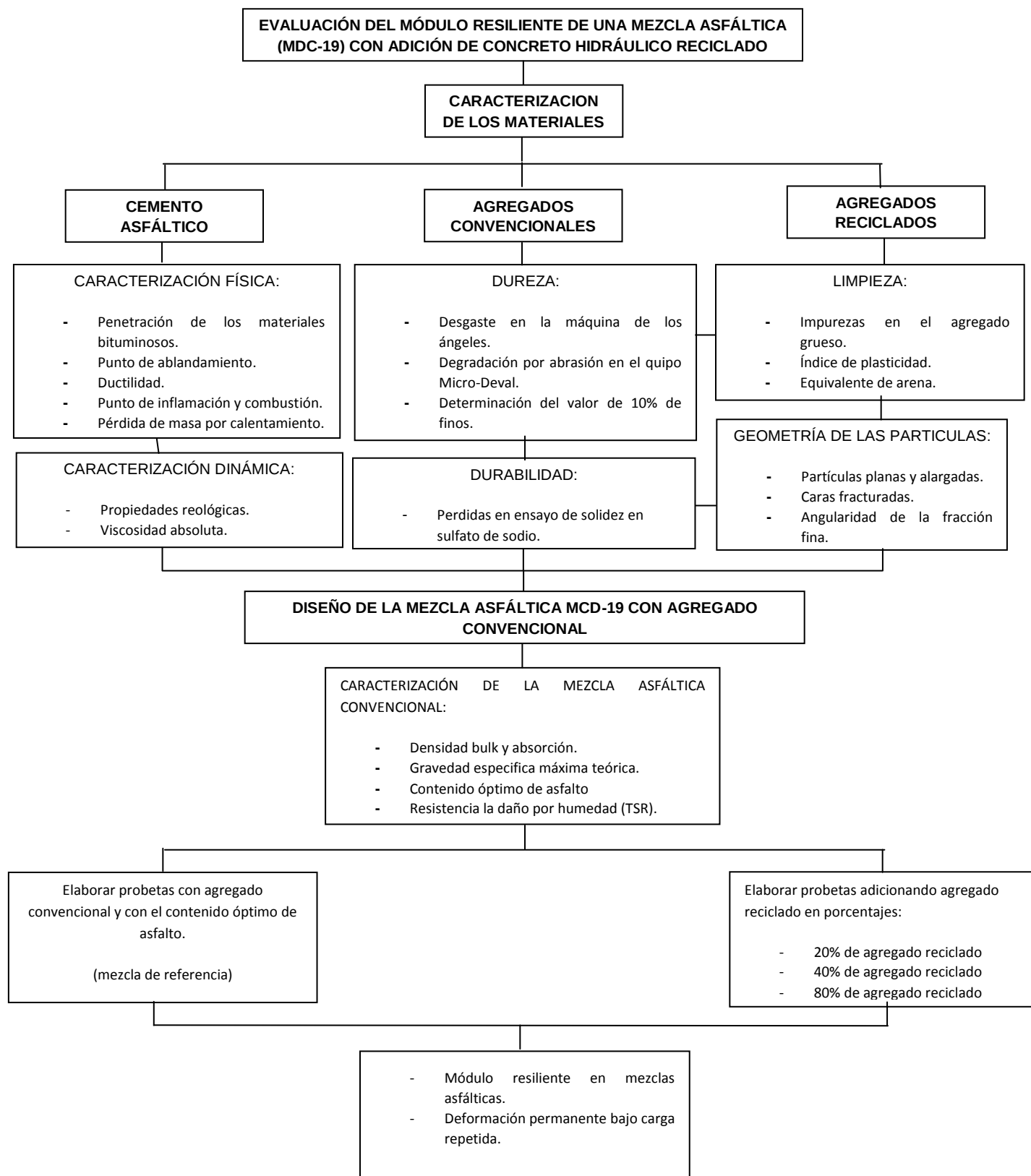
### 6.2. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

En la tabla 2 se definen las variables que intervienen en el desarrollo de esta investigación, se definen las variables independientes como las dependientes, así como su unidad de medida.

Tabla 2. Definición y operacionalización de las variables

|                                 | Variable                                         | Indicador                          | Descripción                                                                                                                 | Medida                                |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Variables independientes</b> | Adición de concreto hidráulico reciclado.        | Porcentaje de agregado reciclado   | Se definió el porcentaje con el asesor disciplinar.                                                                         | % en volumen                          |
| <b>Variables dependientes</b>   | Módulo resiliente de la mezcla densa en caliente | Esfuerzo máximo                    | Se midió el módulo a tres temperaturas y tres frecuencias especificadas por la norma y sugeridas por el asesor disciplinar. | MPa                                   |
|                                 |                                                  | Deformación unitaria máxima        |                                                                                                                             | Adimensional                          |
| <b>Variables intervinientes</b> | Contenido óptimo de asfalto.                     | Porcentaje de asfalto en la mezcla | Se realizaron mezclas con distintos porcentajes de asfalto con el fin de determinar el contenido óptimo del mismo.          | % de asfalto respecto a los agregados |

### 6.3. DISEÑO EXPERIMENTAL



#### 6.4. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

En la tabla 3 se hace un resumen de las fases que se realizaron a lo largo de esta investigación, así como las actividades respectivas de cada fase para dar cumplimiento a los objetivos planteados inicialmente:

Tabla 3. Fases de la investigación.

| FASES DE LA INVESTIGACIÓN                                                                                                                                                                        | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Caracterizar propiedades físicas y mecánicas de los agregados naturales, reciclados y el cemento asfáltico, tomando de referencia las especificaciones del Instituto nacional de vías.</b> | <p><b>Actividad 1.1</b> Caracterizar propiedades físicas y del cemento asfáltico.</p> <p><b>Actividad 1.2</b> Caracterizar las propiedades reológicas del cemento asfáltico</p> <p><b>Actividad 1.3</b> Caracterizar las propiedades físicas de los agregados naturales y reciclados.</p>                                                                                                                                               |
| <b>2. Diseñar una mezcla asfáltica convencional (MDC-19) con agregado natural.</b>                                                                                                               | <p><b>Actividad 2.1</b> Seleccionar la granulometría y dosificar las proporciones de agregado para utilizar en la mezcla asfáltica.</p> <p><b>Actividad 2.2</b> Determinar el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla convencional.</p> <p><b>Actividad 2.3</b> Evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.</p> <p><b>Actividad 2.4</b> Evaluar el daño por humedad (TSR) de la mezcla asfáltica convencional.</p> |
| <b>3. Evaluar el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica (MDC-19) con adición de concreto hidráulico reciclado mediante ensayos de módulo resiliente y deformación permanente.</b>        | <p><b>Actividad 3.1</b> Fabricar las mezclas con agregado natural y con la adición de agregado reciclado sugerido.</p> <p><b>Actividad 3.2</b> Evaluar el módulo resiliente de cada una de las mezclas fabricadas.</p> <p><b>Actividad 3.3</b> Evaluar la deformación permanente bajo carga repetida de cada una de las mezclas fabricadas.</p>                                                                                         |

## 6.5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la tabla 4 se establece el cronograma de las actividades que se realizaron para dar cumplimiento a las fases planteadas anteriormente, las actividades se desarrollaron dentro de las fechas establecidas de acuerdo a la complejidad de la actividad.

Tabla 4. Cronograma de actividades

| FASE   | ACTIVIDAD                                                                                                               | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| FASE 1 | <b>Actividad 1.1</b> Caracterizar las propiedades físicas del cemento asfáltico.                                        | X    | X    |      |      |      |
|        | <b>Actividad 1.2</b> Caracterizar las propiedades reológicas del cemento asfáltico.                                     | x    | X    |      |      |      |
|        | <b>Actividad 1.3</b> Caracterizar los agregados naturales y reciclados.                                                 |      | X    | x    |      |      |
| FASE 2 | <b>Actividad 2.1</b> Diseñar mediante la metodología superpave una mezcla asfáltica con el contenido óptimo de asfalto. |      |      | x    | X    |      |
|        | <b>Actividad 2.2</b> Evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica,                                       |      |      |      | X    |      |
|        | <b>Actividad 2.3</b> Evaluar mediante el ensayo TSR el daño por humedad.                                                |      |      |      | X    |      |
| FASE 3 | <b>Actividad 3.1</b> Fabricar probetas de mezcla convencional y con concreto hidráulico reciclado.                      |      |      |      | X    | X    |
|        | <b>Actividad 3.2</b> Evaluar el módulo resiliente de cada una de las mezclas asfálticas                                 |      |      |      | X    | X    |
|        | <b>Actividad 3.3</b> Evaluar la deformación permanente bajo carga repetida para cada una de las mezclas asfálticas.     |      |      |      | X    | X    |

## 6.6. PRESUPUESTO

En la tabla 5 se proporciona un estimado del costo de los ensayos realizados, cabe resaltar que estos ensayos se realizaron en la Universidad Javeriana de Bogotá la cual nos facilitaron los equipos requeridos para los ensayos descritos anteriormente. Al final se presenta el costo total de estos ensayos:

Tabla 5. Presupuesto

| RECURSOS DE LA UNIVERSIDAD |                                                                                 |          |                |                      |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------|----------------------|
| N°                         | ITEM                                                                            | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR                |
| AGREGADOS                  |                                                                                 |          |                |                      |
| 1                          | GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION                                                 | 4        | \$ 72756,0     | \$ 291024,0          |
| 2                          | GRANULOMETRIA                                                                   | 2        | \$ 80687,0     | \$ 161374,0          |
| 3                          | DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES                                                 | 2        | \$ 128909,0    | \$ 257818,0          |
| 4                          | MICRO-DEVAL                                                                     | 2        | \$ 245500,0    | \$ 491000,0          |
| 5                          | 10% FINOS                                                                       | 2        | \$ 218900,0    | \$ 437800,0          |
| 6                          | PESO ESPECIFICO DE LOS SUELOS                                                   | 2        | \$ 72756,0     | \$ 145512,0          |
| ASFALTO                    |                                                                                 |          |                |                      |
| 7                          | PESO ESPECIFICO                                                                 | 1        | \$ 50126,0     | \$ 50126,0           |
| 8                          | PERDIDA DE MASA                                                                 | 1        | \$ 80000,0     | \$ 80000,0           |
| 9                          | VISCOCIDAD BRUKFREL                                                             | 1        | \$ 289226,0    | \$ 289226,0          |
| 10                         | PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN                                               | 1        | \$ 76780,0     | \$ 76780,0           |
| 11                         | DUCTILIDAD                                                                      | 1        | \$ 92003,0     | \$ 92003,0           |
| 12                         | PENETRACIÓN                                                                     | 1        | \$ 71400,0     | \$ 71400,0           |
| 13                         | PUNTO DE ABLANDAMIENTO                                                          | 1        | \$ 87129,0     | \$ 87129,0           |
| 14                         | DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL ASFALTO DSR                     | 1        | \$ 1100129,0   | \$ 1100129,0         |
| MEZCLA ASFÁLTICA           |                                                                                 |          |                |                      |
| 15                         | GRAVEDAD ESPECÍFICA MAXIMA TEORICA                                              | 4        | \$ 98982,0     | \$ 395928,0          |
| 16                         | GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS                       | 4        | \$ 44800,0     | \$ 179200,0          |
| 17                         | TSR RESISTENCIA DE UNA MEZCLA BITUMINOSA COMPACTADA AL DAÑO CAUSADO POR HUMEDAD | 4        | \$ 730627,0    | \$ 2922508,0         |
| 18                         | ENSAYO DE TENSION INDIRECTA PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE                | 4        | \$ 1051321,0   | \$ 4205284,0         |
| 19                         | DEFORMACIÓN PERMANENTE – CARGA REPETIDA                                         | 4        | \$ 464243,0    | \$ 1856972,0         |
|                            |                                                                                 |          | <b>TOTAL</b>   | <b>\$ 13191213,0</b> |

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS NATURALES, RECICLADOS Y EL CEMENTO ASFÁLTICO, TOMANDO DE REFERENCIA LAS ESPECIFICACIONES DEL INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS.

La caracterización del cemento asfáltico y de los agregados en Colombia está regida por las Normas del Instituto Nacional de Vías (Invías 2013). En el desarrollo de la investigación se empleó un cemento asfáltico penetración 60-70, el cual fue suministrado por la empresa Concescol S.A., procedente de la ciudad de Barrancabermeja en el departamento de Santander Colombia.

El agregado natural fue suministrado por la empresa Concescol S.A., empleando dos tamaños de agregado natural. Un material grueso que proviene del río Guayuriba en el departamento del Meta, y un material fino que proviene del municipio de Coello en el departamento del Tolima.

El Concreto hidráulico reciclado fue suministrado por la empresa Reciclados Industriales, en la ciudad de Bogotá.

En el cemento asfáltico se realizaron ensayos de control de calidad, contrastados con los valores correspondientes a los requisitos para ser parte constituyente de la mezcla asfáltica. Adicionalmente se realizaron ensayos para evaluar la durabilidad y la determinación del grado de desempeño (PG) del asfalto.

En el caso de los agregados naturales y el concreto hidráulico reciclado se realizaron ensayos de laboratorio para conocer si el agregado pétreo cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser parte constituyente de la mezcla asfáltica, ensayos de durabilidad, dureza, geometría, y limpieza son algunos de los ensayos que se realizaron sobre los agregados naturales y reciclados

### 7.1.1. Caracterización del cemento asfáltico

- Caracterización física

A continuación, se presenta la siguiente tabla en la cual se resumen los resultados de cada ensayo realizado para la caracterización del cemento asfáltico de acuerdo con las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías:

Tabla 6. Resumen caracterización del cemento asfáltico

| ENSAYO                                                                                                | NORMA      | ESPECIFICACIÓN |       | RESULTADO |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|-------|-----------|
|                                                                                                       |            | MIN.           | MAX.  |           |
| Penetración de los materiales bituminosos                                                             | INV 706-13 | 60             | 70    | 63        |
| Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)                           | INV 712-13 | 48             | 54    | 51.2      |
| Índice de penetración de los cementos asfálticos                                                      | INV 724-13 | -1.2           | + 0.6 | -0.32     |
| Ductilidad de los materiales asfálticos                                                               | INV 702-13 | 100            | -     | >100      |
| Punto de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland                                  | INV 709-13 | 230            | -     | 240.5     |
| Determinación de la Viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional                       | INV 717-13 | 0              | -     | 209       |
| Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria               |            |                |       |           |
| Efectos del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria                           | INV 720-13 | 0              | 0.8   | 0.749     |
| Penetración de los materiales bituminosos (residuo)                                                   | INV 706-13 | 50             | -     | 50,4      |
| Incremento en el punto de ablandamiento (residuo)                                                     | INV 712-13 | -              | 9     | 7.8       |
| Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original | INV 717-13 | -              | 4     | 3.3       |

Fuente: Propia

Según los resultados obtenidos en la caracterización física del cemento asfáltico se determinó que este cumple con todos los parámetros que exige la especificación 410 para ser utilizado como parte constituyente de una mezcla asfáltica.

- Determinación del Grado de desempeño (PG)

Para la clasificación por grado de desempeño o PG (Performance Grade) se prueban dos temperaturas a las cuales se controlan los parámetros:

- $G^*/\text{Sen}(\delta)$  como la temperatura máxima promedio de diseño para el control de las fallas por ahuellamiento.
- $G^*\text{Sen}(\delta)$  se ensaya a una temperatura moderada que permita un mejor desempeño que controle la falla por fatiga.

En el ensayo, el umbral para  $G^*/\text{Sen}(\delta)$  tendrá un valor mayor a 1 kPa para una muestra fresca a una frecuencia de 10 rad/s (1,59 Hz) bajo un porcentaje de deformación de 12,5%.

Para el residuo del horno rotatorio de película delgada (RTFOT) debe ser mayor a 2,2 kPa con la misma frecuencia a un 10% de deformación.

Para el control de las fallas por fatiga  $G^*\text{Sen}(\delta)$  debe ser menor a 5000 kPa con un 10% de deformación, para una muestra envejecida en el equipo de envejecimiento a presión, PAV.

Luego, para la obtención de los parámetros que describen el comportamiento reológico ( $G^*$ ,  $\delta$ ,  $G^*\text{Sen}(\delta)$ ,  $G^*/\text{Sen}(\delta)$ ) del cemento asfáltico evaluado, se implementó el Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de grado de desempeño:

|                          |                                                  |
|--------------------------|--------------------------------------------------|
| Parámetro de referencia: | $\frac{G^*}{\text{sen}\delta} > 1,0 \text{ Kpa}$ |
|--------------------------|--------------------------------------------------|

| Cemento asfáltico original |                     |                    |            |             |             |                                 |                                 |
|----------------------------|---------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Temperatura<br>°C          | Frecuencia<br>rad/s | Angulo<br>$\delta$ | $G'$<br>Pa | $G''$<br>Pa | $G^*$<br>Pa | $ G^* /\text{sen}\delta$<br>Kpa | $ G^* .\text{sen}\delta$<br>Kpa |
| 58                         | 10                  | 84,145             | 455,6      | 4443,3      | 4466,9      | 4,49                            | 4,4433                          |
| 64                         | 10                  | 85,888             | 135,48     | 1884,4      | 1889,1      | 1,8941                          | 1,8844                          |
| 70                         | 10                  | 87,196             | 41,76      | 852,52      | 853,56      | 0,85459                         | 0,85252                         |

Parámetro de referencia:

$$\frac{G^*}{\text{sen}\delta} \geq 2,2 \text{ Kpa}$$

| Residuo del cemento asfáltico RTFOT |                     |                    |          |           |          |                         |                         |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|----------|-----------|----------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatura<br>°C                   | Frecuencia<br>rad/s | Angulo<br>$\delta$ | G'<br>Pa | G''<br>Pa | G*<br>Pa | G* /sen $\delta$<br>Kpa | G* .sen $\delta$<br>Kpa |
| 58                                  | 10                  | 79,592             | 1751,5   | 9537,9    | 9697,7   | 9,8606                  | 9,5379                  |
| 64                                  | 10                  | 82,424             | 548,32   | 4122,7    | 4159,2   | 4,1957                  | 4,1227                  |
| 70                                  | 10                  | 84,574             | 174,7    | 1838,9    | 1847,1   | 1,8557                  | 1,8389                  |

Parámetro de referencia:

$$G^* \cdot \text{sen}\delta \leq 5000 \text{ Kpa}$$

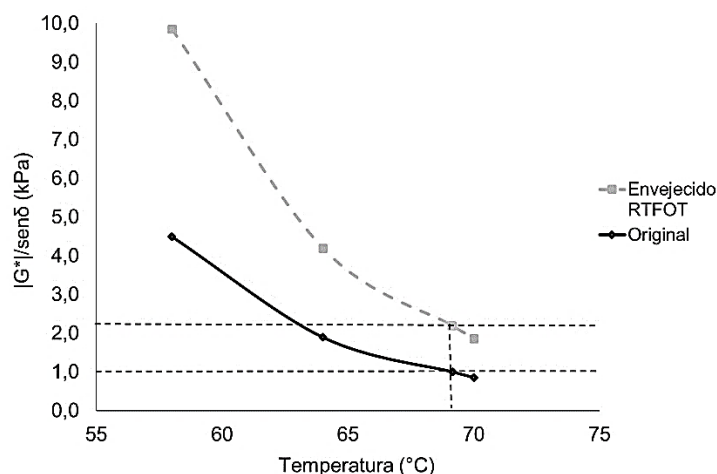
| Residuo del cemento asfáltico PAV |                     |                    |          |           |          |                         |                         |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|----------|-----------|----------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatura<br>°C                 | Frecuencia<br>rad/s | Angulo<br>$\delta$ | G'<br>Pa | G''<br>Pa | G*<br>Pa | G* /sen $\delta$<br>Kpa | G* .sen $\delta$<br>Kpa |
| 19                                | 10                  | 41,691             | 6755700  | 6016800   | 9046700  | 13602                   | 6016,8                  |
| 22                                | 10                  | 44,299             | 4368111  | 4262333   | 6103222  | 8739                    | 4262                    |
| 25                                | 10                  | 47,564             | 2552400  | 2791600   | 3782300  | 5125                    | 2792                    |

El valor central se define como la temperatura a la cual el pavimento presentará un comportamiento adecuado, en el cual no falle por ahuellamiento ni por fatiga. El valor superior simboliza el límite de temperaturas que sobrepasa los parámetros mínimos requeridos para evitar dichos daños. El valor inferior corresponde al límite de temperatura en el cual no se cumplen los llamados requerimientos mínimos para evitar las fallas.

La variación de los parámetros de control, en cuanto a viscosidad se presentan a continuación. En la gráfica 1, se presenta la variación de  $G^*/\text{Sen}(\delta)$  a las diferentes temperaturas.

Primero se analizó la condición en la que no está envejecido el asfalto es decir el cemento asfáltico original. Es importante resaltar que este es más susceptible a sufrir fenómenos de ahuellamiento a medida que se incrementa la temperatura, por lo que el parámetro de  $G^*/\text{sen}(\delta)$  tiende a reducirse, en la misma grafica la condición para el asfalto envejecido en RTFOT conserva el mismo comportamiento. Pues, aunque la tendencia de decremento de  $G^*/\text{Sen}(\delta)$  es similar a lo ocurrido en el cemento asfáltico original, se observa que este arroja valores mayores a los del cemento asfáltico original.

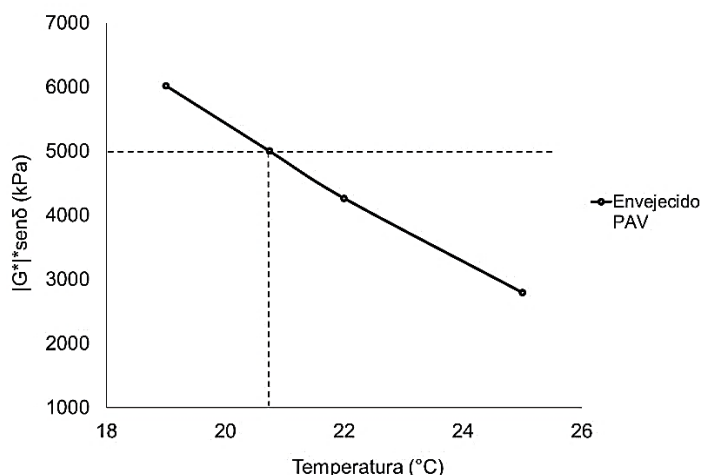
Gráfica 1. Valores de  $G^*/\sin(\delta)$  para el cemento asfáltico original y envejecido en RTFOT a diferentes temperaturas.



Para completar la clasificación PG es necesario evaluar el residuo del asfalto envejecido en el PAV, el cual arroja la mínima temperatura a la cual el asfalto puede trabajar sin sufrir fisuras asociadas con el fenómeno de fatiga, en la gráfica 2 se presentan dichos resultados.

El comportamiento obtenido para el parámetro de control para bajas temperaturas describe la misma tendencia que el obtenido en el parámetro de control para altas temperaturas, siendo que el valor de  $G^* \cdot \sin(\delta)$  decrece al aumentar la temperatura.

Gráfica 2. Valores de  $G^* \cdot \sin(\delta)$  para el cemento asfáltico envejecido en PAV a diferentes temperaturas.

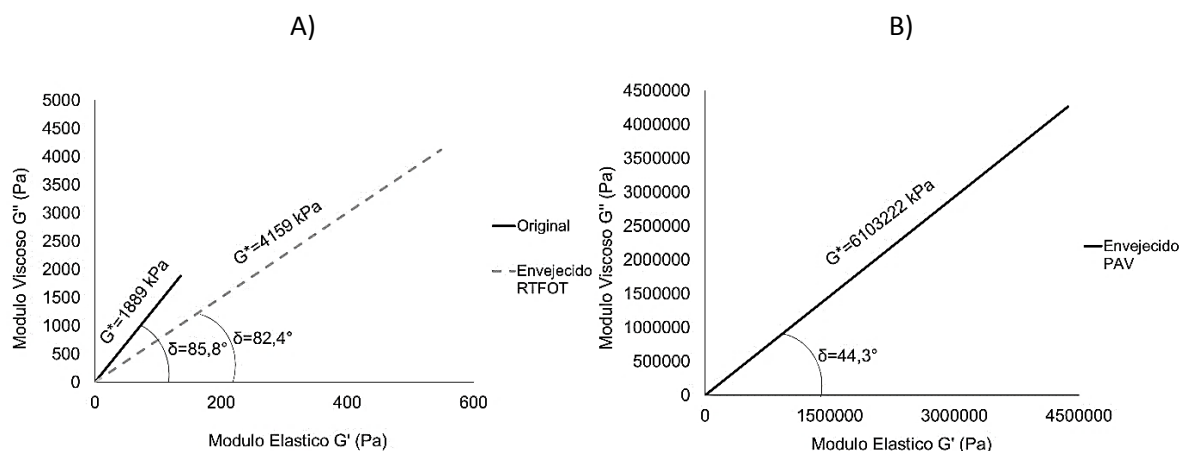


De acuerdo a lo anterior los parámetros de control para altas y bajas temperaturas para que el pavimento no falle por ahuellamiento ni por fatiga son 69 °C y 21 °C

respectivamente, es decir que la clasificación PG para el cemento asfáltico utilizado en esta investigación es: PG 69 – 21.

Para evaluar la variación que experimentó el cemento asfáltico en cuanto a su módulo complejo y ángulo de fase se tomó constante la temperatura de clasificación intermedia para la cual es 64 °C para el cemento asfáltico original y envejecido en RTOFT y 22 °C para el envejecido en PAV.

Gráfica 3. Evolución del Angulo de fase evaluado a la temperatura PG intermedia. A) Cemento asfáltico original y envejecido RTOFT, B) Cemento asfáltico envejecido PAV.



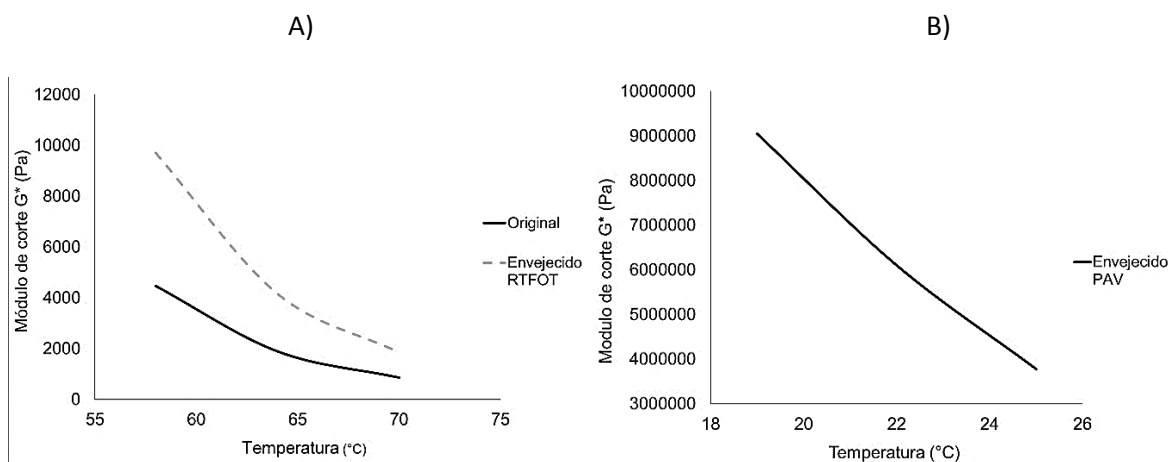
En la gráfica 3, se evaluaron los ángulos de fase para el cemento asfáltico original y los envejecidos en RTOFT y PAV, en la misma temperatura se puede observar que el ángulo reportado inicialmente para el cemento asfáltico original presenta mayor valor que el reportado para el envejecido en RTOFT al igual que el reportado para el envejecido en PAV. Esto implica un comportamiento más viscoso del primero y más rígido del segundo y del tercero. Lo anterior se traduce en la resistencia a las fallas más frecuentes, es decir el material más blando, cuyo ángulo de fase es mayor resistirá mejor a las fallas por fatiga y el más rígido resistirá mejor a las fallas por ahuellamiento.

Adicionalmente el ángulo de fase reportado por el cemento asfáltico original mostro un valor muy cercano a los  $90^\circ$  al igual que el envejecido en RTFOT. Un ángulo de 90 grados muestra un comportamiento meramente viscoso.

En cuanto al módulo de corte o modulo complejo  $G^*$ , al rigidizarse el asfalto por la oxidación lo cual ocurre por el fenómeno de envejecimiento, se incrementa el módulo de corte, quien es directamente proporcional al módulo elástico y viscoso.

Posteriormente en la gráfica 4 se analiza la variación del módulo complejo con las temperaturas de ensayo para el cemento asfáltico original, así como el envejecido en RTFOT y PAV:

Gráfica 4. Variación del módulo complejo  $G^*$  para las temperaturas de ensayo A) Cemento Asfáltico original y Envejecido en RTFOT, B) Cemento asfáltico envejecido en PAV.

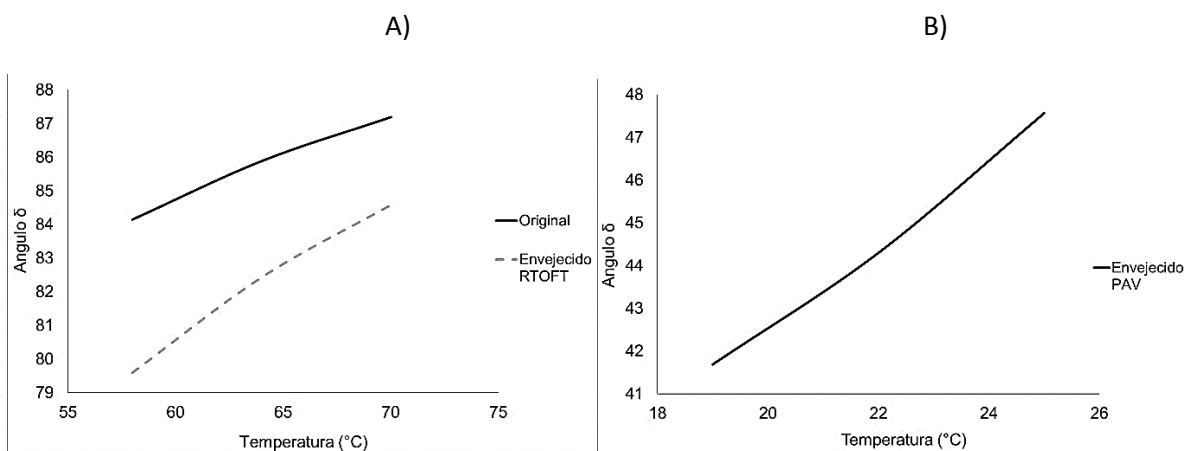


A bajas temperaturas o altas frecuencias, los asfaltos tienden a aproximarse al valor límite de  $G^*$  de aproximadamente 1 GPa, El valor de 1 GPa refleja la rigidez del enlace carbono-hidrogeno de los asfaltos cuándo éstos alcanzan un mínimo equilibrio termodinámico. Se observa en la gráfica 4 que cuando aumenta la temperatura decrece el modulo complejo  $G^*$  lo cual refleja una disminución en la resistencia a la deformación.

De acuerdo a lo anterior es deseable obtener valores altos de  $G^*$ , pues representarían una alta resistencia a la deformación y por lo tanto al ahuellamiento.

En la gráfica 5 se observa que cuando la temperatura aumenta el ángulo de fase también aumenta lo cual refleja un decrecimiento en la elasticidad o habilidad de almacenar energía. Adicionalmente se observa que, a altas temperaturas, los valores de  $\delta$  se aproximan a 90 °C para todos los asfaltos que reflejan un comportamiento completamente viscoso, o completa disipación de la energía en un fluido viscoso.

Gráfica 5. Variación del ángulo de fase  $\delta$  para las temperaturas de ensayo A) Cemento Asfáltico original y Envejecido en RTFOT, B) Cemento asfáltico envejecido en PAV.



### 7.1.2. Caracterización agregado natural y agregado reciclado.

En la tabla 7 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos para la caracterización de los agregados naturales y reciclados de acuerdo con las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

Tabla 7. Resumen de resultados caracterización agregados naturales y reciclados

| ENSAYO                                                                             | NORMA                    | ESPECIFICACIÓN<br>Rodadura/Intermedia/Base |          |           | RESULTADO                   |                             |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                                                    |                          | NT1                                        | NT2      | NT3       | Reciclado                   | Natural                     |
| Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%)                                  | INV 218-13               | 25/35/-                                    | 25/35/35 | 25/35/35  | 29                          | 17                          |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).                     | INV 238-13               | -                                          | 25/30/30 | 20/25/25  | 15                          | 7                           |
| Resistencia mecánica por el método de 10% de finos.                                | INV 224-13               | -                                          | -        | 110/90/75 | 156,3                       | 320,3                       |
| Coeficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo                          | INV 232-13               | 0,45                                       | 0,45     | 0,45      | 0,94                        | 0,98                        |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%)                   | INV 220-13               | 18                                         | 18       | 18        | 14,8                        | 7,2                         |
| Impurezas en agregado grueso, máximo (%)                                           | INV 237-13               | 0,5                                        | 0,5      | 0,5       | 2,8                         | 0,3                         |
| Índice de plasticidad, máximo (%)                                                  | INV 125-13<br>INV 126-13 | NP                                         | NP       | NP        | NP                          | NP                          |
| Equivalente de arena, mínimo (%)                                                   | INV 133-13               | 50                                         | 50       | 50        | 79                          | 80                          |
| Valor de azul de metileno, máximo (%)                                              | INV 235-13               | 10                                         | 10       | 10        | 2                           | 4                           |
| Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)                            | INV 240-13               | 10                                         | 10       | 10        | 0                           | 0                           |
| Caras fracturadas, mínimo (%)                                                      | INV 227-13               | 75/60/-                                    | 75/75/60 | 85/75/60  | 100                         | 97                          |
| Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)                              | INV 239-13               | 40/35/-                                    | 45/40/35 | 45/40/35  | 53                          | 47                          |
| Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso. | INV 223-13               | -                                          | -        | -         | 2338<br>2474<br>2707<br>5,8 | 2738<br>2758<br>2795<br>0,7 |
| Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.   | INV 222-13               | -                                          | -        | -         | 2465<br>2563<br>2734<br>4,0 | 2724<br>2741<br>2771<br>0,6 |

Fuente: Propia

Mediante los ensayos realizados en el laboratorio, se logra determinar que tanto el agregado natural como el agregado reciclado cumplen con los valores de aceptación descritos en la especificación 450 del Invías, cabe resaltar que el agregado reciclado

presentó una mayor absorción lo cual indica un mayor contenido de vacíos en su estructura mineralógica con respecto al agregado natural, esto implica que al tener mayor cantidad de este material en la mezcla asfáltica la misma presentara más vacíos por lo cual la mezcla necesitara más asfalto.

#### 7.1.2.1. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino

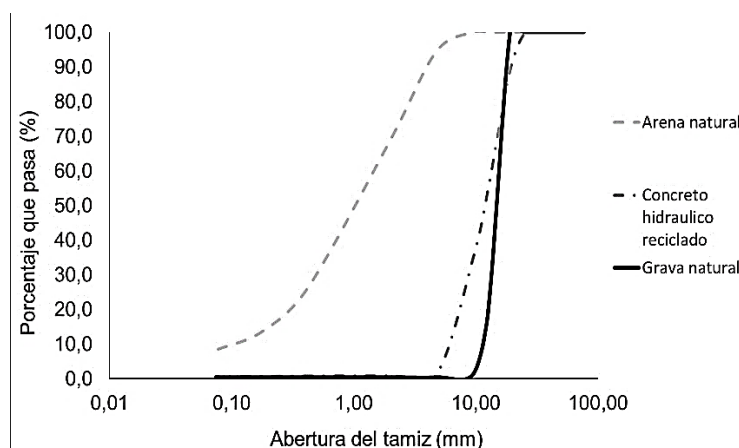
En la tabla 8 se muestra el análisis granulométrico realizado para determinar la distribución de los tamaños de las partículas de agregados naturales y reciclados, por medio de tamices de abertura progresivamente decreciente tomando como referencia la norma INV-E 213-13, así mismo se presenta la gráfica de los respectivos datos.

Tabla 8. Análisis granulométrico por tamices

| ABER. DEL TAMIZ |        | Grava natural (%) | Arena natural (%) | Concreto hidráulico reciclado (%) |
|-----------------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|
| (mm)            | (pulg) | PASA              | PASA              | PASA                              |
| 76,10           | 3      | 100,0             | 100,0             | 100,0                             |
| 64,00           | 2½     | 100,0             | 100,0             | 100,0                             |
| 50,80           | 2      | 100,0             | 100,0             | 100,0                             |
| 38,1            | 1½     | 100,0             | 100,0             | 100,0                             |
| 25,4            | 1      | 100,0             | 100,0             | 100,0                             |
| 19              | ¾      | 100,0             | 100,0             | 89,1                              |
| 12,7            | ½      | 20,8              | 100,0             | 55,6                              |
| 9,53            | ⅜      | 1,4               | 100,0             | 35,2                              |
| 4,76            | No 4   | 0,4               | 94,6              | 1,4                               |
| 2,0             | No 10  | 0,4               | 69,1              | 0,9                               |
| 0,425           | No 40  | 0,4               | 26,5              | 0,9                               |
| 0,177           | No 80  | 0,4               | 13,6              | 0,7                               |
| 0,074           | No 200 | 0,4               | 8,3               | 0,6                               |
| Fondo           |        | 0,0               | 0,0               | 0,0                               |

Fuente: Propia

Gráfica 6. Representación gráfica análisis granulométrico por tamices.



Se procede a revisar dentro de los límites estipulados en la especificación 450 de INVIAS para establecer un ajuste granulométrico con el cual se trabajará dentro de los parámetros establecidos, posteriormente este ajuste se adoptará para realizar las dosificaciones necesarias de material reciclado y material natural para el diseño de la mezcla MDC-19.

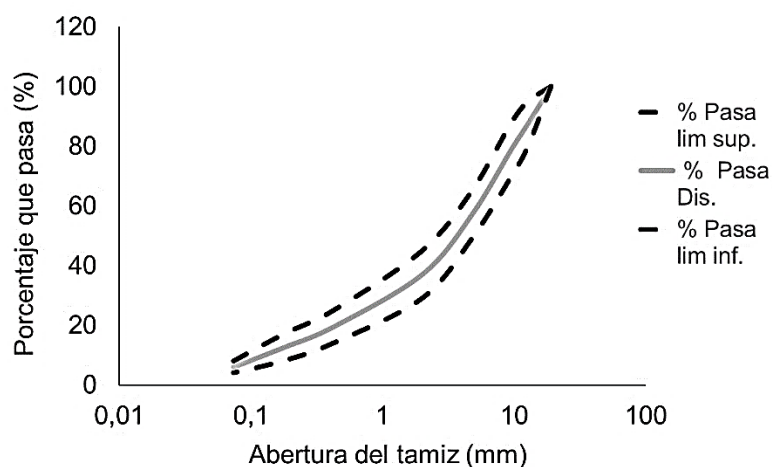
A continuación, se presentan los límites establecidos en el artículo 450 además del ajuste granulométrico y su respectiva gráfica:

Tabla 9. Franja granulométrica para mezclas asfálticas en caliente (MDC-19) gradación continua

| Tamiz | (mm)  | % Pasa lim sup. | % Pasa lim inf. | % Pasa Dis. |
|-------|-------|-----------------|-----------------|-------------|
| 3/4'  | 19    | 100             | 100             | 100,0       |
| 1/2'  | 12,7  | 95              | 80              | 87,5        |
| 3/8'  | 9,53  | 88              | 70              | 79,0        |
| #4    | 4,76  | 65              | 49              | 57,0        |
| #10   | 2,0   | 45              | 29              | 37,0        |
| #40   | 0,425 | 25              | 14              | 19,5        |
| #80   | 0,177 | 17              | 8,0             | 12,5        |
| #200  | 0,074 | 8               | 4,0             | 6,0         |
| Fondo | Fondo |                 |                 |             |

Fuente: Propia

Gráfica 7. Representación gráfica análisis granulométrico para mezclas asfálticas en caliente (MDC-19) gradación continua.



Esta investigación se llevó a cabo siguiendo la especificación del Invías 450-13 (Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua), de la cual se tomó la granulometría intermedia para una mezcla densa en caliente (MDC-19), como la granulometría de diseño, remplazando según lo requerido el agregado natural por agregado reciclado. Las dosificaciones se realizaron de la siguiente manera:

- **Dosificación D0 – 0% AR** de 43% de grava natural, 57% de arena natural, 0% de grava reciclada y 0% de arena reciclada.
- **Dosificación D1 – 20% AR** de 34.4% de grava natural, 45.6% de arena natural, 8.6% de grava reciclada y 11.4% de arena reciclada.
- **Dosificación D2 – 40% AR** de 25.8% de grava natural, 34.2% de arena natural, 17.2% de grava reciclada y 22.8 de arena reciclada.
- **Dosificación D3– 80% AR** de 8.6% de grava natural, 11.4% de arena natural, 34.4% de grava reciclada y 45.6% de arena reciclada.

A continuación, se presenta un resumen de las dosificaciones mencionadas anteriormente:

Tabla 10. Dosificaciones utilizadas en el diseño de la mezcla asfáltica MDC-19

| DOSIFICACIÓN       | UNIDAD | VALOR |
|--------------------|--------|-------|
| <b>D0 – 0% AR</b>  |        |       |
| GRAVA NATURAL      |        | 43    |
| ARENA NATURAL      | %      | 57    |
| GRAVA RECICLADA    |        | 0     |
| ARENA RECICLADA    |        | 0     |
| <b>D1 – 20% AR</b> |        |       |
| GRAVA NATURAL      |        | 34.4  |
| ARENA NATURAL      | %      | 45.6  |
| GRAVA RECICLADA    |        | 8.6   |
| ARENA RECICLADA    |        | 11.4  |
| <b>D2 – 40% AR</b> |        |       |
| GRAVA NATURAL      |        | 25.8  |
| ARENA NATURAL      | %      | 34.2  |
| GRAVA RECICLADA    |        | 17.2  |
| ARENA RECICLADA    |        | 22.8  |
| <b>D3 – 80% AR</b> |        |       |
| GRAVA NATURAL      |        | 8.6   |
| ARENA NATURAL      | %      | 11.4  |
| GRAVA RECICLADA    |        | 34.4  |
| ARENA RECICLADA    |        | 45.6  |

Fuente: Propia

## 7.2. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL (MDC-19) CON AGREGADO NATURAL

### 7.2.1. Obtención del porcentaje de asfalto inicial, Pb estimado.

Después de haber realizado los ensayos correspondientes al material granular y el cemento asfáltico y verificar que cumple con las especificaciones, se procedió a establecer la granulometría de diseño dentro de los límites establecidos en la especificación 450 de INVIAS, en esta fase de la investigación se determinó el porcentaje de asfalto inicial, utilizando la fórmula de aproximación que establece la metodología superpave, a continuación se presentan los cálculos correspondientes para estimar el porcentaje de asfalto inicial, Pbi:

- Gravedad específica bulk, (Gsb)

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

Gsb = gravedad específica bulk para el agregado total.

P1, P2, PN = porcentajes individuales por masa de agregado.

G1, G2, GN = gravedad específica neta individual del agregado.

$$G_{sb} = \frac{43 + 51 + 6}{\frac{43}{2,738} + \frac{51}{2,724} + \frac{6}{2,727}} = 2,73 \frac{g}{cm^3}$$

- Gravedad específica efectiva, (Gse)

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb}) \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

Gse = Gravedad específica efectiva.

Gsb = Gravedad específica bulk para el agregado total.

Gsa = gravedad específica aparente del agregado.

El factor 0,8 debe ser ajustado a discreción del diseñador. Los agregados absorbentes pueden requerir valores cercanos a 0,5 o 0,6.

$$G_{se} = 2,73 + 0,8(2,78 - 2,73) = 2,77 \frac{g}{cm^3}$$

- Volumen de ligante asfáltico absorbido (ligante aparente, Vba)

$$V_{ba} = \frac{P_s(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}} * \left( \frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

Vba = Volumen absorbido de ligante,  $cm^3 / cm^3$  de mezcla

Pb = Porcentaje de ligante supuesto del 0,05.

Ps = Porcentaje de agregado supuesto del 0,95.

Gb = gravedad específica del ligante, 1,0058

Va = Volumen de vacíos de aire,  $0,04 cm^3 / cm^3$

$$V_{ba} = \frac{0,95(1 - 0,04)}{\frac{0,05}{1,0058} + \frac{0,95}{2,77}} * \left( \frac{1}{2,73} - \frac{1}{2,77} \right) = 0,012$$

- Volumen de ligante asfáltico efectivo (ligante aparente, Vbe)

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 * \log(Sn) \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

Vbe = Volumen de ligante efectivo,  $cm^3 / cm^3$  de mezcla

Sn = Tamaño máximo nominal de la mezcla en mm.

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 * \log(12,5) = 0,102 cm^3 / cm^3$$

- Peso de los agregados en gramos por  $cm^3$  de mezcla será de:

$$W_s = \frac{P_s(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

Ws = peso de los agregados, g /  $cm^3$  de mezcla

Pb = Porcentaje de ligante supuesto del 0,05.

Ps = Porcentaje de agregado supuesto del 0,95.

$G_b$  = gravedad específica del ligante, 1,0058

$V_a$  = Volumen de vacíos de aire,  $0,04 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$

$$W_s = \frac{0,95(1 - 0,04)}{\frac{0,05}{1,0058} + \frac{0,95}{2,77}} = 2,32 \frac{g}{\text{cm}^3}$$

- El porcentaje de bitumen inicial de diseño será de:

$$P_{bi} = \frac{G_b(V_{be} + V_{ba})}{(G_b(V_{be} + V_{ba}) + W_s)} * 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

$W_s$  = peso de los agregados,  $g / \text{cm}^3$  de mezcla

$V_{be}$  = Volumen de ligante efectivo,  $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$  de mezcla

$V_{ba}$  = Volumen absorbido de ligante,  $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$  de mezcla

$G_b$  = gravedad específica del ligante, 1,0058

$$P_{bi} = \frac{1,0058 * (0,102 + 0,012)}{(1,0058 * (0,102 + 0,012)) + 2,32} * 100 = 5 \%$$

## 7.2.2. Porcentajes de asfalto y niveles de compactación.

El diseño de la mezcla asfáltica corresponde a un nivel de tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 1 y 3 millones, para lo cual se tiene la siguiente disposición de giros en el proceso de compactación:

Ilustración 32. Esfuerzo de compactación giratoria de Superpave

| ESAL's<br>de diseño<br>(millones) | Temperatura promedio del aire para diseño |           |           |            |           |           |            |           |           |            |           |           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                                   | < 39°C                                    |           |           | 39 – 40 °C |           |           | 41 – 42 °C |           |           | 43 – 44 °C |           |           |
|                                   | $N_{ini}$                                 | $N_{des}$ | $N_{máx}$ | $N_{ini}$  | $N_{des}$ | $N_{máx}$ | $N_{ini}$  | $N_{des}$ | $N_{máx}$ | $N_{ini}$  | $N_{des}$ | $N_{máx}$ |
| <0.3                              | 7                                         | 68        | 104       | 7          | 74        | 114       | 7          | 78        | 121       | 7          | 82        | 127       |
| 0.3 - 1                           | 7                                         | 76        | 117       | 7          | 83        | 129       | 7          | 88        | 138       | 8          | 93        | 146       |
| 1 - 3                             | 7                                         | 86        | 134       | 8          | 95        | 150       | 8          | 100       | 158       | 8          | 105       | 167       |
| 3 - 10                            | 8                                         | 96        | 152       | 8          | 106       | 169       | 8          | 113       | 181       | 9          | 119       | 192       |
| 10 - 30                           | 8                                         | 109       | 174       | 9          | 121       | 195       | 9          | 128       | 208       | 9          | 135       | 220       |
| 30 - 100                          | 9                                         | 126       | 204       | 9          | 139       | 228       | 9          | 146       | 240       | 10         | 153       | 253       |
| >100                              | 9                                         | 143       | 235       | 10         | 158       | 262       | 10         | 165       | 275       | 10         | 172       | 288       |

Fuente: GARNICA ANGUAS, Paul. et al. Aspectos volumétricos de mezclas asfálticas. 2004

El valor de Pbi obtenido fue de 5% y los contenidos de asfalto a utilizar se presentan a continuación:

Tabla 11. Contenidos de asfalto a utilizar.

| Contenidos de asfalto a utilizar |       |
|----------------------------------|-------|
| Pbi - 1 %                        | 4 %   |
| Pbi - 0,5 %                      | 4,5 % |
| Pbi                              | 5 %   |
| Pbi + 0,5%                       | 5,5 % |
| Pbi + 1 %                        | 6 %   |

Posteriormente se dosificaron en total 15 probetas, cada probeta de 1200gr de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente, siendo los porcentajes de asfalto utilizados 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%, tres probetas por porcentaje, como se muestra en la siguiente tabla:

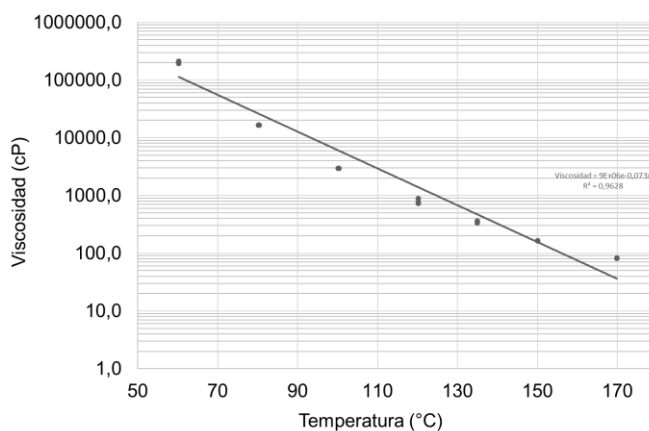
Tabla 12. Dosificación para diseño de mezcla.

| Porcentaje de asfalto (%) |               | 4%                          | 4,5%  | 5%    | 5,5%  | 6%    |
|---------------------------|---------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Tamiz                     | Abertura (mm) | Fracciones de material (gr) |       |       |       |       |
| 3/4'                      | 19            | 0                           | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1/2'                      | 12,7          | 144,0                       | 143,3 | 142,5 | 141,8 | 141,0 |
| 3/8'                      | 9,53          | 97,9                        | 97,4  | 96,9  | 96,4  | 95,9  |
| #4                        | 4,76          | 253,4                       | 252,1 | 250,8 | 249,5 | 248,2 |
| #10                       | 2             | 230,4                       | 229,2 | 228,0 | 226,8 | 225,6 |
| #40                       | 0,425         | 201,6                       | 200,6 | 199,5 | 198,5 | 197,4 |
| #80                       | 0,177         | 80,6                        | 80,2  | 79,8  | 79,4  | 79,0  |
| #200                      | 0,074         | 74,9                        | 74,5  | 74,1  | 73,7  | 73,3  |
| Fondo                     | Fondo         | 69,1                        | 68,8  | 68,4  | 68,0  | 67,7  |
| Asfalto (gr)              |               | 48,0                        | 54,0  | 60,0  | 66,0  | 72,0  |
| Total (gr)                |               | 1200                        | 1200  | 1200  | 1200  | 1200  |

Fuente: Propia

Para iniciar el proceso de fabricación de las probetas es indispensable determinar la temperatura de mezcla y de compactación, las cuales están dadas con base en la viscosidad del asfalto. La temperatura a la cual se debe calentar el asfalto para elaborar la mezcla será la requerida para que presente una viscosidad de  $170 \pm 20$  cP, y la temperatura a la cual se debe realizar la compactación de las probetas será la correspondiente a una viscosidad del cemento asfáltico de  $280 \pm 30$  cP. A continuación, se presenta la gráfica de Viscosidad – Temperatura para el cemento asfáltico a utilizar.

Gráfica 8. Carta de Viscosidad - Temperatura para el cemento asfáltico.



Para el cemento asfáltico se determinó que la temperatura de mezcla y de compactación son 150°C y 135°C respectivamente.

Ilustración 33. Compactador giratorio Pontificia Universidad Javeriana.

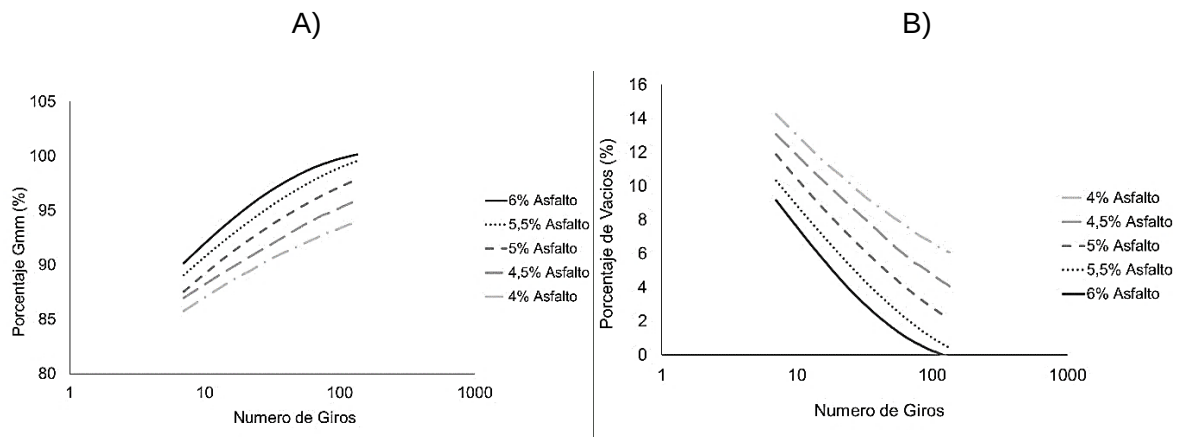


Fuente: Propia

Posteriormente, se realizó la mezcla y compactación de las probetas, obteniendo las curvas de compactación para cada contenido de asfalto utilizado en el diseño de la mezcla como se observa en la gráfica 9A. Lo anterior es posible, ya que el compactador giratorio genera un valor porcentual de la gravedad máxima medida (%Gmm) para cualquier número de giros.

Se observa la variación del porcentaje de vacíos con respecto al número de giros para cada contenido de asfalto utilizado en el diseño de la mezcla. Los vacíos disminuyen a medida que se aumenta el contenido de asfalto, igualmente sucede con el número de giros ya que si estos aumentan el contenido de vacíos disminuye debido a que la mezcla asfáltica se compacta reduciendo los espacios entre partículas.

Gráfica 9. A) Curvas de compactación de la mezcla asfáltica MDC-19, B) Variación del porcentaje de vacíos con el número de giros.



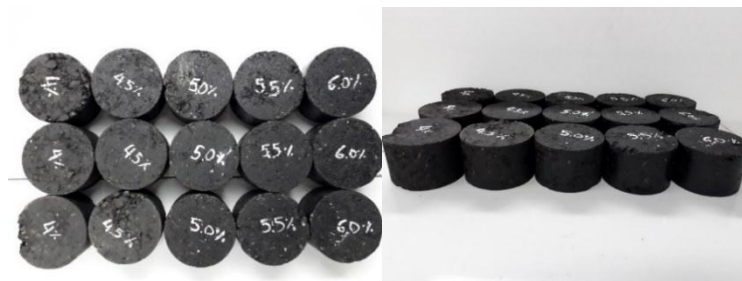
Después de compactar las probetas se deben realizar dos ensayos a la mezcla asfáltica, los cuales son gravedad específica bulk (Gmb) que corresponde a la norma INV-E 733-13 y la gravedad específica máxima medida (Gmm) que corresponde a la norma INV-E 735-13, los resultados promedio se presentan a continuación:

Tabla 13. Resultados gravedad específica bulk y gravedad específica máxima.

| Contenidos de asfalto a utilizar | Gmb     | Gmm     |
|----------------------------------|---------|---------|
| Pbi - 1% (4%)                    | 2,36164 | 2,51575 |
| Pbi - 0.5% (4.5%)                | 2,39394 | 2,49255 |
| Pbi (5%)                         | 2,42295 | 2,47568 |
| Pbi + 0.5% (5.5%)                | 2,44655 | 2,45232 |
| Pbi + 1% (6%)                    | 2,44169 | 2,43308 |

Fuente: Propia

Ilustración 34. Probetas de mezcla asfáltica convencional compactadas



Fuente: Propia

### 7.2.3. Contenido óptimo de asfalto

Con los resultados obtenidos en las pruebas de densidad a la mezcla asfáltica y las curvas de compactación arrojadas por el compactador giratorio, se calcularon los parámetros volumétricos que se utilizarán para la selección del contenido óptimo de asfalto, las ecuaciones necesarias para cada cálculo se presentan a continuación:

- Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla,  $V_a$

$$V_a = \left( 1 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \right) * 100 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk

$G_{mm}$  = Gravedad específica máxima

- Vacíos en el agregado mineral, VMA

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral

$G_{mb}$  = Gravedad específica bulk

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk para el agregado total.

$P_s$  = Porcentaje de agregado

- vacíos llenos de asfalto, VFA

$$VFA = 100 * \frac{VMA * V_a}{VMA} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

VFA = Vacíos llenos de asfalto

VMA = Vacíos en el agregado mineral

$V_a$  = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla

A continuación, se presenta una tabla en la cual se resumen los resultados de las propiedades volumétricas de las mezclas compactadas:

Tabla 14. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas a Ndis

| Contenidos de asfalto a utilizar | Va  | VMA  | VFA  |
|----------------------------------|-----|------|------|
| Pbi - 1% (4%)                    | 6,9 | 17   | 59   |
| Pbi - 0.5% (4.5%)                | 5,1 | 15,8 | 67,5 |
| Pbi (5%)                         | 3,2 | 14,8 | 78,4 |
| Pbi + 0.5% (5.5%)                | 1,4 | 14,0 | 90,0 |
| Pbi + 1% (6%)                    | 0,5 | 14,1 | 96,6 |

Fuente: Propia

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto se utilizan comparaciones entre el porcentaje y las propiedades volumétricas. A continuación, se presentan las gráficas con las cuales se determina el contenido óptimo de asfalto para el diseño final.

En la gráfica 10A se determinó el porcentaje óptimo de asfalto necesario para generar aproximadamente 4% de vacíos en la mezcla asfáltica, a un Ndis (86 giros) de acuerdo a las especificaciones de diseño Superpave. De la misma gráfica se determinó que 4,8% de asfalto es el contenido óptimo, ya que con esta cantidad de asfalto la mezcla tendrá 4% de vacíos. Además, Se puede observar como los vacíos de aire disminuyen drásticamente conforme se incrementa el contenido de asfalto. Un incremento de 0,5% en el contenido de asfalto puede producir que los vacíos de aire se reduzcan de 1 a 2% aproximadamente.

El porcentaje de vacíos con aire es uno de los parámetros volumétricos más importantes debido a que la durabilidad del pavimento está en función de este parámetro. Una mezcla compactada con un alto contenido de vacíos con aire podría acelerar la oxidación y el envejecimiento del cemento asfáltico; mientras que una mezcla compactada con bajo contenido de vacíos con aire puede presentar exudación de cemento asfáltico o deformaciones permanentes.

Posteriormente con el valor de 4.8% de asfalto se ubica en las gráficas para obtener los parámetros volumétricos de la mezcla compactada los cuales son vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA) que exige el diseño Superpave.

En la gráfica 10B se puede observar que los vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen a medida en que se incrementa el contenido de asfalto, para cada incremento de 0.5% en el contenido de asfalto los VMA disminuyen aproximadamente 1%. Los valores de VMA se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla;

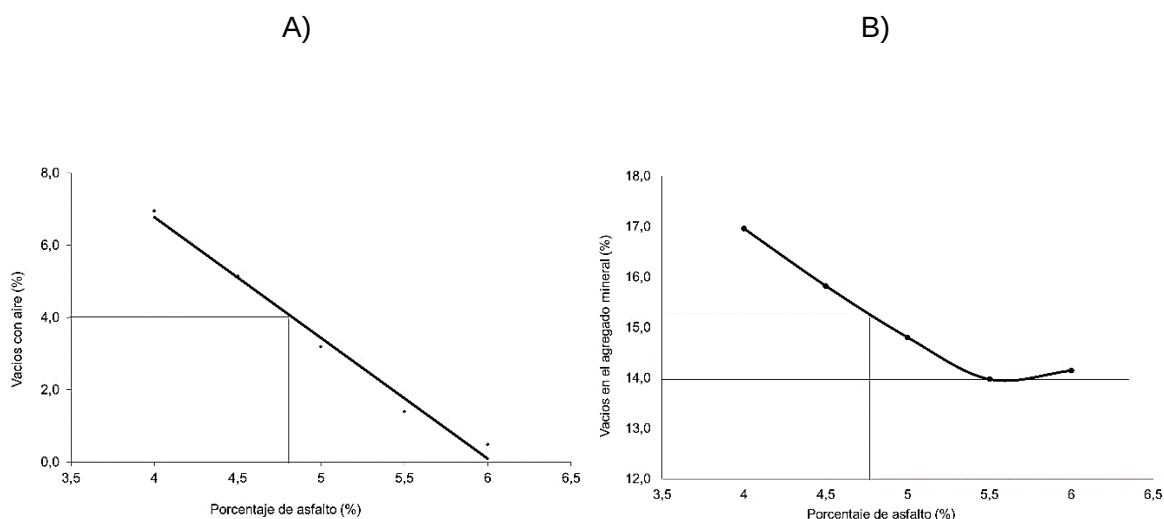
sin embargo, si el VMA es muy alto la mezcla puede presentar problemas de deformación permanente.

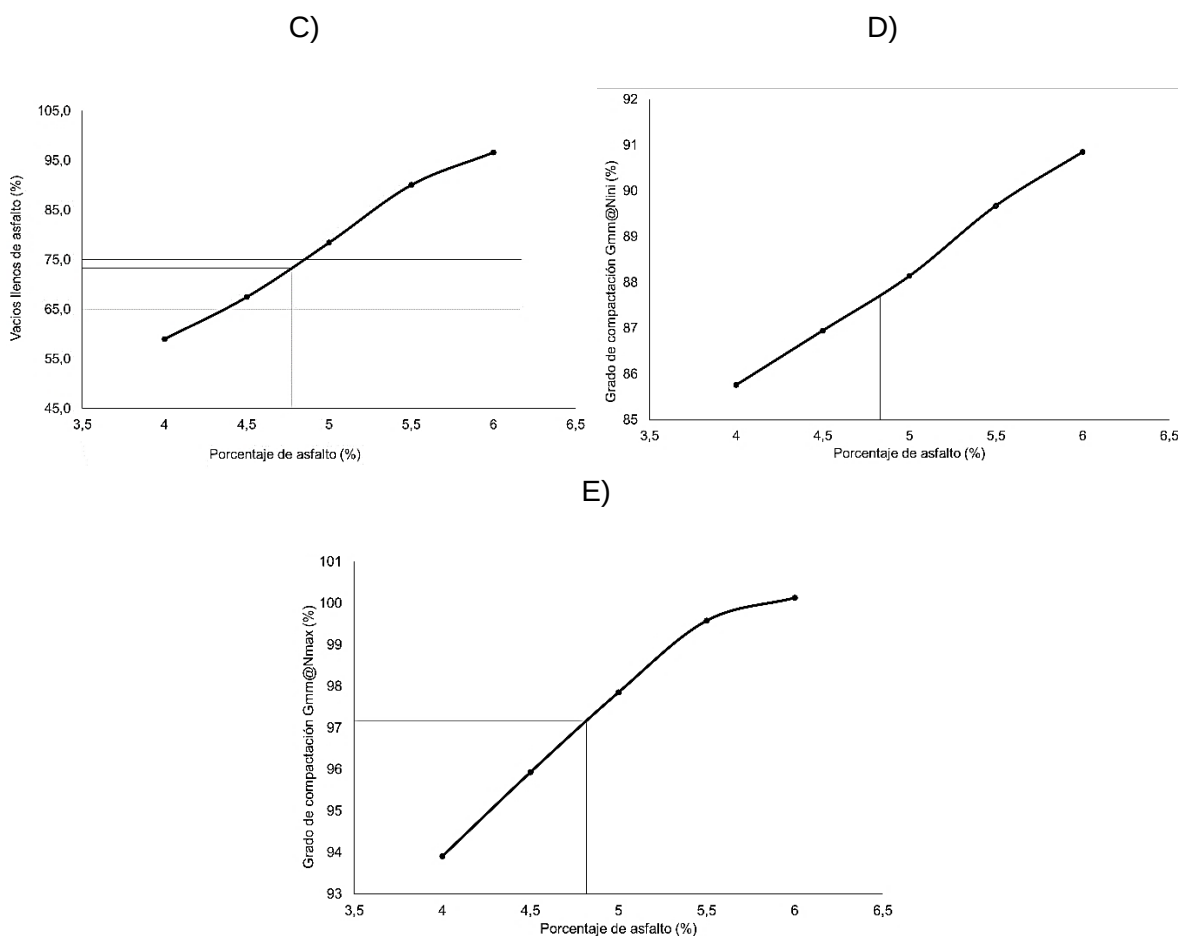
En la gráfica 10C se puede observar que el porcentaje de vacíos llenos con asfalto se incrementa de manera importante, al aumentar el contenido de asfalto. Un incremento de 0,5% en el contenido de asfalto provoca que los vacíos se llenen aproximadamente un 10% más de asfalto. Los vacíos llenos con asfalto se usan para asegurar que parte del asfalto efectivo que ingresa en los vacíos en el agregado mineral, no sea insuficiente debido a que puede producir poca durabilidad en la mezcla o excesivo ya que puede dar como resultado una mezcla propensa a las deformaciones permanentes, y a exudación de cemento asfáltico.

Es necesario determinar otros criterios que hacen parte del diseño exigido por las especificaciones Superpave, En la gráfica 10D se puede observar el grado de compactación Gmm a Nini, el criterio Superpave para la aceptación o rechazo de este valor debe ser máximo de 90.5 para un nivel de tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 0.3 y 3 millones, cumpliendo para el presente diseño.

Finalmente, en la gráfica 10E se puede observar el grado de compactación Gmm a Nmax, el criterio Superpave para la aceptación o rechazo de este valor debe ser máximo de 98 para un nivel de tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de entre 0.3 y 3 millones, cumpliendo para el presente diseño.

Gráfica 10. A) Curva de vacíos con aire para la mezcla MDC-19, B) Curva de vacíos en el agregado mineral para la mezcla MDC-19, C) Curva de vacíos llenos de asfalto para la mezcla MDC-19, D) Curva de grado de compactación Gmm@Nini para la mezcla MDC-19, E) Curva de compactación Gmm@Nmax para la mezcla MDC-19.





Posteriormente se obtiene la proporción de llenante mineral mediante las siguientes ecuaciones:

- Porcentaje de asfalto absorbido ( $P_{ba}$ )

$$P_{ba} = P_s G_b * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}}$$

Ecuación 16

Donde:

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido

$P_s$  = Porcentaje de agregado

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk para el agregado total.

$$P_{ba} = (95,2 * 1,0058) * \frac{2,77 - 2,73}{2,73 * 2,77} = 0,50\%$$

- Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe)

$$P_{be} = P_b - P_{ba}$$

Ecuación 17

Donde:

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo

Pb = Porcentaje de asfalto total

Pba = Porcentaje de asfalto absorbido

$$P_{be} = 4,8 - 0,50 = 4,30\%$$

- Proporción de llenante (DP)

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Ecuación 18

Donde:

DP = Proporción de llenante

$P_{0.075}$  = porcentaje de masa de agregado que pasa el tamiz de 75 m (menor al No. 200 en la mezcla de agregado).

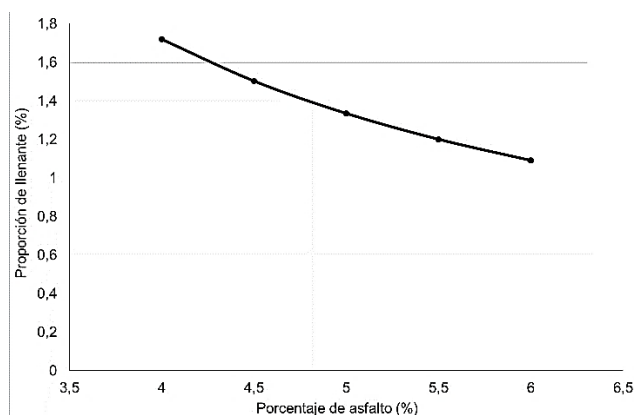
Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo

$$DP = \frac{6}{4,30} = 1,39\%$$

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente a la relación entre la proporción de llenante y el porcentaje de asfalto:

En la gráfica 11 se puede observar el criterio Superpave para la aceptación o rechazo de esta proporción que debe encontrarse en un rango de 0.6 – 1.6, lo que indica que este criterio se cumple para el presente diseño.

Gráfica 11. Curva de Proporción de llenante para la mezcla MDC-19



#### 7.2.4. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.

El ensayo corresponde a la norma INV-E 725-13, el cual establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta. Se elaboraron, seis probetas para el ensayo, tres para ser probados en seco y tres para ser probados después de saturación parcial y acondicionamiento en un baño con agua.

La susceptibilidad al daño por humedad se determina preparando un grupo de probetas compactadas en el laboratorio sin aditivos. Las probetas se compactan a manera de obtener un contenido de vacíos con aire entre 6 y 8 %. El grupo se divide en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada probeta debe tener su par en el otro subgrupo. Un subgrupo se mantiene en condición seca, mientras que el otro se satura parcialmente con agua y se acondiciona en un baño de temperatura. La resistencia a la tensión de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad queda indicado por la relación entre las resistencias a la tensión del subgrupo húmedo y las del subgrupo seco.

Para el ensayo de daño causado por humedad (TSR) se compactaron seis probetas con un porcentaje de vacíos entre 6 y 8 % como lo indica la norma, a continuación, presentamos la gráfica del porcentaje de vacíos frente al número de giros requeridos para llegar a dicho porcentaje de vacíos.

Gráfica 12. Compactación ensayo TSR.



Resultados de daño causado por humedad.

| GRUPO HÚMEDO | Gmb   | Gmm   | Va   |
|--------------|-------|-------|------|
| 3            | 2,330 |       | 6,10 |
| 4            | 2,327 | 2,482 | 6,23 |
| 6            | 2,329 |       | 6,15 |
| GRUPO SECO   | Gmb   | Gmm   | Va   |
| 1            | 2,324 |       | 6,36 |
| 2            | 2,331 | 2,482 | 6,07 |
| 5            | 2,330 |       | 6,13 |

| RESISTENCIA A LA TENSIÓN | UNIDAD | VALOR MEDIDO |
|--------------------------|--------|--------------|
| <b>GRUPO HÚMEDO</b>      |        | 874          |
| <b>GRUPO SECO</b>        | kPa    | 1061         |

| RELACIÓN DE RESISTENCIAS A LA TENSIÓN | UNIDAD | VALOR MEDIDO |
|---------------------------------------|--------|--------------|
| <b>TSR</b>                            | %      | 82           |

La relación de resistencias a la tensión (TSR) arrojó un valor de 82%, tanto en el artículo 450 de Invías como en el criterio del diseño Superpave establece mínimo un 80% para la aceptación de la mezcla, cumpliendo con la especificación.

Según Cheng, X. y Huang, B.<sup>42</sup>, el daño por humedad en una vía, se puede presentar por diferentes situaciones, tales como: ahuellamiento, desprendimiento de agregados, fisuras, grietas, etc., esto puede deberse a la humedad atrapada en las mezclas durante su fabricación o en la humedad que pudo penetrar desde la superficie o ascender desde la estructura general del pavimento, debilitando la unión agregados-ligante asfáltico, desplazando el ligante de los agregados, debido al ablandamiento que presenta a causa del proceso de emulsificación.

Ilustración 35. Probetas compactadas para ensayo TSR.



Fuente: Propia

A continuación, se presenta una tabla con el resumen de los resultados del diseño de la mezcla asfáltica convencional, se muestran parámetros de la mezcla y el criterio Superpave para la aceptación o rechazo de cada uno de los valores obtenidos:

Tabla 15. Resumen resultados de diseño mezcla asfáltica convencional (MDC-19)

| PROPIEDADES DE LA MEZCLA              | CRITERIO SUPERPAVE | RESULTADO |
|---------------------------------------|--------------------|-----------|
| Porcentaje de vacíos con aire         | 4,0 %              | 4,3       |
| Vacíos en el agregado mineral (VMA)   | Min. 14            | 15,3      |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA)        | 65 – 75            | 73        |
| % Gmm @ Nini                          | <89                | 87,8      |
| % Gmm @ Nmax                          | <98                | 97,1      |
| Proporción de llenante (DP)           | 0,6 – 1,6          | 1,39      |
| Relación de resistencias a la tensión | Min. 80            | 82        |

Fuente: Propia.

<sup>42</sup>Chen, X., Huang, B. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. 2008. Volume 22. 1950-1962

### 7.2.5. Elaboración y compactación de mezclas dosificadas con agregado reciclado

Luego de obtener los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica convencional y teniendo en cuenta que estos parámetros cumplen según las especificaciones del método Superpave, se procedió a elaborar las probetas dosificadas con adición de agregado reciclado en porcentajes, como se definió anteriormente los porcentajes de agregado reciclado son respectivamente: 0% de AR, 20% de AR, 40% de AR y 80% de AR, resaltando que el contenido de asfalto optimo a utilizar es del 4,8% para todas las dosificaciones.

Se fabricaron 12 probetas de mezcla asfáltica con adición de agregado reciclado, 3 probetas por cada dosificación cada una de 1200g como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 16. Dosificaciones para mezclas con adición de agregado reciclado.

| Dosificaciones |       | D0 - 0 % AR                |           | D1 - 20% AR |           | D2 - 40% AR |           | D3 - 80% AR |           |
|----------------|-------|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|                |       | Fracciones de material (g) |           |             |           |             |           |             |           |
| Tamiz          | (mm)  | Natural                    | Reciclado | Natural     | Reciclado | Natural     | Reciclado | Natural     | Reciclado |
| 3/4'           | 19    | 0                          | 0         | 0,0         | 0,0       | 0,0         | 0,0       | 0,0         | 0,0       |
| 1/2'           | 12,7  | 142,8                      | 0         | 114,2       | 28,6      | 85,7        | 57,1      | 28,6        | 114,2     |
| 3/8'           | 9,53  | 97,1                       | 0         | 77,7        | 19,4      | 58,3        | 38,8      | 19,4        | 77,7      |
| #4             | 4,76  | 251,3                      | 0         | 201,1       | 50,3      | 150,8       | 100,5     | 50,3        | 201,1     |
| #10            | 2,0   | 228,5                      | 0         | 182,8       | 45,7      | 137,1       | 91,4      | 45,7        | 182,8     |
| #40            | 0,425 | 199,9                      | 0         | 159,9       | 40,0      | 120,0       | 80,0      | 40,0        | 159,9     |
| #80            | 0,177 | 80,0                       | 0         | 64,0        | 16,0      | 48,0        | 32,0      | 16,0        | 64,0      |
| #200           | 0,074 | 74,3                       | 0         | 59,4        | 14,9      | 44,6        | 29,7      | 14,9        | 59,4      |
| Fondo          | Fondo | 68,5                       | 0         | 54,8        | 13,7      | 41,1        | 27,4      | 13,7        | 54,8      |
| 4,8% Asfalto   |       | 57,6                       |           | 57,6        |           | 57,6        |           | 57,6        |           |
| Total          |       | 1200                       |           | 1200        |           | 1200        |           | 1200        |           |

Fuente: Propia

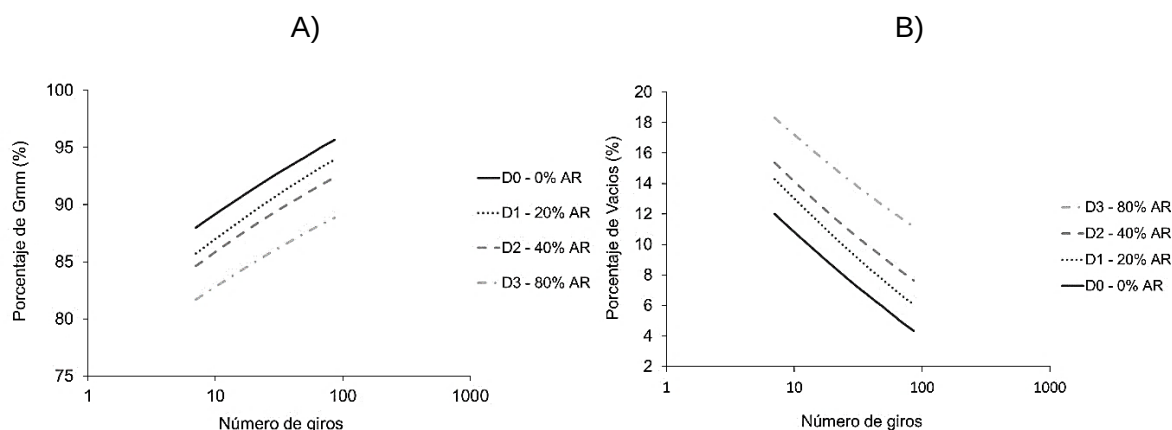
Posteriormente, estas probetas se compactan a el Ndis establecido en el compactador giratorio y se obtuvieron las siguientes graficas:

En la gráfica 13A se observan las curvas de compactación para cada una de las mezclas, se puede analizar de esta grafica el decrecimiento progresivo en el porcentaje de la gravedad máxima alcanzada, a medida que se incrementa el porcentaje de agregado reciclado en la mezcla. Esto se deba a que en el agregado reciclado se presenta mayor contenido de vacíos por lo cual la mezcla también presentó mayor contenido de vacíos en su estructura.

En la gráfica 13B se observa que el porcentaje de vacíos aumenta al incrementar el porcentaje de agregado reciclado en la mezcla. Para la mezcla convencional se obtiene

4,3% de vacíos, lo cual ratifica el diseño. Por otra parte, se puede determinar que un aumento del 20% de agregado reciclado genera un incremento 1.6% de vacíos en la mezcla, es decir que por cada 1% de agregado reciclado se incrementa aproximadamente 0.1% de vacíos en la mezcla.

Gráfica 13. A) Curvas de compactación de las mezclas asfálticas con adición de agregado reciclado, B) Variación del porcentaje de vacíos con el número de giros.



Fuente: Propia

Tabla 17. Resultados de compactación de mezclas asfálticas con agregado reciclado.

| Dosificación | vacíos con aire (%) | Gravedad específica máxima | Gravedad específica bulk |
|--------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|
| D0 - 0% AR   | 4,3                 | 2,48                       | 2,37                     |
| D1 - 20% AR  | 6,0                 | 2,44                       | 2,30                     |
| D2 - 40% AR  | 7,6                 | 2,40                       | 2,22                     |
| D3 - 80% AR  | 11,1                | 2,35                       | 2,09                     |

Fuente: Propia

Ilustración 36. Probetas de mezcla con agregado reciclado compactadas.



Fuente: Propia

### 7.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA (MDC-19) CON ADICIÓN DE CONCRETO HIDRÁULICO RECICLADO MEDIANTE ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE Y DEFORMACIÓN PERMANENTE.

#### 7.3.1. Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas

Para este ensayo se fabricaron 12 probetas de mezcla asfáltica con 4,8% de asfalto y adición de agregado reciclado en porcentajes de acuerdo con las dosificaciones planteadas anteriormente: 0% de AR, 20% de AR, 40% de AR y 80% de AR, durante el ensayo se busca evaluar inicialmente el modulo a la temperatura más baja al igual que la frecuencia de aplicación de carga con el fin de reducir los posibles daños en la estructura de la mezcla compactada.

Para la obtención del módulo resiliente se realiza el ensayo de tensión directa, utilizando la norma I.N.V. E -749. Se colocan los especímenes de ensayo en un gabinete de temperatura controlada y se llevan a la temperatura especificada para el ensayo. Estos especímenes deben permanecer en el gabinete a la temperatura por lo menos durante 24 horas antes del ensayo. Se coloca el espécimen dentro del equipo NAT en posición para que las franjas de carga sean paralelas y queden centradas respecto al plano diametral vertical.

La evaluación del módulo resiliente incluirá ensayos a 3 temperaturas, por ejemplo 10, 20 y 30°C, a una o más frecuencias de carga, por ejemplo 2,5, 5 y 10Hz para cada temperatura. El intervalo recomendado de carga es el que induzca del 10 al 50% de la resistencia a la tensión. A continuación, se presentan los resultados de módulo resiliente.

Tabla 18. Resultados Modulo Resiliente.

| Temperatura<br>°C | Frecuencia<br>(Hz) | Módulo Resiliente (MPa)<br>D0 - 0% AR | Módulo Resiliente (MPa)<br>D1 - 20% AR | Módulo Resiliente (MPa)<br>D2 - 40% AR | Módulo Resiliente (MPa)<br>D3 - 80% AR |
|-------------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 10                | 2,5                | 9949 ± 959                            | 10577 ± 279                            | 10057 ± 574                            | 7862 ± 966                             |
|                   | 5                  | 12784 ± 708                           | 14160 ± 447                            | 12081 ± 516                            | 10002 ± 820                            |
|                   | 10                 | 14993 ± 1190                          | 15204 ± 840                            | 13268 ± 564                            | 11014 ± 487                            |
| 20                | 2,5                | 4487 ± 570                            | 5591 ± 231                             | 5270 ± 296                             | 3757 ± 314                             |
|                   | 5                  | 7835 ± 794                            | 8339 ± 598                             | 8072 ± 340                             | 5499 ± 561                             |
|                   | 10                 | 10689 ± 1113                          | 10988 ± 374                            | 9988 ± 401                             | 8216 ± 394                             |
| 30                | 2,5                | 1155 ± 151                            | 1926 ± 148                             | 1838 ± 227                             | 1921 ± 213                             |
|                   | 5                  | 2163 ± 107                            | 2429 ± 161                             | 2275 ± 248                             | 2379 ± 219                             |
|                   | 10                 | 3152 ± 251                            | 3461 ± 276                             | 3527 ± 441                             | 3313 ± 164                             |

En la gráfica 14 se presenta la evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga. Los resultados presentados en las gráficas corresponden a mezclas fabricadas con agregado convencional y dosificadas con agregado reciclado en los porcentajes establecidos. En las gráficas, se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga.

En cada grafica se observa que la mezcla asfáltica que tiene un mejor comportamiento de módulo resiliente es la que tiene un 20% de agregado reciclado y un 80% de agregado convencional (D1 – 20% AR), puesto que se obtuvieron valores de módulo resiliente más altos en cada temperatura de ensayo respecto a la mezcla asfáltica convencional. El incremento varía dependiendo de la temperatura del ensayo y la frecuencia de carga.

Para un mejor entendimiento de los resultados se optó por realizar una normalización de los valores obtenidos de módulo resiliente con respecto a la mezcla asfáltica convencional D0, en la gráfica 15A se observa que a bajas frecuencias de carga con una temperatura de 10 °C la mezcla que obtuvo un mejor comportamiento como anteriormente se menciona es la mezcla D1 con 20% de AR, mostrando incrementos con respecto a la mezcla convencional de entre 6% a 10%, igualmente a altas frecuencias de carga el módulo resiliente aumento 1% con respecto a la mezcla asfáltica.

Al aumentar la temperatura de ensayo se observa un aumento considerable en el módulo resiliente como se observa en la gráfica 15C a 30 °C y a bajas frecuencias de carga el módulo resiliente de la mezcla D1 aumento entre el 11% y 40% con respecto a la mezcla convencional igualmente a altas frecuencias de carga el módulo resiliente aumento 9% con respecto a la mezcla convencional.

En todas las gráficas de normalización se puede observar que la mezcla D2 con 40% de agregado reciclado mostro un buen comportamiento en su módulo resiliente de entre 1% y 15% a bajas frecuencias de carga y bajas temperaturas. En contraste, la mezcla D3 no mostro un buen comportamiento en su módulo resiliente a bajas frecuencias y bajas temperaturas.

Es necesario resaltar que todas las mezclas mostraron una mejora considerable en el módulo resiliente al ser evaluadas a 30°C tanto a bajas como altas frecuencias de carga. Lo que indica que cualquiera de estas dosificaciones se puede utilizar en sitios con altas temperaturas.

En la gráfica 16 se presenta la evolución del módulo resiliente con la temperatura. En las gráficas, se observa un decremento típico del módulo cuando se aumenta la temperatura.

Al igual que las gráficas anteriores la mezcla que mostro un mejor comportamiento de módulo resiliente es la que tiene un 20% de agregado reciclado y un 80% de agregado

convencional (D1 – 20% AR), puesto que se obtuvieron valores de módulo resiliente más altos en cada frecuencia de carga respecto a la mezcla asfáltica convencional. El incremento varía dependiendo de la temperatura del ensayo y la frecuencia de carga.

Igualmente, para un mejor entendimiento de los resultados del módulo resiliente frente a la temperatura, se realizó una normalización de los datos con respecto a la mezcla asfáltica convencional D0, en la gráfica 17A se observa que a bajas temperaturas y a una frecuencia de carga de 2,5 Hz la mezcla que mostro un módulo resiliente mas alto con respecto a la mezcla convencional es la D1 con 20% de AR, puesto que se obtuvo una mejora de entre 6% y 20%, igualmente a altas temperaturas se obtuvo una mejora en el módulo resiliente del 40% con respecto a la mezcla convencional.

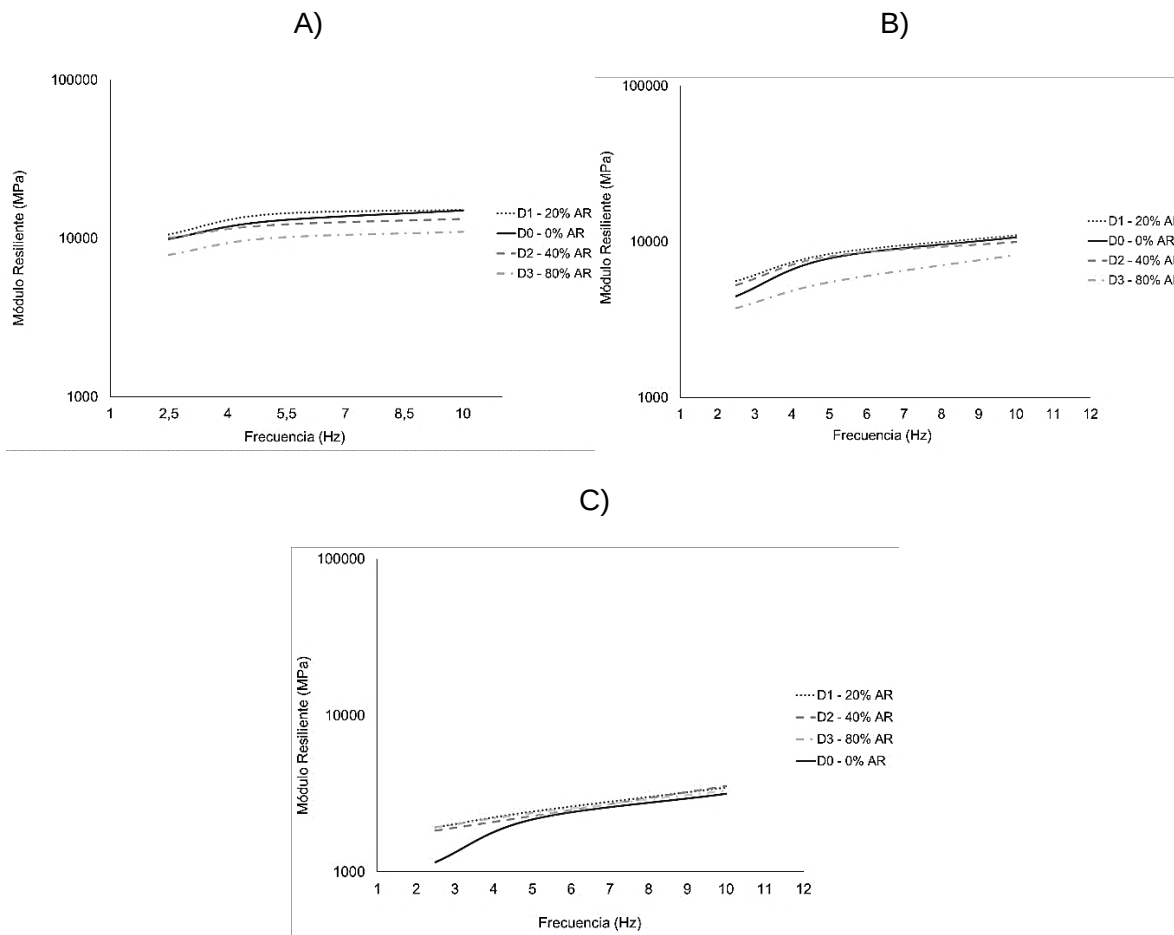
Al aumentar la frecuencia de carga el módulo resiliente de la mezcla D1 decrece, sin embargo, los valores siguen mostrando una mejora con respecto a la mezcla convencional, en la gráfica 17C a una frecuencia de carga de 10 Hz y a bajas temperaturas se obtuvo una mejora en el módulo resiliente de entre 1% y 3%, igualmente a altas temperaturas el modulo mostro una mejora del 9%.

En la gráfica 17, se deduce que todas las mezclas obtuvieron mejoras evaluadas a altas temperaturas, lo cual se traduce en que es posible utilizar cualquier dosificación planteada en esta investigación en sitios con temperaturas elevadas y con bajas o altas velocidades de tránsito.

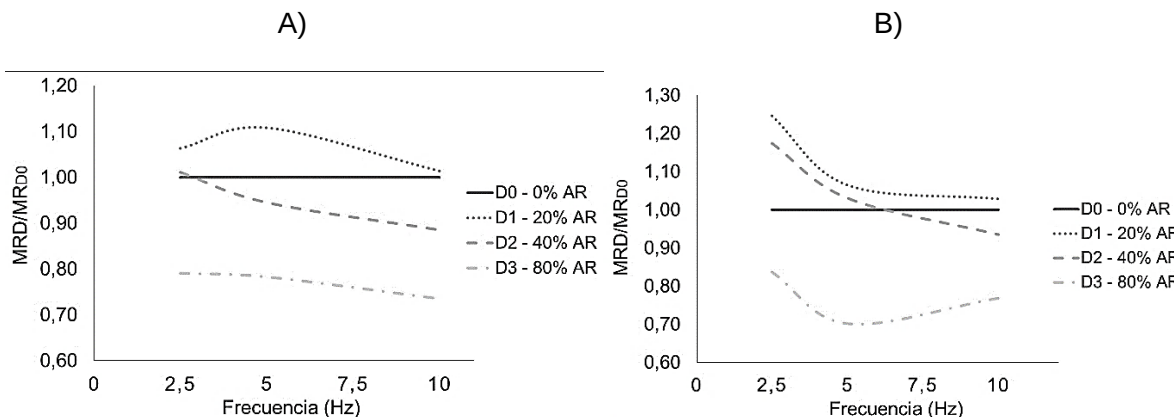
Resulta interesante observar el comportamiento de la mezcla asfáltica D3 la cual tiene un 80% de AR, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la compactación de la mezcla en el numeral 7.2.5., esta mezcla tiene un porcentaje de vacíos del 11%, con respecto a la mezcla convencional con un 4,3% de vacíos, lo cual indica que la mezcla D3 tiene un porcentaje de vacíos casi 3 veces mayor lo que podría resultar en un comportamiento dinámico desfavorable, sin embargo, los resultados obtenidos son satisfactorios si se tiene en cuenta los valores obtenidos en el módulo resiliente.

Lo anterior conlleva a deducir que la adición de agregado reciclado contribuye en el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica de una forma favorable, pues este material compensa en cierta medida un porcentaje de vacíos desfavorable en la mezcla asfáltica compactada.

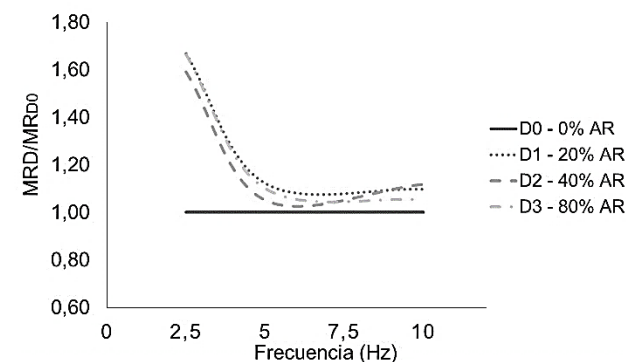
Gráfica 14. A) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 10°C, B) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 20 °C, C) Evolución del módulo resiliente con la frecuencia de carga para 30°C



Gráfica 15. A) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 10 °C, B) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 20 °C, C) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 30 °C

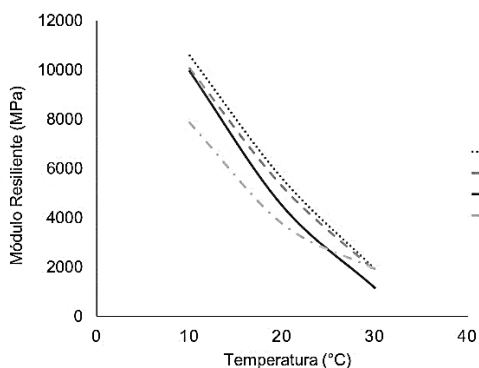


C)

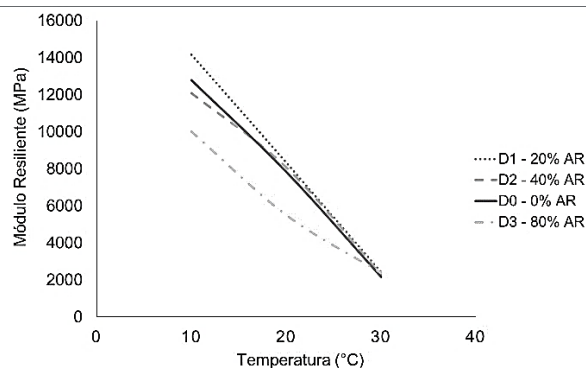


Gráfica 16. A) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 2,5 Hz, B) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 5 Hz, C) Evolución del módulo resiliente con la temperatura para 10 Hz.

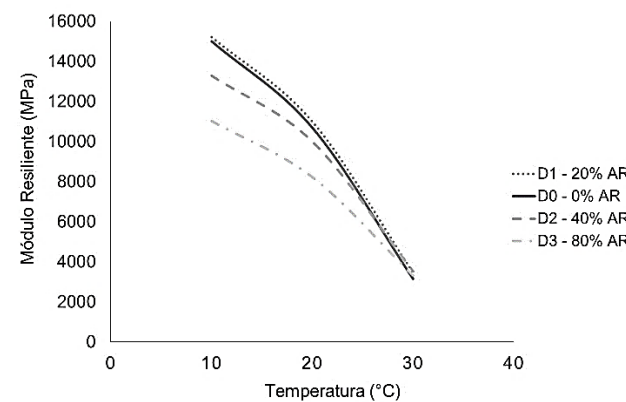
A)



B)



C)



Gráfica 17. A) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 2,5 Hz, B) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 5 Hz, C) Variación del módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional D0 para 10 Hz.

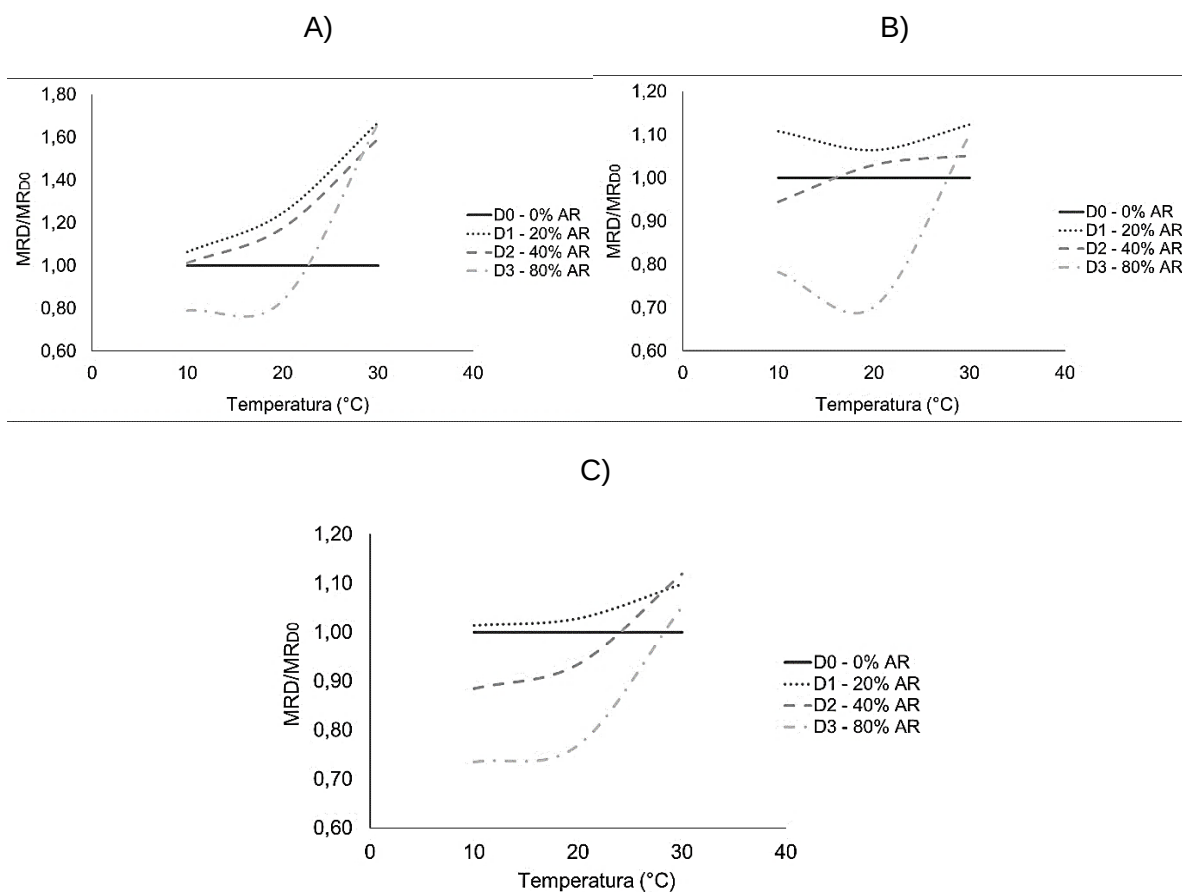
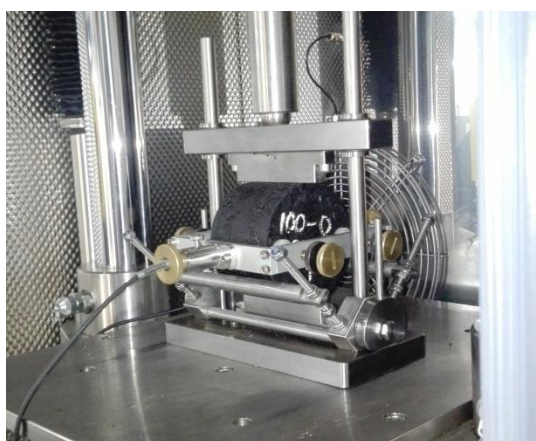


Ilustración 37. Ensayo de tensión indirecta



Fuente: Propia

### 7.3.2. Ensayo de resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida

Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia de mezclas bituminosas a la deformación permanente, para este ensayo se fabricaron 8 probetas de mezcla asfáltica con 4,8% de asfalto y adición de agregado reciclado en porcentajes de acuerdo con las dosificaciones planteadas anteriormente: 0% de AR, 20% de AR, 40% de AR y 80% de AR.

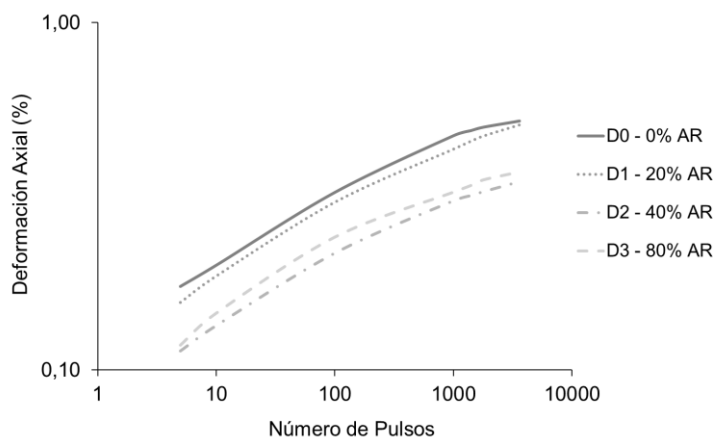
El ensayo se realizó en el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester), en el ensayo se utiliza un espécimen cilíndrico con un diámetro de 100 mm o 150 mm y espesor preferiblemente entre 40 mm y 100 mm. En el ensayo, la muestra se coloca verticalmente entre dos platos de carga, que son ligeramente más anchos que la muestra. La carga repetida se aplica axialmente, la carga pulsante consiste en una forma de onda cuadrada con una frecuencia de 0,5 Hz, es decir, un impulso de una segunda duración seguido por un período de descanso de una duración de segundo. Esto simula el tráfico lento que conduce a la mayor deformación en un camino real.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo y las gráficas correspondientes a cada dosificación propuesta

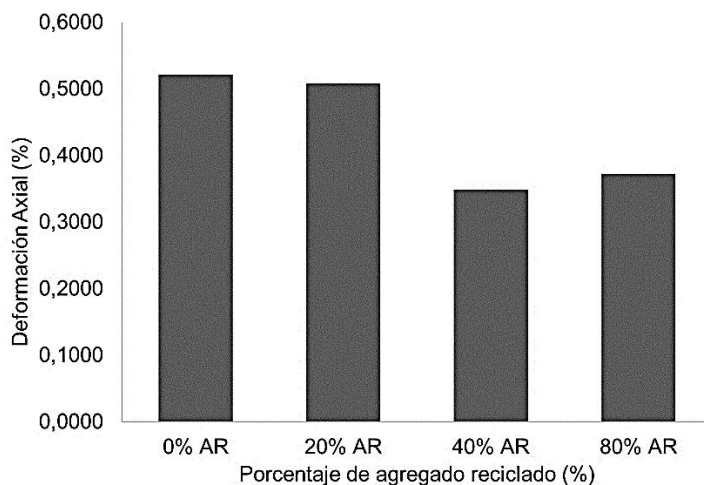
Tabla 19. Resultados resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida.

| Nº Pulsos | Deformación Axial (%)<br>D0 - 0% AR | Deformación Axial (%)<br>D1 - 20% AR | Deformación Axial (%)<br>D2 - 40% AR | Deformación Axial (%)<br>D3 - 80% AR |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0         | 0,0000                              | 0,0000                               | 0,0000                               | 0,0000                               |
| 5         | 0,1738 ± 0,015                      | 0,1567 ± 0,022                       | 0,1136 ± 0,014                       | 0,1181 ± 0,015                       |
| 10        | 0,2000 ± 0,014                      | 0,1866 ± 0,022                       | 0,1343 ± 0,014                       | 0,1458 ± 0,021                       |
| 100       | 0,3246 ± 0,011                      | 0,3045 ± 0,015                       | 0,2171 ± 0,023                       | 0,2417 ± 0,058                       |
| 1000      | 0,4731 ± 0,016                      | 0,4328 ± 0,004                       | 0,3071 ± 0,043                       | 0,3257 ± 0,024                       |
| 1400      | 0,4892 ± 0,022                      | 0,4560 ± 0,005                       | 0,3179 ± 0,046                       | 0,3403 ± 0,026                       |
| 1800      | 0,5008 ± 0,024                      | 0,4724 ± 0,004                       | 0,3264 ± 0,049                       | 0,3535 ± 0,033                       |
| 3600      | 0,5215 ± 0,025                      | 0,5082 ± 0,010                       | 0,3486 ± 0,059                       | 0,3722 ± 0,036                       |

Gráfica 18. Evolución de la deformación con el número de pulsos de carga para las mezclas con agregado reciclado.



Gráfica 19. Deformación Axial frente al porcentaje de agregado reciclado.



La norma EN12697-24E regula lo referente a las deformaciones permanentes y la cual especifica los siguientes límites:

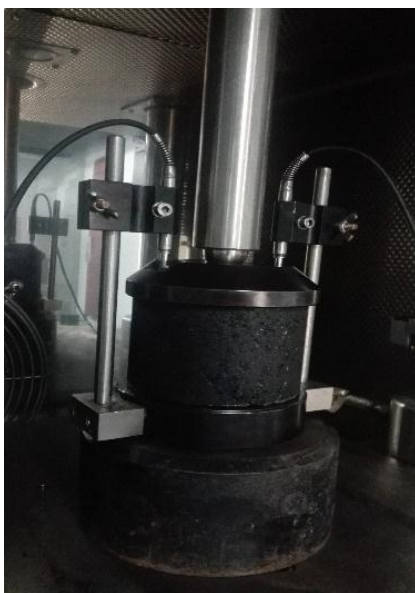
- La mezcla no presentara ahuellamiento si al cabo de los 3600 ciclos de carga el porcentaje de deformación axial en los especímenes es menor del 1%
- La mezcla podrá presentar ahuellamiento si esta deformación axial se encuentra entre 1% y 2%.
- La mezcla presentara ahuellamiento cuando esta deformación supera el 2%

En la gráfica 18 se observa que todas las dosificaciones cumplieron con el límite superior anteriormente descrito, la mezcla asfáltica convencional mostro mayor deformación que las mezclas con adición de agregado reciclado, esto indica que el agregado reciclado si ofrece un aporte estructural a la mezcla asfáltica en cuanto a la resistencia a la deformación permanente. Sin embargo, todas las mezclas mostraron

una buena resistencia a la deformación permanente o al ahuellamiento puesto que al cabo de los 3600 ciclos de carga se obtuvieron valores por debajo del 1% de la deformación axial, es decir que las mezclas no presentarían ahuellamiento.

La mezcla asfáltica que presentó un mejor comportamiento o resistencia al ahuellamiento fue la dosificación 2 (D2 – 40% AR), si se compara el porcentaje de deformación axial de la mezcla asfáltica con 40% de agregado reciclado frente a la convencional se observa que esta mezcla se deformó aproximadamente un 30% menos que la mezcla convencional, algo muy similar a lo que se presentó con la dosificación 3 (D3 – 80% AR) la cual se deformó un 28% en comparación con la misma. Para el caso de la dosificación 1 (D1 – 20% AR) se presentó una deformación menor en 3% en comparación con la mezcla convencional.

Ilustración 38. Ensayo de deformación permanente bajo carga repetida.



Fuente: Propia

## 8. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización tanto de los agregados convencionales y reciclados como el cemento asfáltico empleados en este estudio, se observa, que estos materiales pueden ser utilizados como parte constituyente de la mezcla asfáltica, bajo los criterios normativos del Instituto Nacional de Vías.

La determinación del grado de desempeño PG, mostró que para el ligante empleado en este estudio posee propiedades físicas adecuadas a temperaturas altas hasta 69 °C y a temperaturas bajas hasta -21 °C, entonces la clasificación del grado de desempeño es PG 69 – 21.

El porcentaje de vacíos sin duda es determinante en la mezcla asfáltica, debido a que un alto porcentaje puede ser desfavorable en cuanto al comportamiento dinámico. Teniendo en cuenta los resultados de la compactación, se observa que la mezcla que alcanzo un porcentaje de vacíos alto fue la D3 con 80% de agregado reciclado, esta mezcla reporto un porcentaje de vacíos del 11%. Sin embargo, se reportaron mejoras en el módulo resiliente satisfactorios a altas temperaturas que varían desde 5% hasta 40%, y a altas frecuencias se reportaron mejoras hasta del 5%, esto con respecto a la mezcla convencional. Por otra parte, en los resultados de deformación permanente la mezcla D3 presento una mejora con respecto a la mezcla convencional, debido a que se deforma un 28% menos. Para los autores es posible concluir que este comportamiento se debe a que el agregado reciclado compenso en cierta medida ese porcentaje de vacíos desfavorable de la mezcla asfáltica.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de deformación permanente se puede concluir que la mezcla asfáltica D2 con una adición de 40% de agregado reciclado tiene un mejor comportamiento a la deformación permanente, puesto que esta mezcla se deforma un 30% menos con respecto a la mezcla asfáltica convencional D0. Cabe resaltar que todas las mezclas evaluadas cumplen con el criterio Superpave para considerar que estas no presentaran ahuellamiento.

Los valores de módulo resiliente mostraron resultados satisfactorios en cuanto a la utilización de agregados reciclados, se reportaron mejoras en el módulo resiliente con respecto a la mezcla convencional que varían desde 1% hasta 20% a temperaturas bajas, a altas temperaturas se reportan mejoras que varían desde 9% hasta 40%. Con respecto a la frecuencia de carga se reportaron mejoras en el módulo resiliente desde 3% hasta 40% para bajas frecuencias, a altas frecuencias de carga se reportaron mejoras desde 1% hasta 11%. Lo anterior demuestra que el agregado reciclado ofrece un aporte estructural importante en la mezcla asfáltica.

## 9. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se recomienda la utilización entre un 20% y 40% de concreto hidráulico reciclado en la elaboración de mezcla asfáltica, debido a que mejora las propiedades dinámicas.

Para futuras investigaciones se recomienda evaluar otros porcentajes de agregado reciclado en la mezcla con el fin de conocer con más certeza el comportamiento gradual de la misma.

Debido a que el alcance de esta investigación se enfocó en evaluar el aporte estructural de un agregado reciclado en la mezcla asfáltica, solo se realizó el diseño a la mezcla convencional. Se recomienda para futuras investigaciones realizar un diseño de mezcla por cada dosificación propuesta, con el fin de evaluar las propiedades volumétricas y determinar para cada una de ellas un contenido óptimo de asfalto a utilizar.

Es imprescindible evaluar las leyes de fatiga y el análisis al ahuellamiento con probetas fabricadas en el laboratorio. Lo anterior asegura encontrar las correlaciones más ajustadas a la realidad que se requieren para predecir con certeza el comportamiento de una mezcla asfáltica ante las cargas que le son impuestas.

Se recomienda que en universidades colombianas se inicie un trabajo de investigación fuerte sobre la metodología de diseño Superpave y se estudie con cuidado para poder extraer los aspectos más significativos de esta metodología de diseño, promoviendo el uso de la normatividad propuesta por el programa SHRP.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] CAMACOL, Construcción en cifras, Bogotá, 2017.
- [2] CHEN, X., HUANG, B. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. Construction and Building Materials. 2008. Volume 22. 1950-1962
- [3] «FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. Publication N° FHWA-SA-95-003. February 1995.».
- [4] «GARNICA ANGUAS, Paul et al. Aspectos volumetricos de mezclas asfalticas. México, 2004, No. 264.».
- [5] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-706. Colombia.: Invías, 2013».
- [6] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-720. Colombia.: Invías, 2013».
- [7] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-712. Colombia.: Invías, 2013».
- [8] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-724. Colombia.: Invías, 2013».
- [9] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-702. Colombia.: Invías, 2013».
- [10] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-709. Colombia.: Invías, 2013».
- [11] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-717. Colombia.: Invías, 2013».
- [12] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-218. Colombia.: Invías, 2013».
- [13] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-238. Colombia.: Invías, 2013».
- [14] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma

- I.N.V.E.-224. Colombia.: Invías, 2013».
- [15] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-237. Colombia.: Invías, 2013».
- [16] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-133. Colombia.: Invías, 2013».
- [17] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-235. Colombia.: Invías, 2013».
- [18] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-125. Colombia.: Invías, 2013».
- [19] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-126. Colombia.: Invías, 2013».
- [20] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-227. Colombia.: Invías, 2013».
- [21] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-240. Colombia.: Invías, 2013».
- [22] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-239. Colombia.: Invías, 2013».
- [23] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-223. Colombia.: Invías, 2013».
- [24] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-222. Colombia.: Invías, 2013».
- [25] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-213. Colombia.: Invías, 2013».
- [26] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-725. Colombia.: Invías, 2013».
- [27] «INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo de materiales 2013. Norma I.N.V.E.-749. Colombia.: Invías, 2013».
- [28] «MARIN URIBE, Carlos. Guzmán Meléndez, María. Comparación de módulos dinámicos de probetas elaboradas por el método Marshall y Superpave. En: Revista

Ingenierías Universidad de Medellín. 2007, No. 6. p. 67-76».

- [29] «MARIN URIBE, Carlos. Tendencias en el diseño de mezclas asfálticas en caliente ¡Marshall vs Superpave!. En: Nuevas tendencias en el diseño de materiales y estructuras. Medellín: Universidad de Medellín, 2008. p. 179-204».
- [30] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 472, por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición, Colombia, 2017.
- [31] «OSSA, Alexandra, GARCIA, José Luis. Residuos de construcción y demolición (rcd), una alternativa para la construcción de carpetas asfálticas. En: Gaceta del instituto de ingeniería UNAM. Febrero, 2015, no 107, P. 14-17.».
- [32] QUIÑONES, Ferney. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Universidade de Brasilia. Brasilia, 2014.
- [33] «ROBERTS, F.L. et al. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 1996. 2nd ed. Lanham, MD, NAPA Research and Education Foundation.».
- [34] RODRIGUEZ, Oscar, FERNANDEZ, Adriana. Evaluación del módulo resiliente en un material granular (sub-base) con adición de concreto hidráulico reciclado. Universidad La Gran Colombia. Bogotá. 2015.
- [35] «RONDÓN QUINTANA, Hugo, et al. Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. Bogotá. Ecoe Ediciones. 2012. ISBN: 978-958-8723-53-2».
- [36] «RONDON QUINTANA, Hugo, REYES LIZCANO, Fredy. Pavimentos Mariales, construcción y diseño. Ed. 20. Bogotá. Ecoe Ediciones. 2015. ISBN: 9789587711752.».
- [37] SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, Resolución 2397. Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital, Bogotá, 2011.