



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**Maestría en Infraestructura
del Transporte**
en la Rama de las Vías Terrestres



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO UN ASFALTO CON
ADITIVO PRODUCTO DE LAS COLILLAS DE CIGARRILLO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

Ing. Valentina Silva Ramos

Asesor:

Dr. Rafael Soto Espitia

Co-Asesor:

Dra. Elivet Aguilar Campuzano

**Octubre, 2023
Morelia, Michoacán, México**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por las oportunidades que me ha brindado a lo largo de mi vida; de igual manera, quiero agradecer a mi madre por guiarme y siempre apoyarme en mis decisiones, ya que todos mis logros son el resultado de su dedicación y paciencia. Así como al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada para mis estudios ya que, sin esta no hubiese podido realizar y culminar los mismos.

Del mismo modo, agradezco al Dr. Rafael Soto Espitia por su perseverancia y tiempo para apoyar y supervisar este trabajo de tesis. De la misma manera, a la Dra. Elivet Aguilar Campuzano por haberme enseñado e involucrado en el área de los materiales y al M.I Juan Camilo Salamanca por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación.

A todo el personal del laboratorio PEPSA por brindarme la oportunidad y confianza, así como el tiempo y esfuerzo en instruirme para realizar los diferentes ensayos en sus instalaciones en la ciudad de Morelia (Michoacán). Asimismo, al equipo de MEGA ASFALTOS por darme la confianza y permitirme llevar acabo los ensayos correspondientes a la evaluación del cemento asfáltico, así como la experimentación química dentro de sus instalaciones en la ciudad de Salamanca (Guanajuato). En especial al M.I Adrián Ramírez, por su confianza y tiempo, así como el de compartir su conocimiento para poder culminar este trabajo de investigación con éxito. De igual forma, agradezco al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por acogerme en sus instalaciones y, poder reforzar mi conocimiento y aprendizaje, lo cual es un complemento para mi carrera profesional, especialmente al Dr. Horacio Delgado Alamilla por su colaboración.

Por último, agradezco el apoyo de mis familiares y compañeros, así como a los docentes y personal del posgrado por darme su apoyo y motivación durante el trascurso de esta etapa tan importante en mi vida.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 10 |
| CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 13 |
| 1.2. Justificación..... | 14 |
| 1.3. Objetivos..... | 15 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 15 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos..... | 15 |
| CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO..... | 17 |
| 2.1. MARCO CONCEPTUAL..... | 17 |
| 2.1.1. Agregado..... | 17 |
| 2.1.2. Fuentes de Agregados..... | 17 |
| 2.1.3. Propiedades del agregado y su evaluación..... | 17 |
| 2.1.4. Cemento asfáltico..... | 18 |
| 2.1.5. Propiedades químicas del asfalto..... | 18 |
| 2.1.6. Propiedades físicas del asfalto..... | 19 |
| 2.1.7. Mezcla asfáltica..... | 19 |
| 2.1.8. Diseño Marshall..... | 20 |
| 2.1.9. Contenido de asfalto..... | 20 |
| 2.1.10. Pastillas de referencia..... | 20 |
| 2.1.11. Contenido de diseño de asfalto..... | 20 |
| 2.1.12. Colillas de cigarrillo (filtro del cigarrillo)..... | 21 |
| 2.1.13. Síntesis química..... | 21 |
| 2.1.14. Método de Electrohilado..... | 22 |
| 2.1.15. Método de casting..... | 23 |
| 2.1.16. Microscópico Electrónico de Barrido (MEB)..... | 23 |
| 2.1.17. Espectroscopia infrarroja..... | 24 |
| 2.2. MARCO NORMATIVO..... | 24 |
| 2.2.1. Ensayo a los agregados pétreos..... | 25 |
| 2.2.1.1. Reducción de muestras..... | 25 |
| 2.2.1.2. Peso volumétrico..... | 25 |
| 2.2.1.3. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos..... | 25 |
| 2.2.1.4. Gravedad específica..... | 26 |
| 2.2.1.5. Absorción..... | 28 |
| 2.2.1.6. Resistencia a la degradación en la Máquina de Los Ángeles..... | 29 |
| 2.2.1.7. Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval..... | 30 |
| 2.2.1.8. Resistencia al intemperismo acelerado..... | 32 |
| 2.2.1.9. Porcentaje de partículas planas y alargadas..... | 33 |
| 2.2.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas..... | 34 |
| 2.2.1.11. Desprendimiento por fricción..... | 35 |
| 2.2.1.12. Contenido de vacíos no compactados del agregado fino..... | 36 |
| 2.2.1.13. Equivalente de arena en el agregado fino..... | 37 |
| 2.2.1.14. Valor de azul de metileno de una arcilla..... | 37 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.2.1.15. | Requisitos de calidad del agregado pétreo | 38 |
| 2.2.2. | Pruebas al cemento asfáltico | 39 |
| 2.2.2.1. | Punto de Inflamación Cleveland | 39 |
| 2.2.2.2. | Viscosidad Rotacional Brookfield | 39 |
| 2.2.2.3. | Punto de Reblandecimiento | 40 |
| 2.2.2.4. | Módulo reológico de corte dinámico..... | 40 |
| 2.2.2.5. | Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)..... | 41 |
| 2.2.2.6. | Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV) | 42 |
| 2.2.2.7. | Después de envejecimiento en horno a presión (PAV) | 43 |
| 2.2.2.8. | Requisitos de calidad del cemento asfáltico | 43 |
| 2.2.3. | Ensayo Marshall..... | 45 |
| 2.2.3.1. | Análisis de vacíos..... | 46 |
| 2.2.3.2. | Requisitos de calidad..... | 46 |
| CAPÍTULO III - ESTADO DEL ARTE | | 48 |
| CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA | | 52 |
| 4.1. | FASE 1 – Pruebas Químicas..... | 52 |
| 4.1.1. | Recolección | 52 |
| 4.1.2. | Síntesis química..... | 53 |
| 4.1.3. | Fibras y membranas..... | 53 |
| 4.1.3.1. | Generación de fibras (Método Electrohilado) | 53 |
| 4.1.3.2. | Generación de membranas (Método de casting)..... | 54 |
| 4.2. | FASE 2 – Caracterización | 54 |
| 4.2.1. | Caracterización de fibras..... | 54 |
| 4.2.2. | Caracterización del agregado pétreo | 54 |
| 4.2.2.1. | Muestreo | 54 |
| 4.2.2.2. | Secado del agregado pétreo | 55 |
| 4.2.2.3. | Cuarteo..... | 55 |
| 4.2.2.4. | Peso volumétrico | 55 |
| 4.2.2.5. | Análisis granulométrico | 56 |
| 4.2.2.6. | Gravedad específica..... | 56 |
| 4.2.2.7. | Absorción | 56 |
| 4.2.2.8. | Resistencia a la degradación en la Máquina de los Ángeles | 57 |
| 4.2.2.9. | Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval | 57 |
| 4.2.2.10. | Resistencia al intemperismo acelerado | 58 |
| 4.2.2.11. | Porcentaje de partículas planas y alargadas | 59 |
| 4.2.2.12. | Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso | 59 |
| 4.2.2.13. | Desprendimiento por fricción | 60 |
| 4.2.2.14. | Contenido de vacíos no compactados del agregado fino | 60 |
| 4.2.2.15. | Valor de equivalente de arena en el agregado fino | 61 |
| 4.2.2.16. | Valor de azul de metileno de una arcilla | 61 |
| 4.2.3. | Caracterización del cemento asfáltico | 61 |
| 4.2.3.1. | Punto de Inflamación Cleveland | 62 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.2.3.2. | Viscosidad rotacional Brookfield | 62 |
| 4.2.3.3. | Punto de reblandecimiento | 62 |
| 4.2.3.4. | Módulo reológico de corte dinámico..... | 62 |
| 4.2.3.5. | Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)..... | 63 |
| 4.2.3.6. | Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV) | 63 |
| 4.2.3.7. | Procedimiento de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV)..... | 63 |
| 4.3. | FASE 3 – Diseño | 64 |
| 4.3.1. | Propuesta granulométrica | 64 |
| 4.3.2. | Cálculo del contenido de asfalto inicial | 64 |
| 4.3.3. | Definición del uso de las colillas de cigarrillo | 64 |
| 4.4. | FASE 4 – Ensaye de Mezcla | 65 |
| 4.4.1. | Ensaye de mezcla con síntesis y de referencia en laboratorio..... | 65 |
| 4.4.2. | Evaluación, comparación y análisis de resultados | 65 |
| CAPÍTULO V - RESULTADOS Y ANÁLISIS | | 66 |
| 5.1. | FASE 1 – Pruebas Químicas..... | 66 |
| 5.1.1. | Recolección de colillas de cigarrillo | 66 |
| 5.1.2. | Síntesis química..... | 66 |
| 5.1.3. | Método de electrohilado | 69 |
| 5.1.4. | Método de casting | 71 |
| 5.1.5. | Resumen de las soluciones químicas realizadas..... | 72 |
| 5.2. | FASE 2 – Caracterización | 73 |
| 5.2.1. | Caracterización de las fibras..... | 73 |
| 5.2.1.1. | Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) | 73 |
| 5.2.1.2. | Espectroscopia infrarroja | 79 |
| 5.2.2. | Caracterización del agregado pétreo | 80 |
| 5.2.2.1. | Muestreo | 80 |
| 5.2.2.2. | Secado del material | 81 |
| 5.2.2.3. | Cuarteo..... | 81 |
| 5.2.2.4. | Peso volumétrico | 82 |
| 5.2.2.5. | Análisis granulométrico | 84 |
| 5.2.2.6. | Gravedad específica y absorción | 87 |
| 5.2.2.7. | Resistencia a la degradación en la Máquina de los Ángeles | 89 |
| 5.2.2.8. | Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval | 90 |
| 5.2.2.9. | Resistencia al intemperismo acelerado | 91 |
| 5.2.2.10. | Porcentaje de partículas planas y alargadas | 92 |
| 5.2.2.11. | Porcentaje de partículas fracturadas | 93 |
| 5.2.2.12. | Desprendimiento por fricción | 94 |
| 5.2.2.13. | Contenido de vacíos no compactados del agregado fino | 95 |
| 5.2.2.14. | Valor de equivalente de arena..... | 96 |
| 5.2.2.15. | Valor de azul de metileno..... | 96 |
| 5.2.2.16. | Resumen de resultados al agregado pétreo | 97 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.2.3. | Caracterización del cemento asfáltico | 98 |
| 5.2.3.1. | Punto de Inflamación Cleveland | 98 |
| 5.2.3.2. | Viscosidad rotacional Brookfield | 99 |
| 5.2.3.3. | Punto de reblandecimiento | 100 |
| 5.2.3.4. | Módulo reologico de corte dinámico..... | 100 |
| 5.2.3.5. | Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)..... | 101 |
| 5.2.3.6. | Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV) | 103 |
| 5.2.3.7. | Procedimiento de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV)..... | 104 |
| 5.2.3.8. | Resumen de resultados clasificación del cemento asfáltico por grado PG | 105 |
| 5.3. | FASE 3 – Diseño | 106 |
| 5.3.1. | Propuesta granulométrica | 106 |
| 5.3.2. | Cálculo del contenido de asfalto inicial | 107 |
| 5.3.3. | Incorporación de las colillas de cigarrillo en la mezcla asfáltica | 108 |
| 5.3.4. | Asfalto con síntesis química | 109 |
| 5.3.5. | Comparativa (Asfalto de referencia vs Asfalto con aditivo)..... | 117 |
| 5.4. | FASE 4 – Diseño en laboratorio | 121 |
| 5.4.1. | Mezcla Asfáltica de referencia | 121 |
| 5.4.2. | Mezcla asfáltica con síntesis química producto de las colillas de cigarrillo (2.0%)..... | 126 |
| 5.4.3. | Comparación de resultados (Mezcla asfáltica de referencia vs con síntesis) | 130 |
| CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES | | 135 |
| 6.1. | Trabajos futuros..... | 136 |
| REFERENCIAS | | 138 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | | |
|----------------------|--|----|
| Figura II-1. | Composición colilla de cigarrillo | 21 |
| Figura II-2. | Síntesis química..... | 22 |
| Figura II-3. | Método del electrohilado..... | 23 |
| Figura II-4. | Método de casting..... | 23 |
| Figura II-5. | Equipo Microscópico electrónico de barrido..... | 24 |
| Figura II-6. | Máquina de los ángeles | 30 |
| Figura II-7. | Agitador Mecánico | 35 |
| Figura II-8. | Equipo de viscosímetro digital Brookfield..... | 40 |
| Figura II-9. | Equipo de reómetro de corte dinámico | 41 |
| Figura II-10. | Equipo de envejecimiento RTFO..... | 42 |
| Figura IV-1. | Metodología | 52 |
| Figura IV-2. | Prueba de cuarteo | 55 |
| Figura IV-3. | Vista de la sección transversal máxima de la partícula | 60 |

| | |
|--|-----|
| Figura V-1. Reutilización de botellas de plástico | 66 |
| Figura V-2. Limpieza y corte de colillas de cigarrillo..... | 67 |
| Figura V-3. Proceso de síntesis química | 68 |
| Figura V-4. Método de electrohilado | 70 |
| Figura V-5. Primeros resultados del método casting..... | 71 |
| Figura V-6. Membranas método casting | 71 |
| Figura V-7. Equipo de Microscopio eléctrico de barrido | 73 |
| Figura V-8. Resultados MEB solución No. 4..... | 74 |
| Figura V-9. Mapeo solución No. 4..... | 75 |
| Figura V-10. Resultados MEB solución No. 4..... | 75 |
| Figura V-11. Mapeo solución No. 4..... | 76 |
| Figura V-12. Resultados MEB solución No. 4..... | 76 |
| Figura V-13. Mapeo solución No. 4..... | 77 |
| Figura V-14. Resultados MEB solución No. 5..... | 77 |
| Figura V-15. Mapeo solución No. 5..... | 78 |
| Figura V-16. Resultado del ensayo de espectroscopia infrarroja..... | 79 |
| Figura V-17. Referencia del ensayo de espectroscopia infrarroja | 80 |
| Figura V-18. Muestreo de agregados pétreos | 81 |
| Figura V-19. Secado natural de los agregados pétreos | 81 |
| Figura V-20. Cuarteo (Separación Mecánica) | 82 |
| Figura V-21. Peso volumétrico seco densidad seca mínima..... | 82 |
| Figura V-22. Peso volumétrico seco densidad seca máxima..... | 83 |
| Figura V-23. Granulometría de los agregados pétreos | 84 |
| Figura V-24. Curvas Granulométricas..... | 86 |
| Figura V-25. Prueba de gravedad y absorción en agregado grueso | 87 |
| Figura V-26. Prueba de gravedad y absorción en el agregado fino | 88 |
| Figura V-27. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles | 89 |
| Figura V-28. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval..... | 90 |
| Figura V-29. Prueba de la resistencia al intemperismo acelerado de los agregados..... | 91 |
| Figura V-30. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso..... | 92 |
| Figura V-31. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso..... | 93 |
| Figura V-32. Prueba para el desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreo..... | 94 |
| Figura V-33. Prueba del contenido de vacíos no compactados del agregado fino..... | 95 |
| Figura V-34. Procedimiento de la prueba de equivalente de arena | 96 |
| Figura V-35. Procedimiento de la prueba de valor de azul de metileno de una arcilla..... | 97 |
| Figura V-36. Procedimiento de la prueba punto de Inflamación Cleveland | 99 |
| Figura V-37. Procedimiento de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield | 99 |
| Figura V-38. Procedimiento de la prueba de punto de reblandecimiento | 100 |
| Figura V-39. Procedimiento de la prueba de módulo reológico de corte dinámico | 101 |
| Figura V-40. Procedimiento de la prueba de envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO) | 102 |

| | |
|---|-----|
| Figura V-41. Procedimiento de la prueba de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)..... | 103 |
| Figura V-42. VDO (Horno de desgasificación al vacío)..... | 104 |
| Figura V-43. Procedimiento de la prueba después de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)..... | 104 |
| Figura V-44. Graduaciones para mezcla asfáltica..... | 106 |
| Figura V-45. Propuesta granulométrica..... | 107 |
| Figura V-46. Comprobación de la integración de síntesis química en el asfalto..... | 111 |
| Figura V-47. Resultados pérdida de masa por calentamiento..... | 116 |
| Figura V-48. Prueba de densidad..... | 120 |
| Figura V-49. Fabricación de muestras mediante la metodología Marshall..... | 121 |
| Figura V-50. Volumetría y acondicionamiento de muestras..... | 122 |
| Figura V-51. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto de referencia)..... | 122 |
| Figura V-52. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto de referencia)..... | 123 |
| Figura V-53. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto de referencia)..... | 124 |
| Figura V-54. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto de referencia)..... | 124 |
| Figura V-55. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto de referencia)..... | 125 |
| Figura V-56. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto con síntesis)..... | 126 |
| Figura V-57. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto con síntesis)..... | 127 |
| Figura V-58. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto con síntesis)..... | 128 |
| Figura V-59. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto con síntesis)..... | 128 |
| Figura V-60. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto con síntesis)..... | 129 |
| Figura V-61. Comparación de la volumetría (%)..... | 131 |
| Figura V-62. Comparación de la estabilidad (kgf)..... | 131 |
| Figura V-63. Criterios de aceptabilidad para la prueba de estabilidad..... | 132 |
| Figura V-64. Comparación de flujo (mm)..... | 133 |
| Figura V-65. Criterios de aceptabilidad para la prueba de flujo..... | 134 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla II-1. Juego de mallas por agregado pétreo..... | 26 |
| Tabla II-2. Combinación de muestra a ensayar 19.0 a 12.5 mm..... | 31 |
| Tabla II-3. Combinación de muestra a ensayar 12.5 a 6.3 mm..... | 31 |
| Tabla II-4. Combinación de muestra a ensayar 9.5 a 6.3 mm..... | 31 |
| Tabla II-5. Fracciones para la muestra de agregado fino..... | 32 |
| Tabla II-6. Fracciones para la muestra de agregado grueso..... | 32 |
| Tabla II-7. Masa de la muestra..... | 36 |
| Tabla II-8. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 30 \times 10^6$ | 38 |
| Tabla II-9. Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste..... | 44 |
| Tabla II-10. Continuación de los requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste..... | 44 |
| Tabla II-11. Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de..... | 45 |
| Tabla II-12. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa..... | 46 |
| Tabla II-13. Requisitos de vacíos en el agregado mineral (VAM)..... | 47 |
| Tabla III-1. Resumen del estado del arte..... | 49 |

| | |
|---|-----|
| Tabla V-1. Soluciones químicas | 69 |
| Tabla V-2. Resultados de electrohilado..... | 70 |
| Tabla V-3. Resumen de resultado de membranas | 72 |
| Tabla V-4. Resumen de las soluciones realizadas | 72 |
| Tabla V-5. Muestras analizadas mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) 73 | |
| Tabla V-6. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco suelto..... | 83 |
| Tabla V-7. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco varillado | 84 |
| Tabla V-8. Resultados de la granulometría para la grava triturada | 85 |
| Tabla V-9. Resultados de la granulometría para la gravilla triturada..... | 85 |
| Tabla V-10. Resultado de la granulometría para la arena triturada..... | 86 |
| Tabla V-11. Resultado de la prueba de gravedad y absorción del agregado grueso | 87 |
| Tabla V-12. Resultado de la prueba de gravedad y absorción para el agregado fino | 88 |
| Tabla V-13. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles | 90 |
| Tabla V-14. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval..... | 91 |
| Tabla V-15. Resultados de la resistencia al intemperismo acelerado de la grava, gravilla y arena..... | 92 |
| Tabla V-16. Resultados del porcentaje de partículas planas y alargadas de la grava y gravilla..... | 93 |
| Tabla V-17. Resultados del porcentaje de partículas fracturadas en grava y gravilla | 94 |
| Tabla V-18. Resultados del desprendimiento por fricción en la grava y gravilla | 95 |
| Tabla V-19. Resultados del contenido de vacíos no compactados del agregado fino..... | 95 |
| Tabla V-20. Resultados de la prueba de equivalente de arena..... | 96 |
| Tabla V-21. Resultados de la prueba de azul de metileno | 97 |
| Tabla V-22. Resumen de resultados al agregado pétreo | 98 |
| Tabla V-23. Resultados de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield..... | 100 |
| Tabla V-24. Resultados de la prueba de módulo reológico de corte dinámico | 101 |
| Tabla V-25. Resultados de la prueba envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO) | 103 |
| Tabla V-26. Resultados de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV) | 105 |
| Tabla V-27. Resultados de la clasificación del cemento asfáltico por gado PG | 105 |
| Tabla V-28. Cálculo del contenido de asfalto inicial..... | 107 |
| Tabla V-29. Combinaciones de síntesis química | 110 |
| Tabla V-30. Resultados de asfalto con síntesis química | 113 |
| Tabla V-31. Continuación de resultados de asfalto con síntesis química | 114 |
| Tabla V-32. Continuación de resultados de asfalto con síntesis química | 115 |
| Tabla V-33. Caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis | 118 |
| Tabla V-34. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis..... | 119 |
| Tabla V-35. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis..... | 120 |
| Tabla V-36. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica de referencia) . | 125 |
| Tabla V-37. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica con síntesis) ... | 129 |

RESUMEN

Hoy en día, se han realizado diversas aplicaciones e investigaciones con el fin de mejorar el desempeño de los pavimentos, debido a que por el aumento de cargas aplicadas y factores climáticos se han visto altamente afectada su vida útil; por tal razón, se han estudiado nuevos aditivos y materiales naturales, reciclados y químicos con el fin de contribuir a la conservación de los pavimentos.

Por otro lado, las colillas de cigarrillo son uno de los desechos sólidos más comunes en el mundo y altamente peligrosos, ya que contienen componentes tóxicos como los metales pesados [GOBIERNO DE MÉXICO, 2019]. Sin embargo, están compuestas en un 95% de acetato de celulosa, el cual es un plástico de origen vegetal.

Un problema abierto para el área de la construcción de carreteras es el aprovechar los recursos no biodegradables con el fin de disminuir la contaminación ambiental y al mismo tiempo generar mezclas asfálticas con mejores propiedades químicas, características mecánicas y/o físicas. Por lo tanto, se propone mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica utilizando un asfalto con aditivo producto de la adición de colillas de cigarrillo tratadas químicamente; del mismo modo aprovechar un recurso no biodegradable para contribuir a disminuir la contaminación ambiental.

En el transcurso de esta investigación, se desarrollaron de forma experimental tres diferentes formas del uso de las colillas de cigarrillo (Fibras, membranas y síntesis) para su incorporación en las mezclas asfálticas. Mediante un análisis experimental entre estas alternativas, se obtuvo que la forma más adecuada para la incorporación de las colillas de cigarrillo, era en el cemento asfáltico, lo anterior se evaluó mediante ensayos de laboratorio y se corroboró que al adicionar ciertas cantidades de síntesis química aumenta y conserva las características y propiedades reológicas del cemento asfáltico, pasando su uso de intensidad de tráfico **alto (H)** a **muy alto (V)**; del mismo modo, se ejecutó un diseño de mezcla asfáltica densa en caliente bajo la metodología Marshall, dando como resultado que, el uso del cemento asfáltico con un aditivo producto de las colillas de cigarrillo conserva las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

Palabras clave: *Colillas de cigarrillo, mezcla asfáltica, asfalto, aditivo.*

ABSTRACT

Today, various applications and research have been carried out to improve the performance of pavements, because the increase in applied loads and climatic factors have greatly affected their useful life; for this reason, new additives and natural, recycled, and chemical materials have been studied to contribute to the maintenance of pavements.

On the other hand, cigarette butts are one of the most common solid wastes in the world and are highly hazardous, as they contain toxic components such as heavy metals [GOBIERNO DE MÉXICO, 2019]. However, they are composed of 95% cellulose acetate that is a plastic of plant origin.

An open problem for the area of road construction is the use of biodegradable resources to reduce environmental pollution and at the same time generate asphalt mixtures with better chemical properties and mechanical and/or physical characteristics. Therefore, it is proposed to improve the mechanical properties of an asphalt mixture by using an additive asphalt produced by the addition of chemically treated cigarette butts; similarly, to exploit a biodegradable resource to help reduce environmental pollution.

In the development of this research, three different ways of using cigarette butts (fibers, membranes, and synthesis) for incorporation into asphalt mixtures were developed experimentally. Through an experimental analysis of these alternatives, it was found that the most appropriate way to incorporate cigarette butts was in asphalt cement. This was evaluated by laboratory tests and it was confirmed that adding certain amounts of chemical synthesis increases and preserves the characteristics and rheological properties of asphalt cement, changing its use from high traffic intensity (H) to very high (V); similarly, a hot dense asphalt mixture design was carried out under the Marshall methodology, giving asphalt. That the use of asphalt cement with an additive produced from cigarette butts preserves the mechanical properties of the asphalt mixture.

Keywords: *Cigarette butts, asphalt mixture, asphalt, additive.*

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

El diseño de los pavimentos flexibles para las carreteras ha ido cambiando a través de los años debido a diversos factores como, el aumento de cargas aplicadas y las condiciones climáticas; los cuales, afectan directamente las propiedades químicas, características físicas o mecánicas de los pavimentos generando así, la reducción de su vida útil produciendo agrietamientos, deformaciones, desprendimiento de los agregados, entre otros.

Por lo tanto, a través de la historia, se han buscado diferentes maneras de controlar o reducir los deterioros de los pavimentos flexibles mediante materiales o aditivos químicos, naturales o reciclados; del mismo modo, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) denomina una publicación como *“Pavimentos flexibles. problemática, metodologías de diseño y tendencias”* [IMT, 1998], en donde menciona que “el mejoramiento del comportamiento de los pavimentos deberá estar sujeto a un programa de investigación que permita aumentar el conocimiento de las propiedades físicas, químicas, reológicas y mecánicas de cementos y concretos asfálticos”. Es decir que, aunque hoy en día existe diferentes alternativas para reducir estos deterioros, es necesario seguir investigando sobre este tema.

La contaminación ambiental es la presencia de componentes nocivos en el medio ambiente por medio de residuos tóxicos [Ayuntamiento de Huelva, 2018] siendo así, un tema que se ha tratado a nivel mundial. Según National Geographic [JONES, 2017] en un informe de Ocean Conservancy afirma que las colillas contaminan los océanos tanto como los plásticos y que su presencia está por encima de residuos como envoltorios, botellas, tapones y bolsas de plástico.

En particular, las colillas de cigarrillo tienen agentes carcinogénicos como la nicotina, el benzopireno y adictivos como plomo 210 y polonio 210 en cantidades que ponen en riesgo la salud [PEÑA, 2017]; sin embargo, los filtros de cigarrillos están hechos de acetato de celulosa; lo anterior, lo hace muy atractivo para los diferentes investigadores alrededor del mundo. Es así que, el aprovechamiento de agentes contaminantes, tal como lo son las colillas de cigarrillo, es un área que está siendo investigada para aplicaciones en diferentes áreas.

Un problema en el ámbito de las vías terrestres, es el aprovechar los recursos no biodegradables con el fin de disminuir la contaminación ambiental y al mismo tiempo generar mezclas asfálticas con mejores propiedades químicas, características mecánicas y/o físicas; debido a esto, se han realizado diversas investigaciones con el fin de mejorar el desempeño de los pavimentos; del mismo modo, cabe resaltar que, las colillas de cigarrillo son uno de los desechos sólidos más comunes en el mundo y altamente peligrosos para los seres vivos debido a que contienen componentes tóxicos. Además, están hechas de un tipo de plástico que tarda más de una década en degradarse [GOBIERNO DE MÉXICO, 2019].

Por consiguiente, el propósito de esta investigación es, mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, a través del uso de un material no aprovechable como lo son las colillas de cigarrillo, por medio del área de las vías terrestres.

1.1. Planteamiento del problema

El diseño de los pavimentos flexibles para las carreteras ha ido cambiando a través de los años debido a diversos factores como, el aumento de cargas aplicadas y las condiciones climáticas; los cuales, afectan directamente las propiedades químicas, características físicas o mecánicas de los pavimentos generando así, la reducción de su vida útil, agrietamientos, deformaciones, desprendimiento de los agregados, entre otros. Por lo tanto, a través de la historia, se han buscado diferentes maneras de controlar o reducir estos factores. Hoy en día, se tienen diferentes tipos de aditivos químicos, naturales y reciclados con el fin de mejorarlas; por consiguiente, se ha realizado diversos estudios respecto a la incorporación de materiales como RAR X [CIRTEC, 2021], Cal [KIKUT et al, 2020], fibras sintéticas [MARDONES et al, 2019], fibras de vidrio [AMANCO WAVIN, 2022], entre otros.

Por otro lado, la contaminación ambiental es la presencia de componentes nocivos en el medio ambiente por medio de residuos tóxicos, como el desecho de plásticos y objetos no biodegradables en espacios naturales, debido a que no tienen un proceso adecuado para su desecho o reutilización, son capaces de causar la muerte o provocar efectos nocivos en la salud [AYUNTAMIENTO DE HUELVA, 2018] siendo así, un tema que se ha tratado a nivel mundial.

En la actualidad, se han realizado diversas aplicaciones de materiales no residuales en el ámbito de la construcción como el caucho de llanta *“RARx es un producto de alta tecnología fabricado a partir de polvo de NFVU 60% de su composición pre tratado con cemento asfáltico y otros aditivos de origen mineral”* [CIRTEC, 2021], la Geo malla Fibra de Vidrio cuyo objetivo es *“Controlar agrietamientos por reflexión, agrietamientos por fatiga y deformaciones plásticas”* [AMANCO WAVIN, 2022], entre otros; los cuales han demostrado reducir el impacto ambiental y mejorar las propiedades de algunos materiales.

Otro material no residual son las colillas de cigarrillo, es uno de los grandes desechos a nivel mundial, *“Se estima que 4.5 mil millones de colillas se desechan al año en el planeta, afectando así de manera importante los ecosistemas, tanto en la tierra como en el mar”* [JONES, 2017] por lo que se ha trabajado en la reutilización de este pasivo ambiental en diferentes ámbitos alrededor del mundo con el fin de dar una optimización a este desecho.

Un problema abierto para el área de la construcción de carreteras, es el aprovechar los recursos no biodegradables con el fin de disminuir la contaminación ambiental y al mismo tiempo generar mezclas asfálticas con mejores propiedades y/o características; lo anterior teniendo en cuenta que, hoy en día se han realizado diversas aplicaciones e investigaciones con el fin de mejorar el desempeño de los pavimentos, así como su fabricación y construcción; del mismo modo, cabe resaltar que, las colillas de cigarrillo son uno de los

desechos sólidos más comunes en el mundo y altamente peligrosos para nosotros y para el medio ambiente, ya que contienen componentes tóxicos como los metales pesados. Además, están hechas de un tipo de plástico que tarda más de una década en degradarse [GOBIERNO DE MÉXICO, 2019] por lo tanto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica utilizando las colillas de cigarrillo?

Debido a lo anterior, en esta investigación se propone mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica mediante la disolución de las colillas de cigarrillo; del mismo modo, aprovechar un recurso no biodegradable para contribuir a disminuir la contaminación ambiental.

1.2. Justificación

Hoy en día se tiene varios grupos de deterioros en los pavimentos flexibles, como son, deformaciones permanentes (ahuellamiento, hundimiento, hinchamientos, etc.), agrietamientos (Fisuras); desintegraciones (desprendimientos, baches, entre otros); así como las exudaciones [MOPC, 2016]. Del mismo modo, existen diferentes aditivos y modificadores con el fin de disminuir estos deterioros. Sin embargo, aún se siguen presentando en la superficie del pavimento flexible, por lo que es necesario seguir investigando con el fin de aumentar el conocimiento del comportamiento de estos materiales.

Según National Geographic en el año 2017, en un informe de Ocean Conservancy [JONES, 2017] afirma que las colillas contaminan los océanos tanto como los plásticos y que su presencia está por encima de residuos como envoltorios, botellas, tapones y bolsas de plástico. El estudio denuncia además que las colillas no solo contaminan las aguas, también son ingeridas por error por los peces y otros animales [CRESPO, 2020]. De igual forma se reitera que, las colillas de cigarrillo son el principal contaminante en playas y océanos y el segundo más abundante en ríos y embalses. Del mismo modo, se menciona que *“Las colillas de los cigarrillos son ya el 40% de los residuos del mar Mediterráneo”* [CRESPO, 2020].

El aprovechamiento de agentes contaminantes, tal como lo son las colillas de cigarrillo, es un área que está siendo investigada para aplicaciones como: modificador de cemento asfáltico [RAHMAN et al, 2020]; fertilizantes y abonos naturales para la agricultura [TERRACYCLE, 2021]; prendas y accesorios [MANTIS, 2021], fundas, suelas, aislantes térmicos y acústicos [ECOFILTER, 2023], artículos para el hogar [IMEKO, 2017], entre otros productos. Las colillas de cigarrillo estas compuestas en un 95% de acetato de celulosa, el cual es un plástico de origen vegetal; es decir que, su fabricación es a partir de fibra de algodón y pulpa de madera; por lo tanto, se han realizado diversos estudios en donde se busca extraer este componente de las colillas de cigarrillo y poder reutilizarlo en diferentes materiales.

Debido a lo anterior, se ha estado explorando su aprovechamiento para su incorporación en mezclas asfálticas [MOHAJERANI, 2017], [CUI et al, 2018], [RAHMAN et al, 2020]. Adicional a esto, hoy en día se tiene un gran potencial de recolección de este contaminante a nivel mundial, algunas de las empresas que se dedican a esto son: TerraCycle (Estados Unidos) [TERRACYCLE, 202], Ecofilter (México) [ECO FILTER, 2023], IMEKO (Chile) [IMEKO, 2017], Butt Out (Australia) BUTT OUT, 2023, entre otras.

Mediante las colillas de cigarrillo, se desea mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica como la estabilidad, resistencia, deformación, entre otras. Adicional a lo anterior, dar uso a un material o residuo no aprovechable el cual se puede definir como *“todo material o sustancia que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación a un proceso productivo; es decir que, no tienen ningún valor comercial, por lo tanto, requieren disposición final”*, en un residuo aprovechable *“cualquier material, objeto, sustancia o elemento que no tiene valor para quien lo genera, pero se puede incorporar nuevamente a un proceso productivo”* [REDJURISTA, 2002]

Por consiguiente, el propósito de esta investigación es, evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica a partir de la disolución y análisis de un material no aprovechable como lo son las colillas de cigarrillo, por medio del área de vías terrestres, con el fin de buscar la reutilización de este pasivo ambiental, debido a que el mismo afecta de manera directa al medio ambiente y por sus componentes químicos la vida de los seres vivos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar una mezcla asfáltica mejorando y/o conservando sus propiedades mecánicas, mediante la disolución de las colillas de cigarrillo, con el fin de dar uso a un material no aprovechable en el ámbito de los pavimentos flexibles.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diluir las colillas de cigarrillo mediante una síntesis química con el fin de desarrollar diferentes alternativas de incorporación de esta, en una mezcla asfáltica.
- Ejecutar la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico mediante pruebas de laboratorio teniendo como referencia la normativa vigente para realizar una mezcla asfáltica densa en caliente.
- Desarrollar diferentes alternativas para el uso de las colillas de cigarrillo (fibras, membranas y síntesis), así como determinar la más adecuada mediante un análisis experimental para su incorporación en la mezcla asfáltica.

- Evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica con las colillas de cigarrillo, con respecto a una mezcla de referencia mediante la metodología Marshall, con el fin de evidenciar mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla con colillas de cigarrillo.

CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

Diversos campos de aplicación han buscado la manera de darle un segundo uso a las colillas de cigarrillo, con el fin de contribuir a reducir el gran impacto ambiental que estas generan; del mismo modo debido a sus características y propiedades, se busca la incorporación de este desecho en el ámbito de la construcción con el propósito de crear y/o mejorar los procesos para su aplicación.

En esta investigación se busca la manera de generar una síntesis química para incorporarla en una mezcla asfáltica, con el fin de mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de esta.

2.1.1. Agregado

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.2. Fuentes de Agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo con su origen. Estos incluyen: Agregados naturales y agregados procesados [ASPHALT INSTITUTO,2001]

- **Agregados Naturales:** Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo, y los químicos. [ASPHALT INSTITUTO,2001]
- **Agregados Procesados:** Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: Gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducido en tamaño antes de ser usados en la pavimentación. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.3. Propiedades del agregado y su evaluación

El agregado deberá poseer ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para un pavimento asfáltico de buena calidad, estas propiedades son:

- **Graduación y tamaño máximo de partículas:** Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente, requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones. [MARTIN et al, 1962]
- **Limpieza:** La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparada con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable. [MARTIN et al, 1962]
- **Dureza:** Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de la superficie deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. [MARTIN et al, 1962]
- **Capacidad de Absorción:** Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad. [ASPHALT INSTITUTO,2001]
- **Forma de la Partícula:** La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. [ASPHALT INSTITUTO,2001]
- **Textura Superficial:** La textura superficial de las partículas de agregado, es un factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento [MARTIN et al, 1962]

2.1.4. Cemento asfáltico

El asfalto es un material de color oscuro, cementante, que varía ampliamente en consistencia entre sólido y semisólido, a temperaturas normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.5. Propiedades químicas del asfalto

El asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunos trazos de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El

asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.6. Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento. [NCHRP, 2011]

- **Durabilidad:** Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. [NCHRP, 2011]
- **Adhesión y Cohesión:** Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. [NCHRP, 2011]
- **Susceptibilidad a la temperatura:** Todos los asfaltos son termoplastos esto hace referencia a que se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. [ASPHALT INSTITUTO,2001]
- **Endurecimiento y Envejecimiento:** Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándolo con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado). [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.7. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es una combinación de cemento asfáltico y agregados en proporciones exactas y previamente especificadas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades y características de la mezcla. Las mezclas asfálticas se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más comunes en caliente. [ASOPAC, 2004]

La mezcla asfáltica cuenta con una variedad de características las cuales son:

- **Estabilidad:** Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamiento, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla. [ASOPAC, 2004]

- **Durabilidad:** Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto. [ASOPAC, 2004]
- **Impermeabilidad:** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento. [NCHRP, 2011]
- **Flexibilidad:** Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la sub rasante. [ASOPAC, 2004]
- **Resistencia a la fatiga:** Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse. [NCHRP, 2011]
- **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. [ASOPAC, 2004]

2.1.8. Diseño Marshall

El propósito del método Marshall es determinar el contenido de asfalto óptimo para una combinación durante la construcción del pavimento. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.9. Contenido de asfalto

Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. [ASOPAC, 2004]

2.1.10. Pastillas de referencia

Se define como una mezcla de diseño frecuentemente necesaria de prueba con el fin de encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas. [SICT,2004]

2.1.11. Contenido de diseño de asfalto

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla final de pavimentación, se determina a partir de las pruebas realizadas a una mezcla asfáltica mediante la metodología Marshall, el cual debe cumplir con ciertos criterios de referencia, si no se cumplen todos los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

2.1.12. Colillas de cigarrillo (filtro del cigarrillo)

El filtro de los cigarrillos está constituido de acetato de celulosa, que se produce al hacer reaccionar la celulosa con el ácido acético. El acetato de celulosa es un material termoplástico relativamente duro y brillante, incoloro, transparente y amorfo con una buena claridad, estabilidad a los rayos UV y resistencia química. [SALAMANCA et al, 2019]

El filtro fue concebido con una función principal, retener el alquitrán y el resto de los productos perjudiciales tanto los que lleva el tabaco como los producidos en la combustión del cigarrillo, antes de que lleguen a los pulmones de los fumadores (*Ver figura II-1 Composición colilla de cigarrillo*). [MONZONIS, 2011]



Figura II-1. Composición colilla de cigarrillo

Fuente: Monzonis, 2011

2.1.13. Síntesis química

Una síntesis química es el proceso de obtener compuestos químicos a partir de sustancias químicas; del mismo modo, permite obtener nuevos compuestos ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso.

Los materiales y equipos para realizar una síntesis química pueden variar según el elemento que se desee obtener, para este caso se requieren los siguientes elementos (*Ver figura II-2. Síntesis química*):

- Matraz
- Agitador magnético
- Tapón de caucho
- Cinta selladora
- Parrilla
- Soporte metálico

- Jeringa
- Termómetro
- Baño maría (glicerina)
- Sustancia líquida (Ácido, etanol, acetona, etc.)
- Sólido (Colillas de cigarrillo)

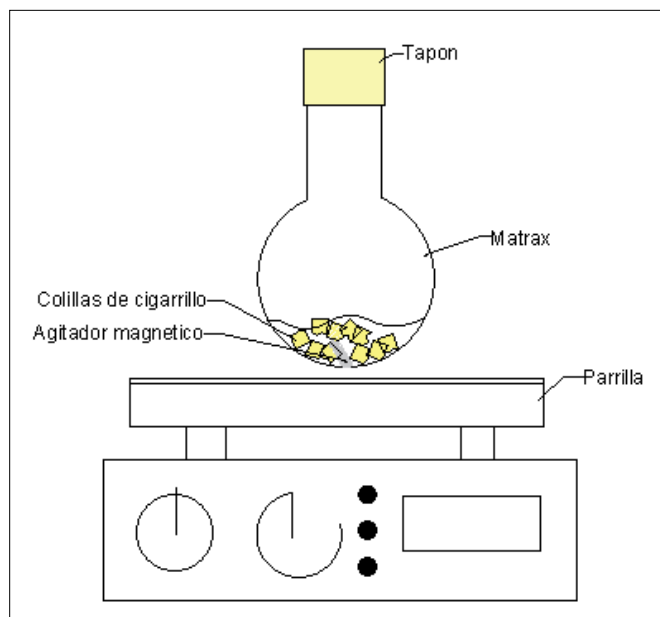


Figura II-2. Síntesis química
Fuente: Propia

2.1.14. Método de Electrohilado

El método electrohilado es un proceso en el que se utiliza una carga eléctrica para crear fibras de filamentos de polímero. El proceso difiere del electro pulverización, que utiliza gotas, en que el polímero líquido cargado eléctricamente se tira en una hebra sólida.

Se utilizan dos métodos para crear el polímero líquido utilizado en el electrohilado. Se puede fundir de su forma sólida o se puede mezclar con un disolvente para formar una solución de polímero. [PEÑA, 2017]

Para poder realizar el método de electrohilado se requiere el siguiente equipo (*Ver figura II-3. Método del electrohilado*)

- Jeringa con la solución
- Papel aluminio
- Equipo de electrohilado (Bomba impulsadora, Fuente de alto voltaje y plato recolector)

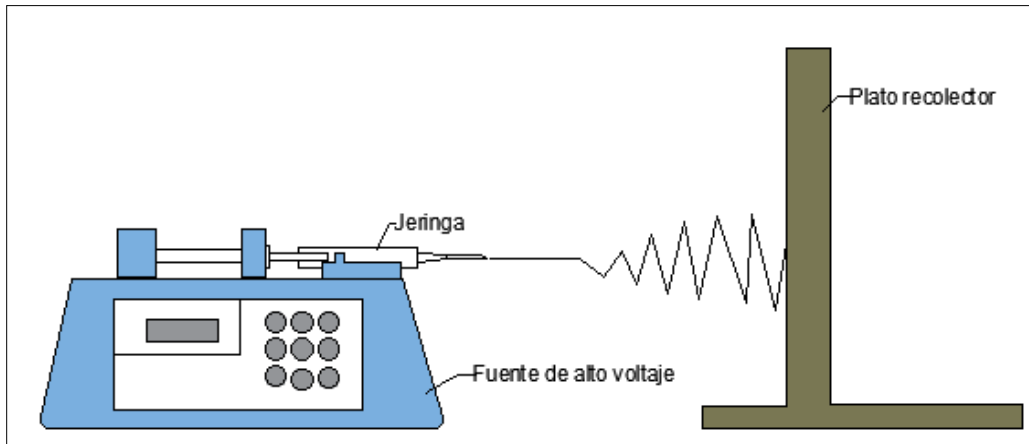


Figura II-3. Método del electrohilado
Fuente: Propia

2.1.15. Método de casting

El método casting es el proceso mediante el cual un líquido es vertido en un molde y dejado para su reacción, curado o endurecimiento para formar un objeto rígido que reproduce la cavidad del molde (Ver figura II-4. Método de casting). [HUERTA et al, 2023]

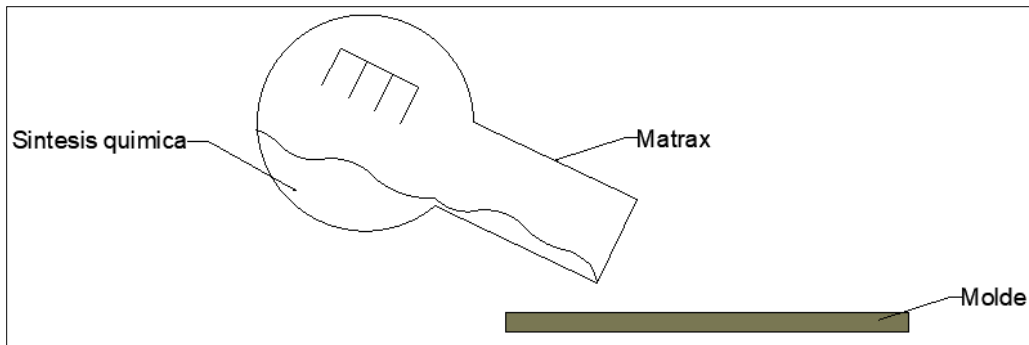


Figura II-4. Método de casting
Fuente: Propia

2.1.16. Microscópico Electrónico de Barrido (MEB)

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra (Ver figura II-5. Equipo Microscópico electrónico de barrido). Este equipo se usa para muestras en alta resolución y realizar un análisis de la composición química de las mismas. [SCAIUMA.ES, 2023]

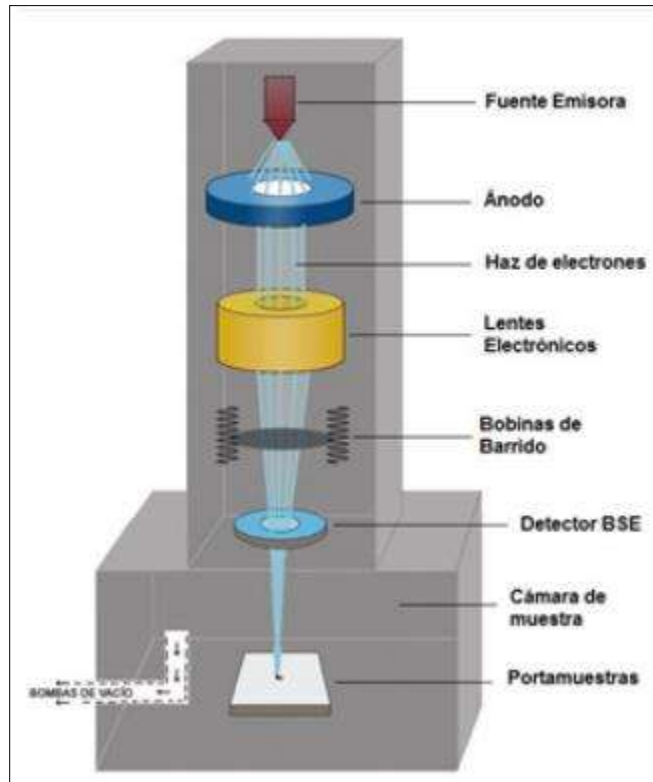


Figura II-5. Equipo Microscópico electrónico de barrido
Fuente: SCAIUMA.ES, 2023

2.1.17. Espectroscopia infrarroja

La espectroscopia infrarroja (espectroscopia IR o espectroscopia de vibración) es la medida de la interacción de la radiación infrarroja con la materia por absorción, emisión o reflexión. Se utiliza para estudiar e identificar sustancias químicas o grupos funcionales en forma sólida, líquida o gaseosa. Este equipo mide la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra y proporciona información sobre los grupos funcionales presentes. [BRUNKER.COM, 2023].

2.2. MARCO NORMATIVO

Para realizar esta investigación, es necesario la caracterización de los agregados pétreos, así como la caracterización del cemento asfáltico, con el fin de poder realizar una mezcla asfáltica por medio de la metodología Marshall; todo lo anterior, siguiendo la normativa vigente de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y el manual de pruebas de laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte - Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (IMT- SICT).

2.2.1. Ensayo a los agregados pétreos

Para la caracterización de los agregados pétreos, se deben realizar una serie de pruebas en laboratorio con el fin de determinar la calidad de los mismo. A continuación, se presenta cada uno de estas pruebas.

2.2.1.1. Reducción de muestras

Este método de ensayo presenta técnicas para el muestreo de los agregados finos y gruesos, así como la fuente potencial de abastecimiento, control del producto en la fuente de abastecimiento, control de las operaciones en la obra para el uso, y aceptación o rechazo de los materiales. [SICT,2002]

Para hacer el cuarteo de los materiales se usó el método A (Separador Mecánico).

2.2.1.2. Peso volumétrico

- **Peso Volumétrico seco y suelto:** Esta prueba permite determinar las masas volumétricas de los materiales para terracerías, es decir, la relación masa - volumen en diferentes estados. [ASTM C 29/ C 29M -97, 1997]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Recipiente de forma cilíndrica con capacidad de 10 lb.
- Balanza con capacidad de 20 Kg y aproximación de 5 g.
- Cucharón de 25 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

Para realizar la prueba de masa volumétrica seco y varillado se requieren los mismos equipos que el ensayo de masa volumétrica seco y suelto, con la diferencia de que en esta se requiere de una varilla metálica lisa con punta redondeada. [ASTM C 29/ C 29M -97, 1997]

2.2.1.3. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos

Esta prueba determina la distribución de tamaños de las partículas de agregados finos y gruesos por medio de tamices. La distribución de tamaños se utiliza para determinar el cumplimiento de las partículas de agregado con los requerimientos de alguna especificación, así como, proveer datos necesarios para el control de la producción de la mezcla. [IMT, 2002]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Juego de mallas con alambre de bronce o acero de diversos calibres tejidos en forma de cuadrícula. La distribución de mallas de acuerdo al agregado pétreo se muestra en la *tabla II-1. Juego de mallas por material pétreo.*

Tabla II-1. Juego de mallas por agregado pétreo.

| Juego de Mallas | | |
|-----------------|------------|--------|
| Arena | Sello | Grava |
| No.4 | 1/2" | 2" |
| No.10 | 3/8" | 1 1/2" |
| No.20 | 1/4" | 1 1/4" |
| No.40 | No.4 | 1" |
| No.60 | Pasa No. 4 | 3/4" |
| No.100 | - | 1/2" |
| No.200 | - | 3/8" |
| Fondo | - | 1/4" |

Fuente: IMT, 2002, **Edición:** Propia

- Balanza con capacidad de 2 kg y aproximación de 0,1 g.
- Recipientes de lámina galvanizada de forma rectangular aproximadamente de 40 x 70 x 20 cm.
- Tapas para el juego de mallas de forma circular.
- Cucharón de acero Galvanizado.

2.2.1.4. Gravedad específica

Este método de prueba permite determinar la densidad relativa de los agregados pétreos empleados en la mezcla asfáltica, con el fin de conocer la masa del sólido por unidad de volumen de dicho sólido sin vacíos en cada una de sus fracciones.

- **Gravedad específica en finos:** Esta prueba consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición para obtener su densidad relativa. [SICT,2018]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Balanza con capacidad de 1 kg o más y precisión de 0,1 g.
- Un picnómetro en donde el volumen contenido puede ser reproducido dentro de 0,1 cm³.
- Tamiz No. 4
- Molde y un pisón para pruebas de humedad superficial: El molde debe tener la forma de cono truncado con las siguientes dimensiones: 40 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte superior, 90 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte inferior, y 753 mm de altura, el metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm. El pisón debe tener una masa

de 340 (±) 15 g y una superficie circular en la cara de apisonamiento de 25 (±) 3 mm de diámetro.

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la gravedad específica bruta del agregado fino es necesario hacer uso de la ecuación (II-1), y para determinar la gravedad específica aparente se requiere la ecuación (II-2)

- Cálculo de la gravedad específica bruta

$$G_{sb} = \frac{A}{B+S-C} \quad (II-1)$$

- Cálculo de la gravedad específica aparente

$$G_{sa} = \frac{A}{B+A-C} \quad (II-2)$$

Donde:

- G_{sb} = Gravedad específica bruta. (adimensional)
- G_{sa} = Gravedad específica aparente. (adimensional)
- S = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)
- A = Masa de la muestra seca al horno (g)
- B = Masa del picnómetro con agua (g)
- C = Masa del picnómetro con agua y muestra (g)
-
- **Gravedad específica en gruesos:** Esta prueba consisten en introducir la muestra de prueba en un depósito de agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, después, comparar con dicho volumen de masa seca de la muestra de prueba, obtener su masa por unidad de volumen y finalmente comparar con la densidad de agua, para obtener su densidad relativa. [SICT,2018]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Baño de agua capaz de mantener una temperatura de 23 ± 2 °C para sumergir la muestra
- Tamiz No.4
- Canastilla de malla de alambre con aberturas del No. 6 o menores para evitar la pérdida de material

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la gravedad específica bruta del agregado grueso es necesario hacer uso de la ecuación (II-3), y para determinar la gravedad específica aparente se requiere la ecuación (II-4).

- Cálculo de la gravedad específica bruta

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \quad (II-3)$$

- Cálculo de la gravedad específica aparente

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad (II-4)$$

Donde:

- G_{sb} = Gravedad específica bruta (adimensional)
- G_{sa} = Gravedad específica aparente. (adimensional)
- A = masa de la muestra secada al horno (g)
- B = masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g)
- C = masa de la muestra sumergida en agua (g)

2.2.1.5. Absorción

Se conoce como absorción, al incremento en masa del agregado pétreo debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito.

- **Absorción en agregado fino:** Para la determinación de la absorción, se separa una porción de 500 (\pm) 10 g de agregado fino el cual debe estar saturado, se seca a masa constante y se determina la masa seca. [SICT,2018]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Balanza
- Molde y un pisón para pruebas de humedad superficial: El molde debe tener la forma de cono truncado con las siguientes dimensiones: 40 (\pm) 3 mm de diámetro interior en la parte superior, 90 (\pm) 3 mm de diámetro interior en la parte inferior, y 75 (\pm) 3mm de altura, el metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm. El pisón debe tener una masa de 340 (\pm) 15 g y una superficie circular en la cara de apisonamiento de 25 (\pm) 3 mm de diámetro.
- Vidrio de reloj.

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la absorción del agregado fino, se debe usar la ecuación (II-5).

$$Aborción \% = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (II-5)$$

Donde:

- S = masa del espécimen saturado y superficialmente seco (g)
- A = masa del espécimen secado al horno (g)

- **Absorción en agregado grueso:** Una muestra de agregado se sumerge en agua durante 24h para llenar esencialmente los poros; luego se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas y se determina la masa. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina la masa seca. Usando los valores de masa obtenidos y las ecuaciones en este método de prueba, es posible calcular la absorción. [SICT,2018]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Contenedor de muestras.
- Balanza de 1 kg de capacidad
- Depósito de agua.
- Vidrio de reloj.

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la absorción del agregado grueso, se debe usar la ecuación (II-6).

$$Abosorción \% = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (II-6)$$

Donde:

- B = masa de la muestra de prueba de la superficie saturada (g)
- A = masa de la muestra de prueba secada al horno (g)

2.2.1.6. Resistencia a la degradación en la Máquina de Los Ángeles

Esta prueba es una medida de la degradación del agregado, cuya combinación de acciones incluyen la abrasión o desgaste, impacto, y molienda en un tambor de acero giratorio que contiene un número indicado de esferas de acero, el número depende de la clasificación de la muestra de ensayo. [SICT,2002]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- La máquina de los Ángeles está constituida por un cilindro cerrado en ambos extremos el cual consta de un diámetro interior de 711 (±) 5 mm y una longitud interior de 508 (±) 5 mm, montado sobre dos soportes ubicados en el centro de sus caras paralelas, que le permiten girar sobre su eje de simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 revoluciones por minuto (*Ver figura II-6. Máquina de los ángeles*).

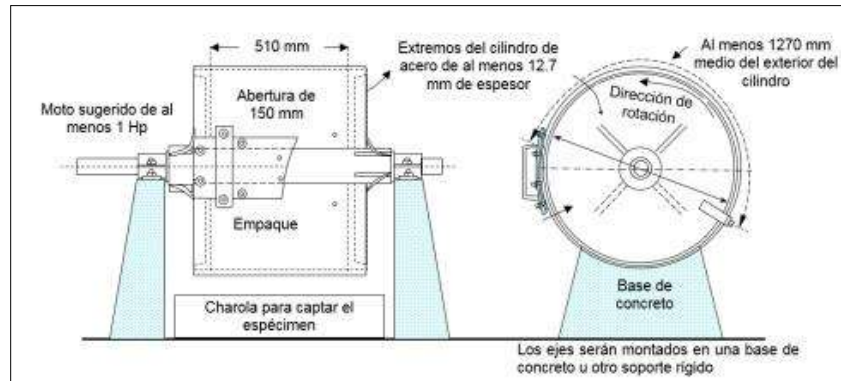


Figura II-6. Máquina de los ángeles

Fuente: IMT, 2019

- Juego de tamiz No. 12.
- Carga abrasiva de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47mm y una masa entre 390 y 445 g cada una Para ver la composición de la muestra con la carga.

Cálculos y resultados: Para el cálculo del desgaste de los ángeles del agregado grueso es necesario hacer uso de la ecuación (II-7).

$$\text{Desgaste de los Angeles (\%)} = \frac{C-Y}{C} * 100 \quad (\text{II-7})$$

Donde:

- C = Masa de la muestra inicial (g)
- Y = Masa de la muestra final (g)

2.2.1.7. Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval

Esta prueba determinar la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado pétreo en presencia de agua utilizando la máquina Micro-Deval. El ensayo es útil también para detectar cambios en las propiedades del agregado como parte de control o garantía de calidad del agregado. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Máquina de abrasión Micro-Deval de molino giratorio
- Contenedor de abrasión de acero inoxidable con capacidad de 5 litros, con tapa y anillo de hule capaz de sellar el recipiente y evitar la pérdida de agua.
- Carga abrasiva de balines magnéticos de acero inoxidable.
- Tamices con aberturas cuadradas de 19.0 mm [3/4"], 16.0 mm [5/8"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"], 6.3 mm [1/4"], 4.75 mm [No. 4], y 1.18 mm [No. 16].

La muestra deberá consistir en material que pasa el tamiz de 19 mm [3/4"] y se retiene en el tamiz de 9.5 mm [3/8"]. Así mismo, debe estar seca al horno una cantidad de 1500 ± 5 g

para ser separada de la siguiente manera (Ver tabla II-2. Combinación de muestra a ensayar 19.0 a 12.5 mm)

Tabla II-2. Combinación de muestra a ensayar 19.0 a 12.5 mm

| Pasa | Retiene | Masa |
|----------------|----------------|------------|
| 19.0 mm (3/4") | 16.0 mm (5/8") | 375 g |
| 16.0 mm (5/8") | 12.5 mm (1/2") | 375 g |
| 12.5 mm (1/2") | 9.5 mm (3/8") | 750 g |
| Total | | 1 500± 5 g |

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

Si el tamaño nominal del agregado es de 12.5 mm [1/2"] o menor, la muestra de 1500 ± 5 g deberá ser separada como se demuestra a continuación (Ver tabla II-3. Combinación de muestra a ensayar 12.5 a 6.3 mm)

Tabla II-3. Combinación de muestra a ensayar 12.5 a 6.3 mm

| Pasa | Retiene | Masa |
|----------------|----------------|------------|
| 12.5 mm (1/2") | 9.5 mm (3/8") | 750 g |
| 9.5 mm (3/8") | 6.3 mm (1/4") | 375 g |
| 6.3 mm (1/4") | 4.75 mm (No.4) | 375 g |
| Total | | 1 500± 5 g |

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

Si el tamaño nominal del agregado es de 9.5 mm [3/8"] o menor, la muestra de 1500 ± 5 g deberá ser separada de la siguiente manera (Ver tabla II-4. Combinación de muestra a ensayar 9.5 a 6.3 mm)

Tabla II-4. Combinación de muestra a ensayar 9.5 a 6.3 mm

| Pasa | Retiene | Masa |
|---------------|----------------|------------|
| 9.5 mm (3/8") | 6.3 mm (1/4") | 750 g |
| 6.3 mm (1/4") | 4.75 mm (No.4) | 750 g |
| Total | | 1 500± 5 g |

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

Cálculos y resultados: Para el cálculo del desgaste por abrasión en agua en la Máquina Micro-Deval del agregado grueso, es necesario hacer uso de la ecuación (II-8).

$$\text{Desgaste Micro - Deval (\%)} = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (\text{II-8})$$

Donde:

- Desgaste Micro-Deval = Desgaste por abrasión en agua en la Máquina Micro-Deval (%)
- A = Masa inicial de la muestra (g)
- B = Masa final de la muestra (g)

2.2.1.8. Resistencia al intemperismo acelerado

El objetivo de esta prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo en materiales pétreos por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Contenedores para sumergir las muestras de agregado en la solución.
- Densímetro
- Tamices con aberturas cuadradas de 37.5 mm [1 1/2"], 31.5 mm [1 1/4"], 25.0 mm [1"], 19.0 mm [3/4"], 16.0 mm [5/8"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"], 8.0 mm [5/16"], 4.75 mm [No. 4], 4.00 mm [No. 5], 2.36 [No. 8], 1.18 mm [No. 16], 600 µm [No. 30], y 300 µm [No. 50].
- Reactivos Sulfato de sodio anhidro (Na₂SO₄) o cristalino (Na₂·SO₄·10H₂O), sulfato de magnesio anhidro (MgSO₄) o cristalino (MgSO₄·7H₂O), cloruro de bario (BaCl₂), agua destilada o des ionizada.

La muestra de agregado fino debe ser separada por el tamiz 9.5 mm [3/8"] y deberá contener no menos de 100 g de cada una de las siguientes fracciones (*Ver tabla II-5. Fracciones para la muestra de agregado fino*). Las fracciones que contengan menos de 5% de material respecto a la masa inicial, deberán ser descartadas.

Tabla II-5. Fracciones para la muestra de agregado fino

| Pasa el tamiz | Retenido en el tamiz |
|---------------|----------------------|
| 3/8" | No.4 |
| No.4 | No.8 |
| No.8 | No.16 |
| No.16 | No.30 |
| No.30 | No.50 |

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

La muestra de agregado grueso deberá consistir en el material retenido en el tamiz 4.75 mm [No. 4] y, deberá ser suficiente para obtener todas las cantidades de cada fracción de agregado (*Ver tabla II-6. Fracciones para la muestra de agregado grueso*). Se deberán ensayar todas las fracciones, a excepción de aquellas que contengan menos del 5% de material respecto a la masa inicial.

Tabla II-6. Fracciones para la muestra de agregado grueso

| Fracción del agregado | Pasa | Retiene | Masa (g) |
|-----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 63.0 mm a 37.5 mm | 63.0 mm (2 1/2") | 50.0 mm (2") | 3000 ± 300 |
| | 50.0 mm (2") | 37.5 mm (1 1/2") | 2000 ± 200 |
| | Total | | 5000 ± 300 |
| 37.5 mm a 19.0 mm | 37.5 mm (1 1/2") | 25.0 mm (1") | 1000 ± 50 |
| | 25.0 mm (1") | 19.0 mm (3/4") | 500 ± 30 |

| Fracción del agregado | Pasa | Retiene | Masa (g) |
|-------------------------|----------------|----------------|------------------|
| | Total | | 1500 ± 50 |
| 19.0 mm a 9.5 mm | 19.0 mm (3/4") | 12.5 mm (1/2") | 670 ± 10 |
| | 12.5 mm (1/2") | 9.5 mm (3/8") | 330 ± 5 |
| | Total | | 1000 ± 10 |
| 9.5 mm a 4.75 mm | 9.5 mm (3/8") | 4.75 mm (No.4) | 300 ± 5 |
| | Total | | 300 ± 5 |

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la resistencia al intemperismo acelerado es necesario hacer uso de la ecuación (II-9).

$$I = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (\text{II-9})$$

Donde:

- I = Porcentaje de intemperismo acelerado (%)
- A = Masa inicial de la muestra (g)
- B = Masa final de la muestra (g)

2.2.1.9. Porcentaje de partículas planas y alargadas

Mediante esta prueba, es posible determinar por masa del porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso. La forma de la partícula es un parámetro que influencia las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que, para un comportamiento adecuado, se busca contar con partículas esféricas y evitar las partículas planas y alargadas debido a que pudieran presentar tendencia a fracturarse durante la construcción y bajo la acción del tránsito. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Dispositivo proporcional calibrador. En donde la posición del eje se puede ajustar para proporcionar la relación de 1:2, 1:3 y 1:5.
- Tamices con aberturas de: 37.5 mm [1 1/2"], 25.0 mm [1"], 19.0 mm [3/4"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"], 4.75 mm [No. 4].

Cálculos y resultados: Para el cálculo del porcentaje de partículas planas y alargadas es necesario hacer uso de las siguientes ecuaciones:

Para el cálculo del porcentaje de agregado retenido por tamiz de la granulometría (%RTtg), se requiere hacer uso de la ecuación (II-10).

$$\% RT_{tg}(C) = \frac{\text{Masa total de cada fracción (B)}}{\text{Masa de cada fracción (D)}} * 100 \quad (\text{II-10})$$

Del mismo modo, para determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría (%PyAtg), se hace uso de la ecuación (II-11).

$$\% PyA_{tg}(H) = \frac{(PyA_{tm}(g) * RT_{tg}(C))}{100} \quad (II-11)$$

Seguidamente, se debe realizar el cálculo de la sumatoria del porcentaje retenido (%RTtotal) con la ecuación (II-12).

$$\% RT_{total}(Total C) = \Sigma \% RT_{tg}(C) \quad (II-12)$$

Así como el cálculo de la sumatoria del porcentaje de partículas planas y alargadas (%PyAtotal) por medio de la ecuación (II-13).

$$\% PyA_{total}(Total H) = \Sigma \% PyA_{tg} \quad (II-13)$$

Para finalmente realizar el cálculo del porcentaje de partículas planas y alargadas de la granulometría (%PyA) con la ecuación (II-14).

$$\% PyA = \frac{PyA_{total}(total H)}{RT_{total}(Total C)} * 100 \quad (II-14)$$

2.2.1.10. Porcentaje de partículas fracturadas

Este método de ensayo cubre la determinación, por masa, del porcentaje de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso. La importancia de contar con un alto contenido de partículas fracturadas consiste en maximizar la resistencia al corte incrementando la fricción interna entre partículas en mezclas de agregados ligados o no ligados. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Balanza con capacidad suficiente para determinar las masas del ensayo
- Tamices con aberturas de: 37.5 mm [1 1/2"], 25.0 mm [1"], 19.0 mm [3/4"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"], 4.75 mm [No. 4].

Cálculos y resultados: Para el cálculo del porcentaje de partículas fracturadas es necesario hacer uso de la ecuación (II-15) y (II-16).

$$P_2 = \frac{F}{F+U+N} * 100 \quad (II-15)$$

$$P_1 = \frac{U}{F+U+N} * 100 \quad (II-16)$$

Donde:

- P2 = Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas (%)
- P1 = Porcentaje de partículas con una cara fracturada (%)
- F = Masa de las partículas con dos o más caras fracturadas(g)
- U = Masa de las partículas con una cara fracturada (g)
- N = Masa de las partículas sin caras fracturadas (g)

2.2.1.11. Desprendimiento por fricción

Esta prueba nos permite determinar el desprendimiento por fricción de la película de asfalto que envuelve el agregado grueso. [AMAAC,2010]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Frasco de vidrio de 500 cm³ de capacidad con aproximadamente 6.5 cm de diámetro a todo lo largo y 16 cm de altura.
- Juego de mallas de ½ “, 3/8” y ¼ “
- Agitador mecánico (*Ver figura II-7. Agitador Mecánico*)

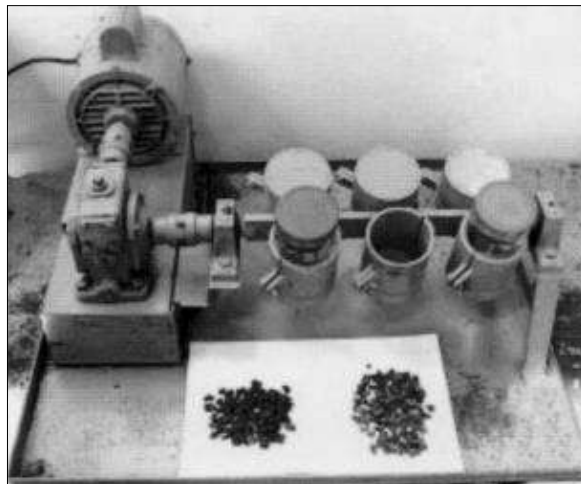


Figura II-7. Agitador Mecánico

Fuente: AMAAC,2010

- Vasos cilíndricos de aluminio con capacidad de 2 litro
- Cemento asfáltico
- Agua destilada o potable

Cálculos y resultados: Para el cálculo del desprendimiento es necesario hacer uso de la ecuación (II-17).

$$P_{FR} = \frac{(0x n_0)+(10 x n_{10})+(20 x n_{20})+\dots+(100x n_{100})}{N} \quad (II-17)$$

Donde:

- PFR = Es la pérdida por fricción promedio redondeado
- N0,10,20,100= Es el número de partículas con 0,10, 20,100% de desprendimiento por fricción
- N = Es el número de partículas en la porción considerada

2.2.1.12. Contenido de vacíos no compactados del agregado fino

Por medio de este ensayo se determina el contenido de vacíos no compactados en una muestra de agregado fino. El contenido de vacíos provee un indicio de la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino, comparado con otros a los mismos tamaños. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Medido Cilíndrico de cobre, de aproximadamente 100 ml de capacidad
- Embudo con la superficie lateral del tronco inclinado a $60 \pm 4^\circ$ desde la horizontal y con una abertura de 12.7 ± 0.6 mm de diámetro.
- Soporte de embudo o con tres o cuatro apoyos.
- Tamices.
- Placa de vidrio o cuadrada de aproximadamente 60 x 60 mm y con un espesor mínimo de 4 mm para calibrar el medidor cilíndrico.

Preparación de muestra (Método A)

Se debe preparar la muestra seca al horno de 190 ± 0.2 g, que deberá ser separada y recombinada. A continuación, se presenta la cantidad de material necesario por tamaño individual de tamices (Ver tabla II-7. Masa de la muestra).

Tabla II-7. Masa de la muestra

| Tamaño de la fracción individual | Masa [g] |
|--|---------------------------------|
| 2.36 mm [No. 8] a 1.18 mm [No. 16] | 44 ± 0.2 |
| 1.18 mm [No. 16] a 600 μm [No. 30] | 57 ± 0.2 |
| 600 μm [No. 30] a 300 μm [No. 50] | 72 ± 0.2 |
| 300 μm [No. 50] a 150 μm [No. 100] | 17 ± 0.2 |
| TOTAL | 190 ± 0.2 |

Fuente: IMT, 2019, **Edición:** Propia

Cálculos y resultados: Para el cálculo de la angularidad del agregado fino es necesario hacer uso de la ecuación (II-18).

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100 \quad (\text{II-18})$$

Donde:

- U = Vacíos no compactados en el material, con aproximación de 0.1% (%)
- V = Volumen del medidor cilíndrico, con aproximación de 0.1 mL (mL)
- F = Masa del agregado fino, con aproximación de 0.1 g (g).
- G = Gravedad específica del agregado fino, con aproximación de 0.1.

2.2.1.13. Equivalente de arena en el agregado fino

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz No.4. [SICT,2016]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Probeta graduada de 30 (\pm) 1 mm de diámetro interior
- Pisón compuesto por una varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 450 mm de largo.
- Sifón compuesto por una botella de aproximadamente 4L
- Tamiz de 4,75 mm (N.º 4) de abertura nominal.
- Recipiente de capacidad igual o mayor que 4 L
- Agitador mecánico
- Herramientas y accesorios como embudos, botellas para reactivos, regla de enrase, etc.
- Solución de trabajo de 240 g de cloruro de calcio anhidro, grado técnico, 1.085 g de glicerina farmacéutica, 25 g de formaldehído (solución 40% de volumen / volumen).

Cálculos y resultados: Para el cálculo del equivalente de arena, es necesario hacer uso de la ecuación (II-19).

$$EA (\%) = \frac{Na}{Nt} * 100 \quad (II-19)$$

Donde:

- EA = equivalente de arena (%).
- Na = nivel superior de la arena (mm).
- Nt = nivel superior de la arcilla (mm).

2.2.1.14. Valor de azul de metileno de una arcilla

Este ensayo determina la absorción de azul de metileno por una arcilla, la cual se calcula como el valor de azul de metileno (MBV). El índice de azul de metileno determina el grado de reactividad del material filler (pasa No. 200) que es utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas, el cual puede tener una influencia nociva en su desempeño. [IMT, 2019]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Agitador magnético
- Barra magnética agitadora
- Vaso de precipitado de vidrio de 100 mL.

- Bureta de 50 mL de capacidad con graduación de 0.1 mL.
- Varilla de vidrio de punta redonda con 8 mm de diámetro por 150 a 250 mm de longitud.
- Tamiz con aberturas de 0.075 mm [No. 200]
- Papel filtro Whatman No. 40
- Reactivos. agua destilada, azul de metileno grado reactivo (C₁₆H₁₈C₁N₃S·3H₂O).

Cálculos y resultados: El valor de azul de metileno (MBV) es equivalente a la cantidad de mililitros de solución de azul de metileno utilizados hasta su saturación (aparición del halo), y se reporta en miligramos de azul de metileno por gramo del material evaluado mediante la siguiente ecuación (II-20).

$$MBV = \frac{C_{sol}}{C_{filler}} \quad (II-20)$$

Donde:

- MBV = Valor de azul de metileno (mg/g)
- C_{sol} = Cantidad de azul de metileno necesario para alcanzar el punto final del ensayo
- C_{filler} = Cantidad de material contenido en la suspensión (g)

2.2.1.15. Requisitos de calidad del agregado pétreo

Los agregados pétreos que se utilicen en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa en caliente, deben cumplir con los requisitos de calidad correspondientes a una intensidad de tránsito entre un millón de ejes equivalentes y hasta treinta millones de ejes equivalentes, los cuales se indican en la *tabla II-8. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 30 \times 10^6$* .

Tabla II-8. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < \Sigma L \leq 30 \times 10^6$

| Característica ^[1] | Valor | |
|--|------------------------|----|
| GRAVA | | |
| Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo | 2,4 | |
| Desgaste de Los Ángeles, %, máximo | 30 | |
| Desgaste Microdeval, %, máximo | 18 | |
| Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2] | En sulfato de sodio | 15 |
| | En sulfato de magnesio | 20 |
| Partículas alargadas y lajeadas, %, máximo | 40 | |
| Partículas trituradas, %, mínimo | Una cara | 95 |
| | Dos o más caras | 85 |
| Desprendimiento por fricción, %, máximo | 20 | |
| ARENA Y FINOS | | |
| Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo | 2,4 | |
| Angularidad, %, mínimo | 45 | |
| Equivalente de arena, %, mínimo | 50 | |
| Azul de metileno, mg/g, máximo | 15 | |

Fuente: SICT, 2017

2.2.2. Pruebas al cemento asfáltico

Para la caracterización del cemento asfáltico se deben realizar una serie de pruebas de laboratorio con el fin de determinar la calidad de este mediante su grado PG (Performance Grade). [IMT, 2018] A continuación, se menciona cada una de estas.

2.2.2.1. Punto de Inflamación Cleveland

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo. [IMT, 2000]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Copa abierta de Cleveland
- Soporte para la copa abierta de Cleveland
- Parrilla eléctrica
- Termómetro
- Aplicador de flama

Cálculos y resultados: Se registra como punto de inflamación, la temperatura leída en el termómetro cuando al pasar el aplicador se produzca una pequeña flama instantánea o desello en cualquier punto de la superficie.

2.2.2.2. Viscosidad Rotacional Brookfield

Por medio de esta prueba es posible determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260°C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. [SICT,2002]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Viscosímetro Brookfield estándar (*Ver figura II-8. Equipo de viscosímetro digital Brookfield*)
- Sistema de lectura digital.
- Extensión de guía y rotos.
- Controlador de temperatura.

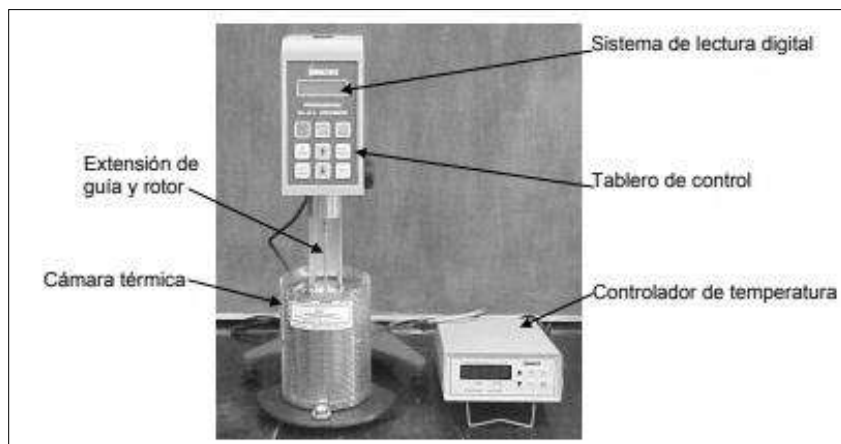


Figura II-8. Equipo de viscosímetro digital Brookfield
Fuente: SICT,2002

Cálculos y resultados: Se reporta como resultado de esta prueba, el promedio de las lecturas observadas en el viscosímetro para cada temperatura de prueba, indicando el número de rotor utilizado.

2.2.2.3. Punto de Reblandecimiento

Mediante esta prueba se puede estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de baño de agua o glicerina. [SICT,2000]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Anillos de latón
- Vaso de vidrio refractario
- Sistema de soporte
- Esferas
- Guías en latón
- Placa de apoyo
- Parrilla eléctrica
- Agua limpia

Cálculos y resultados: Se reporta como punto de reblandecimiento el promedio de las temperaturas registradas indicando el líquido utilizado para la prueba.

2.2.2.4. Módulo reológico de corte dinámico

Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase, como propiedades visco elásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. [IMT, 2002]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Sistema de prueba del reómetro de corte dinámico (DSR) (*Ver figura II-9. Equipo de reómetro de corte dinámico*)
- Plato base
- Planos oscilatorios
- Controlador de temperatura
- Detector de temperatura
- Dispositivo de carga
- Sistema de control y registro de datos
- Molde para formar la muestra

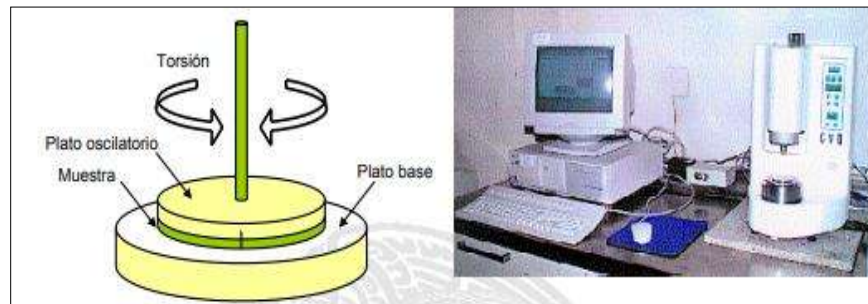


Figura II-9. Equipo de reómetro de corte dinámico

Fuente: IMT, 2002

Cálculos y resultados: Se reporta el valor del módulo reológico de corte dinámico como $(G^*/\text{sen}\delta)$ en kPa, así como el Angulo de fase δ , y la temperatura de prueba.

2.2.2.5. Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)

Por medio del efecto de calor y aire aplicados a una película de cemento asfáltico semisólido, esta prueba permite obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo que ocurren durante el transporte, mezclado en caliente, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, a partir de la medición de la viscosidad y sus características reológicas. Esta prueba se utiliza también para determinar el cambio de masa por la pérdida de componentes volátiles durante el proceso de envejecimiento a corto plazo. [IMT,2022]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Horno rotatorio de película delgada (*Ver figura II-10. Equipo de envejecimiento RTFO*)

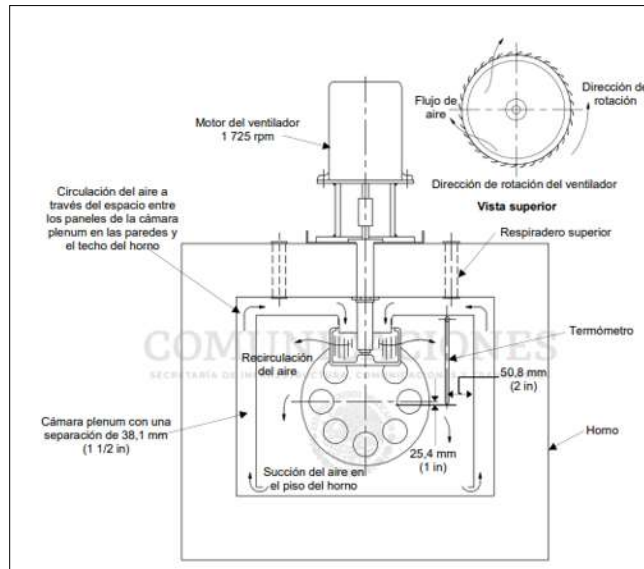


Figura II-10. Equipo de envejecimiento RTFO

Fuente: IMT,2022

- Contenedores de vidrio
- Rejilla de enfriamiento
- Herramienta de recuperación

Cálculos y resultados: Se realiza el cálculo de la pérdida de masa teniendo en cuenta el peso inicial y final con la ecuación (II-21).

$$\Delta_m = \frac{m_f - m_i}{m_i - m_0} * 100 (\%) \quad (\text{II-21})$$

Donde:

- Δ_m = Pérdida o ganancia de masa (%)
- m_0 = Masa del contenedor de vidrio vacío (g)
- m_i = Masa del contenedor de vidrio con la muestra del cemento asfáltico antes de la prueba de RTFO (g)
- m_f = Masa del contenedor con el residuo asfáltico después de ejecutar la prueba de RTFO

2.2.2.6. Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Mediante esta prueba es posible simular los cambios reológicos que pueden ocurrir en un cemento asfáltico durante su envejecimiento (oxidación) a largo plazo. Consiste en colocar el residuo envejecido del cemento asfáltico obtenido en la prueba de "Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada RTFO" en bandejas estándar de acero inoxidable y acondicionarlo dentro de una vasija de presión, a una temperatura y presión especificada. Posteriormente, el residuo se somete a un proceso

de degasificación al vacío para extraer todas las burbujas de aire atrapadas para proseguir a la prueba de la viga de flexión (BBR). [SICT,2022]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Equipo para envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión PAV
- Horno de vacío
- Cronometro

2.2.2.7. Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)

La viga de flexión reómetro (BBR) se utilizan para calcular el valor m y la rigidez de la muestra de ensayo en tiempos de carga de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 segundos. La rigidez y valor m se determinan en el segundo 60.

El valor m se calcula como el valor absoluto de la pendiente de la rigidez cuando la rigidez es representado en una escala logarítmica en función del tiempo. Es el cálculo es realizado automáticamente por el software BBR. [ASPHALT BINDER TESTING MANUAL, 2014]

Equipo: Para realizar esta prueba se requiere el siguiente equipo:

- Bastidor de carga
- Baño de temperatura controlada
- Sistema de control de prueba y adquisición de datos basado en computadora
- Artículos de estandarización o verificación
- Moldes para formar muestras de ensayo

2.2.2.8. Requisitos de calidad del cemento asfáltico

El cemento asfáltico seleccionado debe cumplir con los requisitos de calidad antes y después de envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones del envejecimiento que se espera tengan durante su vida útil en la obra, a continuación, en *la tabla II-9. y II-10 Requisitos de calidad para cementos asfáltico s según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste*, se presenta los valores de los requerimientos de acuerdo con la normativa vigente.

Tabla II-9. Requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG) | PG 64 | | PG 76 | | PG 76 | | PG 82 | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -16 | -22 | -16 | -22 | -16 | -22 | -16 | -22 |
| Temperatura máxima del pavimento ^[1] , °C | ≤ 64 | | ≤ 70 | | ≤ 76 | | ≤ 82 | |
| Temperatura mínima del pavimento ^[1] , °C | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 |
| Cemento asfáltico original | | | | | | | | |
| Punto de inflamación Cleveland ^[2] , °C, mín. | 230 | | | | | | | |
| Viscosidad rotacional 135°C ^[3] , Pa s, máx. | 3 | | | | | | | |
| Punto de reblandecimiento ^[4] , °C, mín. | 48 | | | | 55 | | | |
| Separación, diferencia anillo y esfera ^[5] , °C, máx. | - | | | | 2 | | | |
| Recuperación elástica por torsión 25°C ^[6] , %, mín. | - | | | | 35 | | | |
| Módulo reológico de corte dinámico ^[7] (G'/sen δ) ^[8] , kPa, mín. | 1,0 | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| Después de envejecimiento en horno RTFO^[9] | | | | | | | | |
| Pérdida por calentamiento ^[10] , %, máx. | 1,0 | | | | | | | |
| Recuperación elástica en ductilómetro ^[11] , 25°C, %, mín. | - | | | | 75 | | | |
| Módulo reológico de corte dinámico (G'/sen δ) ^[7] , kPa, mín. | 2,2 | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| Tráfico Normal "S", Nivel de Ajuste (MSCR) ^[12] | 4,0 | | | | | | | |
| · J _{tr} a 3,2 kPa en MSCR ^[13] ; kPa-1, máx. | | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR ^[14] ; %, mín. | - | | | | 25 | | | |
| Tráfico Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) ^[12] | 2,0 | | | | | | | |
| · J _{tr} a 3,2 kPa en MSCR ^[13] ; kPa-1, máx. | | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR ^[14] ; %, mín. | - | | | | 25 | | | |
| Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR) ^[12] | 1,0 | | | | | | | |
| · J _{tr} a 3,2 kPa en MSCR ^[13] ; kPa-1, máx. | | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR ^[14] ; %, mín. | - | | | | 30 | | | |
| Tráfico Extremadamente Alto "E", Nivel de Ajuste (MSCR) ^[12] | 0,5 | | | | | | | |
| · J _{tr} a 3,2 kPa en MSCR ^[13] ; kPa-1, máx. | | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba, °C | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | |
| · Respuesta elástica, RE a 3,2 kPa en MSCR ^[14] ; %, mín. | - | | | | 40 | | | |

Fuente: IMT, 2018

Tabla II-10. Continuación de los requisitos de calidad para cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG) y nivel de ajuste

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG) | PG 64 | | PG 76 | | PG 76 | | PG 82 | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -16 | -22 | -16 | -22 | -16 | -22 | -16 | -22 |
| Temperatura máxima del pavimento ^[1] , °C | ≤ 64 | | ≤ 70 | | ≤ 76 | | ≤ 82 | |
| Temperatura mínima del pavimento ^[1] , °C | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 | ≥ -16 | ≥ -22 |
| Después de envejecimiento en horno a presión (FAV) | | | | | | | | |
| Temperatura de envejecimiento FAV ^[2] , °C | 100 | | | | | | | |
| · En climas normales | | | | | | | | |
| · En climas desérticos | 100 | | | | 110 | | | |
| Rigidización (G' sen δ) ^[3] , kPa, máxima | 5 000 | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 28 | 25 | 31 | 28 | 34 | 31 | 37 | 34 |
| Rigidez de Flexión ^[4] | | | | | | | | |
| S(t) ^[5] , máximo 300 MPa | -6 | -12 | -6 | -12 | -6 | -12 | -6 | -12 |
| Valor m, mínimo 0,300 | | | | | | | | |
| · Temperatura de prueba, @ 60 s, °C | | | | | | | | |

Fuente: IMT, 2018

Del mismo modo, en la *tabla II-11. Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación*, se presenta los requisitos de calidad con respecto al nivel de ajuste de acuerdo al tránsito y velocidad de operación de acuerdo a la normativa vigente.

Tabla II-11. Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación

| Velocidad de operación km/h | Nivel de ajuste | | |
|--|-----------------|---------------------|-------------------------|
| | $v > 70$ | $20 \leq v \leq 70$ | $v < 20$ |
| $\Sigma L < 10^6$ | Normal (S) | Alto (H) | Muy alto (V) |
| $10^6 \leq \Sigma L \leq 30 \times 10^6$ | Alto (H) | Alto (H) | Muy alto (V) |
| $\Sigma L > 30 \times 10^6$ | Muy alto (V) | Muy alto (V) | Extremadamente alto (E) |

[1] ΣL es el número de ejes equivalentes de 8,2 t acumulados durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño que en ningún caso será menor de diez (10) años; obtenido con el método de Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial.

Fuente: IMT, 2018

2.2.3. Ensayo Marshall

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm. [SICT,2004]

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall, los cuales son:

- **Determinación peso específico total:** El peso específico de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de pesos específicos es esencial para un análisis preciso de densidad – vacío. [NCHRP, 2011]
- **Medición de estabilidad y fluencia:** El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla. [NCHRP, 2011]
- **Análisis de la densidad y contenido de vacíos:** Una vez que se completan las pruebas de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada. [NCHRP, 2011]

2.2.3.1. Análisis de vacíos

Los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. [ASPHALT INSTITUTO,2001]

- **Análisis de peso unitario:** El peso unitario para casa muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³. [ASPHALT INSTITUTO,2001]
- **VMA (Vacíos en el agregado mineral):** Es el volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen. [NCHRP, 2011]
- **VFA (Porcentaje de vacíos llenados con asfalto):** Es la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VMA. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla. [NCHRP, 2011]

2.2.3.2. Requisitos de calidad

Las mezclas asfálticas densas en caliente, deben cumplir con los requisitos de calidad de acuerdo con el número de ejes equivalentes de diseño, que para este caso corresponde a una cantidad de entre un millón a diez millones de ejes equivalentes, lo anterior se determina en la norma de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras". (Ver tabla II-12 *Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa*). Del mismo modo, se debe tener en cuenta los requisitos de calidad con respecto a los vacíos del agregado minera (Ver tabla II-13. *Requisitos de vacíos en el agregado mineral (VAM)*)

Tabla II-12. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa

| Características | Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1] | |
|---|--|--|
| | $\Sigma L \leq 10^6$ | $10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2] |
| Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta | 50 | 75 |
| Estabilidad; N (lb _r), mínimo | 5 340 (1 200) | 8 000 (1 800) |
| Flujo; mm (10 ⁻² in) | 2 - 4 (8 - 16) | 2 - 3,5 (8 - 14) |
| Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); % | 3 - 5 | 3 - 5 |
| Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); % | 65 - 78 | 65 - 75 |

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.
[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Fuente: IMT, 2016

Tabla II-13. Requisitos de vacíos en el agregado mineral (VAM)

| Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1] | | Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño % | | |
|--|-------------|---|----|----|
| | | 3 | 4 | 5 |
| mm | Designación | Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo | | |
| 9,5 | ¾" | 14 | 15 | 16 |
| 12,5 | ½" | 13 | 14 | 15 |
| 19 | ¾" | 12 | 13 | 14 |
| 25 | 1" | 11 | 12 | 13 |
| 37,5 | 1½" | 10 | 11 | 12 |

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Fuente: IMT, 2016

CAPÍTULO III - ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo de esta investigación, se realizó una amplia revisión de literatura relacionada con el uso de las colillas de cigarrillo en el ámbito de las vías terrestres, sin embargo, en el presente documento se relacionan los más acorde a la temática abordada.

La incorporación de las colillas de cigarrillo en el ámbito de las mezclas asfáltica se ha desarrollado desde el año 2017 en Australia, el investigador Mohajerani [MOHAJERANI, 2017], incorporo colillas de cigarrillo recubiertas con cemento asfáltico y parafina a una mezcla asfáltica densa en caliente, en donde se demostró que las colillas que presentaron un mejor resultado fueron las que estaban recubiertas con un asfalto de clase más alta mejorando la resistencia y flexibilidad de la mezcla asfáltica.

Del mismo modo, en el año 2019, el investigador chino Jimei Jin [JIN et al, 2019], realizo una investigación sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con colillas de cigarrillos, mediante el análisis de la estabilidad y flujo bajo la metodología Marshall, en obtuvo resultados prometedores, ya que menciona que, las colillas de cigarrillo funcionan como un nuevo tipo de modificador en la mezcla asfáltica, ya que tienen una amplia perspectiva y espacio de desarrollo.

En el año 2020, el investigador Rahman [RAHMAN et al, 2020], desarrollo una investigación con el fin de comparar el uso de fibras de celulosa naturales y fibras a partir de las colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica tipo SMA; en donde se obtuvo resultados prometedores y se descubrió que la fibra a partir de las colillas de cigarrillo es una posible sustitución de la fibra de celulosa natural en una mezcla asfáltica tipo SMA.

En el mismo año, nuevamente el mismo investigador [RAHMAN et al, 2020] busco la manera de incorporar las colillas de cigarrillo en los cementos asfálticos, por medio de la trituración de estas y la adición directa a diferentes tipos de cemento asfáltico; en donde se obtuvo como resultado que, las colillas de cigarrillo podrían usarse como modificadores de fibra para el cemento asfáltico mejorando sus propiedades físicas y reológicas. Así mismo, el investigador Mohajerani [Mohajerani et al, 2022], realizo un análisis de lixiviados de las colillas de cigarrillo recubiertas de cemento asfáltico y parafina, con el fin de evaluar el comportamiento de estas, dentro de la mezcla asfáltica, en donde obtuvo como resultado que, al momento de recubrir las colillas de cigarrillo con asfalto, se generó una reducción de la absorción de agua, así mismo evitando liberación de lixiviados.

Por otro lado, con respecto a la extracción del acetato de celulosa y la disolución de las colillas de cigarrillo de manera química, se ha desarrollado desde el año 2020 en donde el investigador Arroyo [ARROYO et al, 2020], inicialmente realizo la purificación de estas, usando agua del grifo para separar el tabaco, filtros y envolturas; posteriormente uso tiempos de secado de 12 horas y mediante el proceso de extracción de Soxhlet (Usando tolueno y etanol), genero la extracción del acetato de celulosa; así mismo, disolvió el residuo en acetona con agitación durante 30 min. Luego, la solución se precipitó en agua destilada

y finalmente, la solución se filtró y se secó durante 12 h, dando como resultado final acetato de celulosa en forma sólida. Del mismo modo, en el año 2021 el ingeniero Cajamarca [CAJAMARCA, 2021], realizó la extracción del acetato de celulosa de las colillas de cigarrillo, realizando lavados de las colillas de cigarrillo en agua potable por periodos de 7 a 3 días, posteriormente realizó el secado del material y usó el proceso de filtración con etanol, así mismo generó el blanqueamiento de estas con hipoclorito de sodio, adicional, uso ácido acético y ácido sulfúrico, para extraer el acetato de celulosa purificado.

Finalmente, en China el investigador Liu [LIU et al, 2021] realizó fibras a partir de las colillas de cigarrillo mediante procesos químicos, las cuales fueron comparadas con una fibra sintética y ensayadas en una mezcla asfáltica discontinua tipo SMA; los dos tipos de fibras fueron analizadas mediante el microscopio eléctrico de barrido (MEB) en donde se obtuvo que no se encontraron grietas, agujeros ni huecos visibles en la estructura de las fibras de cigarrillo, lo que indica que las morfologías son similares a las fibras sintéticas.

A continuación, en la *tabla III-1. Resumen del estado del arte*, se presenta lo mencionado anteriormente, en donde se realiza un resumen de los documentos anteriormente descritos.

Tabla III-1. Resumen del estado del arte

| Investigación | Cita | Uso de las colillas de cigarrillo | Aplicación | Resultado |
|--|-------------------------|--|----------------------|--|
| Physic-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with hen capsulated cigarette butts | Mohajerani Abbas (2017) | Recubiertas cemento asfáltico y parafina | Mezcla asfáltica | Mejora resistencia y flexibilidad |
| Research on the road performance of cigarette butts modified asphalt mixture | Jimei et al (2019) | Fibras | Mezcla asfáltica | Mejor estabilidad y menor flujo |
| Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt | Rahman, et al (2020) | Recubiertas cemento asfáltico | Mezcla asfáltica SMA | Mejor estabilidad e incremento en la resistencia a la deformación permanente |
| Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt | Rahman, et al (2020) | Trituración | Cemento asfáltico | Mejores propiedades físicas y reológicas |
| Bitumen and Parafin Wax Encapsulated | Mohajerani et al (2022) | Recubiertas cemento | Cemento asfáltico | Reducción de la absorción en las colillas recubiertas |

| Investigación | Cita | Uso de las colillas de cigarrillo | Aplicación | Resultado |
|--|---------------------|--|---|--|
| Cigarette Butts: Physical Properties and Leachate Analysis | | asfáltico y parafina | (Análisis de lixiviados) | con asfalto, evitando liberación de lixiviados |
| Thin films of cellulose acetate nanofibers from cigarette butt waste | Arroyo et al (2019) | Síntesis química | Membranas de acetato | Generación de fibras (método Electrohilado) |
| Obtención del acetato de celulosa a partir de las colillas de cigarrillos | Cajamarca (2021) | Síntesis química | Reducción contaminación ambiental | Extracción de acetato de celulosa |
| Reutilization of recycled cellulose diacetate from discarded cigarette filters in production of stone mastic asphalt mixtures | Lui H et al (2021) | Procesos químicos, análisis mediante MEB | Comparación de fibra sintética a la fibra de colillas de cigarrillo | Morfologías de ambas fibras son similares |
| Evaluación de una mezcla asfáltica utilizando un asfalto con aditivo producto de las colillas de cigarrillo | Silva (2023) | Síntesis química, técnica de electrohilado y casting | Mezcla asfáltica (Metodología Marshall) | Mejorar propiedades mecánicas |

Fuente: Propia

De la tabla anterior se puede evidenciar que las colillas de cigarrillo se han incorporado en las mezclas asfálticas y en el cemento asfáltico [MOHAJERANI, 2017] [JIMEI et al, 2019] [RAHMAN et al 2020]; sin embargo, las mismas han sido incluidas cambiando sus características físicas, es decir que no se les ha realizado un proceso que cambie sus propiedades químicas. Por otro lado, se han desarrollado investigación para sintetizar las colillas de cigarrillo, es decir que se han experimentados procesos químicos con el fin de extraer el mayor componente de las colillas de cigarrillo que es el acetato de celulosa [ARROYO et al, 2019] [CAJAMARCA, 2021). De igual forma, en China [LUI et al, 2021] se generaron fibras a partir de las colillas de cigarrillo mediante diferentes ensayos químicos en laboratorio, las cuales fueron analizadas mediante el microscopio eléctrico de barrido y espectroscopia infrarroja, y se compararon con las fibras sintéticas que normalmente se incorporan en una mezcla asfáltica discontinua tipo SMA, para lo que se obtuvo como resultado que las morfologías de ambas fibras son similares.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han realizado investigaciones incorporando las colillas de cigarrillo en las mezclas asfálticas y en los cementos asfálticos modificando sus propiedades físicas, y no sus propiedades químicas. Con respecto a la extracción de acetato de celulosa y disolución de las colillas de cigarrillo de manera química, se han desarrollado algunos procesos como se mencionó anteriormente, sin embargo, dichos procesos requieren del uso de agua potable, diferentes sustancias químicas y altos tiempos de tratamiento.

De lo anterior, no ha surgido una investigación que mediante una síntesis química directa logre extraer el acetato de celulosa de las colillas de cigarrillo, y que esta pueda ser incorporada en una mezcla asfáltica para mejorar y/o conservar sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, en esta investigación se experimentan tres formas de incorporar las colillas de cigarrillo (síntesis química, fibras y membranas) en una mezcla asfáltica, tratando de encontrar cual es de estas, es la más viable para su uso en el ámbito de las vías terrestres.

CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA

Con el fin de mejorar y/o conservar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica convencional, se propone desarrollar diferentes alternativas de incorporación de las colillas de cigarrillo. La metodología se divide en cuatro (4) fases (Ver figura IV-1. Metodología) las cuales abarcan todas las actividades necesarias para el desarrollo de esta investigación.

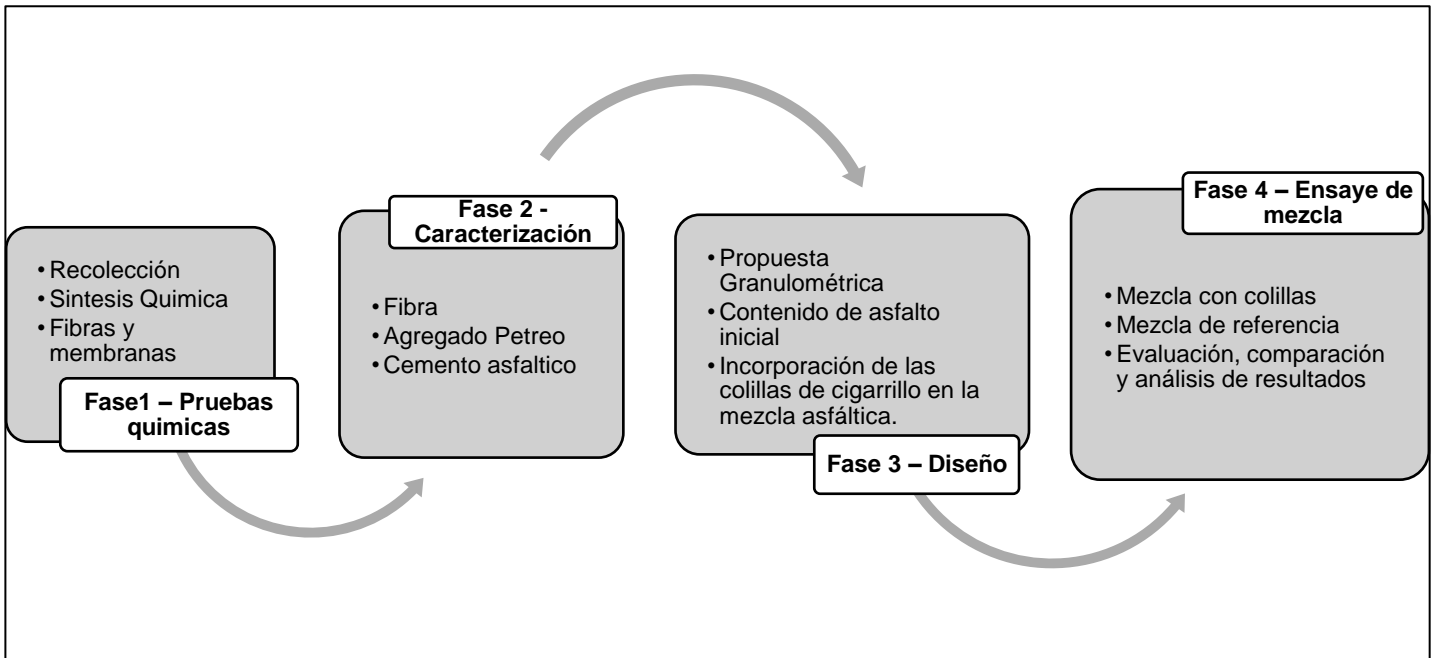


Figura IV-1. Metodología
Fuente: Propia

4.1. FASE 1 – Pruebas Químicas

En la fase 1, se realiza las pruebas químicas necesarias para hacer uso de las colillas de cigarrillo en las mezclas asfálticas, del mismo modo se contempla la fabricación de una síntesis química, así como la generación de fibras (técnica de electrohilado) y membranas (Método casting).

4.1.1. Recolección

Se inicia con la recolección de las colillas de cigarrillo debido a que, es el principal insumo para realizar la síntesis química. Para esta actividad, se hace uso de recipientes metálicos o plásticos, preferiblemente reciclados, en los cuales se depositará las colillas de cigarrillo; posteriormente, se realiza la adecuación de estos con el fin de que queden aptos para su uso; así mismo, se deben ubicar en puntos estratégicos en donde se presente una gran cantidad este desecho.

4.1.2. Síntesis química

Posterior a esto, teniendo en consideración la revisión del estado del arte, se procede a realizar pruebas experimentales en laboratorio buscando sintetizar un sólido (colillas de cigarrillo) con alguno de los compuestos químicos como el etanol, ácido, acetona, alquitrán, entre otros, con el fin de lograr la síntesis de las colillas de cigarrillo, para obtener su mayor componente (acetato de celulosa), en donde se especifica: Cantidad, temperatura, entre otras variables.

Para realizar la síntesis química, se inicia limpiando las colillas de cigarrillo retirando el papel envolvente y cortando a la mitad con el fin de extraer cualquier residuo producto de la carburación del cigarrillo, posterior a esto se pesa la cantidad necesaria para la experimentación. Se introducen en un matraz las colillas de cigarrillo y se le adiciona los reactivos en mililitros según se requiera; seguidamente, se incorpora un agitador magnético y se sella con un tapón para evitar la evaporación de las sustancias químicas. Finalmente, se coloca en la plancha a una temperatura de 30°C a 40°C y una agitación constante de 400 a 450 revoluciones por minuto durante un periodo mínimo de 3.0 horas.

4.1.3. Fibras y membranas

Teniendo en cuenta la síntesis química realizada anteriormente, se procede a fabricar fibras mediante la técnica de electrohilado y membranas mediante el método casting.

4.1.3.1. Generación de fibras (Método Electrohilado)

Pasado el tiempo, se extrae la solución resultante de la síntesis química y una parte de esta se incorpora en una jeringa, seguidamente se instala en el equipo de electrohilado y la otra parte de la solución resultante se usa para el método casting, con el fin de evaluar qué sucede con la solución en ambas metodologías.

Para realizar fibras mediante la técnica del electrohilado, se coloca una cantidad conocida de la sustancia en una jeringa en la cual la punta de su aguja debe estar totalmente pulida generando una circunferencia plana, posterior a esto se incorpora la jeringa en el equipo de electrohilado, y se configura la carga en kilo volts según lo requerido, así mismo se ubica la lámina de depósito de las fibras a una distancia determinada para generar las fibras; se debe tener en cuenta que, la carga y distancia influyen en el tamaño resultante de las fibras; el equipo finaliza la inyección de material y se retira la lámina resultante del proceso de electrohilado con el fin de analizarla.

Este método se debe complementar con otras pruebas con el fin de corroborar las características del material resultante; para este caso que se está buscando la generación de las fibras, se realiza el ensayo de microscopio electrónico de barrido (MEB) y la prueba de espectroscopia infrarroja.

Para realizar las pruebas de microscopio electrónico de barrido (MEB) y espectroscopia infrarroja, se debe separar una pequeña muestra del material resultante, el cual se incorpora en el quipo correspondiente.

4.1.3.2. Generación de membranas (Método de casting)

Una vez realizada la síntesis de las colillas de cigarrillo, se procede a generar membranas por medio del método de casting, en las cuales se especifica la cantidad de sustancia, así como las dimensiones de la membrana resultante, las cuales deben ser las apropiadas para su incorporación en una mezcla asfáltica.

El método casting consiste en verter un líquido en un recipiente de dimensiones conocidas, para lo cual se deja a temperatura ambiente esperando la solidificación del líquido y moldeado al tamaño del recipiente.

Una vez se solidifique y se logre obtener la membrana se procede a medir el diámetro y espesor de la membrana resultante.

4.2. FASE 2 – Caracterización

En esta fase, se realiza la caracterización de las fibras resultantes de la *Fase 1. Pruebas químicas*. Así como la caracterización del agregado pétreo y del cemento asfáltico mediante las pruebas de laboratorio teniendo como referencia la normativa vigente de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT).

4.2.1. Caracterización de fibras

La caracterización de las fibras se realiza mediante las pruebas de microscopio electrónico de barrido (MEB) y espectroscopia infrarroja, con el fin de corroborar la existencia de fibras generadas mediante la técnica de electrohilado.

4.2.2. Caracterización del agregado pétreo

Posteriormente, se realiza la recolección de los agregados pétreos, para lo cual se ubica un banco de materiales, seguidamente se realiza la caracterización de estos, mediante pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades y características. A continuación, se presenta el procedimiento de las pruebas al agregado pétreo.

4.2.2.1. Muestreo

El objetivo del muestreo, consiste en obtener una porción representativa de volumen del material pétreo en estudio. Este se realiza directamente en el banco de material o en algún lugar de explotación.

4.2.2.2. Secado del agregado pétreo

Debido a que el agregado se encuentra a la intemperie en el banco de materiales, es necesario realizar un secado a este con el fin de eliminar alguna humedad que pueda afectar los resultados de laboratorio.

Se debe iniciar limpiando una superficie de concreto, en donde se tenga luz solar para exponer el material y secarlo de manera natural, para garantizar un adecuado secado se debe extender el agregado pétreo y dejar mínimo tres horas al sol; así mismo, se realizan movimientos de este en intervalos de una hora con implementos de laboratorio.

4.2.2.3. Cuarteo

El cuarteo tiene como objetivo mezclar el material para obtener una mezcla homogénea. Se debe colocar la muestra total y distribuir uniformemente de un borde a otro, de manera que cuando pase por las canaletas, fluyan cantidades aproximadamente iguales, así se obtendrá la primera división de la muestra. Posteriormente se debe retirar el material de uno de los receptáculos y reservar. Esta porción de material se puede utilizar posteriormente para realizar reducciones para otras pruebas. Se debe hacer cuantas veces sea necesario, hasta obtener el tamaño de muestra requerido por el ensayo en uno de los receptáculos. *(Ver figura IV-2. Prueba de cuarteo)*

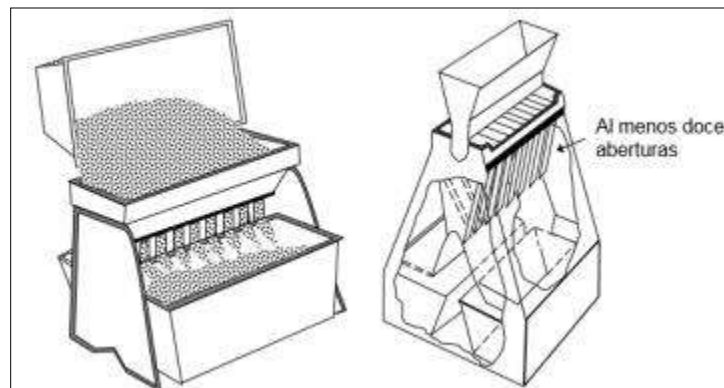


Figura IV-2. Prueba de cuarteo

Fuente: IMT, 2019

4.2.2.4. Peso volumétrico

La prueba de peso volumétrico realizada a un material pétreo se divide en dos partes, la primera es el peso volumétrico seco suelto y la segunda el peso volumétrico seco varillado, las cuales se explicarán a continuación:

- **Peso volumétrico seco suelto (Densidad seca mínima):** Consta de una tara con volumen de 2800 cm³ la cual se usa para el peso volumétrico, esta se llena en constantes capas con una elevación de 5 cm para el vaciado del material, cada vez que

esta se va llenando se debe ir aumentando cada 5 cm la elevación. Luego de llenar por completo la tara se pesa en una balanza y se registra este peso para los cálculos correspondientes.

- **Peso volumétrico seco varillado (Densidad seca máxima):** Consta de una tara de 2800 cm³ la cual es llenada en tres capas de igual espesor, por cada capa vertida en la tara mediante una varilla se realizan 25 golpes constantes al material, esto con el fin de reducir los vacíos que queden entre el mismo. Al terminar el llenado se enrasa la tara con la misma varilla, se procede a pesarlo en la balanza y se registra este peso como dato de laboratorio para realizar los cálculos pertinentes.

4.2.2.5. Análisis granulométrico

Esta prueba determinar la distribución de tamaños de las partículas de los agregados finos y gruesos; inicialmente, se debe tomar cierta cantidad de cada material y pasarlo por un conjunto de mallas con aberturas determinadas según la norma empleada, el material que se vaya reteniendo en cada malla se pesa en una balanza y se registra el valor para realizar los cálculos correspondientes.

4.2.2.6. Gravedad específica

Esta prueba permite determinar la densidad relativa de los agregados pétreos empleados en mezcla asfáltica, sin embargo, la prueba es diferentes para agregados finos y agregados gruesos, a continuación, se explica brevemente cada una de estas.

- **Gravedad en agregado fino:** La prueba de densidad para arena con finos consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba; se coloca un volumen de agua conocido en la probeta, en este caso 200 ml, después una cantidad de 300 gr a 400 gr de arena seca en la probeta con el agua. Se inclina el frasco y se gira una y otra vez de un lado hacia otro con la finalidad de que las burbujas suban a la superficie. Se determina el peso y se registra el volumen del frasco.
- **Gravedad en agregado grueso:** Para realizar esta prueba se requiere el material que pasa la malla 1/2" y la que se retiene en la malla 3/8", buscando el valor de 1.5 kilogramo con el objetivo de ponerlo a saturar durante 24 horas en agua, después del tiempo transcurrido, se pesa sumergido y superficialmente seco, para posteriormente secarlo al honor y registrar su peso seco.

4.2.2.7. Absorción

La absorción es el incremento en masa del agregado pétreo debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito.

- **Absorción agregado fino:** Para la determinación de la absorción, se satura una muestra de arena de 2 kg durante 24 horas. Se coloca el material en un recipiente a fuego medio, moviendo la arena de un lado a otro con ayuda de una espátula. Para verificar que la muestra este superficialmente seca, se coloca un molde metálico en forma de cono invertido, donde se llena con el material en tres capas, entre cada capa se debe realizar golpes con una barra metálica para así reducir al máximo los espacios entre partículas. Inmediatamente se retira el cono, y si la arena trata de disgregarse quiere decir que ya se encuentra el material apto para realizar la prueba.

Posteriormente, se pesa 300 gr de material superficialmente seco, y se coloca nuevamente en un recipiente a fuego medio con el fin de secar en la totalidad el material, con ayuda de un vidrio de reloj se verifica que no exista contenido de agua en el material, finalmente se pesa el material totalmente seco y se realiza los cálculos pertinentes.

- **Absorción agregado grueso:** Para realizar esta prueba se requiere una muestra de agregado que pasa la malla 1/2" y la que se retiene en la malla 3/8", el material se sumerge en agua durante 24h para llenar esencialmente los poros; pasado este tiempo se seca superficialmente con una franela para obtener una muestra superficialmente seca y se pesa de 300 gr a 400 gr.

Se pone a calentar la muestra y con ayuda de un vidrio de reloj se verifica cuando el material este totalmente seco, se deja enfriar la muestra y se registra su peso seco como dato de laboratorio para sus fines pertinentes.

4.2.2.8. Resistencia a la degradación en la Máquina de los Ángeles

Esta prueba, es una medida de la degradación del agregado mineral cuya combinación de acciones incluyen la abrasión o desgaste, impacto, y molienda en un tambor de acero giratorio.

Para realizar esta prueba se requiere el material grueso que pase la malla No.3 y se retenga en la No. 1/2" y pase la malla No. 1/2" y se retenga en la No. 3/8"; seguidamente, se determina el tamaño del agregado y la cantidad de esferas que se utilizaran para la prueba. En la máquina de desgaste de los ángeles, se introduce el material junto con las esferas, se procede a iniciar el triturado del material mecánico durante 500 revoluciones, al terminar las revoluciones necesarias se saca el material y se tamiza por la malla No. 12, y se pesa en una balanza el material retenido en esta malla.

4.2.2.9. Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval

Este método de prueba cubre un procedimiento para determinar la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado pétreo en presencia de agua, utilizando la máquina Micro-Deval.

Primeramente, se debe preparar la muestra de 1500 g, posterior sumergir la muestra en el contenedor con 2.0 L de agua a una temperatura de 20 °C por 1 hora. Colocar 5 000 g de la carga abrasiva dentro del contenedor con la muestra y el agua, y colocar los contenedores en la Máquina Micro-Deval a 100 rpm durante 2 h.

Posteriormente, se debe verter cuidadosamente la muestra y los balines de acero sobre el tamiz de 4.75 mm [No. 4] superpuesta sobre el tamiz de 1.18 mm [No. 16]. Seguidamente lavar y manipular el material retenido en la malla con agua utilizando una manguera y la mano hasta que el agua se observe clara y todo el material menor a 1.18 mm [No. 16] pase el tamiz.

Finalmente, se debe remover los balines de acero haciendo uso de un imán u otro medio adecuado, cuidando no perder material retenido en los tamices en este proceso. Desechar el material menor a 1.18 mm [No. 16]. Combinar el material retenido en los tamices de 4.75 mm [No. 4] y 1.18 mm [No. 16], teniendo cuidado de no perder material. Secar la muestra a masa constante en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. y registrar la masa final.

4.2.2.10. Resistencia al intemperismo acelerado

El objetivo de esta prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo en materiales pétreos por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Para realizar esta prueba se debe sumergir las muestras en la solución preparada de sulfato de sodio por 16 horas y no más de 18 horas, de tal manera que, la solución cubra el agregado al menos 13 mm. Mantener las muestras sumergidas en la solución a una temperatura de 21°C durante el periodo de inmersión.

Después del periodo de inmersión, se debe retirar las muestras de agregado de la solución, permitir que escurran por 15 min, y secar a masa constante en el horno a una temperatura de 110 °C. Posteriormente enfriar las muestras a temperatura ambiente. Repetir el proceso de inmersión y secado hasta completar 5 ciclos. Después de completar el ciclo final y que las muestras se han enfriado, lavar las mismas dentro de los contenedores con agua circulando a una temperatura de 43 °C, para eliminar la solución de saturación (sulfato de sodio).

Finalmente, se sumergen las muestras lavadas en la solución de cloruro de bario, si la solución de cloruro de bario reacciona pintándose de color blanco, significa que las muestras no han sido lavadas adecuadamente, ya que el sulfato de sodio continúa presente en el agregado y es necesario repetir con el proceso de lavado con agua. Si la solución de cloruro de bario permanece transparente el agregado ha sido lavado adecuadamente y este se encuentra libre de sulfatos.

Después de que el sulfato de sodio ha sido removido, secar las muestras en el horno a una temperatura de 110 °C hasta masa constante y registrar la masa.

4.2.2.11. Porcentaje de partículas planas y alargadas

Este método de prueba, cubre la determinación por masa del porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso.

Inicialmente se seca la muestra en el horno a una temperatura de 110 °C hasta masa constante y se registra la masa de la muestra total, se tamiza por los tamaños: 37.5 mm [1 1/2"], 25.0 mm [1"], 19.0 mm [3/4"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"].

Se registrar la masa retenida en cada tamiz y se calcula el porcentaje retenido parcial de cada fracción. Si el porcentaje retenido parcial de alguna fracción es menor al 10%, ésta se puede descartar para ser ensayada y registrar la nueva masa a ensayar de cada fracción, si aplicó reducción.

Posteriormente, se debe colocar el largo de la partícula en la abertura más grande del dispositivo calibrador y ajustar el calibrador a dicha abertura. Después, hacer pasar el espesor de la misma partícula por la abertura más pequeña. La partícula se considera plana y alargada, si el espesor pasa completamente a través de la abertura más pequeña del calibrador. Finalmente, se separar las partículas por fracción en dos grupos: (1) planas y alargadas o (2) ni planas ni alargadas, y se determinar la masa de cada grupo, por fracción.

4.2.2.12. Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

Este método de ensayo cubre la determinación, por masa, del porcentaje de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso.

Se inicia lavando la muestra sobre el tamiz designado para retirar cualquier material fino y secar a masa constante a una temperatura de 110 °C para determinar y registrar la masa de la muestra seca. Posteriormente, se extiende la muestra seca sobre una superficie plana, limpia y suficientemente grande para permitir una inspección cuidadosa de cada una de las partículas. Para verificar que la partícula cumple con los criterios de fractura, sostener la partícula de manera que la cara sea vista directamente. Si la cara constituye al menos un cuarto (25 %) del área de la sección transversal máxima de la partícula del agregado, se considera una cara fracturada, lo anterior, se debe inspeccionar cada cara de cada partícula para determinar si cada cara cumple con el criterio de cada fracturada. *(Ver figura IV-3. Vista de la sección transversal máxima de la partícula)*

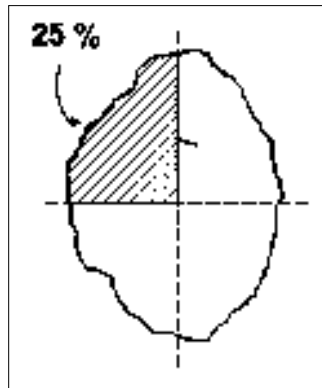


Figura IV-3. Vista de la sección transversal máxima de la partícula

Fuente: IMT, 2019

Finalmente, se debe separar las partículas en tres categorías: partículas con dos o más caras fracturadas, partículas con una cara fracturada y partículas sin caras fracturadas, y se determina la masa de las partículas de cada uno de estos grupos.

4.2.2.13. Desprendimiento por fricción

Esta prueba nos permite determinar visualmente el desprendimiento por fricción de la película de asfalto que envuelve al agregado grueso.

Esta prueba consiste en calentar el agregado grueso, así como el asfalto, para posteriormente mezclarlos y someter dicha mezcla a la acción del agua pura o destilada por un periodo de 15 horas. Seguidamente, se preparan cuidadosamente las partículas, se agrega nuevamente agua para someterlo a un periodo de agitación de 3 horas, una vez terminado este proceso se extraen las partículas, se deja secar y se evalúa visualmente su estado físico una vez concluido este tratamiento.

4.2.2.14. Contenido de vacíos no compactados del agregado fino

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de vacíos no compactados en una muestra de agregado fino.

Para realizar esta prueba, se debe lavar y secar el medidor cilíndrico y registrar su masa. Posteriormente, centrarlo en el equipo y bloquear la abertura del embudo y verter la muestra total. Nivelar el material en el embudo con la espátula y liberar la abertura para permitir que la muestra caiga libremente dentro del medidor cilíndrico. Finalmente, se enrasa el agregado en exceso del medidor cilíndrico en un solo movimiento, haciendo uso de la espátula, así como unos ligeros golpes al medidor cilíndrico, con el objetivo de compactar la muestra y no perder material durante su traslado a la balanza, para registrar la masa del cilindro con la muestra.

4.2.2.15. Valor de equivalente de arena en el agregado fino

Este método, establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz No.4.

Para realizar esta prueba, es necesario colocar una solución de trabajo en una probeta hasta llegar a la marca de 10 cm o 4". Luego se llena una cápsula de agregado fino y con ayuda del embudo se coloca el material dentro de la probeta y se debe dejar reposar durante 10 minutos. Después, se coloca un tapón tipo corcho y se agita horizontalmente durante 30 segundos, asegurando que sean 90 ciclos, enseguida se vuelve a colocar solución de trabajo en la probeta ahora hasta la marca de 15" limpiando el material pegado a las paredes, se deja reposar 20 min y se mide la distancia hasta dónde llega el material arcilloso con ayuda de una regla, por último se introduce el irrigador lentamente, se deja asentar y se registra el nivel superior del material correspondiente a las arenas.

4.2.2.16. Valor de azul de metileno de una arcilla

Este método determina la absorción de azul de metileno por una arcilla, la cual se calcula como el valor de azul de metileno (MBV). El índice de azul de metileno determina el grado de reactividad del material filler (pasa No. 200) que es utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas, el cual puede tener una influencia nociva en su desempeño.

Para realizar esta prueba, se debe colocar 1 g de azul de metileno en el vaso de precipitado de 1000 mL luego se agrega 1000 mL de agua destilada. Posteriormente, se debe mezclar durante 20 min mínimo haciendo uso del agitador y la barra magnética. Se llena la bureta con la solución de azul de metileno y se fija la bureta en posición vertical haciendo uso del soporte universal, se ajusta la bureta a la altura requerida sobre el vaso de precipitado de 100 mL, mientras éste se encuentra sobre el agitador magnético.

Con la suspensión aún en agitación, se añade 1.0 ml de la solución de azul de metileno a la suspensión y se agita durante 1 min. Sin detener la agitación, se debe retirar una gota de la suspensión con la punta de la varilla de vidrio y colocar en el papel de filtro y observar el aspecto de la gota sobre el papel de filtro. Si la formación de un círculo color azul claro alrededor de la gota no se observa, continuar agregando la solución de azul de metileno a la suspensión en incrementos de 1.0 ml con 1 min de agitación, y retirando una gota de la suspensión por cada incremento. La prueba terminará cuando se observe el círculo azul alrededor de la gota.

4.2.3. Caracterización del cemento asfáltico

A continuación, se realiza un resumen de los diferentes procedimientos para la realización de cada prueba correspondiente a la caracterización y clasificación del cemento asfáltico mediante su grado PG (Performance Grade) bajo la normativa SICT, N·CMT·4·05·004/18. [IMT, 2018]

4.2.3.1. Punto de Inflamación Cleveland

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego.

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzca en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación, si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión.

4.2.3.2. Viscosidad rotacional Brookfield

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260°C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación.

Primeramente, se vierte una cantidad de asfalto de 10.2 gr en el molde, posteriormente, se coloca en la cámara de prueba, se ajusta el rotor, se deja equilibrar la prueba por 25 minutos para permitir igualar la temperatura a 135°C, posteriormente se inicia la prueba y se registra los datos necesarios para determinar la viscosidad del cemento asfáltico.

4.2.3.3. Punto de reblandecimiento

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos. El procedimiento inicia colocando los anillos de la muestra en las guías de soporte, posteriormente en el vaso de vidrio se debe llenar a una altura de 10 cm con agua, se colocan las esferas y se deja en conjunto durante 15 minutos manteniendo la temperatura de 5°C, consecutivamente todo el montaje se coloca sobre la parrilla eléctrica y se empieza a incrementar uniformemente la temperatura del líquido a razón de 5°C por minuto, finalmente se registra la temperatura de cada esfera una vez toque la placa inferior del soporte, las temperaturas no deben diferir entre las dos esferas más de 1°C.

4.2.3.4. Módulo reológico de corte dinámico

Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo de fase, como propiedades visco elásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte.

Para realizar esta prueba, se debe calibrar el equipo a la temperatura requerida, posteriormente se coloca la cantidad de muestra necesaria en los platos rotatorios, se limpia el exceso de esta, y se inicia el proceso mediante el quipo para determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo de fase.

4.2.3.5. Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)

Esta prueba permite, mediante el efecto de calor y aire aplicados a una película de cemento asfáltico semisólido, obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo que ocurren durante el transporte, mezclado en caliente, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, a fin de determinar, a partir de la medición de la viscosidad y sus características reológicas, el efecto de este envejecimiento.

Inicialmente se debe marcar y pesar los contenedores de vidrio, posteriormente se agrega en cada contenedor una cantidad de asfalto de 35 g, e inmediatamente se colocan de manera horizontal, se gira lentamente sobre su eje longitudinal durante al menos una vuelta completa intentando cubrir toda su superficie cilíndrica, evitando llegar completamente al extremo del contenedor, seguidamente se dejan enfriar para registrar nuevamente su peso y se incorporan en el horno rotatorio de película delgada, una vez transcurrido un tiempo de 80 minutos dentro del horno, se deja enfriar para finalmente volver a pesar y determinar la pérdida por calentamiento, así mismo se debe realizar nuevamente la prueba de *“Modulo reologico de corte dinámico”*, y el material sobrante dentro de los contenedores de vidrio es necesario para realizar la prueba de envejecimiento en horno a presión (PAV).

4.2.3.6. Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Esta prueba permite simular los cambios reológicos que pueden ocurrir en un cemento asfáltico durante su envejecimiento (oxidación) a largo plazo. Según el material resultante del procedimiento de la prueba de envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO), se coloca sobre una charola metálica de forma circular, posteriormente se incorpora en el equipo del PAV calibrado a una temperatura de 100°C por un tiempo estimado de 20 horas, seguidamente se extrae el residuo en una charola metálica y se incorpora en el equipo VDO (Horno de desgasificación al vacío) con el fin de extraer todas las burbujas de aire de la muestra.

4.2.3.7. Procedimiento de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV)

Del residuo obtenido del equipo VDO, se realiza el ensayo de reómetro de flexión de viga (BBR) la cual se utilizan para calcular el valor m y la rigidez de la muestra de ensayo en tiempos de carga de 8, 15, 30, 60, 120 y 240 segundos. Para ello, se debe realizar el armado de los moldes de las vigas, posteriormente se vacía en ellas la cantidad de asfalto necesario, se deja enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se enfría y se lleva por 5 minutos a una temperatura de -5°C, seguidamente se calibra el equipo de BBR según la temperatura requerida, y se retira el molde de las vigas para solo incorporar en el equipo el cemento asfáltico.

4.3. FASE 3 – Diseño

En esta fase, se realiza el diseño granulométrico de la mezcla asfáltica mediante la metodología Marshall, en donde se determina el tipo de mezcla asfáltica, así como su granulometría y las características mínimas que debe cumplir con el fin de satisfacer y mejorar las propiedades mecánicas. Del mismo modo, se establece la cantidad de agregado pétreo requerido por malla para la fabricación de los especímenes y finalmente se define cuál de las diferentes alternativas (fibras, membranas y síntesis) es la más adecuada para la incorporación de las colillas de cigarrillo en la mezcla asfáltica.

4.3.1. Propuesta granulométrica

Para realizar la propuesta granulométrica, se debe tener como referencia los resultados de las pruebas correspondientes a la granulometría. Para lo cual, se procede a proponer diferentes porcentajes de cada agregado, y la sumatoria de estos no debe ser mayor al 100%, lo anterior se logra con ayuda de la herramienta Excel.

Estos valores se grafican junto con los límites superiores e inferiores correspondientes a una granulometría densa, teniendo en cuenta que la propuesta granulométrica se mantenga por dentro del área de estos límites.

4.3.2. Cálculo del contenido de asfalto inicial

Para la determinación del contenido mínimo de asfalto, se deben tener en cuenta el factor de constante de área y de índice asfáltico, los cuales están relacionado a las características del material pétreo. Así mismo, un factor de seguridad de 1.25 con respecto al resultado final.

4.3.3. Definición del uso de las colillas de cigarrillo

Durante el desarrollo de esta investigación se proponen tres diferentes formas de integrar las colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica densa en caliente, las cuales son:

- Fibras (Método electrohilado)
- Membranas (Método casting)
- Síntesis química

De lo anterior, basándose en un análisis experimental, teniendo en cuenta los tiempos de fabricación, materiales, entre otros; se define cuál de estas alternativas es la más conveniente para su incorporación en las mezclas asfálticas y su posterior fabricación.

4.4. FASE 4 – Ensaye de Mezcla

Esta última fase comprende llevar a cabo la fabricación de dos mezclas asfálticas densas en caliente mediante la metodología Marshall (referencia y con colillas de cigarrillo), así mismo realizar y analizar las pruebas de laboratorio que este método comprende (Estabilidad, flujo, análisis volumétrico, etc.) con el fin de poder evidenciar alguna variación en las propiedades mecánicas entre estas dos mezclas.

4.4.1. Ensaye de mezcla con síntesis y de referencia en laboratorio

Se debe realizar en laboratorio la fabricación de las mezclas asfálticas mediante la metodología Marshall, en donde se lleva a cabo las pruebas que se especifican para esta, como flujo, estabilidad, cantidad de vacíos, densidad, etc. Cabe aclarar que, estas pruebas se realizan a una mezcla de referencia y del mismo modo a la mezcla asfáltica con colillas de cigarrillo de acuerdo lo determinado en fases anteriores.

Para la fabricación de la mezcla asfáltica densa en caliente, se debe agregar en una charola metálica la cantidad de agregado pétreo debidamente caliente y la cantidad de cemento asfáltico necesaria; seguidamente, con ayuda de una espátula se hace la mezcla de estos dos materiales, cuando se visualice que todas las partículas del agregado estén recubiertas de asfalto, se retira la mezcla y se vierte en moldes metálicos que deben estar previamente calentados y lubricados con aceite, para evitar la adherencia entre el molde y la mezcla asfáltica.

Posteriormente, se incorpora el molde metálico con la cantidad de mezcla asfáltica y se procede a compactar con el martilló Marshall una cantidad de 75 golpes por cada cara de la pastilla; finalmente, se deja enfriar a temperatura ambiente y se retira la mezcla asfáltica compactada del molde. De cada muestra se debe realizar mínimo tres medidas del diámetro y la altura, así como realizar el registro del peso seco, sumergido y superficialmente seco de cada una de estas para determinar el análisis volumétrico. Seguidamente, se colocan las muestras en un baño maría a temperatura de 60 °C durante 30 minutos. Al cumplir este tiempo se retira la muestra y se ensaya en la prensa Marshall, donde de allí se obtienen los valores de estabilidad y flujo.

4.4.2. Evaluación, comparación y análisis de resultados

Finalmente, se evalúa las propiedades mecánicas de la mezcla con la adición de colillas de cigarrillo con respecto a una mezcla de referencia, en donde se debe comparar y analizar los valores del contenido de asfalto, la relación de vacíos, Vacíos en el agregado mineral (VMA), Porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), estabilidad, entre otros.

CAPÍTULO V - RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo, se da a conocer cada uno de los resultados con su respectivo análisis de las diferentes fases realizadas según la metodología de esta investigación, así como evidencias mediante tablas y Figuras del proceso realizado.

5.1. FASE 1 – Pruebas Químicas

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las pruebas químicas realizadas a las colillas de cigarrillo, así como los diferentes procedimientos para la incorporación de estas en las mezclas asfálticas.

5.1.1. Recolección de colillas de cigarrillo

Como primera actividad de esta fase, se realiza la recolección de las colillas de cigarrillo debido a que es el principal insumo para generar la síntesis química, para lo cual se disponen botellas reciclables, posteriormente, se ubican en puntos estratégicos en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en algunos bares en la ciudad de Morelia (Michoacán). (Ver figura V-1. Reutilización de botellas de plástico)



Figura V-1. Reutilización de botellas de plástico

Fuente: Propia

5.1.2. Síntesis química

Seguidamente, teniendo en consideración la revisión del estado del arte, se procede a realizar pruebas experimentales en laboratorio buscando sintetizar entre un sólido (colillas de cigarrillo), con algún compuesto químico (etanol, ácido, acetona, alquitrán, entre otros), y así poder obtener el mayor componente de las colillas de cigarrillo (acetato de celulosa);

lo anterior, con el fin de lograr una síntesis química adecuada la cual sea totalmente líquida y que no presente una rápida solidificación.

Se debe iniciar con la limpieza de las colillas de cigarrillo, para poder generar una mezcla homogénea entre el sólido y los compuestos químicos, evitando el paso de partículas generadas por la combustión del cigarrillo. Para la limpieza de las colillas se debe retirar el papel envolvente, posteriormente hacer un corte a la mitad de las colillas con el fin de retirar cualquier residuo ajeno al filtro del cigarrillo, seguidamente se almacena en un recipiente para evitar que se aloje alguna otra partícula.

El proceso de limpieza de las colillas de cigarrillo se realizó para la cantidad total de colillas de cigarrillo recolectadas, en el cual se promedió que en una botella de un litro puede almacenarse alrededor de 450 filtros limpios de cigarrillo. (Ver figura V-2. Limpieza y corte de colillas de cigarrillo)



Figura V-2. Limpieza y corte de colillas de cigarrillo

Fuente: Propia

Posteriormente, se realiza diferentes ensayos en donde se varía la cantidad de colillas, así como los tipos y cantidades de sustancias químicas, de igual forma, el tiempo de agitación de la mezcla en el matraz. Para todas las muestras ensayadas, se designó una temperatura promedio entre 30°C a 40°C, así como una agitación constante de 450 revoluciones por minuto.

La síntesis química se inicia incorporando en el matraz la cantidad de colillas de cigarrillo sin el papel envoltorio y limpias de cualquier residuo producto de la combustión del cigarrillo (Ver figura V-3 a), posteriormente se añade las sustancias químicas según se desee experimentar (Ver figura V-3 b), seguidamente se agrega el agitador magnético y se coloca el tapón en el matraz para evitar la evaporación de las sustancias químicas (Ver figura V-3 c).

Cabe mencionar que, se realizó una síntesis química directa, es decir, que no se efectuó la limpieza química de colillas de cigarrillo o purificación de estas, con el fin de reducir tiempo e insumos durante el proceso, lo cual podría justificar el color marrón que se presenta en la síntesis química resultante.

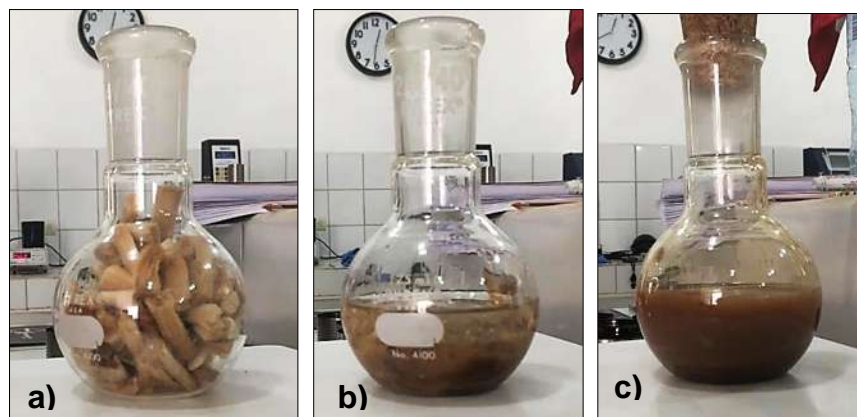


Figura V-3. Proceso de síntesis química

Fuente: Propia

Principalmente se usaron diferentes cantidades de sustancias químicas como el etanol, acetona y ácido acético, con el fin de encontrar cuál de estos o la combinación de estos químicos pudiese generar la disolución de las colillas de cigarrillo. Inicialmente se usó el etanol, pero la sustancia química fue absorbida por la colilla de cigarrillo, por lo tanto, no fue posible generar la disolución de las colillas de cigarrillo (No. Solución 0). Seguidamente, se experimentó con el etanol y ácido acético, en donde se logró generar la síntesis química de manera adecuada, sin embargo, las cantidades de ácido acético son bastantes altas para este caso (No. Solución 1), por lo que se siguió experimentando con otros componentes químicos.

Se procede a experimentar con sustancias químicas como, el etanol y la acetona, en donde se evidencia que la acetona disuelve las colillas rápidamente, sin embargo, una vez finalizado el proceso de disolución y al momento de manipular la solución resultante, esta empieza a solidificarse rápidamente (No. Solución 2). Es así que, nuevamente se experimenta con ácido acético, etanol, pero para disminuir la cantidad de ácido acético se incorpora acetona. Sin embargo, nuevamente al momento de manipular la solución resultante se solidifica rápidamente (No. Solución 3), por lo que se puede determinar que, la acetona diluye rápidamente las colillas de cigarrillo, sin embargo, genera la solidificación rápida de la solución resultante, lo cual dificulta su manipulación para procesos posteriores.

Es así que, nuevamente se experimenta con el etanol y ácido acético, sin embargo, se reduce la cantidad de ácido acético, para lo que se logra una síntesis química adecuada (No. Solución 4). Finalmente se repite la misma cantidad y tipo de sustancias químicas, sin embargo, se usan colillas completamente nuevas, es decir sin pasar por el proceso de carburación del cigarrillo, en donde se obtiene una síntesis química adecuada, la única

diferencia con la solución anterior es que en este caso el color de la síntesis es de color blanco (No. Solución 5).

A continuación, se presenta en *tabla V-1. Soluciones químicas*, el resumen de los diferentes intentos de solución para lograr la síntesis de las colillas de cigarrillo.

Tabla V-1. Soluciones químicas

| No. Solución | Colillas (gr) | Etanol (ml) | Acetona (ml) | Ácido acético (ml) | ml inicial | ml Final | Resultado |
|--------------|---------------|-------------|--------------|--------------------|------------|----------|--|
| 0 | 0.15 | 1.0 | - | - | 1.0 | 0.0 | Líquido absorbido por la colilla |
| 1 | 0.2 | 2.5 | - | 2.5 | 5.0 | 3.5 | Se logró la síntesis |
| 2 | 0.2 | 0.5 | 3 | - | 3.5 | 3.2 | Solidificación de la sustancia |
| 3 | 0.2 | 2.0 | 0.5 | 0.5 | 3.0 | 2.8 | Solidificación de la sustancia |
| 4 | 0.2 | 1.0 | - | 1.5 | 2.5 | 1.3 | Se logró la síntesis |
| | 0.4 | 2.0 | - | 3.0 | 5.0 | 3.5 | Se logró la síntesis |
| 5 (nuevas) | 0.4 | 2.0 | - | 3.0 | 5.0 | 3.4 | Se logró la síntesis (Colillas sin usar) |

Fuente: Propia

Para la ejecución de la disolución de las colillas de cigarrillo, con los diferentes compuestos químicos, se realizó una agitación constante de 450 revoluciones por minuto durante un periodo mínimo de 3.0 horas a una temperatura entre 30°C a 40 °C.

5.1.3. Método de electrohilado

Seguidamente, de la sustancia recuperada se designa entre 2.5 ml a 3.0 ml para realizar fibras por el método del electrohilado. Se debe tener en cuenta que, la sustancia suministrada para poder generar el electrohilado no tiene que solidificarse rápidamente, sino que debe permanecer en su estado líquido hasta que exista un cambio representativo a menor temperatura; esto debido a que, podría tapar la aguja de la jeringa y evitar la salida del material.

Inicialmente, se ensayó la solución No. 1 en donde se obtuvo como resultado el secado del solvente, lo cual se puede justificar el uso de la acetona, por lo tanto, se continuo a ensayar la síntesis química resultante de la solución No. 4 determinada en la fase 1, en donde se logró evidenciar la generación de las fibras, por tal razón de esta misma solución se repitió el procedimiento variando la distancia y carga eléctrica del equipo de electrohilado, con el fin, de poder corroborar los diferentes tamaños de generación de fibras.

Se inició con una carga de 12 kv y una distancia de 12 cm, posteriormente se aumentó a 14 kv y 14 cm, luego a 16 kv y a 16 cm, sin embargo, cuando se realizó para una carga de 18kv y una distancia de 18 cm no se logró obtener fibras, por tal razón la carga y distancia

adecuada para la generación de fibras en este caso, debe ser entre 12 kv a 16 kv y 12 cm a 16 cm.

La solución No. 5 la cual hace referencia a colillas de cigarrillo nuevas, las cuales, se ensayaron a una distancia de 16 cm y 16 kv, para lo cual dio como resultado una generación de fibras completamente blancas.

En la *tabla V-2. Resultados de electrohilado*, se presenta un resumen de las soluciones que fueron aptas para poder generar fibras mediante la técnica del electrohilado en donde se varió la distancia y carga eléctrica en el equipo.

Tabla V-2. Resultados de electrohilado

| No. Solución | Cantidad inyectada (ml) | Distancia (cm) | Carga (kv) | Resultado |
|--------------|-------------------------|----------------|------------|---------------------|
| 1 | 3.0 | 12 | 12 | Secado del solvente |
| 4 | 1.3 | 12 | 12 | Se lograron fibras |
| | 3.0 | 14 | 14 | Se lograron fibras |
| | 2.5 | 16 | 16 | Se lograron fibras |
| | 3.0 | 18 | 18 | Secado del solvente |
| | 5 (nueva) | 3.0 | 16 | 16 |

Fuente: Propia

En la *figura V-4. Método de electrohilado*, se puede evidenciar a grandes rasgos el procedimiento de este método, así como el material resultante.

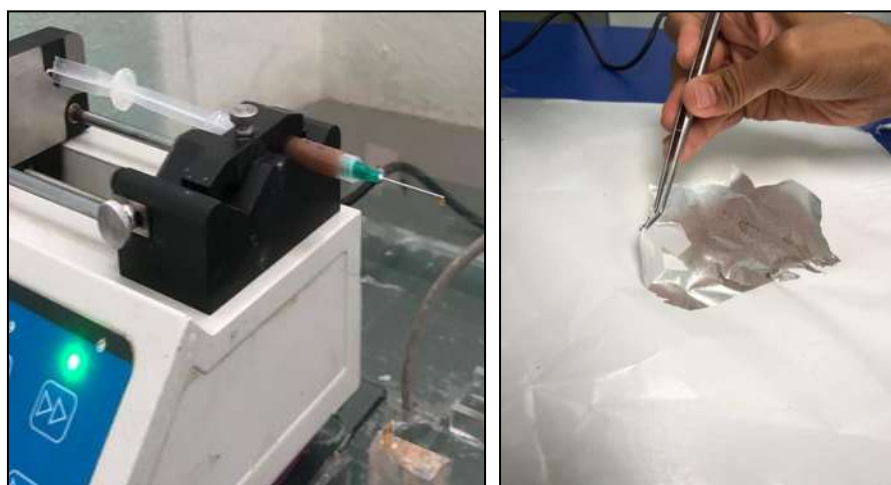


Figura V-4. Método de electrohilado

Fuente: Propia

De lo anterior, es necesario realizar pruebas adicionales con el fin de verificar la composición del material, así mismo corroborar la existencia de las fibras, por tal razón se realizan las pruebas de microscopio electrónico de barrido (MEB) y de espectroscopia infrarroja, los cuales se presentan en la Fase 2 – Caracterización.

5.1.4. Método de casting

El método casting consiste en vaciar un líquido en un recipiente de dimensiones conocidas, posteriormente dejar reposar dicha sustancia a temperatura ambiente con el fin de lograr su solidificación. Inicialmente se realiza el método casting con los residuos de la síntesis química, con el objetivo de ver su reacción al momento de solidificarse. En donde se pudo determinar que es necesario un tiempo mínimo de 48 horas para lograr la solidificación completa y homogénea de la solución química. (Ver figura V-5. Primeros resultados del método casting)



Figura V-5. Primeros resultados del método casting

Fuente: Propia

Posterior a esto, se realizaron membranas por el método casting de la síntesis química No. 4 definida anteriormente, con diferentes cantidades entre 8 ml a 25 ml, con el fin de identificar espesores y dimensiones de las membranas. (Ver figura V-6. Membranas método casting)



Figura V-6. Membranas método casting

Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-3. Resumen de resultado de membranas*, se presenta un resumen de las membranas realizadas, las cuales tienen variación de diámetro de molde, así como la cantidad de síntesis incorporada.

Así mismo, se puede observar una disminución de la lectura del diámetro resultante, a la medición del diámetro inicial del molde, lo anterior, debido a que, al momento de la solidificación de la membrana, existe una contracción de la síntesis química.

Tabla V-3. Resumen de resultado de membranas

| Diámetro molde | Cantidad de síntesis | Membrana | |
|----------------|----------------------|----------|---------|
| | | Diámetro | Espesor |
| 12 cm | 10 ml | 11.83 cm | 0.1 mm |
| 12 cm | 20 ml | 11.83 cm | 0.2 mm |
| 12 cm | 25 ml | 11.83 cm | 0.3 mm |
| 9 cm | 8.33 ml | 7.73 cm | 0.35 mm |
| 9 cm | 8.33 ml | 8.17 cm | 0.35 mm |
| 9 cm | 8.33 ml | 7.67 cm | 0.35 mm |

Fuente: Propia

Como resultado se puede determinar que, de la solución No. 4 se lograron generar fibras y membranas; las membranas se realizaron de diferentes cantidades, en donde es posible analizar que al momento de su solidificación entre mayor sea la cantidad de síntesis mayor será su espesor, así como el tiempo de solidificación; como membrana resultante, se contempla de un material con textura plástica totalmente sólida.

5.1.5. Resumen de las soluciones químicas realizadas

Como resultado se puede determinar que, la solución No.0 no se pudo usar por el método de electrohilado y casting, debido a que los reactivos incorporados fueron absorbidos por la colilla de cigarrillo, y no se logró una mezcla entre estos componentes; respecto a la solución No. 1 se logró una mezcla homogénea, sin embargo, al momento de electrohilar como resultado se obtuvo un polvo, lo cual no es una características de la existencia de fibras; con respecto a la solución No. 2 y 3, ambas mezclas presentaron una rápida solidificación, lo cual dificultó el proceso de electrohilado y la generación de membranas. Finalmente, de la solución No. 4 y 5 se lograron generar membranas y fibras por tal razón se repitió esta misma solución para diferentes cargas y distancias con el fin de poder analizar la generación de fibras en diferentes tamaños. (Ver tabla V-4. Resumen de las soluciones realizadas)

Tabla V-4. Resumen de las soluciones realizadas

| No. Solución | Electrohilado | Casting | Resultado |
|--------------|---------------|---------|---|
| 0 | NO | NO | Líquido absorbido por la colilla, No se generó síntesis |
| 1 | SI | SI | Como resultado se obtuvo un Polvo |
| 2 | NO | SI | La síntesis tuvo una rápida condensación |
| 3 | NO | SI | La síntesis tuvo una rápida condensación |
| 4 | SI | SI | Se generaron fibras y membranas |
| 5 (Nuevas) | SI | SI | Se generaron fibras y membranas |

Fuente: Propia

5.2. FASE 2 – Caracterización

En esta fase se realiza la caracterización de las fibras y membranas resultantes de la Fase 1, así mismo la caracterización de los agregados pétreos y del cemento asfáltico los cuales van a hacer utilizados en el diseño de mezcla asfáltica densa en caliente.

5.2.1. Caracterización de las fibras

Las fibras generadas por el método de electrohilado, producidas a partir de la síntesis química producto de las colillas de cigarrillo (Solución No. 4 y 5), deben ser analizadas con pruebas de laboratorio, con el fin de identificar la existencia de las fibras y algunas de sus características, por tal razón, se realiza la prueba de microscopio electrónico de Barrido (MEB) y de espectroscopia infrarroja.

5.2.1.1. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Para realizar el ensayo de microscopio eléctrico de barrido (MEB) (Ver Figura V-7. *Equipo de Microscopio eléctrico de barrido*), se incorporó las diferentes muestras obtenidas mediante la técnica del electrohilado, con el fin de que sean analizadas para obtener su composición química y visualizar si efectivamente se generaron fibras.

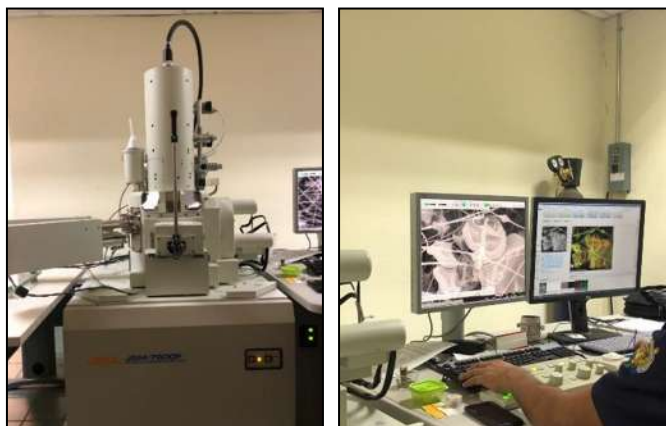


Figura V-7. Equipo de Microscopio eléctrico de barrido

Fuente: Propia

En la *tabla V-5. Muestras analizadas mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)*, se presentan las muestras que se incorporaron en el equipo, para hacer analizadas fueron las siguientes:

Tabla V-5. Muestras analizadas mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

| No. Solución | Distancia (cm) | Carga (kv) |
|--------------|----------------|------------|
| 4 | 12 | 12 |
| | 14 | 14 |
| | 16 | 16 |

| No. Solución | Distancia (cm) | Carga (kv) |
|--------------|----------------|------------|
| 5 (nueva) | 16 | 16 |

Fuente: Propia

La primera muestra analizada corresponde a la solución No. 4, en donde se determinó una configuración del equipo de electrohilado para una carga de 12 kv y una distancia de 12 cm; se evidencia en la *figura V-8. Resultados MEB solución No. 4*, que efectivamente se generaron fibras de tamaño 0.25 μm . Sin embargo, se presentan algunos fragmentos derivados de la síntesis química que no lograron diluirse en su totalidad.

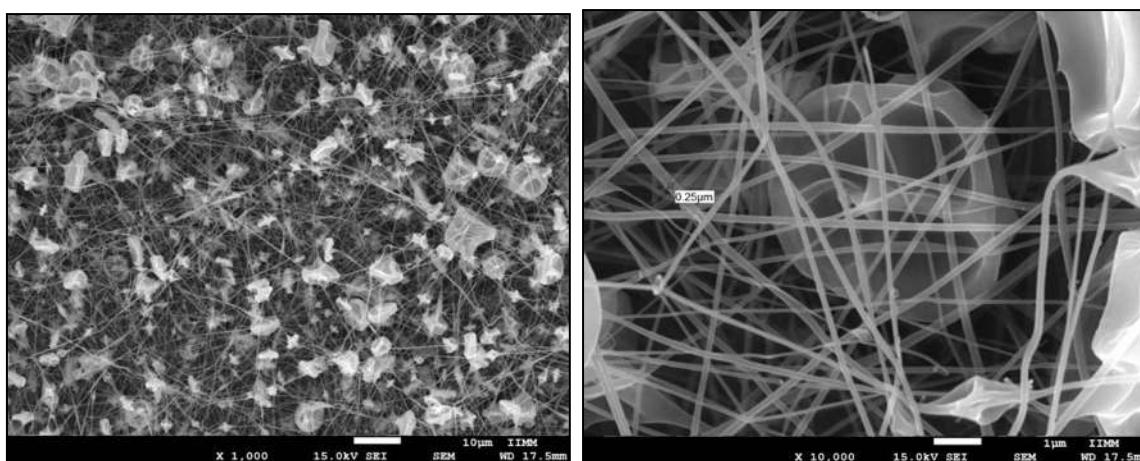


Figura V-8. Resultados MEB solución No. 4

Fuente: Propia

Del mismo modo, este ensayo permite determinar la composición química que se encuentra en las muestras analizadas mediante un mapeo (Energía [Kilo-electronvoltios] vs Conteos por segundo / electronvoltios), para este caso, se encontraron sustancias en altos contenidos como el carbono, oxígeno, nitrógeno y cobre. (*Ver figura V-9. Mapeo solución No. 4*)

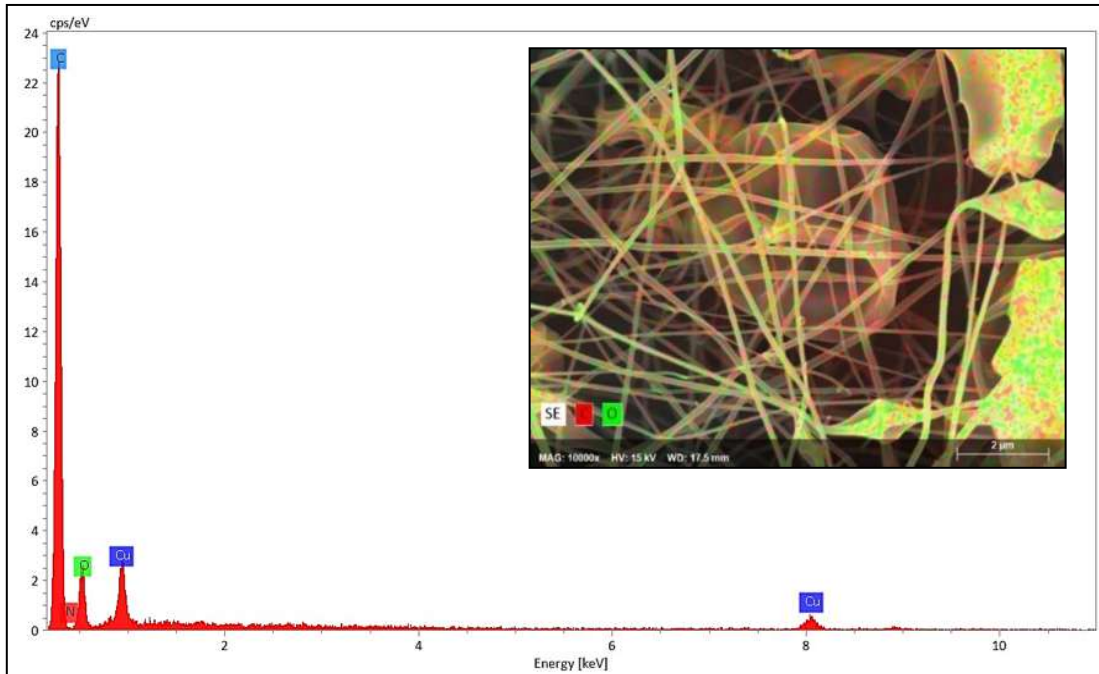


Figura V-9. Mapeo solución No. 4
Fuente: Propia

La segunda muestra analizada corresponde a la solución No. 4, en donde se determinó una configuración del equipo de electrohilado para una carga de 14 kv y una distancia de 14 cm. Se evidencia en la *figura V-10. Resultados MEB solución No. 4*, que efectivamente se generaron fibras. Sin embargo, se presentan en gran cantidad fragmentos derivados de la síntesis química que no lograron diluirse en su totalidad e identificar las fibras visualmente se hace un poco más complejo.

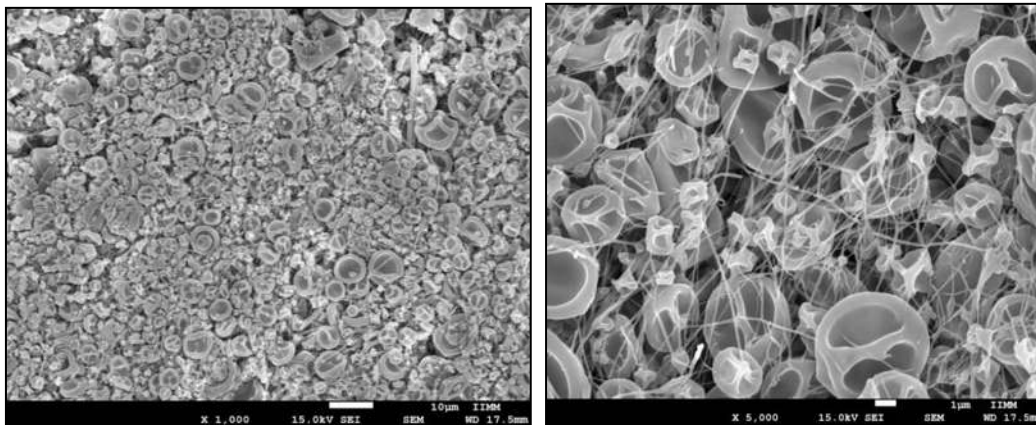


Figura V-10. Resultados MEB solución No. 4
Fuente: Propia

Del mismo modo, este ensayo permite determina la composición química que se encuentra en las muestras analizadas mediante un mapeo (Energía [Kilo-electronvoltios] vs Conteos por segundo / electronvoltios), para este caso, se encontraron sustancias en altos

contenido como el carbono, oxígeno, titanio y cobre; y pocas cantidades de calcio, cloro, potasio, titanio y silicio, las cuales al ser en pequeñas cantidades no alcanzan a hacer reconocidas por la gráfica, sin embargo, el equipo registra su existencia en la muestra. (Ver figura V-11. Mapeo solución No. 4)

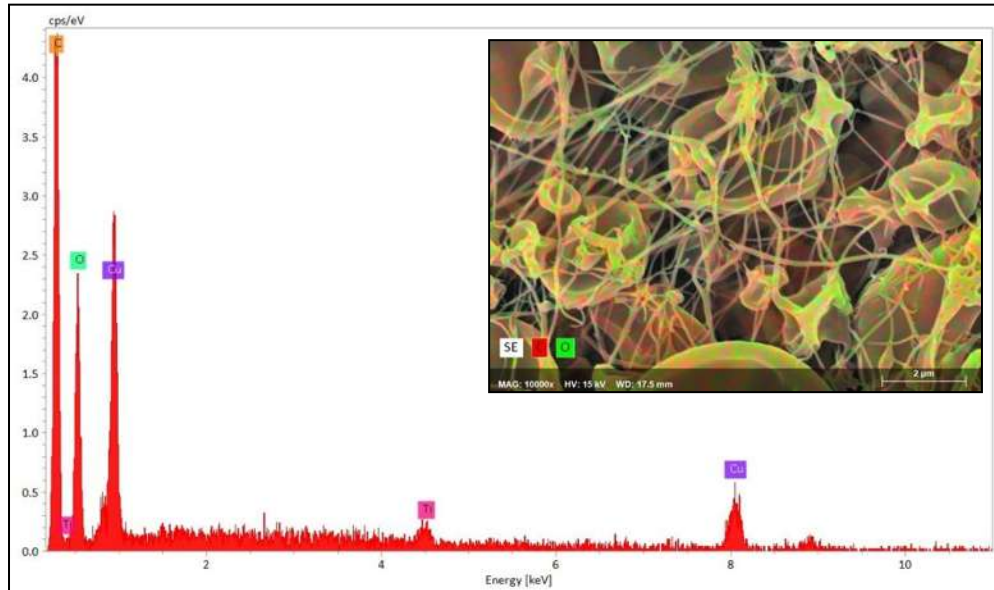


Figura V-11. Mapeo solución No. 4

Fuente: Propia

La tercera muestra analizada corresponde a la solución No. 4, en donde se determinó una configuración del equipo de electrohilado para una carga de 16 kv y una distancia de 16 cm; en la *figura V-12. Resultados MEB solución No. 4*, se evidencia que efectivamente se generaron fibras. Sin embargo, se presentan en gran cantidad fragmentos derivados de la síntesis química que no lograron diluirse en su totalidad, así mismo, las fibras son más delgadas debido a que la configuración de esta muestra, tiene mayor distancia en comparación a las demás.

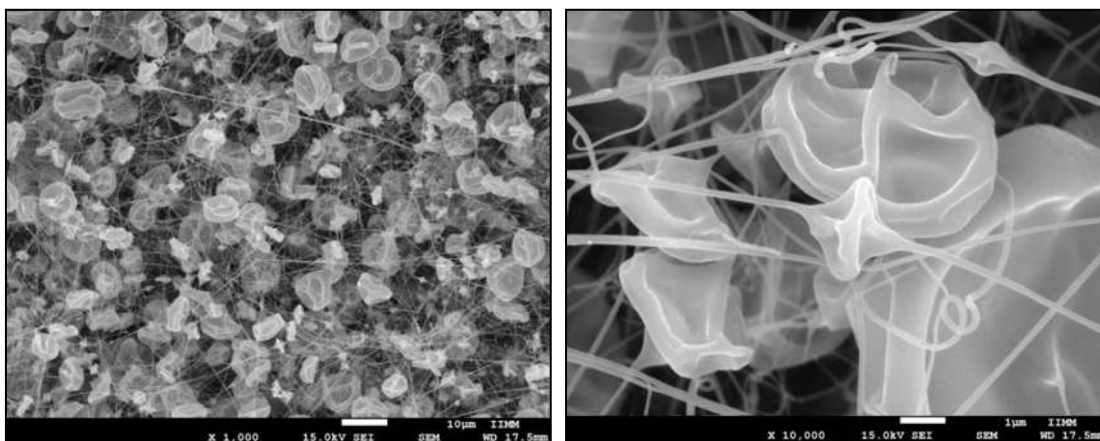


Figura V-12. Resultados MEB solución No. 4

Fuente: Propia

Del mismo modo, este ensayo permite determina la composición química que se encuentra en las muestras analizadas mediante un mapeo (Energía [Kilo-electronvoltios] vs Conteos por segundo / electronvoltios), para este caso, se encontraron sustancias en altos contenido como el carbono, oxígeno, titanio y cobre; y pocas cantidades de calcio, cloro, potasio, azufre y silicio. (Ver figura V-13. Mapeo solución No. 4)

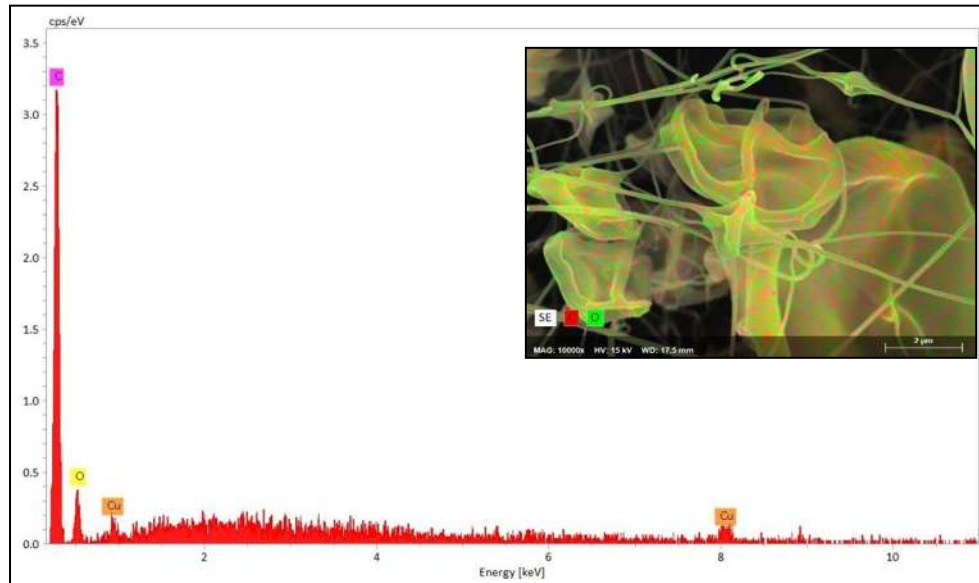


Figura V-13. Mapeo solución No. 4

Fuente: Propia

La cuarta muestra analizada corresponde a la solución No. 5, la cual hace referencia a las colillas sin usar, es decir completamente nuevas, en donde se determinó una configuración del equipo de electrohilado para una carga de 16 kv y una distancia de 16 cm; se evidencia en la figura V-14. Resultados MEB solución No. 5, que efectivamente se generaron fibras de tamaños más pequeños. Sin embargo, se presentan en gran cantidad fragmentos derivados de la síntesis química que no lograron diluirse en su totalidad.

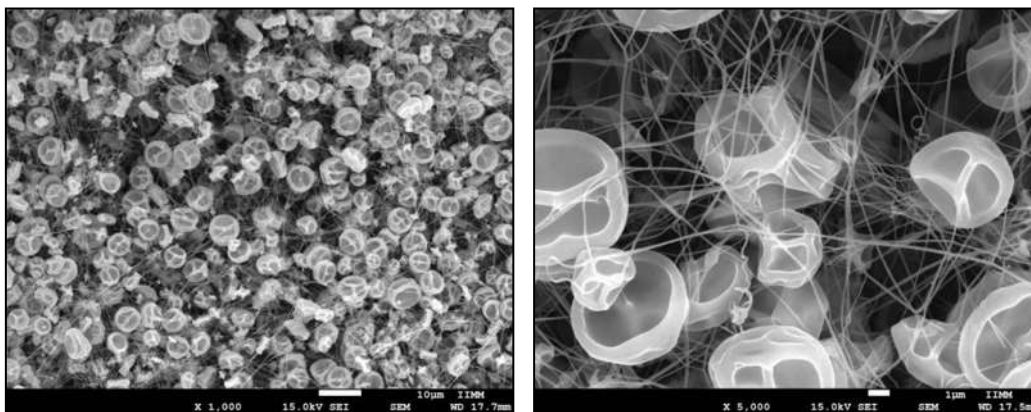


Figura V-14. Resultados MEB solución No. 5

Fuente: Propia

Del mismo modo, este ensayo permite determinar la composición química que se encuentra en las muestras analizadas mediante un mapeo, para este caso, se encontraron sustancias en altos contenidos como el carbono, oxígeno, y cobre. (Ver figura V-15. Mapeo solución No. 5)

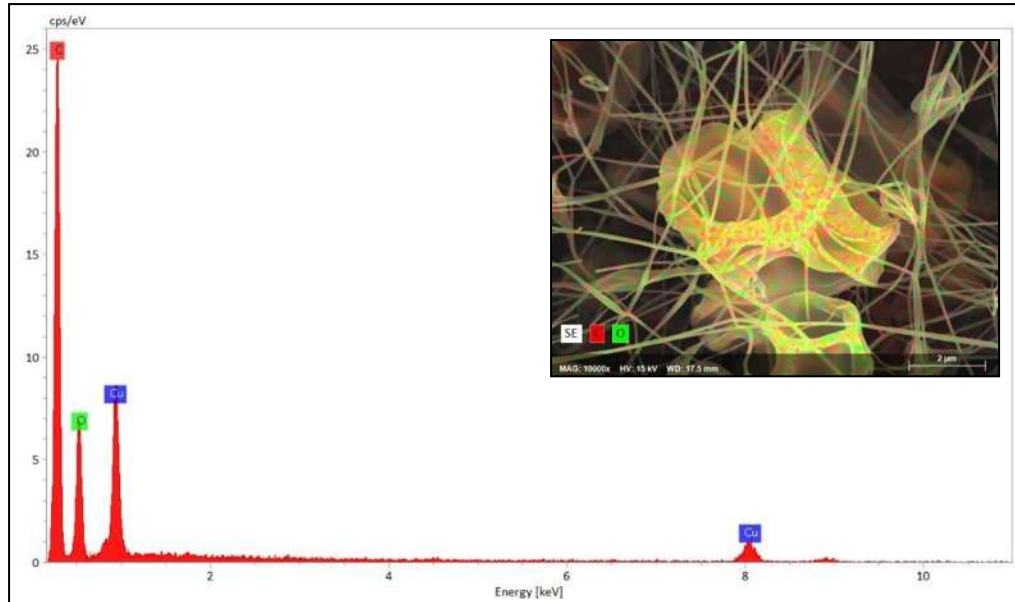


Figura V-15. Mapeo solución No. 5

Fuente: Propia

De lo anterior, la existencia de los diferentes compuestos químicos en las muestras analizadas, se deben los componentes usados para la fabricación del cigarrillo, que debido a la carburación de este, quedan retenidos en la colilla; del mismo modo, cabe aclarar que, alguno de esos compuestos químicos fueron encontrados en la muestra correspondiente a las colillas completamente nuevas, por lo tanto, es de recordar que, como se mencionó anteriormente, la composición de las colillas de cigarrillo se basa en un 95% de acetato de celulosa, es decir que el 5% corresponde a otros componentes para poder generar este producto (Colillas de cigarrillo).

Teniendo en cuenta que la síntesis química usada en el equipo de electrohilado es la misma, se deduce que la diferencia de los componentes químicos registrados entre las muestras se debe a la carga y distancia aplicada. Sin embargo, la muestra analizada correspondientes a las colillas nuevas a una carga y distancia de 16 kv y 16 cm, sus componentes químicos son muy similares a la muestra analizada a una carga y distancia de 12 kv y 12 cm. Por lo tanto, no es recomendable usar cargas y distancia mayores a 12 kv y 12 cm, ya que las muestras que se analizaron con una mayor carga y distancia presentan una gran cantidad de residuos y una cantidad menor de fibras, así mismo existe gran cantidad de componentes químicos en estas muestras lo cual podría afectar o contaminar los elementos en los que se use.

5.2.1.2. Espectroscopia infrarroja

El ensayo de espectroscopia infrarroja, nos permite conocer la composición del tipo de material resultante del proceso del electrohilado mediante una gráfica (número de onda vs absorción), lo anterior, se comparó con una gráfica revisada en la literatura en donde un grupo de investigadores [ARROYO et al, 2019] mediante este ensayo analizaron el acetato de celulosa extraído de las colillas de cigarrillo por diferentes métodos, primeramente, analizan una muestra de colilla de cigarrillo purificada, así como la generación de fibras mediante el método de electrohilado e hidrolisis acida. De lo anterior, se evidencia una similitud entre la gráfica obtenida mediante esta investigación (*figura V-16. Resultado del ensayo de espectroscopia infrarroja*) y la gráfica correspondiente a las colillas de cigarrillo purificada y a la muestra de fibras mediante la técnica de electrohilado realizado por este grupo de investigadores (*figura V-17. Referencia del ensayo de espectroscopia infrarroja*)

Por lo tanto, se puede deducir que el material extraído mediante el proceso de síntesis química desarrollado en esta investigación en fases anteriores, es similar al acetato de celulosa extraído por el grupo de investigadores, por lo tanto, se puede concluir que mediante el proceso químico propuesto se obtiene como material resultante el acetato de celulosa.

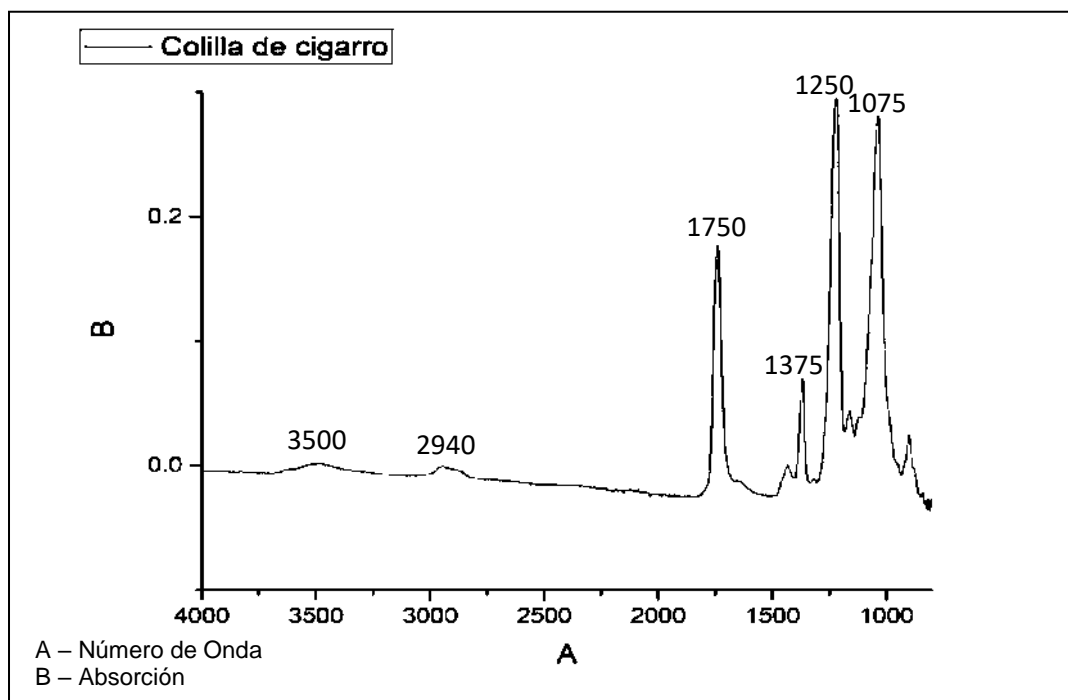


Figura V-16. Resultado del ensayo de espectroscopia infrarroja

Fuente: Propia

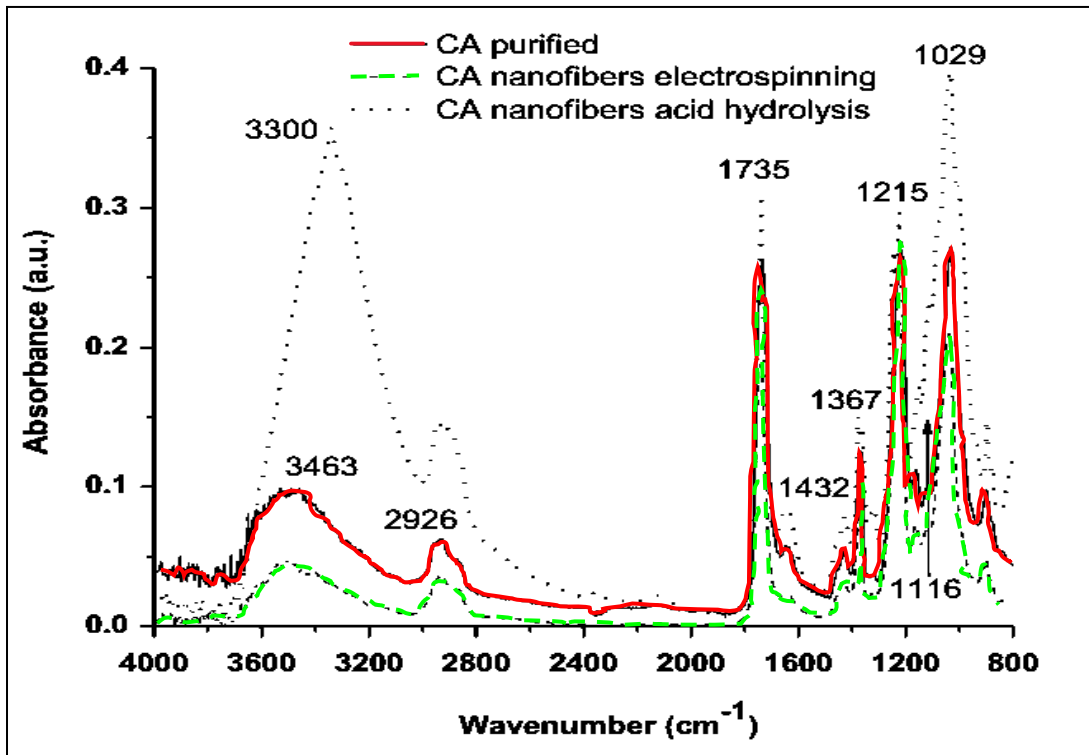


Figura V-17. Referencia del ensayo de espectroscopia infrarroja
Fuente: ARROYO et al, 2019

5.2.2. Caracterización del agregado pétreo

Dentro de la Fase 2 (Caracterización), comprende las pruebas de calidad del agregado pétreo, para lo cual se realizaron en el laboratorio PEPSA (Pruebas, Ensayos y Proyectos, S.A. de C.V) en la ciudad de Morelia, lo anterior es requerido para realizar el diseño de mezcla asfáltica densa en caliente. A continuación, se presentan los resultados de cada una de estas pruebas.

5.2.2.1. Muestreo

El muestreo de los agregados pétreos se realizó en el banco de materiales “SUPRA”, ubicado en la vía Morelia – Salamanca para el agregado grueso, del mismo modo, para el agregado fino, se realizó el muestreo en el banco de materiales “SUPRAMAX” ubicado en la vía Morelia – Quiroga. (Ver figura V-18. Muestreo de agregados pétreos)



Figura V-18. Muestreo de agregados pétreos

Fuente: Propia

5.2.2.2. Secado del material

Para el secado del material: grava, gravilla y arena triturada, se estipuló un proceso de secado natural el cual fue de 3.0 horas comprendidas entre las 11:00 am a 2:00 pm, con intervalos de movimiento del material, cada 20 minutos, obteniendo así el secado de agregado de manera adecuada. (Ver figura V-19. Secado natural de los agregados pétreos)



Figura V-19. Secado natural de los agregados pétreos

Fuente: Propia

5.2.2.3. Cuarteo

El cuarteo, es necesario para lograr obtener una muestra representativa del agregado a ensayar. Este ensaye se realizó por el método A, el cual hace referencia al uso de un equipo de separación mecánica. (Ver figura V-20. Cuarteo (Separación Mecánica))



Figura V-20. Cuarteo (Separación Mecánica)
Fuente: Propia

5.2.2.4. Peso volumétrico

La prueba de peso volumétrico, se realiza para cada uno de los agregados pétreos (grava, gravilla y arena), los cuales serán usados para el diseño de la mezcla asfáltica.

- **Peso volumétrico seco (Densidad seca mínima):** Esta prueba se realiza con el material seco y suelto de cada uno de los agregados pétreos, a continuación, en *figura V-21. Peso volumétrico seco densidad seca mínima*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-21. Peso volumétrico seco densidad seca mínima
Fuente: Propia

En la *tabla V-6. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco suelto*, del presente documento, se presentan los resultados de la prueba del peso volumétrico seco suelto para cada agregado pétreo, obteniendo la masa neta del material por unidad de volumen.

Con referencia a los valores, el mayor es el de arena triturada siendo este 1.541 t/ m³, la cual expresa que fue mayor la masa ocupada por unidad de volumen, presentando una mayor acomodación de las partículas debido a la forma de esta, y el valor menor fue el de la grava con un valor de 1.319 t/ m³ de masa por unidad de volumen del material, dando a conocer el espaciamiento entre cada una de las partículas del agregado.

Tabla V-6. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco suelto

| Peso volumétrico Seco Suelto (t/m ³) | | |
|--|--------------------|-------------------|
| Banco "Supra" | | Banco "Supra Max" |
| Grava Triturada | Gravilla Triturada | Arena Triturada |
| 1.319 | 1.375 | 1.541 |

Fuente: Propia

- **Peso volumétrico varillado densidad seca máxima:** Esta prueba se realiza con el material seco y varillado de cada uno de los agregados pétreos, (Ver figura V-22. *Peso volumétrico seco densidad seca máxima*).



Figura V-22. Peso volumétrico seco densidad seca máxima

Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-7. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco varillado*, se presentan los resultados de la prueba del peso volumétrico seco varillado para cada agregado pétreo, obteniendo la masa neta del material por unidad de volumen.

Con referencia a los valores, el mayor es el de arena triturada siendo este 1.623 g/ cm³, la cual expresa que fue mayor la masa ocupada por unidad de volumen, presentando una mayor acomodación de las partículas debido a la forma de esta, y el valor menor fue el de la gravilla con un valor de 1.565 g/cm³, de masa por unidad de volumen del material, dando a conocer el espaciamiento entre cada una de las partículas del agregado.

Tabla V-7. Resultados de la prueba de peso volumétrico seco varillado

| Peso volumétrico Seco Varillado (g/cm ³) | | |
|--|--------------------|-------------------|
| Banco "Supra" | | Banco "Supra Max" |
| Grava Triturada | Gravilla Triturada | Arena Triturada |
| 1.586 | 1.565 | 1.623 |

Fuente: Propia

5.2.2.5. Análisis granulométrico

La prueba de granulometría se realizó mediante el método de agitación mecánica, en donde se registró el peso del material pétreo retenido por unidad de volumen en cada una de las mallas correspondientes a cada agregado. A continuación, en la *figura V-23. Granulometría de los agregados pétreos*, se presenta unas fotografías como evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-23. Granulometría de los agregados pétreos

Fuente: Propia

En la *tabla V-8. Resultados de la granulometría para la grava triturada*, se puede observar los resultados de la granulometría en la grava triturada, así mismo, para ambas replicas, en la malla con abertura de 1", pasa el 100% de la muestra, y en la malla con abertura de 1/2" pasa solo el 12.81% es decir que se retiene más del 15% del agregado, por lo que el tamaño máximo nominal es la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel tamiz que retenga el 15% o más del material, por lo tanto, el tamaño nominal es de 3/4 " siendo la abertura de la malla superior a 1/2" y el tamaño máximo es de 1".

Tabla V-8. Resultados de la granulometría para la grava triturada

| Banco "Supra" | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--------|-----------------|
| Grava Triturada | | | | | | | | | |
| Malla | Replica No.1 | | | | Replica No.2 | | | | Promedio Pasa % |
| | Peso Inicial (g) | | 5505 | | Peso Inicial (g) | | 5485 | | |
| | Material Retenido (g) | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | Material Retenido (g) | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | |
| 1" | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 100,00 |
| 3/4" | 150 | 2,72 | 2,72 | 97,28 | 95 | 1,73 | 1,73 | 98,27 | 97,77 |
| 1/2" | 4650 | 84,47 | 87,19 | 12,81 | 4790 | 87,33 | 89,06 | 10,94 | 11,87 |
| 3/8" | 675 | 12,26 | 99,46 | 0,54 | 565 | 10,30 | 99,36 | 0,64 | 0,59 |
| 1/4" | 10,6 | 0,19 | 99,65 | 0,35 | 13,6 | 0,25 | 99,61 | 0,39 | 0,37 |
| N.4 | 19,4 | 0,35 | 100,0 | 0,00 | 21,4 | 0,39 | 100,0 | 0,00 | 0,00 |
| SUMA | 5505 | - | - | - | 5485 | - | - | - | - |

Fuente: Propia

Del mismo modo, según los resultados de la granulometría en la gravilla triturada en la tabla V-9. Resultados de la granulometría para la gravilla triturada, se puede evidenciar que para ambas replicas, en la mallan No. ¾", pasa el 100% siendo este su tamaño máximo, y en la malla 3/8" pasa el 34.49%, es decir que retiene más del 15% de la muestra, por lo tanto, el tamaño máximo nominal del agregado corresponde a la abertura de malla superior a este, es decir ½".

Tabla V-9. Resultados de la granulometría para la gravilla triturada

| Banco "Supra" | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--------|-----------------|
| Gravilla Triturada | | | | | | | | | |
| Malla | Replica No.1 | | | | Replica No.2 | | | | Promedio Pasa % |
| | Peso Inicial (g) | | 3275 | | Peso Inicial (g) | | 3100 | | |
| | Material Retenido (g) | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | Material Retenido (g) | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | |
| 3/4" | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 0 | 0,0 | 0,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 440 | 13,44 | 13,44 | 86,56 | 350 | 11,29 | 11,29 | 88,71 | 87,64 |
| 3/8" | 1640 | 50,08 | 63,51 | 36,49 | 1500 | 48,39 | 59,68 | 40,32 | 38,41 |
| 1/4" | 1115 | 34,05 | 97,56 | 2,44 | 1165 | 37,58 | 97,26 | 2,74 | 2,59 |
| N.4 | 80 | 2,44 | 100,0 | 0,0 | 85 | 2,74 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| SUMA | 3275 | - | - | - | 3100 | - | - | - | - |

Fuente: Propia

Posteriormente, según los resultados de la granulometría en la arena triturada presentados en la tabla V-10. Resultado de la granulometría para la arena triturada, es posible deducir que para ambas replicas, en la mallan No.8 se retiene la mayor cantidad de siendo así el tamaño de la partícula que es más repetitivo en el agregado pétreo.

Tabla V-10. Resultado de la granulometría para la arena triturada

| Banco "SupraMax" | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|--------|-------------------|--------------------|------------------------------|--------|-----------------|
| Arena Triturada | | | | | | | | | |
| Malla | Replica No.1 | | | | Replica No.2 | | | | Promedio Pasa % |
| | Peso Inicial (g) | | 514 | | Peso Inicial (g) | | 500 | | |
| | Material Retenido | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | Material Retenido | Retenido Parcial % | Acumulado Retenido Parcial % | Pasa % | |
| N.4 | 31,8 | 6,19 | 6,19 | 93,81 | 49,2 | 9,84 | 9,84 | 90,16 | 91,99 |
| N.8 | 110,4 | 21,48 | 27,67 | 72,33 | 133,6 | 26,72 | 36,56 | 63,44 | 67,89 |
| N.16 | 103,4 | 20,12 | 47,78 | 52,22 | 100 | 20,00 | 56,56 | 43,44 | 47,83 |
| N.30 | 70,2 | 13,66 | 61,44 | 38,56 | 62 | 12,40 | 68,96 | 31,04 | 34,80 |
| N.50 | 55,2 | 10,74 | 72,18 | 27,82 | 47,8 | 9,56 | 78,52 | 21,48 | 24,65 |
| N.100 | 46 | 8,95 | 81,13 | 18,87 | 36,2 | 7,24 | 85,76 | 14,24 | 16,56 |
| N.200 | 35,6 | 6,93 | 88,05 | 11,95 | 36,6 | 7,32 | 93,08 | 6,92 | 9,43 |
| Fondo | 61,4 | 11,95 | 100,0 | 0,00 | 34,6 | 6,92 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| SUMA | 514 | - | - | - | 500 | - | - | - | - |

Fuente: Propia

Finalmente, en la siguiente *figura V-24. Curvas Granulométricas*, se puede observar las curvas granulométricas resultantes de la prueba de granulometría correspondientes al agregado pétreo (grava, gravilla y arena).

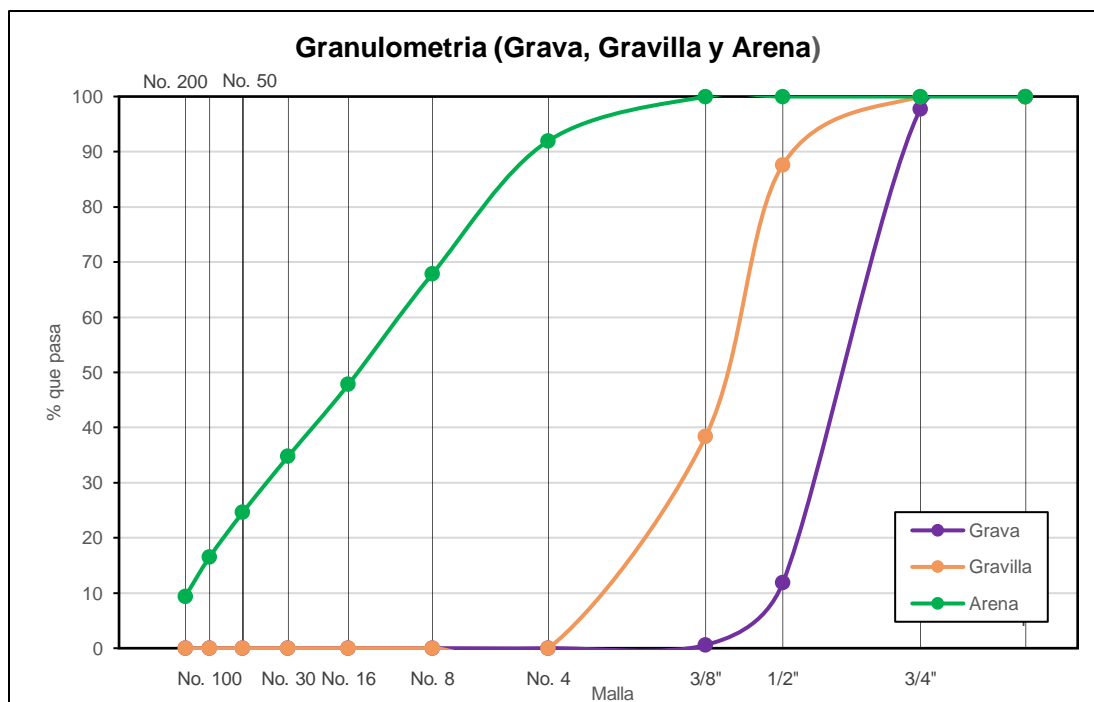


Figura V-24. Curvas Granulométricas

Fuente: Propia

5.2.2.6. Gravedad específica y absorción

La gravedad de los agregados pétreos, tiene como finalidad conocer el valor de la masa sólida por unidad de volumen, esto teniendo en cuenta que no contienen vacíos una vez realizada la prueba.

- **Gravedad y absorción en agregado grueso:** Para la prueba de gravedad y absorción en los agregados gruesos, se encuentra la grava y la gravilla triturada, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales. En la *figura V-25. Prueba de gravedad y absorción en agregado grueso*, se puede observar brevemente el procedimiento de este ensaye.



Figura V-25. Prueba de gravedad y absorción en agregado grueso
Fuente: Propia

En la *tabla V-11. Resultado de la prueba de gravedad y absorción del agregado grueso*, se presentan los resultados de la prueba de gravedad para los agregados gruesos, lo cual es necesario que cumpla los requisitos de calidad; por lo tanto, para la grava triturada da como resultado 2.646 g/cm^3 y para la gravilla triturada de 2.623 g/cm^3 ; de acuerdo con los requisitos de calidad la gravedad para los agregados gruesos según la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser mínimo de 2.4 g/cm^3 , esto quiere decir que la grava y la gravilla triturada cumplen con el requisito mínimo de gravedad.

Con respecto a la absorción de los agregados gruesos se tiene como resultado un valor de 1.130% para la grava triturada y de 1.710 % para la gravilla respectivamente.

Tabla V-11. Resultado de la prueba de gravedad y absorción del agregado grueso

| Banco "Supra" | | | | |
|------------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| Resultados | Grava Triturada | | Gravilla Triturada | |
| | Replica No.1 | Replica No.2 | Replica No.1 | Replica No.2 |
| (Gsb) Gravedad específica bruta | 2,646 | 2,645 | 2,616 | 2,629 |
| (Gsa) Gravedad específica aparente | 2,733 | 2,722 | 2,760 | 2,732 |
| Absorción [%] | 1,19 | 1,07 | 1,99 | 1,43 |

| Banco "Supra" | | | | |
|---|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| Resultados | Grava Triturada | | Gravilla Triturada | |
| | Replica No.1 | Replica No.2 | Replica No.1 | Replica No.2 |
| Gravedad específica bruta (Gsb) promedio | 2,646 | | 2,623 | |
| Gravedad específica aparente (Gsa) promedio | 2,727 | | 2,746 | |
| Absorción promedio [%] | 1,130 | | 1,710 | |

Fuente: Propia

- **Gravedad y absorción en agregado fino:** Para la prueba de gravedad y absorción en los agregados finos se encuentra la arena triturada. A continuación, en la *figura V-26*. *Prueba de gravedad y absorción en el agregado fino*, se presenta unas fotografías del procedimiento de esta prueba.



Figura V-26. Prueba de gravedad y absorción en el agregado fino

Fuente: Propia

En la *tabla V-12. Resultado de la prueba de gravedad y absorción para el agregado fino*, se presentan los resultados de la prueba de gravedad y absorción para el agregado fino, lo cual es necesario que cumpla los requisitos de calidad; por lo tanto, para la arena triturada da como resultado 2.438 g/cm^3 ; según los requisitos de calidad la gravedad para los agregados finos por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser de 2.4 g/cm^3 , esto quiere decir que la arena triturada cumple con el requisito mínimo de gravedad. Con respecto a la absorción del agregado fino se tiene como resultado un valor de 2.98% respectivamente.

Tabla V-12. Resultado de la prueba de gravedad y absorción para el agregado fino

| Banco "SupraMax" | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| Arena Triturada | | |
| Resultados | Replica No.1 | Replica No.2 |
| (Gsb) Gravedad específica bruta | 2,5 | 2,497 |
| (Gsa) Gravedad específica aparente | 2,702 | 2,706 |
| Absorción [%] | 2,9866 | 2,9654 |

| Banco "SupraMax" | |
|---|-------|
| Arena Triturada | |
| Gravedad específica bruta (Gsb) promedio | 2,438 |
| Gravedad específica aparente (Gsa) promedio | 2,625 |
| Absorción promedio [%] | 2,98 |

Fuente: Propia

5.2.2.7. Resistencia a la degradación en la Máquina de los Ángeles

La prueba de desgaste de los ángeles, consiste en dar a conocer el desprendimiento del agregado grueso sometido a grandes impactos en un tambor de acero, con cierta cantidad de esferas determinadas por la normativa. Para la prueba de desgaste de los ángeles se encuentra la grava y gravilla triturada, siendo así, el mismo procedimiento para los dos agregados. En la *figura V-27. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles*, se relaciona algunas imágenes correspondientes al procedimiento de esta prueba.



Figura V-27. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-13. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles*, se presentan los resultados de la prueba de desgaste de los ángeles, para la grava triturada se obtuvo como resultado 17.5% (Carga abrasiva 11 esferas) y para la gravilla triturada 13.6% (Carga abrasiva 8 esferas) respectivamente; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes, debe ser máximo de 30%, esto quiere decir que, el desprendimiento del agregado grueso a una carga abrasiva cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-13. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

| Banco "Supra" | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| Resultados | Grava Triturada | | Gravilla Triturada | |
| | Replica No.1 | Replica No.2 | Replica No.1 | Replica No.2 |
| Masa de la carga abrasiva [g] | 4574,8 | 4577,8 | 3330 | 3330 |
| (C) Masa inicial de la muestra [g] | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| (Y) Masa final de la muestra [g] | 4120,5 | 4130,6 | 4317,8 | 4320,4 |
| Desgaste de Los Ángeles [%] | 17,59 | 17,39 | 13,64 | 13,59 |
| Desgaste de Los Ángeles promedio [%] | 17,5 | | 13,6 | |

Fuente: Propia

5.2.2.8. Resistencia a la degradación en la Máquina Micro-Deval

Esta prueba permite determinar la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado pétreo en presencia de agua utilizando la máquina Micro-Deval. Así mismo detectar cambios en las propiedades del agregado como parte de control o garantía de calidad del agregado. En la *figura V-28. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval*, se presentan unas fotografías relacionadas con el procedimiento de esta prueba.



Figura V-28. Prueba de resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval

Fuente: Propia

En la *tabla V-14. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval*, se presentan los resultado de esta prueba, en donde se obtuvo como resultado 14.7% para la grava triturada y para la gravilla triturada 12.7% respectivamente; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes, debe ser máximo de 18%, por lo anterior, la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado a una carga abrasiva cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-14. Resultados de la resistencia a la degradación por abrasión en la maquina Micro-Deval

| Banco "Supra" | | | | |
|------------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| Resultados | Grava Triturada | | Gravilla Triturada | |
| | Replica No.1 | Replica No.2 | Replica No.1 | Replica No.2 |
| Masa de la carga abrasiva [g] | 5002,8 | 5002,3 | 5001,8 | 5000,5 |
| (A) Masa inicial de la muestra [g] | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |
| (B) Masa final de la muestra [g] | 1278,5 | 1280,9 | 1309,6 | 1310,1 |
| Desgaste Micro-Deval [%] | 14,77 | 14,61 | 12,69 | 12,66 |
| Desgaste Micro-Deval promedio [%] | 14,7 | | 12,7 | |

Fuente: Propia

5.2.2.9. Resistencia al intemperismo acelerado

El objetivo de esta prueba, es determinar la degradación esperada por intemperismo de los agregados pétreos empleados en la mezcla asfáltica. En la *figura V-29. Prueba de la resistencia al intemperismo acelerado de los agregados*, se presenta unas fotografías como evidencia de procedimiento de este ensayo.

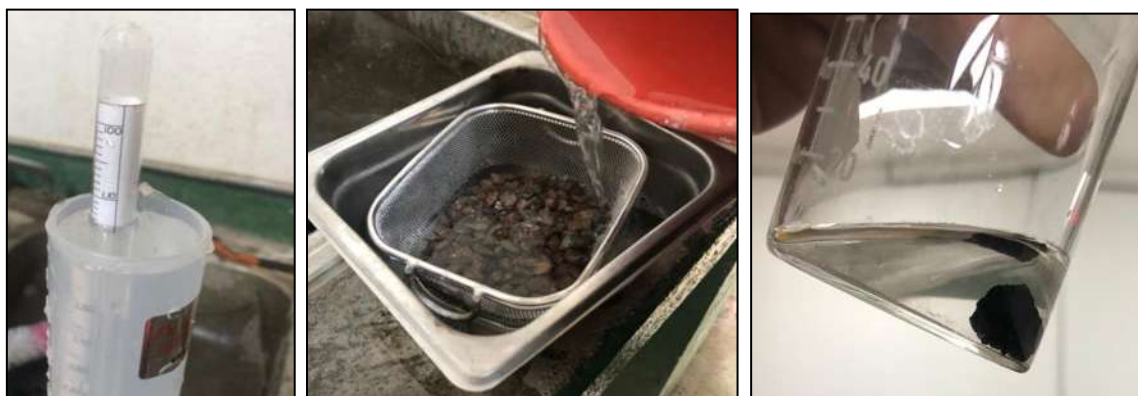


Figura V-29. Prueba de la resistencia al intemperismo acelerado de los agregados

Fuente: Propia

En la *tabla V-15. Resultados de la resistencia al intemperismo acelerado de la grava, gravilla y arena*, se presentan los resultados de la prueba de resistencia al intemperismo acelerado para cada uno de agregados pétreos, para lo cual, se realizaron un total de 5 ciclos, y se usó sulfato de sodio para la saturación de este.

Con respecto a la grava triturada se obtuvo como resultado 7.2%, para la gravilla triturada de 4.6% y para la arena triturada de 2.9% respectivamente; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes, debe ser máximo de 15%, es decir que, la resistencia degradación esperada por intemperismo de los agregados cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-15. Resultados de la resistencia al intemperismo acelerado de la grava, gravilla y arena

| Resultados | Banco "Supra" | | | | Banco "Supra Max" | |
|--|-----------------|------------|--------------------|------------|-------------------|------------|
| | Grava Triturada | | Gravilla triturada | | Arena triturada | |
| | Réplica #1 | Réplica #2 | Réplica #1 | Réplica #2 | Réplica #1 | Réplica #2 |
| (Ip Total) Porcentaje de intemperismo ponderado total ($\sum I_p$) [%] | 7,4 | 7,1 | 4,5 | 4,8 | 2,6 | 3,1 |
| Intemperismo ponderado total promedio [%] | 7,2 | | 4,6 | | 2,9 | |

Fuente: Propia

5.2.2.10. Porcentaje de partículas planas y alargadas

Este método de prueba, cubre la determinación por masa del porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso. La forma de la partícula es un parámetro que influencia las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica. En la *figura V-30. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso*, se presenta unas fotografías como evidencia de procedimiento de este ensayo.



Figura V-30. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

Fuente: Propia

En la *tabla V-16. Resultados del porcentaje de partículas planas y alargadas de la grava y gravilla*, se presentan los resultados de la prueba de porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso, en la ejecución de esta prueba se llevó a cabo mediante el método B y se usó una relación de abertura 5:1.

En los resultados se obtuvo para la grava triturada un valor de 1.35% y para la gravilla triturada de 1.03% respectivamente; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser máximo de 40%, para lo cual se refiere que la forma de las partículas es adecuada y cumple para el desempeño de la mezcla asfáltica.

Tabla V-16. Resultados del porcentaje de partículas planas y alargadas de la grava y gravilla

| Banco "Supra" | | | | |
|--|-----------------|------------|--------------------|------------|
| Resultados | Grava triturada | | Gravilla triturada | |
| | Réplica #1 | Réplica #2 | Réplica #1 | Réplica #2 |
| Masa inicial de la muestra [g] | 5999,7 | 6339,0 | 3275,0 | 3100,0 |
| Σ de retenido parcial (Total C) [%] | 97,40 | 97,70 | 100,00 | 100,00 |
| Σ de planas y alargadas (Total H) [%] | 1,38 | 1,26 | 0,65 | 1,41 |
| Partículas planas y alargadas [%] | 1,42 | 1,29 | 0,65 | 1,41 |
| Partículas planas y alargadas promedio [%] | 1,35 | | 1,03 | |

Fuente: Propia

5.2.2.11. Porcentaje de partículas fracturadas

Este método de ensayo cubre la determinación, por masa, del porcentaje de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso. En esta prueba, se espera contar con un alto contenido de partículas fracturadas con el fin de aumentar la resistencia al corte incrementando la fricción interna entre partículas en mezclas de agregados ligados o no ligados. En la *figura V-31. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso*, se presenta unas fotografías como evidencia de procedimiento de este ensayo.



Figura V-31. Prueba para el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-17 Resultados del porcentaje de partículas fracturadas en grava y gravilla*, se presentan los resultados de la prueba del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, para la grava triturada se obtuvo un porcentaje de 99.6% de partículas con dos o más caras fracturadas y 0.3% para partículas con una cara fracturada. Así mismo, para la gravilla se obtuvo un valor de partículas con dos o más caras fracturadas del 99.6% y del 0.4% para partículas de una cara.

De acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones

de ejes equivalentes el valor mínimo debe ser de 85% de partículas fracturadas de dos o más caras, por lo tanto, el agregado grueso cumple con lo requerido.

Tabla V-17. Resultados del porcentaje de partículas fracturadas en grava y gravilla

| Banco "Supra" | | | | |
|--|-----------------|------------|--------------------|------------|
| Resultados | Grava triturada | | Gravilla triturada | |
| | Réplica #1 | Réplica #2 | Réplica #1 | Réplica #2 |
| (P ₂) Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas [%] | 99,63 | 99,60 | 99,64 | 99,56 |
| (P ₁) Porcentaje de partículas con solo una cara fracturada | 0,32 | 0,31 | 0,36 | 0,44 |
| (P _{2 prom}) Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas promedio [%] | 99,6 | | 99,6 | |
| (P _{1 prom}) Porcentaje de partículas con solo una cara fracturada promedio [%] | 0,3 | | 0,4 | |

Fuente: Propia

5.2.2.12. Desprendimiento por fricción

Esta prueba nos permite determinar visualmente, el desprendimiento por fricción de la película de asfalto que envuelve al agregado grueso. En la *figura V-32. Prueba para el desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreo*, se presenta unas fotografías como evidencia de procedimiento de este ensayo.



Figura V-32. Prueba para el desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreo

Fuente: Propia

En la *tabla V-18. Resultados del desprendimiento por fricción en la grava y gravilla*, se presentan los resultados de la prueba desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreo, para la grava triturada se obtuvo como resultado de 8.7% y para la gravilla triturada 7.1% respectivamente; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes, el desprendimiento por fricción debe ser máximo de 20%, es decir que el agregado grueso cumple con este requerimiento.

Tabla V-18. Resultados del desprendimiento por fricción en la grava y gravilla

| Banco "Supra" | |
|---|--|
| Grava Triturada | Gravilla Triturada |
| 0% → No desprendimiento, 100% → Desprendimiento total | |
| 8.7 % de pérdida por fricción promedio | 7.1 % de pérdida por fricción promedio |

Fuente: Propia

5.2.2.13. Contenido de vacíos no compactados del agregado fino

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de vacíos no compactados en una muestra de agregado fino. En la *figura V-33. Prueba del contenido de vacíos no compactados del agregado fino*, se presenta unas fotografías como evidencia de procedimiento de este ensayo.



Figura V-33. Prueba del contenido de vacíos no compactados del agregado fino

Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-19. Resultados del contenido de vacíos no compactados del agregado fino*, se presentan los resultados de la prueba del contenido de vacíos no compactados del agregado fino, para la arena triturada se obtuvo como resultado 42.5%; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser mínimo de 45%, por lo tanto, la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-19. Resultados del contenido de vacíos no compactados del agregado fino

| Banco "Supra Max" | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Arena Triturada | | | | |
| Resultados | Réplica #1 | | Réplica #2 | |
| | 1ra Medición | 2da Medición | 1ra Medición | 2da Medición |
| (U) Porcentaje de vacíos no compactados por medición [%] | 42,7 | 42,5 | 42,4 | 42,3 |
| (Us) Porcentaje de vacíos no compactados [%] | 42,6 | | 42,4 | |
| (Us) Porcentaje de vacíos no compactados promedio [%] | 42,5 | | | |

Fuente: Propia

5.2.2.14. Valor de equivalente de arena

La prueba de equivalente de arena, permite determinar la cantidad de arena y arcilla que contiene el agregado fino. A continuación, en la *figura V-34. Procedimiento de la prueba de equivalente de arena*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-34. Procedimiento de la prueba de equivalente de arena
Fuente: Propia

En *tabla V-20. Resultados de la prueba de equivalente de arena*, se presentan los resultados de la prueba de equivalente de arena, para la arena triturada se obtuvo como resultado 73%; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la *normativa N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser un valor mínimo de 50%, por tal razón, las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos respecto a polvos de suelos granulares en agregados finos cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-20. Resultados de la prueba de equivalente de arena

| Banco "Supra Max" | | | |
|---|----------------|------------|------------|
| Arena Triturada | | | |
| Procedimiento de agitación | | Mecánico | |
| Método de prueba utilizado: | | B | |
| Resultados | | Réplica #1 | Réplica #2 |
| Lecturas | Arena [pulg] | 4,4 | 4,15 |
| | Arcilla [pulg] | 5,8 | 6 |
| (SE) Equivalente de arena por réplica [%] | | 75,86 | 69,17 |
| (SE) Equivalente de arena promedio [%] | | 73 | |

Fuente: Propia

5.2.2.15. Valor de azul de metileno

Este método determina la absorción de azul de metileno por una arcilla, la cual se calcula como el valor de azul de metileno (MBV). En la *figura V-35. Procedimiento de la prueba de*

valor de azul de metileno de una arcilla, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-35. Procedimiento de la prueba de valor de azul de metileno de una arcilla
Fuente: Propia

A continuación, en la *tabla V-21. Resultados de la prueba de azul de metileno*, se presentan los resultados de la prueba de valor de azul de metileno, para la arena triturada se obtuvo como resultado 7 mg/g; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N CMT 4 04/17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, para un nivel de tránsito entre 1 a 30 millones de ejes equivalentes debe ser un valor máximo de 15 mg/g, esto quiere decir que, el grado de reactividad del material filler en el agregado fino cumple dentro del rango estipulado.

Tabla V-21. Resultados de la prueba de azul de metileno

| Banco "Supra Max" | | |
|---|------------|------------|
| Arena Triturada | | |
| Resultados | Réplica #1 | Réplica #2 |
| Masa de filler (g) | 1,00 | 1,00 |
| (MBV) Valor de azul de metileno [mg/g] | 7 | 7 |
| (MBV) Valor de azul de metileno promedio [mg/g] | 7 | |

Fuente: Propia

5.2.2.16. Resumen de resultados al agregado pétreo

En la *tabla V-22. Resumen de resultados al agregado pétreo*, se presenta un resumen de las pruebas realizadas al agregado pétreo teniendo como referencia la normativa *N CMT 4 04 /17* de la Secretaría de infraestructura, comunicaciones y transportes (SICT) [IMT, 2016], en donde se logra analizar que el agregado pétreo seleccionado y ensayado, cumple con los requisitos de calidad y es adecuado para realizar mezclas asfálticas.

Tabla V-22. Resumen de resultados al agregado pétreo

| Ensayo | | Especificación | Valor Obtenido | | |
|---|-----|-----------------------|----------------|----------|-------|
| | | SICT 2017 (1-30 ejes) | Grava | Gravilla | Arena |
| Densidad Relativa (Gravedad específica bruta - Gsb) % | Min | 2,4 | 2,646 | 2,623 | - |
| Gravedad específica aparente (Gsa) | - | - | 2,727 | 2,746 | - |
| Absorción % | - | - | 1,13 | 1,71 | - |
| Desgaste de los Ángeles % | Max | 30 | 17,5 | 13,6 | - |
| Desgaste Micro-deval % | Max | 18 | 14,7 | 12,7 | - |
| Intemperismo acelerado % (Sulfato de Sodio) | Max | 15 | 7,2 | 4,6 | 2,9 |
| Partículas planas y alargadas % | Max | 40 | 1,35 | 1,03 | - |
| Partículas trituradas % | Min | 85 | 99,6 | 99,6 | - |
| Desprendimiento por fricción % | Max | 20 | 8,7 | 7,1 | - |
| Adherencia con el asfalto % | Min | - | 91,3 | 92,9 | - |
| Densidad Relativa (Gravedad específica bruta - Gsb) % | Min | 2,4 | - | - | 2,438 |
| Gravedad específica aparente (Gsa) | - | - | - | - | 2,625 |
| Absorción % | - | - | - | - | 2,98 |
| Angularidad | Min | 45 | - | - | 42,5 |
| Equivalente de arena | Min | 50 | - | - | 73 |
| Azul de metileno | Max | 15 | - | - | 7 |

Fuente: Propia

5.2.3. Caracterización del cemento asfáltico

Dentro de la Fase 2 (Caracterización) comprende las pruebas en laboratorio del cemento asfáltico para su debida clasificación por grado PG, la cual es necesarias para realizar el diseño de mezcla.

Las pruebas para la caracterización del cemento asfáltico, se realizaron en la empresa Mega Asfaltos S.A de C.V, en la ciudad de Salamanca en el estado de Guanajuato; el cemento asfáltico a utilizar es original, es decir que no contiene ningún aditivo o polímero. A continuación, se presentan los resultados de cada uno de las pruebas.

5.2.3.1. Punto de Inflamación Cleveland

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo. En la *figura V-36. Procedimiento de la prueba punto de Inflamación Cleveland*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-36. Procedimiento de la prueba punto de Inflamación Cleveland

Fuente: Propia

Para esta prueba se obtuvo un punto de inflamación Cleveland del cemento asfáltico a una temperatura de 270 °C; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, debe ser un valor mínimo de 230 °C, esto quiere decir que el punto de inflamación cumple dentro del rango estipulado.

5.2.3.2. Viscosidad rotacional Brookfield

Con esta prueba, se determinará la consistencia de los cementos asfálticos, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. En la *figura V-37. Procedimiento de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-37. Procedimiento de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield

Fuente: Propia

Para este cemento asfáltico, la viscosidad rotacional obtuvo un valor promedio de 440 cP (0.44 Pa. s) con una fuerza del torque de 43.9 y una cantidad de revoluciones por minuto de 250 (*Ver tabla V-23. Resultados de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield*); de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, la viscosidad

máxima permitida es de 3 Pa. s, por lo anterior, la viscosidad del cemento asfáltico se encuentra dentro del rango estipulado.

Tabla V-23. Resultados de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield

| Viscosidad rotacional 135°C | |
|------------------------------------|-------------|
| Cantidad de asfalto (gr) | 10,2 |
| Numero de aguja | 27 |
| Tiempo de prueba (min) | 8 |
| RPM | 250 |
| Torque | 43,9 |
| Viscosidad (Pa.s) | 0.44 |

Fuente: Propia

5.2.3.3. Punto de reblandecimiento

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos. En la *figura V-38. Procedimiento de la prueba de punto de reblandecimiento*, se presenta evidencia del procedimiento.



Figura V-38. Procedimiento de la prueba de punto de reblandecimiento

Fuente: Propia

En la prueba de punto de reblandecimiento se tuvo un valor de 51°C en ambas muestras; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, este valor debe ser mínimo de 48°C, por lo anterior, el cemento asfáltico cumple con la consistencia requerida en los requisitos de calidad.

5.2.3.4. Módulo reológico de corte dinámico

Con el equipo de reología, es posible determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase, como propiedades visco elásticas lineales de un cemento asfáltico, A

continuación, en la *figura V-39. Procedimiento de la prueba de módulo reológico de corte dinámico*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-39. Procedimiento de la prueba de módulo reológico de corte dinámico

Fuente: Propia

Para la prueba de módulo reológico de corte dinámico para una temperatura de 64 °C se tuvo un valor del ángulo de fase de 83.4°, así mismo, un valor de $G^*/\text{sen } \delta$ de 1.2695 kPa, en ambas muestras (*Ver tabla V-24. Resultados de la prueba de módulo reológico de corte dinámico*); de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, para una temperatura de 64°C, se debe tener un valor mínimo $G^*/\text{sen } \delta$ de 1.0 kPa, por lo anterior, el cemento asfáltico cumple con las propiedades visco elásticas lineales de acuerdo con los requisitos de calidad.

Tabla V-24. Resultados de la prueba de módulo reológico de corte dinámico

| Módulo reológico de corte dinámico | |
|---|--------|
| Temperatura de prueba °C | 64 |
| Angulo de Fase ° | 83.4 |
| ($G^*/\text{sen } \delta$), kPa | 1,2695 |

Fuente: Propia

5.2.3.5. Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)

Mediante el efecto de calor y aire aplicados a una película de cemento asfáltico semisólido, esta prueba permite obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo, con lo anterior, es posible determinar la pérdida por calentamiento del asfalto, y el módulo reológico de corte dinámico. En la *figura V-40. Procedimiento de la prueba de envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.



Figura V-40. Procedimiento de la prueba de envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)

Fuente: Propia

Para determinar la pérdida por calentamiento, es necesario registrar el peso de las muestras después del horno RTFO, por otro lado, según lo requerido por la normativa, se debe realizar nuevamente la prueba de módulo reológico de corte dinámico.

En la *tabla V-25. Resultados de la prueba envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)*, se presentan los resultados obtenidos por este ensayo. Para este caso, la pérdida por calentamiento da un resultado de 0.743 %, lo cual cumple dentro del valor máximo de 1.0% según con lo requerido en los requisitos de calidad por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

Por otro lado, para una temperatura de 64°C, en la prueba de módulo reológico de corte dinámico el resultado del ángulo de fase de 72.5°C, así mismo, un valor de $G^*/\sin \delta$ de 6.8203 kPa, en ambas muestras; de acuerdo con lo requerido en los requisitos de calidad, por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, para una temperatura de 64°C se debe tener un valor mínimo $G^*/\sin \delta$ de 2.2 kPa, por lo anterior, el cemento asfáltico cumple con las propiedades visco elásticas lineales de acuerdo con los requisitos de calidad después del envejecimiento en el horno RTFO. Del mismo modo, según el J_{nr} a 3,2 kPa en MSCR kPa-1, para este caso es de 1.1609, es decir que cumple con el parámetro de **Tráfico Alto "H"**, el cual requiere un valor de J_{nr} a 3,2 kPa en MSCR kPa-1 máximo de 2.0.

Por otro lado, al ser un cemento asfáltico no modificado la respuesta elástica RE a 3,2 kPa en MSCR es del 8.36% es decir, que la elasticidad del asfalto es baja y se clasificaría inicialmente como un cemento asfáltico con grado PG de 64. Sin embargo, se requiere completar dicha clasificación con la menor temperatura (-16 o -22), para ello es necesario realizar en envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión (PAV).

Tabla V-25. Resultados de la prueba envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO)

| Después de Horno RTFO | |
|---|--------|
| Pérdida por calentamiento, % | |
| Pérdida de masa (%) | 0.743 |
| Módulo reológico de corte dinámico | |
| Temperatura de prueba °C | 64 |
| Angulo de Fase ° | 72.5 |
| (G*/sen δ), kPa | 6.8203 |
| Jnr a 3,2 kPa en MSCR kPa-1 | 1.1609 |
| Transito Alto | H |
| RE a 3,2 kPa en MSCR | 8.36% |

Fuente: Propia

5.2.3.6. Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Esta prueba permite simular los cambios reológicos que pueden ocurrir en un cemento asfáltico durante su envejecimiento (oxidación) a largo plazo. Para ello, se vacía el residuo del horno RTFO en el equipo del PAV, seguidamente se pasa la muestra al VDO (Horno de desgasificación al vacío).

Según lo indicado bajo la normativa vigente de la Secretaría de infraestructura, comunicaciones y transportes (SICT), la prueba del PAV se realiza a una temperatura de 100°C durante un tiempo de 20 horas, por otro lado, el equipo de VDO se maneja a temperatura de 140°C a 170°C por 30 minutos. En la *figura V-41. Procedimiento de la prueba de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)*, y en la *figura V-42. VDO (Horno de desgasificación al vacío)*, se presentan evidencia del procedimiento de esta prueba.

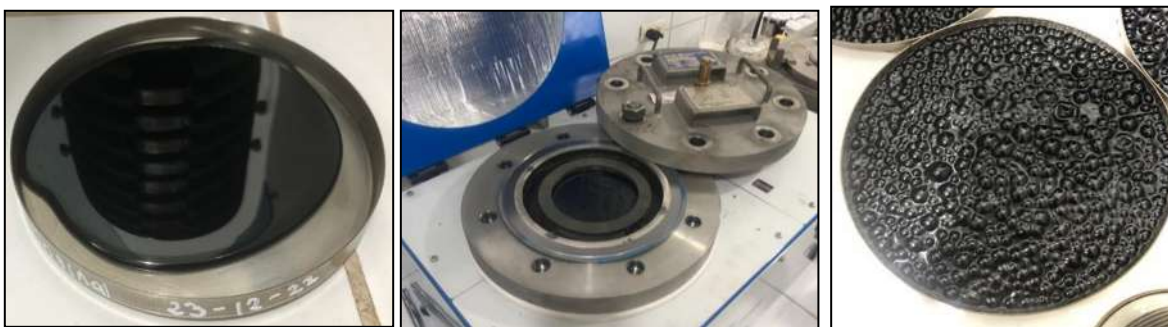


Figura V-41. Procedimiento de la prueba de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Fuente: Propia



Figura V-42. VDO (Horno de desgasificación al vacío)

Fuente: Propia

5.2.3.7. Procedimiento de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV)

Del residuo obtenido del equipo VDO, se realiza el ensayo de la viga de flexión reómetro (BBR) la cual se utiliza para calcular el valor m y la rigidez de la muestra de ensayo en diferentes tiempos de carga. Para el equipo de BBR, se calibra a una temperatura de -12°C teniendo como referencia la normativa vigente de la Secretaría de infraestructura, comunicaciones y transportes (SICT). En la *figura V-43. Procedimiento de la prueba después de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)*, se presenta evidencia del procedimiento de esta prueba.

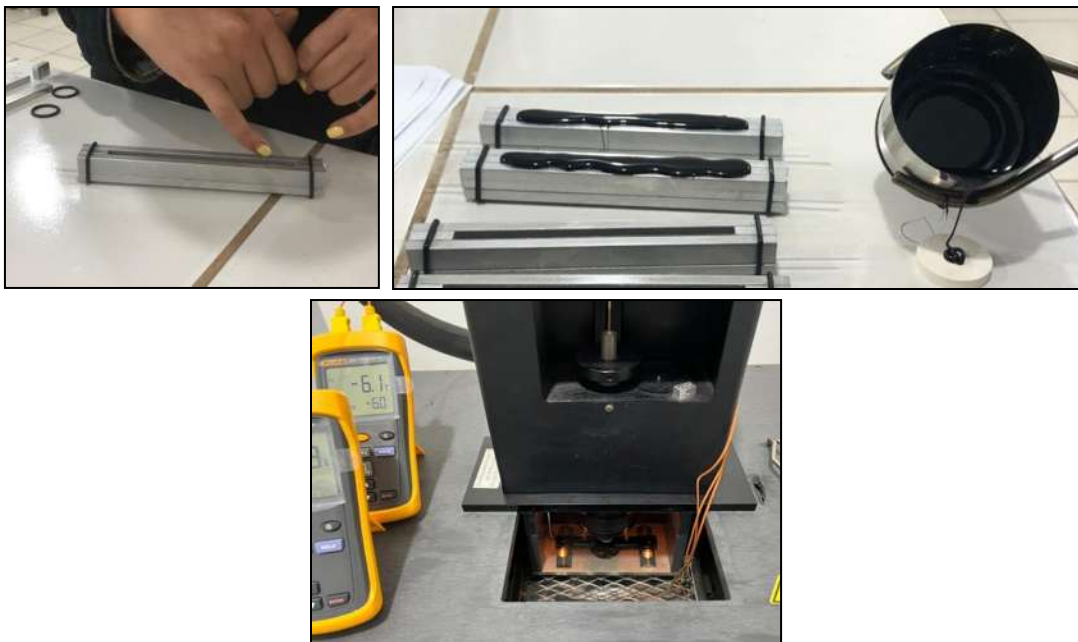


Figura V-43. Procedimiento de la prueba después de envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV)

Fuente: Propia

Como resultado se obtuvo un valor de rigidización promedio de 2593.406 kPa, así como una rigidez de flexión de la viga de 96.1225 MPa y un valor de la pendiente m de 0.3095. (Ver *tabla V-26. Resultados de la prueba después de envejecimiento en horno a presión*)

(PAV)). De acuerdo con lo requerido en la normativa N.CMT.05.004/18 - *Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)* de la SICT, el valor máximo de la rigidización es de 5000 kPa, la rigidez de flexión debe ser máximo de 300 MPa y la pendiente m debe tener un valor mínimo de 0.300, por lo tanto, el asfalto seleccionado anteriormente cumple con dichos requerimientos.

Tabla V-26. Resultados de la prueba después de envejecimiento en horno a presión (PAV)

| Después de envejecimiento en horno a presión (PAV) | |
|---|----------|
| Temperatura de envejecimiento PAV, °C | 100 |
| Rigidización (G*sen δ), kPa, | 2893.406 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 25 |
| Rigidez de Flexión MPa | 96.1125 |
| Valor m | 0,3095 |
| Temperatura de prueba, @ 60s, °C | -12 |

Fuente: Propia

5.2.3.8. Resumen de resultados clasificación del cemento asfáltico por grado PG

A continuación, en la *tabla V-27. Resultados de la clasificación del cemento asfáltico por grado PG*, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de laboratorio para la clasificación del cemento asfáltico por grado PG, de lo cual se puede concluir que de acuerdo con los requisitos de calidad solicitados por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT), el asfalto que se seleccionó corresponde a un asfalto de grado **PG 64 H - 22**.

Tabla V-27. Resultados de la clasificación del cemento asfáltico por gado PG

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG) | Valores Norma N-CMT-4-05-004/18 | Valores de Ensayo |
|--|---------------------------------|-------------------|
| | PG 64 - 22 | PG 64 - 22 |
| Cemento asfáltico original | | |
| Punto de inflamación Cleveland °C, mín. | 230 | 270 |
| Viscosidad rotacional 135°C, Pa.s, máx. | 3 | 0.44 |
| Punto de reblandecimiento, °C, mín. | 48 | 51 |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín. | 1,0 | 1,270 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | 64 |
| Después de envejecimiento en horno RTFO | | |
| Pérdida por calentamiento, %, máx. | 1,0 | 0.743 |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín. | 2,2 | 6.8203 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 64 | 64 |
| Tráfico Alto "H", Nivel de Ajuste (MSCR) | 1,0 | 1.1609 |
| Jnr a 3,2 kPa en MSCR; kPa-1, máx. | | |

| GRADO DE DESEMPEÑO (PG) | Valores Norma N-CMT-4-05-004/18 | Valores de Ensayo |
|--|------------------------------------|----------------------|
| | PG 64 - 22 | PG 64 - 22 |
| Después de envejecimiento en horno a presión (PAV) | | |
| Temperatura de envejecimiento PAV, °C | 100 | 100 |
| Rigidización (G*sen δ), kPa, máxima | 5000 | 2593.406 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C | 25 | 25 |
| Rigidez de Flexión S(t), máximo 300 Mpa Valor m, mínimo 0,300 | -12 | 96.1125 |
| Temperatura de prueba, @ 60s, °C | | 0,3095 |
| | | -12 |

Fuente: Propia

5.3. FASE 3 – Diseño

Dentro de esta fase, se determina la propuesta granulométrica, así como el contenido mínimo de asfalto para un diseño de una mezcla asfáltica densa en caliente, mediante la metodología Marshall.

5.3.1. Propuesta granulométrica

Para la propuesta granulométrica, se realiza teniendo en cuenta los límites superiores e inferiores con respecto a lo especificado en la Manual “Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas” de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Como se mencionó en la descripción de la prueba de granulometría del agregado grueso, el tamaño máximo es de ¾” por lo tanto esto indica los siguientes valores de los límites (Ver figura V-44. Graduaciones para mezcla asfáltica).

| Abertura de malla | Mezclas cerradas | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Tamaño máximo nominal del agregado | | | | | | | | |
| | 2 in. (50 mm) | 1 ½ in. (37,5 mm) | 1 in. (25,0 mm) | ¾ in. (19,0 mm) | ½ in. (12,5 mm) | ¾ in. (9,5 mm) | No. 4 (4,75 mm) | No. 8 (2,36 mm) | No. 16 (1,18 mm) |
| Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler) | | | | | | | | | |
| 2 ½ in. (63 mm) | 100 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 in. (50 mm) | 90 – 100 | 100 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1 ½ in. (37,5 mm) | ... | 90 – 100 | 100 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1 in. (25,0 mm) | 60 – 80 | ... | 90 – 100 | 100 | ... | ... | ... | ... | ... |
| ¾ in. (19,0 mm) | ... | 66 – 80 | ... | 90 – 100 | 100 | ... | ... | ... | ... |
| ½ in. (12,5 mm) | 35 – 65 | ... | 56 – 80 | ... | 90 – 100 | 100 | ... | ... | ... |
| ¾ in. (9,5 mm) | ... | ... | ... | 56 – 80 | ... | 90 – 100 | 100 | ... | ... |
| No. 4 (4,75 mm) | 17 – 47 | 23 – 53 | 29 – 59 | 35 – 65 | 44 – 74 | 55 – 85 | 80 – 100 | ... | 100 |
| No. 8 (2,36 mm) | 10 – 36 | 15 – 41 | 19 – 45 | 23 – 49 | 28 – 58 | 32 – 67 | 65 – 100 | ... | 95 – 100 |
| No. 16 (1,18 mm) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 40 – 80 | ... | 85 – 100 |
| No. 30 (600 µm) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 35 – 85 | ... | 70 – 95 |
| No. 60 (300 µm) | 3 – 15 | 4 – 16 | 5 – 17 | 5 – 19 | 5 – 21 | 7 – 23 | 7 – 40 | ... | 45 – 75 |
| No. 100 (150 µm) | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 3 – 20 | ... | 20 – 40 |
| No. 200 (75 µm) | 0 – 5 | 0 – 6 | 1 – 7 | 2 – 8 | 2 – 10 | 2 – 10 | 2 – 10 | ... | 9 – 20 |
| | Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla | | | | | | | | |
| | 2 – 7 | 3 – 8 | 3 – 9 | 4 – 10 | 4 – 11 | 6 – 12 | 6 – 12 | 7 – 12 | 8 – 12 |

Figura V-44. Graduaciones para mezcla asfáltica

Fuente: IMT, 2019, Edición: Propia

Seguidamente, se realiza diversas propuestas de porcentajes de cada tipo de agregado pétreo, el cual se visualiza gráficamente que cumpla dentro de estos límites. En la figura V-45. Propuesta granulométrica, se presenta la propuesta granulométrica definida que para este caso corresponde a 20% grava, 30% Gravilla y 50% de arena.

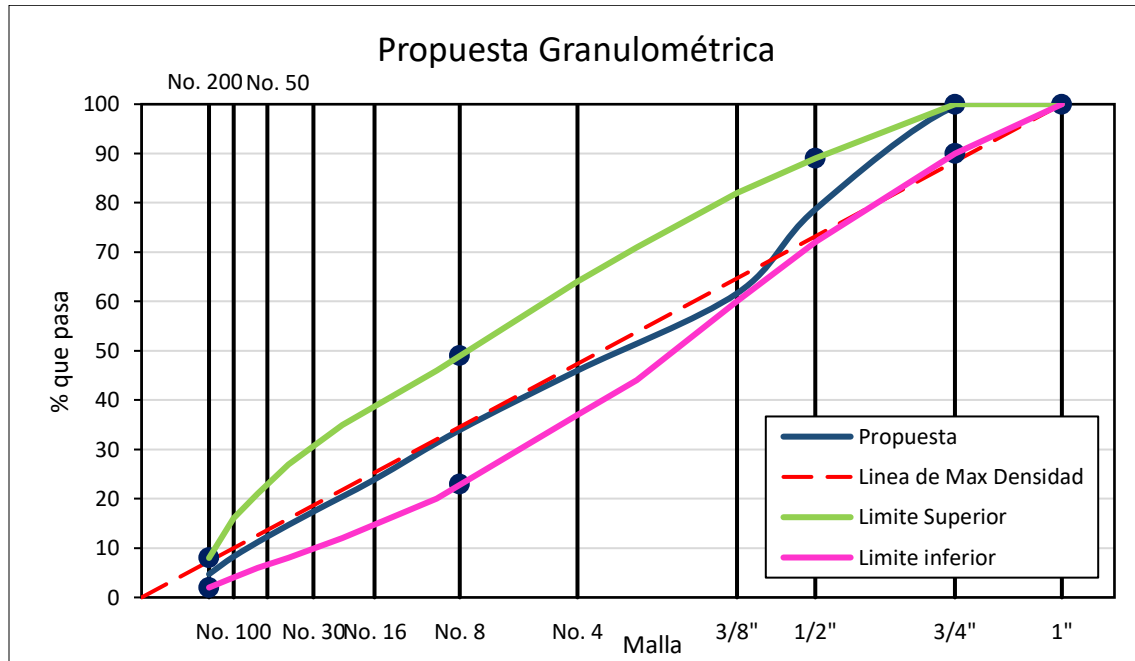


Figura V-45. Propuesta granulométrica
Fuente: Propia

5.3.2. Cálculo del contenido de asfalto inicial

De acuerdo con esta metodología, es necesario calcular el contenido de asfalto, el cual depende de la granulometría y características de los agregados pétreos; así mismo, se debe de considerar una constante de área y un índice asfáltico.

Posteriormente, se determina el contenido mínimo de asfalto para cada fracción de agregado, y la suma de este indica la cantidad de asfalto necesario; sin embargo, se debe tener en cuenta un factor de seguridad de 1.25 adicional. Como resultado se determina que el contenido mínimo de asfalto es de 5.14%. (Ver tabla V-28. Cálculo del contenido de asfalto inicial)

Tabla V-28. Cálculo del contenido de asfalto inicial

| Malla que Pasa | Malla que Retiene | % Peso | Constante de área (m ² /Kg) | Superficie Parcial | índice asfáltico | Contenido Mínimo (%) |
|----------------|-------------------|--------|--|--------------------|------------------|----------------------|
| 1 1/2 | 3/4 | 0,45 | 0,27 | 0,120 | 0,006 | 0,0007 |
| 3/4 | No.4 | 53,56 | 0,41 | 21,959 | 0,006 | 0,1318 |
| No.4 | No.30 | 28,60 | 2,05 | 58,620 | 0,007 | 0,4103 |

| Malla que Pasa | Malla que Retiene | % Peso | Constante de área (m ² /Kg) | Superficie Parcial | índice asfáltico | Contenido Mínimo (%) |
|-----------------------------|-------------------|--------|--|--------------------|------------------|----------------------|
| No.30 | No.200 | 12,69 | 15,38 | 195,095 | 0,008 | 1,5608 |
| No.200 | | 4,72 | 53,3 | 251,310 | 0,008 | 2,0105 |
| Suma | | 100,00 | | | | 4,1141 |
| Contenido mínimo de Asfalto | | | | | | 5,1426 |

Fuente: Propia

Finalmente, de acuerdo con la propuesta granulométrica, se determina la cantidad necesaria de agregado pétreo por cada malla para la fabricación de cada espécimen; siguiendo con la metodología Marshall, se deben realizar mínimo 3 especímenes por cada porcentaje de cemento asfáltico analizado.

5.3.3. Incorporación de las colillas de cigarrillo en la mezcla asfáltica

De acuerdo con lo establecido anteriormente, se experimentaron tres diferentes alternativas para el uso de las colillas de cigarrillo, las cuales fueron: síntesis química, fibras (Método electrohilado) y membranas (Método casting). Sin embargo, en este apartado se hace un análisis experimental de cada una de estas alternativas, para definir cuál es la más conveniente para su incorporación en las mezclas asfálticas.

Si bien, se realizó la síntesis química como se mencionó en el presente capítulo en la FASE 1 – Pruebas Químicas, para poder generar las fibras y membranas; la síntesis química genera una gran disminución de volumen con respecto a las colillas, ya que se pasa de un sólido a un líquido con ayuda de los diferentes reactivos químicos, este proceso dura 3.0 horas a una temperatura de 30 °C a 40°C, he inmediatamente después de este tiempo es posible usarlo.

Con respecto a la generación de fibras mediante la técnica de electrohilado, como se presentó anteriormente, si es posible generar fibras, sin embargo, para poder generar un volumen representativo de este material, es un proceso que requiere un tiempo considerable, ya que para poder tener como material resultante una película de fibras de aproximadamente de 3 cm por 3 cm, es necesario 3.0 ml de síntesis química y mínimo dos horas en el equipo de electrohilado; así mismo, es un material de bajo peso lo cual dificulta determinar las proporciones de este con respecto a los materiales que conforman una mezcla asfáltica, además de que se requiere de un volumen importante de insumos y reactivos.

Para la fabricación de las membranas, es necesario verter la síntesis química en moldes en función del volumen, sin embargo, para su solidificación es necesario esperar mínimo 48 horas a temperatura ambiente; por otro lado, la distribución de la síntesis alrededor del molde no es uniforme, es decir que se puede visualizar unas áreas con mayor cantidad de síntesis que otras, y para lograr una membrana uniforme es necesario utilizar cantidades

de síntesis mayores a 40 ml, lo cual aumenta el espesor de las membranas, y el tiempo de solidificación.

Por lo anterior, se analizó la incorporación de estas alternativas en una mezcla asfáltica, teniendo en cuenta que, para generar una muestra representativa de fibras electrohiladas y poder incorporar esta, en una mezcla asfáltica, es un proceso que demandaría mayor tiempo, y que, además su incorporación no tendría un valor significativo por el tamaño de este en comparación a los diferentes materiales que comprenden una mezcla asfáltica; por lo tanto, se considera que esta no es la mejor opción. Del mismo modo, la colocación de las membranas en una mezcla asfáltica se tendría que agregar por capas entre la mezcla lo cual podría dificultar la adherencia entre estas y ocasionar mayores deformaciones.

Es así que, se optó por incorporar estas opciones en el cemento asfáltico y posteriormente generar una mezcla asfáltica, sin embargo, por procesos de manejabilidad y producción del cemento asfáltico, la opción a seleccionar tenía que quedar completamente diluida en el asfalto, con el fin de garantizar una distribución uniforme dentro de este producto.

Con respecto a las fibras de acuerdo al tamaño de estas, al momento que hicieran contacto con el cemento asfáltico, podría perder su estructura, por lo tanto no sería adecuado realizar un proceso de generación de fibras y que el momento de incorporarlas en el cemento asfáltico estas cambiaran sus características, por lo anterior se descarta esta opción; por otro lado, con respecto a las membranas, si bien estas son el producto de la síntesis química pero de manera sólida; es decir que, para poder incorporarlo en el cemento asfáltico sería necesario colocar sus dimensiones iguales, para poder incorporarla de manera homogénea en el cemento asfáltico y garantizar su disolución; sin embargo, es de recordar que la síntesis química da como resultado un fluido, por lo que, para una mejor distribución y homogenización entre estos elementos, lo más adecuado es generar una mezcla entre líquidos, por lo tanto se determina que, la mejor opción entre las diferentes opciones de uso de colillas de cigarrillo, es mediante la incorporación de la síntesis química en el cemento asfáltico, para posteriormente generar una mezcla asfáltica.

5.3.4. Asfalto con síntesis química

Teniendo como referencia la síntesis química descrita en apartados anteriores (Fase 1), se propone incorporarla en el cemento asfáltico para posteriormente realizar la fabricación de una mezcla asfáltica densa en caliente. Por lo cual, se inicia incorporando la síntesis química en el asfalto, una vez incorporada se tamiza por una malla No. 20 con el fin de evidenciar si existe material retenido y corroborar la incorporación de las colillas de cigarrillo (síntesis química), en el cemento asfáltico.

Cabe mencionar que, la síntesis química está compuesta por 0.4 gr de colillas, 2.0 ml de etanol y 3.0 ml de ácido acético, sin embargo, al tratar de incorporar esta síntesis en el

cemento asfáltico se presentó gran cantidad de material retenido en la malla No. 20. Por lo tanto, se intentó con diferentes cantidades de ácido fosfórico y ácido acético.

El ácido fosfórico se ha utilizado en cantidades variables para modificar el cemento asfáltico, así mismo se ha determinado que, los aditivos de ácido fosfórico aumentan significativamente la rigidez del asfalto a altas temperaturas y pueden ocurrir daños por humedad si el ácido se usa en concentraciones elevadas [KING et al, 2002]. Sin embargo, este ácido se ha seguido utilizando en cantidades mínimas para la incorporación de los polímeros en el cemento asfáltico, tal como lo ha demostrado el investigador Gaylon L. Baumgardner de la empresa “*ERGON INCORPORATED*” [SUÁREZ, 2013]

Por lo tanto, se realizaron diferentes combinaciones entre las sustancias químicas, en la *tabla V-29. Combinaciones de síntesis química*, se presenta cada una de estas iniciando con cantidades de ácido fosfórico de 0.0 ml (3.0 ml ácido acético) [*tabla V-29 1a*], 0.1 ml (2.9 ml ácido acético) [*tabla V-29 2b*] y 0.5 ml (2.5 ml ácido acético) [*tabla V-29 3f*] respectivamente, en donde se registró que al usar una cantidad de 0.5 ml de ácido fosfórico en la síntesis, no se presentaba material retenido en la malla No. 20, por lo que se procedió a realizar una síntesis química con 0.3 ml de ácido fosfórico (2.7 ml ácido acético) [*tabla V-29 4e*] y se obtuvo como resultado que, no había material retenido en la malla No. 20; es así que, se continuó con la experimentación tratando de encontrar la cantidad mínima de ácido fosfórico que lograra incorporar completamente la síntesis química en el cemento asfáltico, por tal razón se experimentó con cantidades de ácido de acético de 0.15 ml [*tabla V-29 5c*] y 0.3 ml [*tabla V-29 6d*]. Lo descrito anteriormente, se presenta a continuación.

Tabla V-29. Combinaciones de síntesis química

| MATERIALES | SINTESIS QUIMICA | | | | | |
|-----------------|------------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | 1a | 2b | 5c | 6d | 4e | 3f |
| Colillas | 0,4 g | 0,4 g | 0,4 g | 0,4 g | 0,4 g | 0,4 g |
| Ácido Acético | 3 ml | 2.9 ml | 2.85 ml | 2.8 ml | 2.7 ml | 2.5 ml |
| Ácido Fosfórico | - | 0.1 ml | 0.15 ml | 0.2 ml | 0.3 ml | 0.5 ml |
| Etanol | 2 ml | 2 ml | 2 ml | 2 ml | 2 ml | 2 ml |
| Mat. Retenido | SI | SI | SI | NO | NO | NO |

Fuente: Propia

Como se puede observar, se intentó diferentes combinaciones entre sustancias químicas (*Ver tabla V-29. Combinaciones de síntesis química*), hasta lograr que, toda la solución química quedara completamente incorporada en el cemento asfáltico con la cantidad mínima de ácidos y no se presentara ningún material retenido en la malla No. 20.

En la *figura V-46. Comprobación de la integración de síntesis química en el asfalto*, se presentan las diferentes fotografías con el material retenido en la malla No.20, La primera síntesis evaluada fue sin contenido de ácido fosfórico, la cual corresponde a la composición descrita en la *tabla V-29 [1a]*, en esta se evidencia un alto contenido de material retenido (*Ver figura V-46 [1a]*).

Posteriormente se incorporó en pequeñas cantidades este ácido fosfórico, con 0.1 ml (*tabla V-29 [2b]*) y 0.15 ml (*tabla V-29 [2b]*) en los cuales aún se observa una pequeña cantidad de material retenido en la malla No. 20 (*Ver figura V-46 [2b]* y *[5c]*). Sin embargo, para una síntesis química con una cantidad de 0.2 ml de ácido fosfórico (*tabla V-29 [6b]*), no se presentó material retenido en la malla No. 20 (*Ver figura V-46 [6d]*).

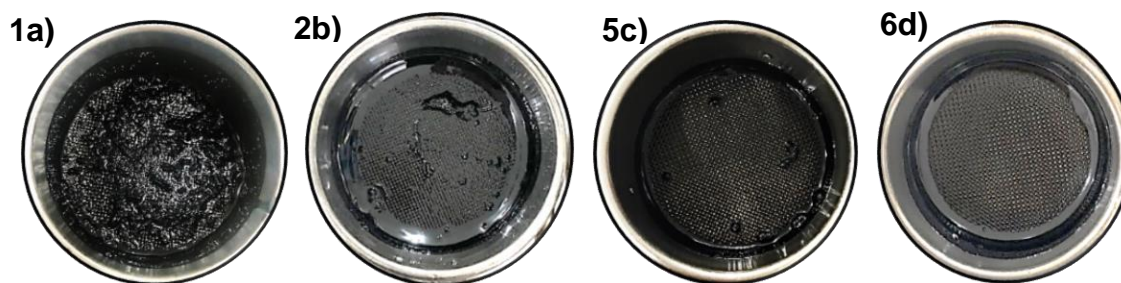


Figura V-46. Comprobación de la integración de síntesis química en el asfalto

Fuente: Propia

Por lo anterior, para diluir una cantidad de 0.4 g de colillas de cigarrillo es necesario 0.2 ml de ácido fosfórico, 2.8 ml de ácido acético y 2.0 ml de etanol, con una agitación mínima de 3.0 horas a una temperatura entre 30°C a 40°C.

La síntesis química seleccionada se adiciono en diferentes porcentajes con respecto al peso del cemento asfáltico convencional, posteriormente se realizaron las pruebas de laboratorio teniendo en cuenta la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)* de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), los resultados de los mismos se presentan en la *tabla V-30. Resultados de asfalto con síntesis química.*

Dentro de las pruebas que se realizan al asfalto original de acuerdo con la normativa, se encuentra punto de inflamación, penetración, viscosidad rotacional, punto de reblandecimiento y módulo reológico de corte dinámico, si bien estas pruebas corresponden para cualquier tipo de asfalto, sin embargo, se encuentra pruebas adicionales como separación diferencia anillo y esfera, y recuperación elástica por torsión para los cementos asfálticos modificados con polímero.

En la investigación realizada por el investigador Rahman en el año 2020 [RAHMAN et al. 2020], realizaron las pruebas de penetración, punto de reblandecimiento y viscosidad. Para esta investigación, en los resultados de la prueba de penetración, se tiene un valor de referencia de 81 dmm (decímetro), al adicionar un 0.3% de síntesis la penetración aumenta a 84 dmm (decímetro), sin embargo, al usar 1% de adición la penetración disminuye a 83 dmm (decímetro), con 3% a 76 dmm (decímetro), y 5% a 75 dmm (decímetro) respectivamente, es decir que con 0.3% de adición aumenta un poco este valor pero a partir de 1% este valor empieza a disminuir, sin embargo, al adicionar 3% el valor es inferior al valor del cemento asfáltico de referencia, lo anterior concierne con los resultados obtenidos

por el investigador Rahman en donde comenta que, cuando se añadió 0,3% de fibras de celulosa triturada, se observó un aumento en el valor de penetración. Sin embargo, a medida que se agregaron más colillas de cigarrillo, los valores de penetración comenzaron a disminuir [RAHMAN et al. 2020]; por lo anterior, los resultados sugieren que para este tipo de cemento asfáltico el uso de la síntesis química en porcentajes inferiores a 3% no comprometen el valor de la penetración de referencia y no es significativamente perjudicial para las propiedades de dureza y/o consistencia relativa.

Con respecto a la prueba de punto de reblandecimiento, en este caso se tiene un valor de referencia de 51°C, para una adición de 0.3%, 1% y 3% se mantuvo un punto de reblandecimiento de 52°C y para una adición de 5% se registró una temperatura de punto de reblandecimiento de 51.3°C; en los resultados por el investigador Rahman [RAHMAN et al. 2020] se registraron ligeras disminuciones en sus resultados, sin embargo, se concuerda que, en este caso los resultados son relativamente similares y que todas las muestras podrían ser adecuadas para la construcción de pavimento flexible. Por lo tanto, la adición realizada no altera la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico y según lo sugerido en los resultados se recomienda adiciones inferiores al 3% debido a que, a partir de este valor se empieza a reducir ligeramente el punto de reblandecimiento.

Para la prueba de viscosidad, se tiene un valor de 440 cP como referencia; con una adición de 0.3% la viscosidad aumenta a 455 cP, así mismo, para una adición del 1% se logra obtener un aumento de la viscosidad a 463 cP. Sin embargo, para una adición de 3% y 5% la viscosidad disminuye a 451 cP y 447 cP respectivamente, sin embargo, dichos valores no son inferiores al valor de referencia, lo cual se asemeja a los resultados del investigador Rahman, en donde comenta que, cuando se modificó el cemento asfáltico con colillas de cigarrillo trituradas, se encontró un aumento de la viscosidad con el aumento de la cantidad de las colillas en la mezcla [RAHMAN et al. 2020]. De lo anterior, los porcentajes de adición aumentan el estado de fluidez del cemento asfáltico a 135 °C, lo cual garantiza las condiciones de almacenamiento, traslado y bombeo del cemento asfáltico. Así mismo, los resultados de esta investigación sugieren para este tipo de cemento asfáltico usar porcentajes de adición inferiores a 3% con el fin de obtener una mayor viscosidad.

La prueba de punto de inflamación, básicamente es un parámetro de seguridad, en donde se tiene como valor de referencia 270°C; con una adición de 0.3% y 1% aumenta este valor a 271°C y 275°C respectivamente, y para las adiciones de 3% y 5% este valor disminuye por debajo del valor de referencia a 259°C y 254°C; lo anterior sugiere que para este tipo de cemento asfáltico se adicione en porcentajes inferiores al 3%, con el fin de no reducir la temperatura inflamación que se tiene con el asfalto de referencia.

Para la prueba de módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen } \delta$), se tiene un valor de referencia de 1.2695 kPa y con los diferentes porcentajes de adición aumenta este valor y se mantiene entre 1.4735 kPa a 1.500 kPa lo cual son valores muy similares, y no comprometen el valor del módulo reológico de referencia, es decir que, no es significativamente perjudicial para las propiedades visco elásticas del cemento asfáltico de

referencia. Lo anterior, se puede corroborar con una prueba adicional correspondiente a la recuperación elástica por torsión en donde el valor de referencia corresponde a 9.44% y para los diferentes porcentajes de adición ensayados dicho valor se mantiene igual. A continuación, se puede observar los resultados de las pruebas de laboratorio con los diferentes porcentajes de adición con respecto al cemento asfáltico convencional (Referencia).

Tabla V-30. Resultados de asfalto con síntesis química

| PRUEBA | REFERENCIA | ADICIÓN DE SÍNTESIS QUÍMICA | | | |
|---|------------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | | 0,3% | 1% | 3% | 5% |
| CEMENTO ASFÁLTICO ORIGINAL | | | | | |
| Punto de inflamación (°C) | 270 | 271 | 275 | 259 | 254 |
| Penetración (dmm) | 81 | 84 | 83 | 76 | 75 |
| Viscosidad Rotacional (cP) | 440 | 455 | 463 | 451 | 447 |
| Toque | 43,9 | 45 | 46 | 45,1 | 44 |
| RPM | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| Punto de reblandecimiento (°) | 51° | 52° | 52° | 52° | 51,3° |
| Recuperación elástica por torsión (%) | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) (Kpa) | 1.2695 | 1,4734 | 1,4754 | 1,4744 | 1,5000 |
| Angulo de fase (°) | 83,4° | 82,4° | 82° | 81,3 | 80,5 |

Fuente: Propia

Con los resultados de las pruebas de laboratorio descritos anteriormente, se puede deducir que, de acuerdo con los diferentes porcentajes de adición, todas las propiedades evaluadas cumplen de acuerdo a lo establecido por la normativa; si bien, a un mayor porcentaje de adición entre 3% al 5% empieza a ver una disminución de algunas de estas propiedades. Sin embargo, dichos valores se encuentran muy cercanos al valor de referencia y cumplen con los criterios establecidos en la normativa.

Posteriormente en la *tabla V-31. Continuación de resultados de asfalto con síntesis química*, se presentan los siguientes resultados. Se realiza las pruebas correspondientes al envejecimiento del cemento asfáltico a corto plazo en horno rotatorio de película delgada (RTFO), en ellas se determina la pérdida de masa por calentamiento, nuevamente se hace la prueba de módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) y se comprueba la recuperación elástica a diferentes esfuerzos (MSCR) en el cual comprende el valor de la deformación no recuperable (Jnr) y la respuesta elástica a 3.2 kPa.

Para la prueba de pérdida de masa por calentamiento, la cual simula la pérdida de volátiles, lo cual indica el envejecimiento que pudiese ocurrir en el asfalto durante los procesos de mezclado y construcción, su valor máximo permitido es de 1.0 %, para lo cual el valor de referencia es de 0.743%; con una adición de 0.3%, 1%, 3% y 5% este valor aumenta a 0.753%, 0.854%, 1.1862% y 1.381% respectivamente. Por lo tanto, de acuerdo con lo requerido en la normativa, para porcentaje de adición de síntesis química mayores de 3% el cemento asfáltico no cumpliría debido a que sobre pasa el valor máximo permitido. Lo anterior, se debe a la pérdida de volátiles que se generan en la prueba de envejecimiento

en el horno RTFO; Es así como, esta sería la primera prueba que comprometería el comportamiento del cemento asfáltico en porcentajes de adicciones mayores de 3%. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados se sugiere usar porcentajes de adición inferiores a este valor.

Por otro lado, en la prueba de módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen } \delta$), el valor de referencia es de 6.8203 kPa y a medida que se adicione diferentes porcentajes al cemento asfáltico, dicho valor aumenta, es decir que, hay un crecimiento en el comportamiento visco elástico del cemento asfáltico, lo cual no tendrá problema, ya que el valor que exige la normativa es mínimo de 2.2 kPa y no especifica un valor máximo; para la prueba de la recuperación elástica a diferentes esfuerzos (MSCR), en el cual comprende el valor del deformación no recuperable (J_{nr}) y la respuesta elástica a 3.2 kPa, se tiene como referencia un valor de 1.1609 kPa con un nivel de ajuste “H” el cual significa que el cemento asfáltico de referencia puede usarse para un nivel de **tráfico alto**, además se tiene una respuesta elástica de 8.36%, es así, que a medida que se aumenta el porcentaje de adición en el cemento asfáltico el valor de MSCR va disminuyendo generando así, el aumento del nivel de ajuste a “V” correspondiente a un **tráfico muy alto**. Así mismo, la respuesta elástica va aumentado de 10.14 % a 22.86%. Lo anterior, se puede expresar que a mayor porcentaje de adición se alcanza valores mayores de nivel de ajuste y de respuesta elástica.

Tabla V-31. Continuación de resultados de asfalto con síntesis química

| PRUEBA | REFERENCIA | ADICIÓN DE SÍNTESIS QUÍMICA | | | |
|---|------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | 0,3% | 1% | 3% | 5% |
| DESPUÉS DE ENVEJECIMIENTO EN HORNO RTFO | | | | | |
| Pérdida de masa por calentamiento (%) | 0,743 | 0,753 | 0,854 | 1,186 | 1,381 |
| Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen } \delta$) (kPa) | 6,8203 | 7,1397 | 7,5455 | 8,0467 | 10,5512 |
| Angulo de fase (°) | 72,5 | 71,7 | 71 | 69,4 | 65,9 |
| Nivel de Ajuste (MSCR) | 1,1609 | 1,0478 | 0,9797 | 0,8454 | 0,5442 |
| Jnr a 3,2 kPa en MSCR (kPa-1) | H “Alto” | H “Alto” | V “Muy Alto” | V “Muy Alto” | V “Muy Alto” |
| Respuesta elástica RE a 3,2 kPa en MSCR (%) | 8,36 | 10,14 | 11,12 | 14,11 | 22,86 |
| Temperatura de prueba (°C) | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |

Fuente: Propia

Finalmente, en la *tabla V-32. Continuación de resultados de asfalto con síntesis químicas*, se presenta los resultados de las últimas pruebas requeridas, iniciando con la prueba de envejecimiento a largo plazo del cemento asfáltico en horno a presión (PAV), en donde comprenda las pruebas de rigidización, rigidez de flexión (coeficiente entre la tensión a flexión y la deformación a flexión bajo una carga constante), y en este el valor de m , el cual corresponde al valor absoluto de la pendiente de la curva del logaritmo del módulo de rigidez, frente al logaritmo del tiempo a un tiempo dado.

Con respecto a la rigidización ($G^*\text{sen } \delta$) de acuerdo con la normativa, se permite un valor máximo de 5000 kPa, el asfalto de referencia tiene un valor de 2593.406 kPa, y para 0.3%, 1% y 5% de adición, este aumenta y se mantiene en un rango de 2620.12 kPa y 2768.37

kPa. Sin embargo, para porcentaje de 3% este valor disminuye a 2532.48, kPa el cual es inferior al valor de referencia, es así como se sugiere usar porcentaje de adición inferiores al 3%. Lo anterior se corrobora con la rigidez de flexión, en donde la normativa indica que su valor máximo es de 300 MPa; del cemento asfáltico de referencia se tiene un valor de 96,11 Mpa, y con 0.3%, 1%, 3% y 5% de adición de síntesis química, este valor aumenta y se mantiene en un rango de 105.633 Mpa a 111.99 Mpa. Lo anterior tiene relación al valor de la pendiente m , la cual es inversamente proporcional a este, de acuerdo con la normativa se debe tener un valor mínimo de 0.3, el cemento asfáltico de referencia tiene un valor de 0.3095, y con los diferentes porcentajes de adición este disminuye en un rango de 0.306 a 0.300; Como se puede observar, estos resultados no se encuentran alejados de los valores de referencia, es decir que, si existe una ligera rigidización del asfalto debido a la adición química, y entre mayor sea el porcentaje de adición mayor será su valor, sin embargo, al ser mayor su rigidez disminuye al valor de la pendiente m .

De lo anterior, se puede determinar que las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico con una adición de síntesis química mejoran significativamente, lo cual concuerda con los resultados del investigador, Rahman en el año 2020 [RAHMAN et al. 2020].

Tabla V-32. Continuación de resultados de asfalto con síntesis química

| PRUEBA | REFERENCIA | ADICIÓN DE SÍNTESIS QUÍMICA | | | |
|---|------------|-----------------------------|---------|---------|---------|
| | | 0,3% | 1% | 3% | 5% |
| DESPUÉS DE ENVEJECIMIENTO EN VASIJA DE PAV | | | | | |
| Temperatura de envejecimiento PAV(°C) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Rigidización ($G^* \cdot \sin \delta$) (kPa) | 2593.406 | 2620.1 | 2768.3 | 2532.4 | 2637.8 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s (°C) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Rigidez de Flexión $S(t)$, máximo 300 Mpa | 96.1125 | 105.633 | 111.999 | 106.731 | 108.934 |
| Valor m , mínimo 0,300 | 0.3095 | 0.306 | 0.302 | 0.301 | 0.300 |
| Temperatura de prueba, @ 60s (°C) | -12 | -12 | -12 | -12 | -12 |

Fuente: Propia

De lo anterior, se puede determinar que, la síntesis química adicionada no actúa como un modificador para los cementos asfálticos, ya que mantiene en el mismo grado PG del asfalto, por lo tanto, para este caso, la síntesis química podría funcionar como un material de aditivo para mejorar las propiedades del cemento asfáltico. Un ejemplo de ellos, es el uso del asfalto en mayores intensidades de tráfico, debido a que como se mencionó anteriormente, se tiene una intensidad de tránsito de referencia como "Alto" (H) y debido al uso de la síntesis química pasa a ser "Muy Alto" (V). Del mismo modo, todos los parámetros evaluados del cemento asfáltico con la síntesis química, están dentro de los parámetros estipulados por la normativa.

Por otro lado, una de las pruebas fundamentales para determinar el porcentaje de adición de síntesis química para este tipo de cemento asfáltico, es la prueba de pérdida de masa mediante el envejecimiento del cemento asfáltico a corto plazo en horno rotatorio de película delgada (RTFO), debido a que a mayor cantidad de síntesis química se generó

mayor pérdida de masa; si bien en otras pruebas, los valores de los resultados varían con referencia al asfalto sin ninguna adición, sin embargo estos aun así cumplen con lo establecido en la normativa, por lo anterior, la única prueba que no cumpliría esta premisa sería en la prueba de pérdida de masa. Es así que, se establece una gráfica en donde se relaciona los diferentes porcentajes de adición de la síntesis química con los resultados del ensayo de pérdida de masa, para así poder determinar la mayor cantidad en porcentaje de síntesis química para adicionarla en el cemento asfáltico y que cumpla con todos los requerimientos de calidad.

De la siguiente *figura V-47. Resultados pérdida de masa por calentamiento*, se puede observar que el coeficiente de determinación (R^2) el cual proporciona información de que tan bien la línea de regresión se aproxima a los datos reales, se tiene un valor de 0.98 es decir que no existe una gran variación entre los datos expuestos, por lo tanto, se puede determinar que se tiene un crecimiento lineal de acuerdo al porcentaje de adición de la síntesis química y la pérdida de masa por calentamiento.

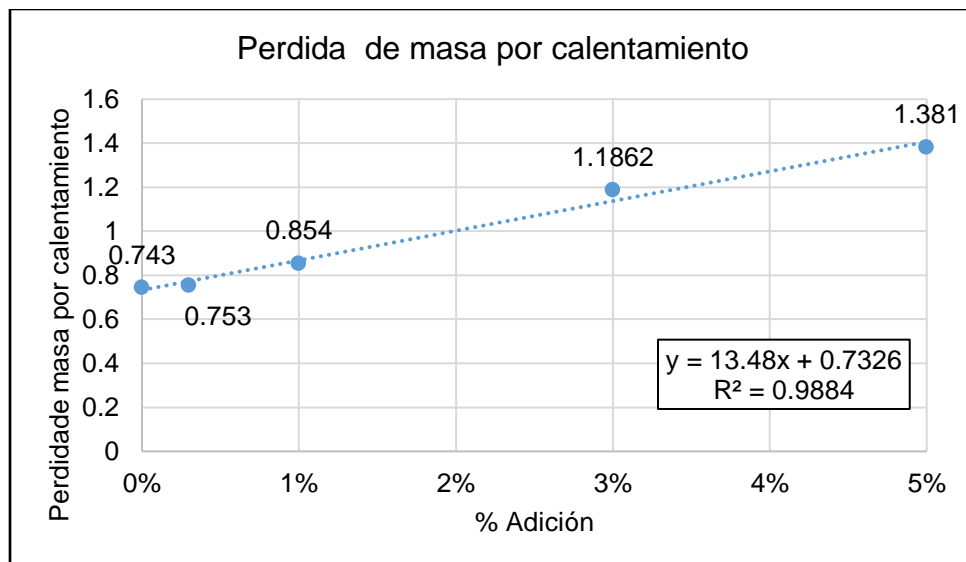


Figura V-47. Resultados pérdida de masa por calentamiento

Fuente: Propia

Asimismo, se obtiene la ecuación de la recta (*Ecuación V-1*), la cual, a partir de esta, se determina el mayor porcentaje de adición de síntesis química para que la pérdida de masa por calentamiento sea de 1.0%, lo cual es lo máximo permitido por la normativa.

$$y = 13.48x + 0.7326 \quad (V-1)$$

Entendiendo a X como el porcentaje de adición de síntesis química en el cemento asfáltico y, Y como el porcentaje de la pérdida de masa por calentamiento; con lo anterior, se reemplaza en Y el valor de 1.0, ya que es el valor máximo permitido por la normativa, y se despeja el valor de X, el cual indicara el mayor porcentaje de adición de la síntesis química para este tipo de cemento asfáltico (*Ecuación V-2*). Realizando la operación

matemática, da como resultado que la cantidad máxima de síntesis química que se puede adicionar para este tipo de cemento asfáltico y que cumpla con todos los requerimientos de calidad es de 2.0%.

$$1 = 13.48x + 0.7326 \quad (V-2)$$

$$\frac{1 - 0.7326}{13.48} = x$$

$$x = 2.0\%$$

Por lo anterior, se procede a incorporar el 2.0% de adición de síntesis química en el cemento asfáltico, para posteriormente generar una mezcla asfáltica densa en caliente con el cemento asfáltico de referencia y con la síntesis producto de las colillas de cigarrillo.

5.3.5. Comparativa (Asfalto de referencia vs Asfalto con aditivo)

Una vez incorporado el 2.0% de síntesis química producto de las colillas de cigarrillo en el cemento asfáltico, se procede a realizar la caracterización del mismo para analizar y comparar los resultados de este, con el cemento asfáltico de referencia, buscando obtener alguna mejora en su comportamiento, así como en sus propiedades reológicas y/o físicas.

En la *tabla V-33. Caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis*, la primera prueba que se realiza al cemento asfáltico en su estado original, es decir sin ningún tipo de envejecimiento inducido, es el punto de inflamación, para este caso de tiene un valor del cemento asfáltico de referencia de 270°C y para el cemento asfáltico con la síntesis es de 268°C; de acuerdo con la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, esta temperatura debe ser mínimo de 230°C, por lo anterior se puede concluir que el cemento asfáltico cumple, así mismo la síntesis química no afecta de manera significativa el punto de inflamación del asfalto.

Por otro lado, se realiza la prueba de penetración; esta prueba ya no es requerida por la normativa, sin embargo, con el fin de rectificar la consistencia del asfalto se lleva a cabo; para el cemento asfáltico de referencia se tiene un valor de 81 dmm y el valor del cemento asfáltico con la síntesis es de 80 dmm, lo cual indica que la síntesis química incorporada no compromete la consistencia del cemento asfáltico.

La prueba de viscosidad rotacional a 135°C nos indica la consistencia del cemento asfáltico, para el cemento asfáltico de referencia se tiene un valor de 440 cP (0.44 Pa.s) y para el asfalto con síntesis de 458 cP (0.458 Pa.s); según lo requerido por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, el valor máximo de viscosidad es de 3 Pa.s; por lo tanto el cemento asfáltico con síntesis cumple; del mismo modo se puede analizar que, si bien hay un aumento de la viscosidad para el cemento asfáltico con síntesis, lo cual indica que debido a la adición de la síntesis

química se rigidiza este material, sin embargo, no es un aumento significativo comparado este valor con el de referencia.

La anterior prueba, se complementa con el ensayo de punto de reblandecimiento, lo cual nos indica la consistencia del asfalto, para este caso se tiene valores de 51°C (Asfalto de referencia) y de 52°C (Asfalto con síntesis) respectivamente; de acuerdo con la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, el valor mínimo para una asfalto convencional es de 48 °C, por lo tanto el cemento asfáltico con síntesis cumple, así mismo se puede determinar que, la síntesis química no compromete la consistencia del cemento asfáltico .

La prueba de recuperación elástica por torsión, se realiza a los cementos asfálticos modificados con polímero, sin embargo, para este caso se realiza este ensayo para verificar que la síntesis química agregada no comprometa la elasticidad del cemento asfáltico de referencia, por lo que, para ambos casos, su recuperación elástica por torsión fue de 9.44% es decir que, la adición química realizada no afecta la elasticidad del cemento asfáltico.

Con respecto a la reología, se tiene un módulo reológico de corte dinámico de 1.2695 Kpa con un ángulo de fase de 83.4° (asfalto de referencia) y 1.4749 con un ángulo de fase de 21.7° (asfalto con síntesis), de acuerdo con la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, se requiere un valor mínimo de 1.0 Kpa por lo anterior, el cemento asfáltico con síntesis, cumple con lo requerido en la normativa, así mismo se puede evidenciar un aumento en el módulo, lo anterior deduce que debido a la síntesis química adicionada, esta aumenta la resistencia del asfalto, lo cual genera el aumento del módulo reológico. Así mismo hay una reducción en el ángulo de fase debido a que el asfalto con síntesis presenta un comportamiento más elástico.

Tabla V-33. Caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis

| PRUEBA | Cemento Asfáltico de Referencia | Cemento Asfáltico con síntesis 2.0% |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| CEMENTO ASFÁLTICO ORIGINAL | | |
| Punto de inflamación (°C) | 270 | 268 |
| Penetración (dmm) | 81 | 80 |
| Viscosidad Rotacional (cP) | 440 | 458 |
| Toque | 43,9 | 45 |
| RPM | 250 | 250 |
| Punto de reblandecimiento (°) | 51° | 52° |
| Recuperación elástica por torsión (%) | 9,44 | 9,44 |
| Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) (Kpa) | 1.2695 | 1,4749 |
| Angulo de fase (°) | 83,4° | 81.7° |

Fuente: Propia

Después de analizar el asfalto en su estado original, en la *tabla V-34. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis*, se presentan los

resultados del ensayo de envejecimiento a corto plazo en el horno RTFO; como se comentó en apartados anteriores, a mayor cantidad de adición de síntesis química la pérdida de masa por calentamiento aumenta, sin embargo, para un porcentaje de adición de 2.0%, la pérdida de masa es de 1.0% lo cual es el valor máximo permitido por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

Por otro lado, el módulo reológico de corte dinámico aumento de 6.8203 Kpa (Asfalto de referencia) a 7.7961 Kpa (Asfalto con síntesis) debido a la adición de la síntesis química, lo cual hace disminuir el ángulo de fase de 72.5° a 69.9°, como se mencionó anteriormente, este comportamiento se debe al aumento de la resistencia del asfalto, y a un comportamiento del mismo un poco más elástico, lo anterior debido a la adición de la síntesis química producto de las colillas de cigarrillo. La normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*, requiere que el módulo reológico de corte dinámico tenga un valor mínimo de 2.2 Kpa, por lo tanto, el asfalto con síntesis cumple con este requerimiento.

Del mismo modo, al evaluar el nivel de ajuste (MSCR) se tiene un valor de referencia de 1.1609 el cual clasifica su uso para **transito alto (H)**, así como una respuesta elástica de 8.36%; de lo cual, para el cemento asfáltico con síntesis se obtuvo un nivel de ajuste de 0.9001, menor al de referencia, para lo cual se clasifica su uso para **transito muy alto (V)**, así mismo, la recuperación elástica aumenta a 13.69%, lo anterior concuerda con lo evaluado anteriormente, debido a la incorporación de la síntesis química aumenta la elasticidad del cemento asfáltico .

Tabla V-34. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis

| PRUEBA | Cemento Asfáltico de Referencia | Cemento Asfáltico con síntesis 2.0% |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| DESPÚES DE ENVEJECIMIENTO EN HORNO RTFO | | |
| Pérdida de masa por calentamiento (%) | 0,74 | 1,0 |
| Módulo reológico de corte dinámico ($G^*/\text{sen } \delta$) (kPa) | 6,8203 | 7,7961 |
| Angulo de fase (°) | 72,5 | 69,9 |
| Nivel de Ajuste (MSCR) | 1,1609 | 0,9001 |
| Jnr a 3,2 kPa en MSCR (kPa-1) | H "Alto" | V "Muy Alto" |
| Respuesta elástica RE a 3,2 kPa en MSCR (%) | 8,36 | 13.69 |
| Temperatura de prueba (°C) | 64 | 64 |

Fuente: Propia

Finalmente, es necesario evaluar el cemento asfáltico a bajas temperaturas por lo que se le realiza el envejecimiento a largo plazo mediante la vasija de presión de PAV. En la *tabla V-35. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis*, se presentan los siguientes resultados; se tiene un valor de la rigidización de 2593.406 kPa, así como una rigidez de flexión de 96.31125 Mpa y 0.309 como el valor de

m (Asfalto de referencia); para el asfalto con síntesis se tiene un valor un poco más alto de la rigidización correspondiente a 2650.4 kPa, así como una rigidez de flexión de 109.362 y 0.302 como el valor de m.

Si bien se podría decir que, la síntesis química adicionada genera una rigidización del cemento asfáltico, sin embargo, los valores obtenidos no están muy alejados de los valores de referencia, además, estos resultados se mantienen dentro de los estipulado por la normativa *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)*.

Tabla V-35. Continuación de la caracterización del cemento asfáltico de referencia vs con síntesis

| PRUEBA | Cemento Asfáltico de Referencia | Cemento Asfáltico con síntesis 2.0% |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|
| DESPÚES DE ENVEJECIMIENTO EN VASIJA DE PAV | | |
| Temperatura de envejecimiento PAV(°C) | 100 | 100 |
| Rigidización ($G^* \text{sen } \delta$) (kPa) | 2593.406 | 2650.4 |
| Temperatura de prueba @ 10 rad/s (°C) | 25 | 25 |
| Rigidez de Flexión S(t), máximo 300 Mpa Valor m, mínimo 0,300 | 96.1125 0.3095 | 109.362 0.302 |
| Temperatura de prueba, @ 60s (°C) | -12 | -12 |

Fuente: Propia

Por lo anterior, se establece que el cemento asfáltico con síntesis corresponde a una clasificación por grado **PG 64V-22**. Como prueba adicional, se evalúa la densidad del cemento asfáltico con síntesis al 2.0% producto de las colillas de cigarrillo mediante el ensayo presentado en la normativa *ASTM D70-18 "Método estándar para determinar la densidad de materiales bituminoso semi-sólidos (Método del picnómetro)"* (Ver figura V-48. Prueba de densidad) en donde se obtuvo como resultado una densidad de 1.092 kg/l, en donde se tenía un valor de referencia de 1.029 kg/l, por lo que se puede determinar que la síntesis química adicionada, no cambia a gran escala la densidad del cemento asfáltico original.



Figura V-48. Prueba de densidad

Fuente: Propia

De lo anterior, se podría concluir que, el cemento asfáltico con síntesis al 2.0% producto de las colillas de cigarrillo, mejora el comportamiento y propiedades reológicas, y mantiene las características de un asfalto convencional.

5.4. FASE 4 – Diseño en laboratorio

En este apartado, se presentan la fabricación y resultados bajo la metodología Marshall, de la mezcla asfáltica de referencia y la de 2.0% con la síntesis química producto de la disolución de las colillas de cigarrillo.

5.4.1. Mezcla Asfáltica de referencia

La fabricación de la mezcla asfáltica de referencia, se realiza de acuerdo a lo especificado por la metodología Marshall. Teniendo en cuenta el contenido de asfalto inicial, calculado anteriormente, se procede a realizar diferentes porcentajes de contenido de asfalto, con el fin de identificar el porcentaje de asfalto óptimo que cumpla con los requisitos de calidad que establece el método. (Ver figura V-49. Fabricación de muestras mediante la metodología Marshall)

Se usaron porcentajes de cemento asfáltico de 4.69%, 5.19%, 5.69%, 6.19% y 6.69%. Asimismo, se realizaron 3 muestras por cada contenido de asfalto, con el fin de sacar el promedio de los diferentes resultados por cada porcentaje de cemento asfáltico.



Figura V-49. Fabricación de muestras mediante la metodología Marshall

Fuente: Propia

Una vez teniendo las muestras desmoldadas, se procede a tomar sus medidas de diámetro y altura, así como su peso seco, sumergido y superficialmente seco, para posteriormente, colocarlas en baño maría por 30 minutos. Seguidamente, se coloca cada una de las muestras en la prensa Marshall y se evalúa las propiedades de estabilidad y flujo. Dicho procedimiento se presenta mediante fotografías en la *figura V-50. Volumetría y acondicionamiento de muestras.*



Figura V-50. Volumetría y acondicionamiento de muestras
Fuente: Propia

Una vez realizada la totalidad de las pruebas que comprende esta metodología, se recopila toda la información, y con ayuda de la herramienta de Excel, se procede a calcular los datos necesarios para el análisis de resultados, así como las gráficas respectivas.

Primeramente, se analiza el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, (Ver figura V-51. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto de referencia)) en donde se puede determinar que a mayor contenido de asfalto estos vacíos disminuyen y a menor contenido de cemento asfáltico el valor aumenta, sin embargo, según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 “Calidad de mezclas asfálticas para carreteras”, la cantidad de vacíos en la mezcla asfáltica debe estar entre 3.0% a 5.0%, por lo anterior, se logra evidenciar dos porcentaje de asfalto que se encuentran dentro de este rango, para este caso es de 5.69% y 6.19%. Por lo tanto, es necesario analizar los demás resultados para definir cuál de estos dos valores de cemento asfáltico es el óptimo para la mezcla asfáltica.

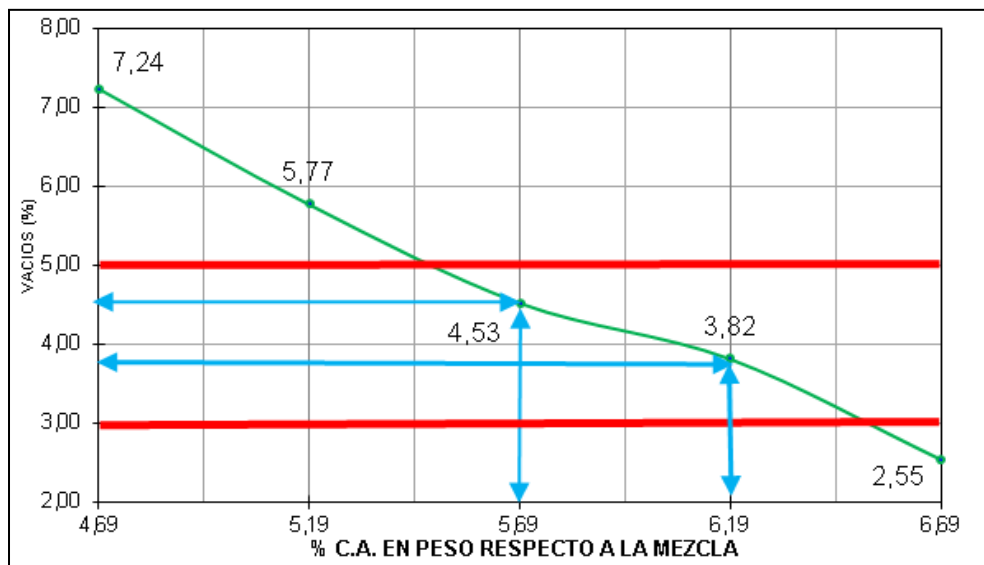


Figura V-51. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto de referencia)
Fuente: Propia

Seguidamente, se analiza la estabilidad de la mezcla asfáltica, (Ver figura V-52. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto de referencia)), según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes se requiere una estabilidad mínima de 1800 lbf (816.47 kgf), para este caso, con un porcentaje de cemento asfáltico de 5.69% alcanzo una estabilidad de 2194 kgf, lo cual fue la mayor carga de resistencia máxima obtenida durante una tasa constante de deformación.

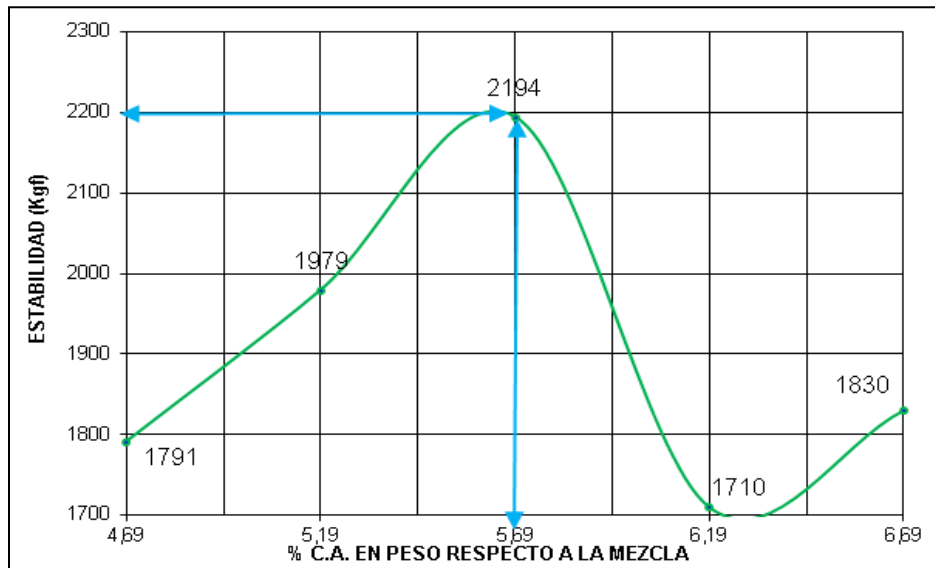


Figura V-52. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto de referencia)

Fuente: Propia

Asimismo, se complementa lo anterior, con los resultados del flujo, (Ver figura V-53. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto de referencia)), en donde nos indica una medida de deformación de la muestra determinada durante la prueba de estabilidad. Según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes, se requiere un flujo entre 2 mm a 3.5 mm, por lo anterior, para un porcentaje de cemento asfáltico de 5.96%, se tiene un valor de 3.48 mm de deformación, lo cual cumple dentro del rango estipulado. Para un porcentaje de cemento asfáltico de 6.19% el valor del flujo es de 3.64%, lo cual no cumple con lo requerido por la normativa.

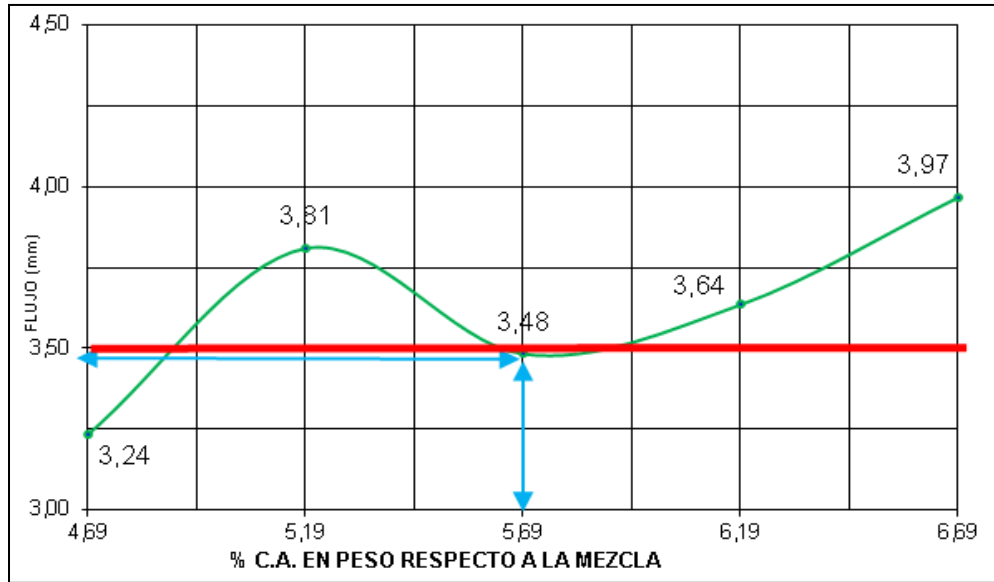


Figura V-53. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto de referencia)

Fuente: Propia

Con respecto a los vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VAF), de acuerdo con lo requerido por la normativa *N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras"*, para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes se tiene un rango de 65% a 75%; para este caso, con un contenido de cemento asfáltico de 5.69% el valor del VAF corresponde a 74.14% lo cual está dentro del rango estipulado por la normativa. (Ver figura V-54. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto de referencia))

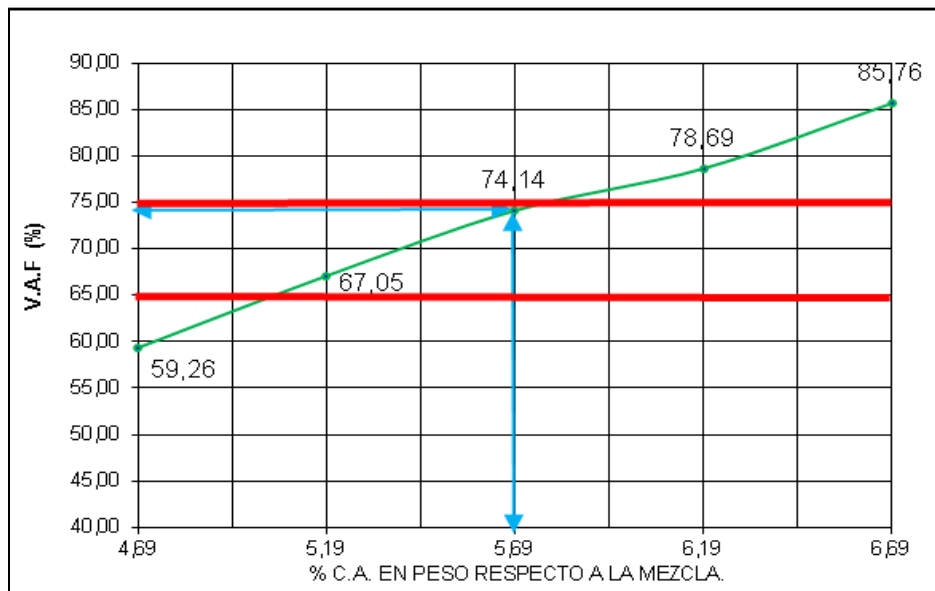


Figura V-54. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto de referencia)

Fuente: Propia

Del mismo modo, se deben analizar los vacíos en el agregado mineral (VAM), de acuerdo con lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", el porcentaje mínimo para una granulometría con un tamaño nominal de ¾" (19 mm) es de 12 % para mezclas asfálticas con vacíos de aire correspondientes al 3%; 13% para mezclas asfálticas con vacíos de aire correspondientes al 4%; y 14% para mezclas con vacíos de 5%; si bien, en este caso, para aun porcentaje de cemento asfáltico de 5.69% se tiene un valor de 17.48% de VAM, lo cual cumple con los valores mínimos requeridos por la normativa. (Ver figura V-55. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto de referencia))

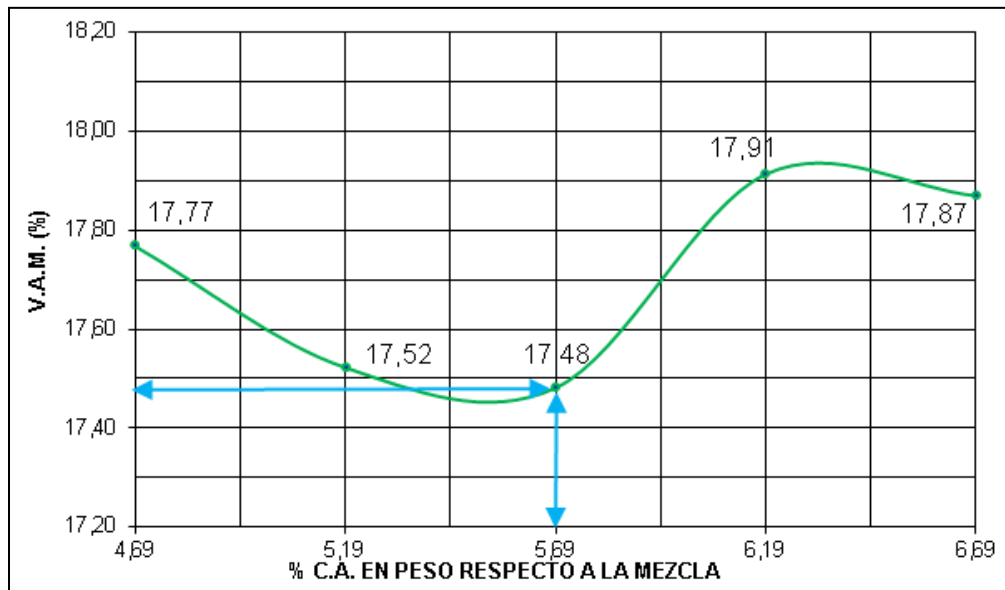


Figura V-55. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto de referencia)

Fuente: Propia

Por lo anterior, se puede concluir que, el porcentaje óptimo de cemento asfáltico es de 5.69%, debido a que, de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, se encuentran dentro de los rangos estipulados por la normativa, es decir que la mezcla asfáltica densa en caliente diseñada cumple para ser usada en tramos carreteros con una intensidad de tránsito de un millón a diez millones de ejes equivalentes. En la tabla V-36. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica de referencia), se presenta un resumen de los resultados obtenidos teniendo en cuenta el porcentaje de asfalto seleccionado.

Tabla V-36. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica de referencia)

| CARACTERISTICAS | RESULTADO | ESP. SICT 1 millón a 10 millones |
|-------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Cont. Óptimo de C.A. R.M. (%) | 5,69 | ÓPTIMO ± 0,30 % |
| Peso Específico (Kg/m³) | 2.343 | - |
| Vacíos (%) | 4,53 | 3 - 5 |
| V.A.M. (%) | 17,48 | 14 MÍN. |
| V.F.A. (%) | 74,14 | De 65 a 75 |

| CARACTERISTICAS | RESULTADO | ESP. SICT 1 millón a 10 millones |
|-------------------|-----------|----------------------------------|
| Estabilidad (Kgf) | 2194 | 816 kgf MÍN |
| Flujo (mm) | 3,48 | 2,00 -3,50 |

Fuente: Propia

5.4.2. Mezcla asfáltica con síntesis química producto de las colillas de cigarrillo (2.0%)

El proceso de fabricación de las muestras para la mezcla asfáltica con síntesis, es el mismo procedimiento que para la mezcla asfáltica de referencia, solo que, para este caso, se hace uso del cemento asfáltico con síntesis al 2.0% producto de las colillas de cigarrillo.

Por lo anterior, se inicia analizando el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, (Ver figura V-56. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto con síntesis)), en donde se puede determinar que a mayor contenido de asfalto estos vacíos disminuyen y a menor contenido de cemento asfáltico el valor aumenta, sin embargo, según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", la cantidad de vacíos en la mezcla asfáltica debe estar entre 3.0% a 5.0%, por lo anterior, se logra evidenciar que para un contenido de cemento asfáltico de 5.69% hay 4.3% de vacíos, lo cual cumple dentro de los rangos establecidos.

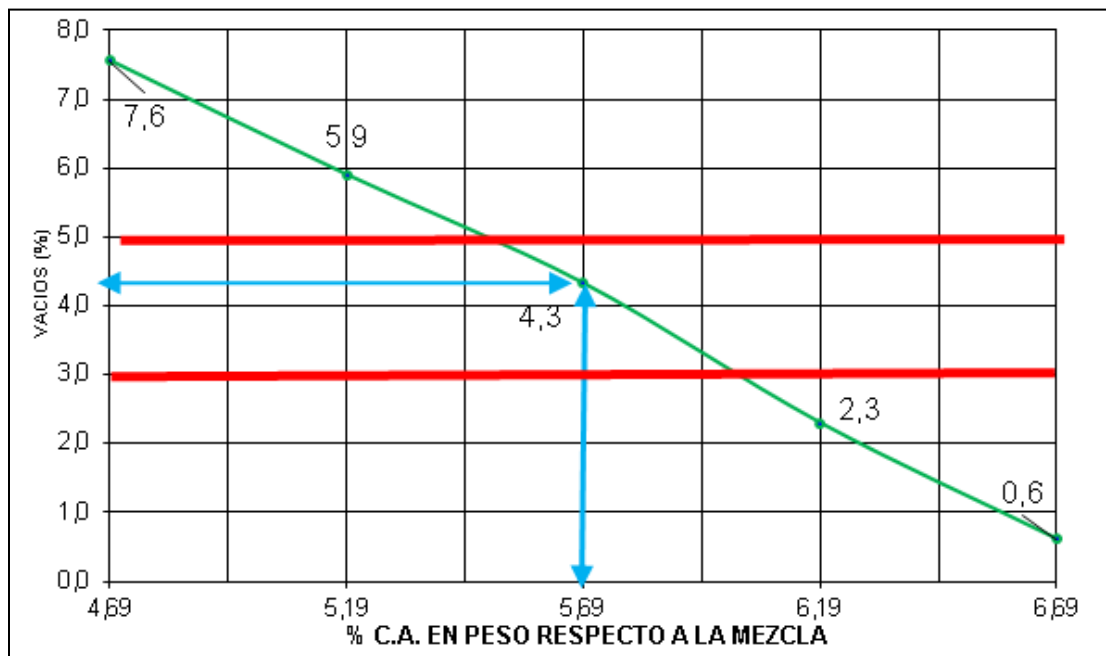


Figura V-56. % Cemento asfáltico vs %Vacíos (Asfalto con síntesis)

Fuente: Propia

Seguidamente, se analiza la estabilidad de la mezcla asfáltica, según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes se requiere una

estabilidad mínima de 1800 lbf (816.47 kgf), para este caso, con un porcentaje de cemento asfáltico de 5.69% alcanzo una estabilidad de 2083 kgf, lo cual fue la mayor carga de resistencia máxima obtenida durante una tasa constante de deformación. (Ver figura V-57. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto con síntesis))

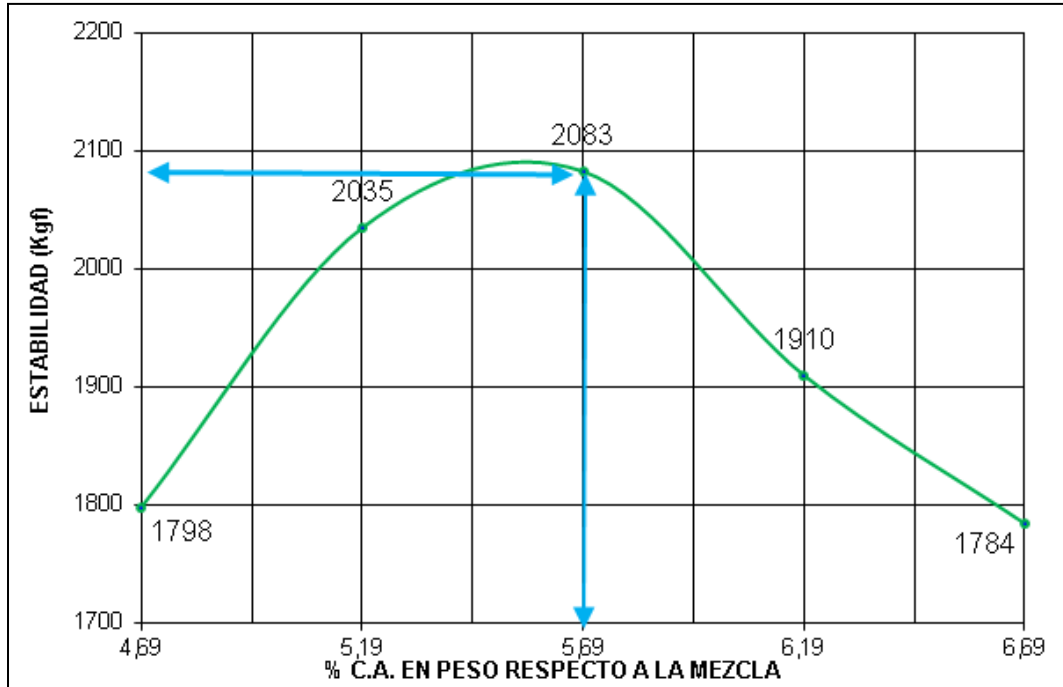


Figura V-57. % Cemento asfáltico vs Estabilidad (Asfalto con síntesis)

Fuente: Propia

Asimismo, se complementa lo anterior, con los resultados del flujo (Ver figura V-58. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto con síntesis)). Según lo requerido por la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes, se requiere un flujo entre 2 mm a 3.5 mm, por lo anterior, para un porcentaje de cemento asfáltico de 5.96% se tiene un valor de 3.12 mm de deformación, lo cual cumple dentro del rango estipulado.

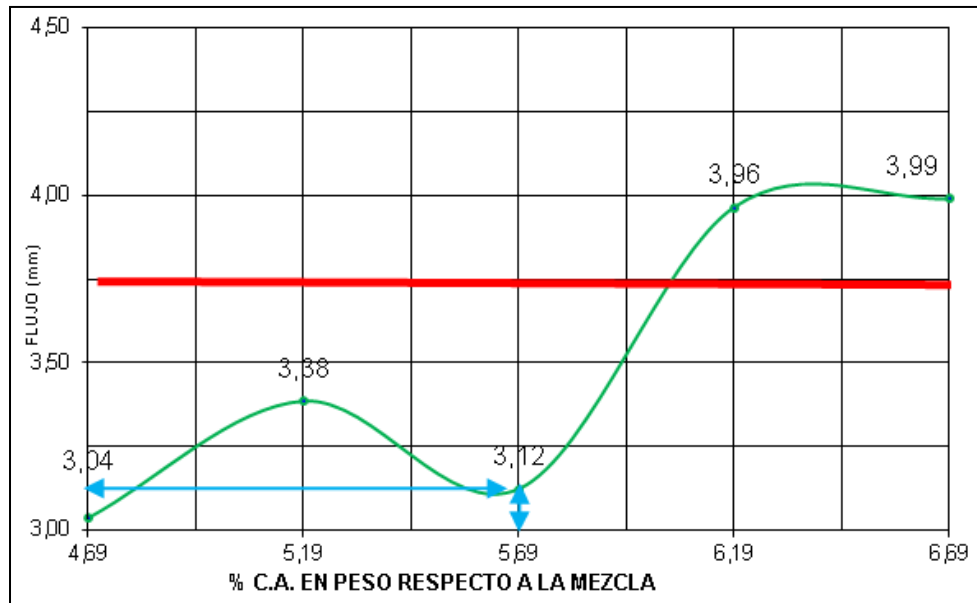


Figura V-58. % Cemento asfáltico vs Flujo (mm) (Asfalto con síntesis)

Fuente: Propia

Con respecto a los vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VAF), de acuerdo con lo requerido por la normativa *N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras"*, para una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes se tiene un rango de 65% a 75%; para este caso, con un contenido de cemento asfáltico de 5.69% el valor del VAF corresponde a 74.9% lo cual está dentro del rango estipulado por la normativa. (Ver figura V-59. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto con síntesis))

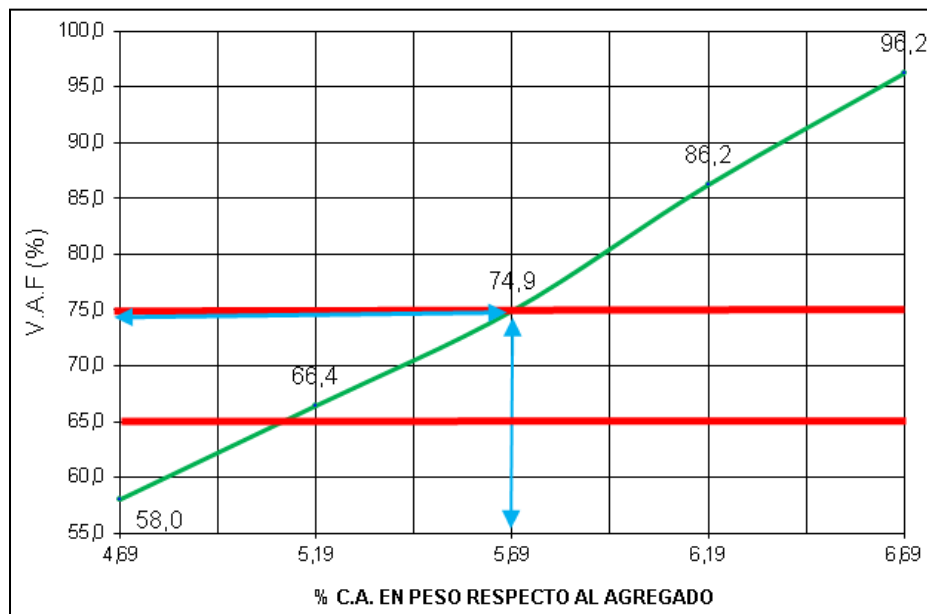


Figura V-59. % Cemento asfáltico vs %VAF (Asfalto con síntesis)

Fuente: Propia

Del mismo modo, se deben analizar los vacíos en el agregado mineral (VAM), (Ver figura V-60. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto con síntesis)), de acuerdo con la normativa N-CMT-4-05-003/16 "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras" el porcentaje mínimo para una granulometría con un tamaño nominal de ¾" (19 mm) es de 12 % para mezclas asfálticas con vacíos de aire correspondientes al 3%; 13% para mezclas asfálticas con vacíos de aire correspondientes al 4%; y 14% para mezclas con vacíos de 5%; si bien, en este caso, para aun porcentaje de cemento asfáltico de 5.69% se tiene un valor de 17.2% de VAM, lo cual cumple con los valores mínimos requeridos por la normativa.

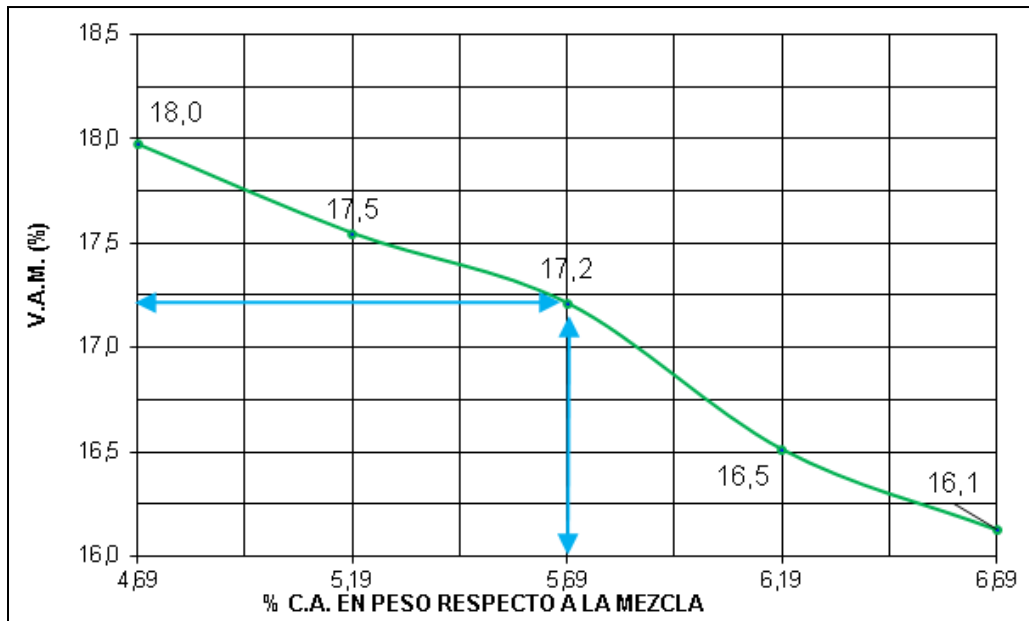


Figura V-60. % Cemento asfáltico vs %VAM (Asfalto con síntesis)

Fuente: Propia

Por lo anterior, se puede concluir que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico con síntesis es de 5.69%, debido a que, de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, se encuentran dentro de los rangos estipulados por la normativa, es decir que la mezcla asfáltica densa en caliente con síntesis, cumple para ser usada en tramos carreteros con una intensidad de tránsito de un millón a diez millones de ejes equivalentes. En la *tabla V-37. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica con síntesis)*, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico seleccionado.

Tabla V-37. Resumen de resultados método Marshall (Mezcla asfáltica con síntesis)

| CARACTERISTICAS | RESULTADO | ESP. SICT 1 millón a 10 millones |
|-------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Cont. Óptimo de C.A. R.M. (%) | 5,69 | ÓPTIMO ± 0,30 % |
| Peso Específico (Kg/m³) | 2.331 | - |
| Vació (%) | 4,32 | 3 - 5 |
| V.A.M. (%) | 17,21 | 14 MÍN. |

| CARACTERISTICAS | RESULTADO | ESP. SICT 1 millón a 10 millones |
|-------------------|-----------|----------------------------------|
| V.F.A. (%) | 74,91 | De 65 a 75 |
| Estabilidad (kgf) | 2083 | 816 Kgf MÍN |
| Flujo (mm) | 3,12 | 2,00 -3,50 |

Fuente: Propia

5.4.3. Comparación de resultados (Mezcla asfáltica de referencia vs con síntesis)

De los resultados anteriores, se procede a realizar una comparativa de estos, teniendo en cuenta la mezcla asfáltica de referencia y la mezcla asfáltica con síntesis, lo anterior con el fin de encontrar alguna mejora en las propiedades mecánicas.

En la *figura V-61. Comparación de la volumetría (%)*, se presenta una gráfica comparativa de la volumetría de la mezcla asfáltica de referencia y la que contiene síntesis química. Primeramente es de aclarar que, para ambas mezclas se obtuvo como contenido óptimo del cemento asfáltico de 5.69%, del mismo modo, la cantidad de vacíos de aire en la mezcla, se obtuvo un valor de 4.32% (Mezcla asfáltica con síntesis) y 4.53% (Mezcla asfáltica de referencia), los vacíos de aire son espacios pequeños de aire que están presentes entre los agregados, revestidos en la mezcla compactada con el fin de permitir alguna compactación adicional generadas por el tráfico; entre menor se la cantidad de vacíos de aire, la mezcla asfáltica va a tener menor permeabilidad y puede ocasionar la exudación, por otro lado, a un contenido alto de vacíos de aire en la mezcla asfáltica ocasiona deterioros por el agua y aire.

Por otro lado, el VAM son los vacíos que existe de aire y los que están llenos de asfalto, es decir que, representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto; cuando sea mayor más espacio habrá disponible, en cuanto sea la película de asfalto más gruesa más durable será la mezcla asfáltica, sin embargo si es muy gruesa perdería fricción entre partículas; para este caso, la cantidad de vacíos del agregado mineral (VAM) de 17.21% (Mezcla asfáltica con síntesis) y 17.48% (Mezcla asfáltica de referencia), y los vacíos ocupados por el cemento asfáltico (VAF) se determinó un valor de 74.91% (Mezcla asfáltica con síntesis) y 74.14% (Mezcla asfáltica de referencia), lo anterior indica que al hacer uso del cemento asfáltico con la síntesis química producto de las colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica densa en caliente, mantiene la cantidad optima de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica, así como sus características volumétricas debido a que los resultados obtenidos son muy similares entre sí.

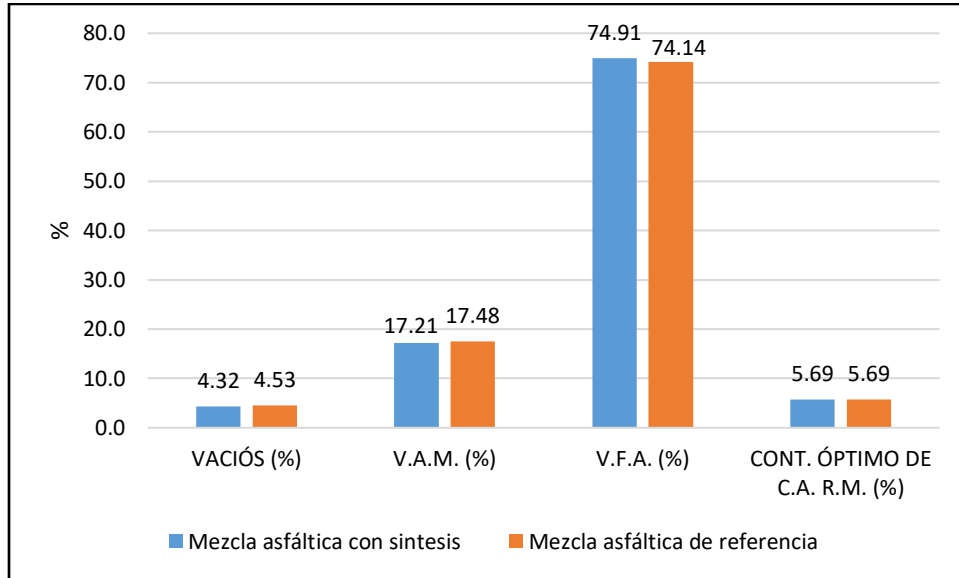


Figura V-61. Comparación de la volumetría (%)

Fuente: Propia

Complementando lo anterior, en la *figura V-62. Comparación de la estabilidad (kgf)*, se tiene los resultados de la estabilidad, la cual hace referencia a la carga máxima soportada por la mezcla asfáltica; para este caso, se tiene una estabilidad de 2083.15 kgf (Mezcla asfáltica con síntesis) y 2193.99 kgf (Mezcla asfáltica de referencia), de lo anterior se puede evidenciar que, la estabilidad en la mezcla asfáltica con síntesis es menor con respecto a la estabilidad de la mezcla de referencia.

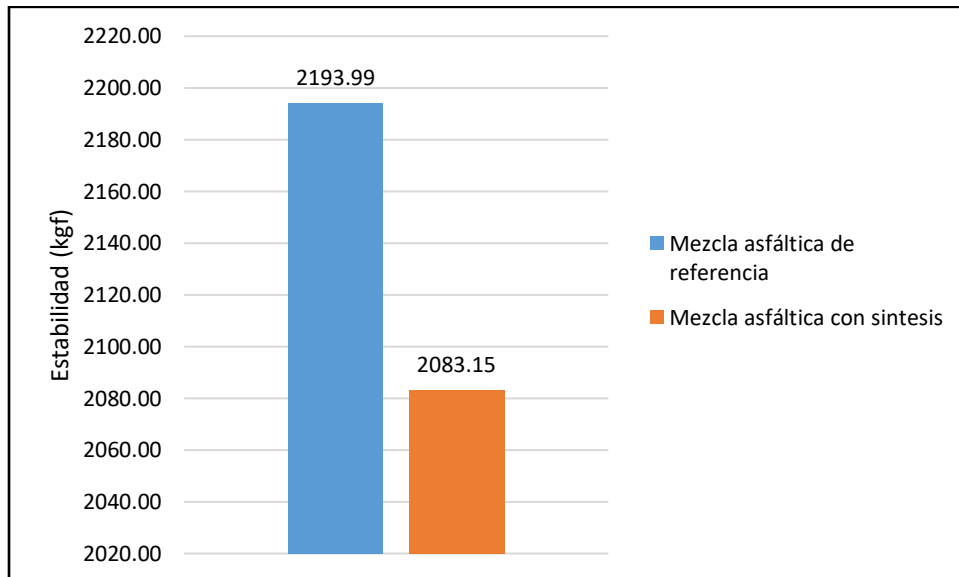


Figura V-62. Comparación de la estabilidad (kgf)

Fuente: Propia

Cabe mencionar que, para corroborar si esta diferencia entre estabilidades es significativa o no, se hace uso de lo descrito en la normativa *ASTM D6927-15 Standard*

Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures [ASTM D6927-15, 2015], apartado 9 correspondiente a la precisión entre los resultados obtenidos; debido a que si bien se ha demostrado una similitud en las características volumétricas de la mezcla asfáltica, se esperaría que la diferencia entre los valores de la estabilidad se comportaran de la misma manera.

Según lo mencionado en la norma ASTM D6927-15; los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la prueba de estabilidad Marshall obtenidos por este método de prueba se dan en la *figura V-63. Criterios de aceptabilidad para la prueba de estabilidad.*

| Test and Type of Index | Coefficient of Variation (% of mean) ^A | Acceptable Range of Two Results (% of mean) ^A |
|------------------------------|---|--|
| Within-Laboratory Precision | 6 | 16 |
| Between-Laboratory Precision | 16 | 43 |

Figura V-63. Criterios de aceptabilidad para la prueba de estabilidad
Fuente: ASTM D6927-15, 2015, **Edición:** Propia

Para este caso, se hace uso del parámetro correspondiente al rango aceptable entre dos resultados (D2S) el cual corresponde al 16% para la precisión dentro del mismo laboratorio y del 43% cuando es entre laboratorios, debido a que en este caso se realizaron los ensayos dentro del mismo laboratorio, usando los mismos equipos y bajo condiciones similares, se usa el valor correspondiente al 16%. Adicional a lo anterior, se debe de tener en cuenta que, la diferencia entre estos dos resultados es de 110.84 kgf (*Ver ecuación V-3*); por lo tanto, es necesario determinar el valor de D2S el cual nos indicara si la diferencia entre los resultados (\neq) no es significativa (Resultados menor al D2S) o es significativa (Resultado mayor al D2S).

$$\neq \text{Estabilidad} = 2193.99 \text{ kgf} - 2083.15 \text{ kgf} = 110.84 \text{ kg} \quad (\text{V-3})$$

Para este caso, el valor proporcionado por la norma ASTM D6927-15 está en unidades de porcentaje, por lo anterior, es necesario multiplicar el 16% por la media de los datos, en donde se obtiene como resultado que, la diferencia permitida entre los resultados para que estos no se considere una diferencia significativa es de 342.1712 kgf (*V-4*); por lo tanto, la diferencia obtenida entre los resultados de la estabilidad es de 110.84 kgf, es decir que dicha diferencia no es significativa. (*Ver ecuación V-5*)

$$D2S = D2S\% * \bar{x} \quad (\text{V-4})$$

$$D2S = 16\% * \frac{2193.99 + 2083.15}{2} = 342.1712 \text{ kgf}$$

$$\neq \text{Estabilidad} \leq D2S \quad (\text{V-5})$$

$$110.84 \text{ kgf} \leq 342.1712 \text{ kgf}$$

Por lo anterior se determina que, el uso del cemento asfáltico con una síntesis química producto de las colillas de cigarrillo no afecta a la estabilidad de la mezcla asfáltica. Del mismo modo, es necesario analizar los resultados del flujo en la mezcla asfáltica ya que nos indica la deformación de la mezcla al llegar a su máxima carga.

De los resultados del flujo, se tiene un valor de 3.48 mm (Mezcla asfáltica de referencia) y 3.12 mm (Mezcla asfáltica con síntesis), (Ver figura V-64. Comparación de flujo (mm)), si bien el menor flujo corresponde a la mezcla con síntesis, es decir que hubo menor deformación, sin embargo, es de recalcar que, también hubo una menor estabilidad por lo que podría justificar este menor valor de flujo que al de referencia.

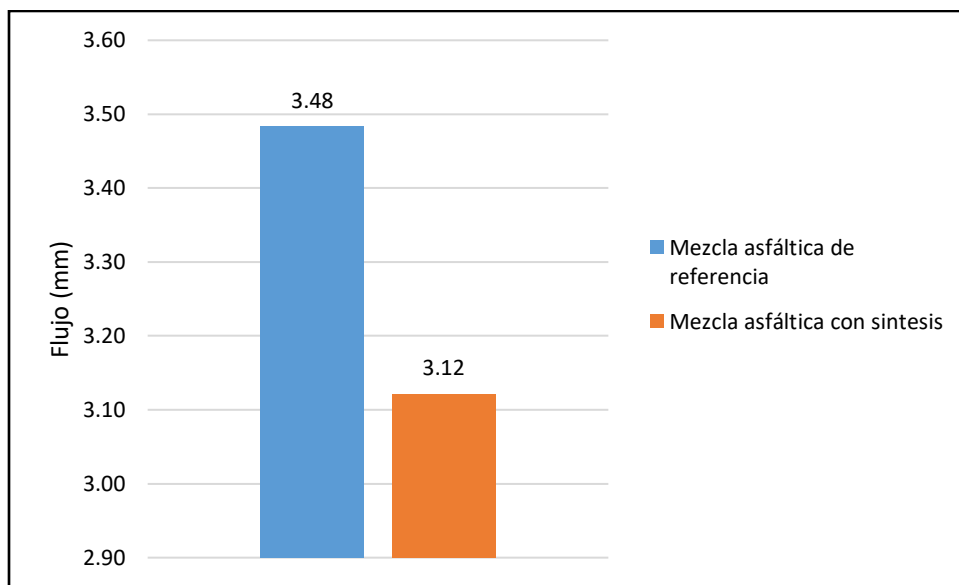


Figura V-64. Comparación de flujo (mm)

Fuente: Propia

Sin embargo, para corroborar si esta diferencia entre los resultados del flujo es significativa o no, se hace uso de lo descrito en la normativa *ASTM D6927-15 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures* [ASTM D6927-15, 2015], apartado 9 correspondiente a la precisión entre los resultados obtenidos; debido a que si bien, se ha demostrado una similitud en las características volumétricas así como en la estabilidad de la mezcla asfáltica, se esperaría que la diferencia entre los resultados del flujo no fuese significativa.

Según lo mencionado en la norma ASTM D6927-15; los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la prueba de flujo Marshall obtenidos por este método de prueba, se dan en la *figura V-65. Criterios de aceptabilidad para la prueba de flujo*.

| Test and Type of Index | Coefficient of Variation (% of mean) ^A | Acceptable Range of Two Results (% of mean) ^A |
|------------------------------|---|--|
| Within-Laboratory Precision | 9 | 26 |
| Between-Laboratory Precision | 20 | 58 |

Figura V-65. Criterios de aceptabilidad para la prueba de flujo
Fuente: ASTM D6927-15, **Edición:** Propia

Para este caso, se hace uso del parámetro correspondiente al rango aceptable entre dos resultados (D2S) el cual corresponde al 26% para la precisión dentro del mismo laboratorio y del 58% cuando es entre laboratorios, debido a que en este caso se realizaron los ensayos dentro del mismo laboratorio, usando los mismos equipos y bajo condiciones similares se usa el valor correspondiente al 26%.

Adicional a lo anterior, se debe de tener en cuenta que, la diferencia entre estos dos resultados es de 0.36 mm (*Ver ecuación V-6*); por lo tanto, es necesario determinar el valor de D2S, el cual nos indicara si la diferencia entre los resultados (\neq) no es significativa (Resultados menor al D2S) o es significativa (Resultado mayor al D2S).

$$\neq \text{Flujo} = 3.48 \text{ mm} - 3.12 \text{ mm} = 0.36 \text{ mm} \quad (\text{V-6})$$

Para este caso, el valor proporcionado por la norma ASTM D6927-15 está en unidades de porcentaje por lo anterior es necesario multiplicar el 26% por la media de los datos, en donde se obtiene como resultado que, la diferencia permitida entre los resultados para que estos no se considere una diferencia significativa es de 0.858 mm (*Ver ecuación V-7*); por lo tanto, la diferencia obtenida entre los resultados de la estabilidad es de 0.36 mm, es decir que dicha diferencia no es significativa. (*Ver ecuación V-8*)

$$D2S = D2S\% * \bar{x} \quad (\text{V-7})$$

$$D2S = 26\% * \frac{3.48 + 3.12}{2} = 0.858 \text{ mm}$$

$$\neq \text{Flujo} \leq D2S \quad (\text{V-8})$$

$$0.36 \text{ mm} \leq 0.858 \text{ mm}$$

Por lo anterior se puede concluir que, el uso del cemento asfáltico con una síntesis química producto de las colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica, no afecta la estabilidad y deformación de la misma, es decir, que mantiene sus propiedades mecánicas. Así mismo, la mezcla asfáltica con síntesis cumple con los requisitos de calidad de una mezcla asfáltica de granulometría densa, diseñada mediante el método Marshall para una cantidad de numero de ejes equivalente de diseño entre un millón a diez millones, correspondiente a la máxima intensidad de transito permitida bajo esta metodología.

CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el objetivo general de esta investigación, se puede concluir que, es posible realizar una mezcla asfáltica conservando sus propiedades mecánicas, mediante la incorporación de colillas de cigarrillo en el cemento asfáltico; así mismo, dar un segundo uso a un material no aprovechable en el ámbito de los pavimentos flexibles.

Con respecto al primer objetivo específico planteado en esta investigación, el cual busca la disolución de las colillas de cigarrillo con el fin de desarrollar diferentes alternativas de estas, para su incorporación en las mezclas asfálticas, se puede concluir que, mediante un diseño de experimentos se logró realizar una síntesis química con el fin de diluir las colillas de cigarrillo con sustancias químicas (etanol y ácido acético) dando como resultado un fluido viscoso homogéneo de color café; el cual se desarrolló de manera directa, es decir que, no se efectuó la limpieza química de colillas de cigarrillo o purificación de estas, con el fin de demostrar el uso de este desecho optimizando tiempo y usos de productos químicos.

Por otro lado, de acuerdo al segundo objetivo específico establecido para el desarrollo de esta investigación, es necesario realizar la caracterización de los agregados pétreos así como del cemento asfáltico mediante la normativa vigente, con el fin de realizar la mezcla asfáltica, de lo anterior, se puede concluir que, se llevó a cabo la caracterización de los agregados pétreos (arena, gavilla y grava) teniendo como referencia la normativa *N CMT 4 04 /17 - Materiales pétreos para mezclas asfálticas* de la Secretaría de infraestructura, comunicaciones y transportes (SICT), dando como resultado que, el agregado pétreo seleccionado y ensayado, cumple con los requisitos de calidad y es adecuado para realizar un diseño de mezcla asfáltica. De igual forma, con respecto al cemento asfáltico de referencia, de acuerdo con los requisitos de calidad solicitados por la *N.CMT.05.004/18 - Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)* de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT) el asfalto corresponde a un asfalto de grado **PG 64 H - 22**.

El tercer objetivo específico de esta investigación, abarca el desarrollo de tres diferentes alternativas (fibras, membranas y síntesis) así como la evaluación experimental de las mismas, para determinar cuál es la más adecuada para su incorporación en las mezclas asfálticas, en donde se puede concluir que, en el desarrollo de esta investigación se llevó a cabo tres diferentes alternativas para la incorporación de las colillas de cigarrillo en la mezcla asfáltica; la primera alternativa es de forma líquida (síntesis química); la segunda son fibras (Método electrohilado), y finalmente la tercera son membranas (Método casting). Las fibras se analizaron mediante los ensayos de microscopio eléctrico de barrido (MEB), y espectroscopia infrarroja. En donde se pudo confirmar la generación de fibras con tamaños correspondientes a $0.25\mu\text{m}$ lo cual equivale a 250 nanómetros. Del mismo modo, se encontró similitud entre el residuo generado en esta investigación con respecto a lo desarrollado en otras investigaciones por diferentes autores, por lo que se puede concluir que, mediante el proceso químico propuesto en este trabajo, se obtiene como material resultante el acetato de celulosa.

Adicional a lo anterior, se analizó experimentalmente el uso de las fibras, membranas y síntesis para su incorporación en una mezcla asfáltica, en ella se determinó que la opción más viable es adicionar la síntesis química en el cemento asfáltico, con el fin de garantizar una distribución uniforme entre estos dos materiales. Sin embargo, para su completa integración en el asfalto, se utilizó ácido fosfórico, el cual es una sustancia química que permite la incorporación y disolución de los polímeros en el cemento asfáltico, por lo tanto, se adiciono la mínima cantidad de este componente, logando así, integrar completamente la síntesis química producto de las colillas de cigarrillo en el asfalto.

Así mismo, realizada la caracterización del cemento asfáltico con síntesis se puede concluir inicialmente que, la síntesis química adicionada no actúa como un modificador en los asfaltos, ya que mantiene en el mismo grado PG, por lo tanto, la síntesis química funciona como un material de aditivo para mejorar las propiedades del cemento asfáltico, un ejemplo de ello, es el uso del asfalto para mayores intensidades de tráfico. Adicional a lo anterior, se puede concluir que, una de las pruebas fundamentales para determinar el porcentaje de adición de síntesis química en el cemento asfáltico, fue la pérdida de masa mediante el envejecimiento a corto plazo (RTFO), debido a que a mayor cantidad de síntesis química se genera mayor pérdida de masa. Por lo anterior, mediante la ecuación de la recta se determina que con una adición del **2.0%** con respecto al peso del asfalto es la cantidad máxima que se puede agregar de síntesis química para que este tipo de cemento asfáltico cumpla con todos los requisitos de la normativa, obteniendo como resultado una clasificación **PG 64 V – 22**. Por último, se determina que el cemento asfáltico con síntesis al 2.0% por la síntesis química producto de las colillas de cigarrillo, mejora el comportamiento, así como las propiedades reológicas de un cemento asfáltico convencional.

Finalmente, teniendo en cuenta el último objetivo planteado en esta investigación, el cual tiene como propósito, evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas (con colillas y de referencia) mediante la metodología Marshall, para así poder analizar los resultados obtenidos, con el fin de evidenciar mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla con colillas de cigarrillo, se pudo determinar que, de acuerdo a la evaluación y análisis de resultados de una mezcla asfáltica de referencia, así como la del cemento asfáltico con la adición del 2.0% de síntesis química producto de las colillas de cigarrillo mediante la metodología Marshall, se concluye que, el uso del cemento asfáltico con síntesis en una mezcla asfáltica, no afecta la estabilidad y deformación de la misma. Es decir, que mantiene sus propiedades mecánicas. Así mismo, esta mezcla asfáltica cumple las características correspondientes a una mezcla asfáltica densa en caliente para ser utilizada en vías con una intensidad de tránsito entre un millón a diez millones de ejes equivalentes.

6.1. Trabajos futuros

Como trabajo futuro se recomienda incorporar las colillas de cigarrillo (síntesis química) en diferentes tipos de cemento asfáltico con el fin de evaluar y analizar su comportamiento, así como determinar su porcentaje máximo de adición.

Del mismo modo, como continuidad a este trabajo, se recomienda evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica utilizando cemento asfáltico con las colillas de cigarrillo mediante la metodología de alto desempeño, así como un análisis de costo sobre la implementación de las colillas de cigarrillo en las mezclas asfálticas.

REFERENCIAS

[AMAAC,2010] AMAAC, Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., Recomendación AMAAC RA 08/2010: desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas

[AMANCO WAVIN ,2022] Amanco Wavin, Geo sintéticos, Geo malla Fibra de Vidrio, 2022, Disponible en: <https://amancowavingeosinteticos.com/geomalla-fibra-de-vidrio/>

[ARROYO et al, 2020], Arroyo F. Delgado; Castro-Guerrero, C. F.; León-Silva, U. Thin films of cellulose acetate nanofibers from cigarette butt waste. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 2020, vol. 36, no 1, p. 3-17.

[ASOPAC, 2004] ASOPAC, Cartilla Del Pavimento Asfáltico. Disponible en: <https://vdocuments.mx/cartilla-del-pavimento-asfaltico-asopac.html>

[ASPHALT BINDER TESTING MANUAL, 2014], MS-25 asphalt binder testing manual. Technician's Manual for Specification Testing of Asphalt Binders. Third Edition. ISBN: 9781934154649, abril 2014.

[ASPHALT INSTITUTO,2001], Asphalt Instituto, principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. No. 22 (MS-22).

[ASTM C 29/C 29M – 97,1997]. Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente ("peso unitario") e Índice de Huecos en los Árido, 1997.

[ASTM D70-18,2018], ASTM D70-18. Método estándar para determinar la densidad de materiales bituminoso semi-solidos (Método del picnómetro), 2018.

[ASTM D6927-15, 2015] Standard test method for Marshall Stability and flow of asphalt mixtures. Disponible es: <https://www.astm.org/d6927-15.html>

[AYUNTAMIENTO DE HUELVA, 2018] Ayuntamiento de Huelva; Especialidades ambiente contaminantes; 2018; disponible en: <http://www.lineaverdehuelva.com/lv/consejos-ambientales/contaminantes/Que-es-la-contaminacion-ambiental.asp7>

[BRUKER.COM, 2023] Bruker.com, Espectroscopia Infrarroja, 2023. Disponible en: <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>

[BUTT OUT, 2023] BUTT OUT Australia, recolección de colillas de cigarrillo, 2023. Disponible en: <https://buttoutaustralia.com.au/>

[CAJAMARCA, 2021] Cajamarca Marín, Cristian Alexis. Obtención del acetato de celulosa a partir de colillas de cigarrillos. trabajo de grado. 2021

[CRESPO, 2020] Crespo C, National Geographic, Las colillas permanecen durante doce años en la naturaleza, 2020, Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/07/las-colillas-permanecen-durante-doce-anos-en-la-naturaleza>

[CIRTEC, 2021] Cirtec, Circular Economy on the Road, Madrid España, 2021; disponible en: <https://cirtec.es/rarx-aditivo-con-polvo-de-neumatico/>

[CUI et al, 2018] Cui, Y., Wu, Z. R., Li, Y., & Yang, H. (2018). Experimental study on determining the optimum cigarette butt content of modified bituminous mixture of cigarette butts. Journal of Civil Engineering and Architecture, 12, 447-453.

[ECO FILTER, 2023] ECO FILTER, Recicladora especializada en acetato de celulosa, 2023. Empresa de biotecnología, México, disponible en: <https://parabienoparamal.com/>

[GOBIERNO DE MÉXICO, 2019] Gobierno de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Colillas, enemigas del ambiente, 2019. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/colillas-enemigas-del-ambiente>

[HUERTA et al, 2023] Huerta, A., Wong, G., Ramos, M., Arevalo, L. H., & Katiushka, N. Estudio de las propiedades y biodegradabilidad de plásticos (CAST-FIMLS) elaborados a partir de cascara de naranja, pectina y alcohol polivinilico (PVOH), 2023. Disponible en: https://smbb.mx/congresos%20smbb/veracruz01/TRABAJOS/AREA_IV/CIV-14.pdf

[IMEKO, 2017] IMEKO, soluciones sustentables para las colillas de cigarro. 2017. Disponible en: <https://imeko.cl/>

[IMT, 1998], Instituto Mexicano del Transporte, Pavimentos Flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Publicación Técnica No. 104, ISSN 0188-7297. Sanfandila, Qro (1998) p. 96

[IMT, 2000] Instituto Mexicano del Transporte, Punto de Inflamación Cleveland en cementos asfáltico s. M-MMP-4-05-007-00. LIBRO: MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-007-00.pdf>

[IMT, 2002] Instituto Mexicano del Transporte. Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas, M. LIBRO: MMP. métodos de muestreo y prueba de materiales. M-MMP-4-04-002-02. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-002-02.pdf>

[IMT, 2002], Instituto Mexicano del Transporte, Módulo reológico de corte dinámico. M-MMP-4-05-025-02 LIBRO: MMP. métodos de muestreo y prueba de materiales 2002. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-025-02.pdf>

[IMT, 2016] Instituto Mexicano del Transporte, Calidad de mezcla asfáltica para carreteras, N-CMT-4-05-003-16. LIBRO: CMT. Características de los materiales. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/n-cmt-4-05-003-16.pdf>

[IMT, 2018], Instituto Mexicano del Transporte, Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG). N-CMT-4-05-004-18. LIBRO: CMT. características de los materiales. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-004-18.pdf>

[IMT, 2019] Instituto Mexicano del Transporte, Asfálticas, A. P. Manual de ensayos para laboratorio. ISSN 0188-7297. Publicación Técnica No. 551, Sanfandila Qro, 2019. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>

[IMT,2022] Instituto Mexicano del Transporte, Envejecimiento del cemento asfáltico en horno rotatorio de película delgada (RTFO). M-MMP-4-05-027-22. LIBRO: MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales, 2022. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-027-22.pdf>

[JONES, 2017] Jones Janis, Chief Executive Officer. Ocean Conservancy International Coastal Cleanup (ICC 2017 Report). Disponible en: https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2017/06/International-Coastal-Cleanup_2017-Report.pdf

[JIN et al, 2019] Jin, J., Wu, Z., Song, J., & Liu, X. (2019). Research on the road performance of cigarette butts modified asphalt mixture. Journal of physics. Conference series, 1168, 022053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022053>

[KIKUT et al, 2020] kikut C.K, Baldi A, Elizondo ALS, Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte, Universidad de costa rica, Costa rica, 2020.

[KING, et al, 2002] King G.; BISHARA, Safwat W.; FAGER, Glenn. Acid/base chemistry for asphalt modification (with discussion). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, vol. 71.

[LIU et al, 2021] Liu, Huachen; Chen, Yikun; Xue, Yongjie. Reutilization of recycled cellulose diacetate from discarded cigarette filters in production of stone mastic asphalt mixtures. Frontiers in Materials, 2021, vol. 8, p. 770150.

[MARDONES et al, 2019] Mardones Parra, L., Sánchez Alonso, E., Calabi Floody, A., & Valdés Vidal, G. (2019). Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno. Infraestructura vial, 20(36), 10. <https://doi.org/10.15517/iv.v20i36.37729>

[MANTIS, 2021] Mantis, prendas y accesorios con colillas de cigarrillo purificadas, Disponible en: <http://mantis-mantis.blogspot.com/>

[MARTIN et al, 1962] Martin Rogers J. y Hugh A. Wallace, Pavimentos asfálticos, Proyecto y construcción, Aguilar, Madrid, 1962.

[MOHAJERANI, 2017] Mohajerani Dr. Abbas. Physico mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts. Elsevier Construction and Building Materials. Julio, 2017. vol.153, p.69-80.

[MOHAJERANI, 2022] Mohajerani, A., Kurmus, H., Rahman, M. T., Smith, J. V., Woo, S. S., Jones, D., Dastjerdi, M. G., Pulitano, J., Nguyen, B. T., & Calderón, C. (2022). Bitumen and paraffin wax encapsulated cigarette butts: Physical properties and leachate analysis. International Journal of Pavement Research and Technology, 15(4), 931–947. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00063-9>

[MONZONÍS, 2011] Monzonís Marco, JC. Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización. Universidad Politécnica de Valencia, 2011. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/11025>.

[MOPC, 2019] Ministerio de obras públicas y comunicaciones, identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (catálogo de fallas), departamento de administración y evaluación de pavimentos (2019) Disponible en: <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>

[NCHRP, 2011] Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, & Transportation Research Board. (2011). Special mixture design considerations and methods for warm-mix asphalt: A supplement to NCHRP report 673: A manual for design of hot-mix asphalt with commentary. National Academies Press.

[PEÑA, 2017] Peña González, J. R. (2017). Procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos del cigarrillo. Departamento de Química. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62316>

[RAHMAN et al, 2020] Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (2020). Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. Construction and Building Materials, 261(120530), 120530.

[RAHMAN et al, 2020] Rahman M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. Possible recycling of cigarette butts as fiber modifier in bitumen for asphalt concrete. Materials, 13(3), 734, 2020.

[REDJURISTA, 2002] Redjurista, S. A. S. Decreto 1713 de 2002. Ministerio de Desarrollo Económico - Colombia. Disponible en: https://www.redjurista.com/Documents/decreto_1713_de_2002_ministerio_de_desarrollo_economico.aspx#/

[SALAMANCA et al, 2019] Salamanca, J. C & Silva Ramos, V. (2019). Evaluación del desempeño de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente con adición de colillas de cigarrillo.

[SCAIUMA.ES, 2023] Scaiuma.es, Microscopía Electrónica de Barrido. (s/f). SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN. Recuperado el 26 de julio de 2023, de <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>

[SICT,2000] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Punto de reblandecimiento en cementos asfálticos. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-009-00.pdf>

[SICT,2002] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Desgaste mediante la prueba de los ángulos de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-006-02.pdf>

[SICT,2002] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-001-02.pdf>

[SICT,2002] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Viscosidad rotacional Brookfield de cementos asfálticos. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/m-mmp-4-05-005-02.pdf>

[SICT,2004] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte. Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas. ISO 9001:2000. Sanfandila, Oro: 2004. p.6.

[SICT,2016] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-004-16.pdf>

[SICT,2017] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: CMT. Características de los materiales. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-04-17.pdf>

[SICT,2018] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Densidad relativa y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-003-18.pdf>

[SICT,2022] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte Materiales, Libro: MMP. Métodos De Muestreo y Prueba de Materiales. Envejecimiento acelerado del cemento asfáltico en vasija de envejecimiento a presión (PAV). Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-05-028-22.pdf>

[SUÁREZ, 2013] Suárez, P. (2013, abril 21). Composiciones de asfalto y procedimientos para su preparación. Disponible en: <https://patentados.com/2013/composiciones-de-asfalto.1>

[TERRACYCLE, 2021] Terracycle, Empresa de recolección de colillas de cigarrillo, 2021, Disponible en: <https://www.terracycle.com/en-CA/>