



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**TEMA:**

Incidencia del tipo de filler en las propiedades del mástico asfáltico

**AUTOR(A):**

Alcívar Bastidas, Alfredo Gregorio  
Rosero Monserrate, Víctor Hugo

**Previo a la obtención del Grado Académico de:  
Magíster en Ingeniería de la Construcción**

**Guayaquil, Ecuador  
2025**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por los Ingenieros; **Alcívar Bastidas Alfredo Gregorio**, y **Rosero Monserrate Víctor Hugo**, como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **Magíster en Ingeniería de la Construcción**

**REVISOR(A)**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Mgs.**

**DIRECTOR DEL PROGRAMA**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Rommel Yela Acosta, Mgs.**

**Guayaquil, a los 19 días del mes de junio del año 2025**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Alcívar Bastidas, Alfredo Gregorio y  
Rosero Monserrate, Víctor Hugo**

**DECLARAMOS QUE:**

El trabajo de titulación **Incidencia Del Tipo De Filler En Las Propiedades Del Mástico Asfáltico** para la obtención del **Grado Académico de Magíster en Ingeniería de la Construcción**, ha sido desarrollada en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del ensayo del Grado Académico en mención.

**Guayaquil, a los 19 días del mes de junio del año 2025**

**AUTORES**

f. \_\_\_\_\_ f. \_\_\_\_\_  
**Alcívar Bastidas, Alfredo Gregorio Rosero Monserrate, Víctor Hugo**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**AUTORIZACIÓN**

**Nosotros, Alcívar Bastidas, Alfredo Gregorio y  
Rosero Monserrate, Víctor Hugo**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación previo a la obtención del grado de **Magíster en Ingeniería de la Construcción** titulado: **Incidencia Del Tipo De Filler En Las Propiedades Del Mástico Asfáltico**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 19 días del mes de junio del año 2025**

**AUTORES**

f. \_\_\_\_\_ f. \_\_\_\_\_  
**Alcívar Bastidas, Alfredo Gregorio      Rosero Monserrate, Víctor Hugo**

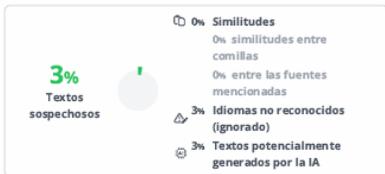


**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**REPORTE COMPILATIO**

 **INFORME DE ANÁLISIS**  
magister

Trabajo Titulación Maestría. Alfredo y Víctor Hugo



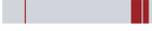
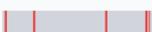
Nombre del documento: Trabajo Titulación Maestría. Alfredo y Víctor Hugo.doc ID del documento: 7bb2f7ab61db5b71cfbfedff12f3472053c1570b Tamaño del documento original: 13,02 MB	Depositante: Rolando Vila Romani Fecha de depósito: 5/5/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 5/5/2025	Número de palabras: 16.632 Número de caracteres: 107.893
---	---	---

Ubicación de las similitudes en el documento:

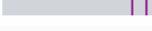
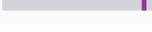
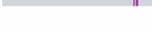


≡ Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 <a href="https://www.doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351">www.doi.org</a> 43 fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (516 palabras)
2	 <a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/Cuidado%20humanizado%20del%20personal%20de%20enfermer%C3%ADa%20del%20área%20de%20enfermer%C3%ADa%20de%20la%20UCSG-C518-23172.pdf">repositorio.ucsg.edu.ec</a>   Cuidado humanizado del personal de enfermería del á... 42 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (284 palabras)
3	 <a href="#">Ensayo de Paulette Fajardo Lucero- Gestión Integral de Tecnología Sa...</a> #49106 El documento proviene de mi grupo 38 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (262 palabras)
4	 <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/331718419/3/7-UCSG-PR-ING-C-432.pdf.txt">localhost</a>   Caracterización del asfalto ecuatoriano recuperado en vías de la Regió... 39 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (266 palabras)
5	 <a href="#">TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 28 NOV (1).docx</a>   TRABAJO DE INVESTIGA... #2a1707 El documento proviene de mi grupo 33 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (257 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 <a href="https://www.doi.org/10.1177/0361198118759064">www.doi.org</a>   Effects of Regular and Nano Sized Hydrated Lime Fillers on Fatigue... https://www.doi.org/10.1177/0361198118759064	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
2	 <a href="#">FRANK LOAYZA RONNY_CARRANZA.docx</a>   FRANK LOAYZA RONNY_CA... #a180aa El documento proviene de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
3	 <a href="https://www.doi.org/10.1080/14680629.2019.1572528">www.doi.org</a>   Laboratory evaluation of the performance of asphalt mixtures con... https://www.doi.org/10.1080/14680629.2019.1572528	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
4	 <a href="https://repositorio.unal.edu.co/">repositorio.unal.edu.co</a>   Evaluación de la influencia de la adición de ceniza del c... https://repositorio.unal.edu.co/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
5	 <a href="https://doi.org/10.1617/s11527-007-9283-4">doi.org</a> https://doi.org/10.1617/s11527-007-9283-4	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (26 palabras)

**Fuente ignorada** Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 Trabajo Titulación Maestría. Alfredo y Víctor Hugo.doc   Trabajo Titul... #a1d824 El documento proviene de mi biblioteca de referencias	100%		Palabras idénticas: 100% (16.632 palabras)

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme concluir esta etapa de estudio. A mis padres por su apoyo infinito y cada consejo que me ayudaron a ser el profesional que soy hoy en día. A mi hermana que es como mi segunda madre, que siempre está presente guiándome y recordándome que en la vida TODO ES POSIBLE. A todos los docentes por brindarme su tiempo y conocimiento durante el aprendizaje de esta maestría, en especial al Dr. Rolando Vila por sus enseñanzas, guías y consejos brindados en este proyecto, gracias a ello se pudo concluir con éxito este trabajo de titulación. A la Ing. María Fernanda Márquez por su ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Alfredo Alcívar

Agradecimiento total primero a Dios por permitirme y ayudarme a concluir con esta etapa de estudio. A mis recordados padres por todos sus consejos, enseñanzas y valores impartidos en vida, los cuales me permitieron convertirme en la persona que soy el día de hoy. A todos los docentes por brindarme su tiempo y conocimiento durante el aprendizaje de esta maestría, en especial al Dr. Rolando Vila por sus enseñanzas, guías y consejos brindados en este proyecto de investigativo, ya que con la impartición de sus conocimientos y experiencia se pudo concluir con éxito la realización de este trabajo.

Víctor Rosero

## DEDICATORIA

A mis padres y hermana que siempre estuvieron presente motivándome para ser mejor persona. A cada una de las personas que durante esta maestría estuvieron presente y hoy ya no están en mi vida, gracias por su apoyo. Este logro me lo dedico y que este sea el momento de agradecerme por el tiempo empleado, los sacrificios realizados y sobre todo valorar lo que en estos momentos estoy logrando.

Alfredo Alcívar

A mis padres donde quiera que se encuentren junto a Dios, estoy muy seguro que este logro los llenará de mucho orgullo, a mis hermanas, amigos y seres queridos que con su ayuda fueron parte de este proceso y me motivaron para que el día de hoy pueda concluir con mucho éxito esta nueva etapa, sin ellos habría sido difícil.

Víctor Rosero

## INDICE

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación e importancia del tema .....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>8</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Control de calidad al filler o relleno mineral .....	8
2.1.1 Norma ASTM D242/D242M .....	8
2.1.2 Norma europea UNE-EN 13043 .....	10
2.2 Manejo de la dosificación de filler en la mezcla asfáltica .....	22
2.2.1 Introducción .....	22
2.2.2 Relación filler-betún .....	22
2.3 Empleo adecuado del filler en el proceso de producción en planta .....	28
2.3.1 Utilizando filler de adición .....	28
2.3.2 Utilizando el filler de recuperación .....	30
2.4 Ensayos de control a los másticos .....	32
2.5 Impacto del filler en la calidad del mástico y de la mezcla asfáltica .....	33
2.5.1 Generalidades .....	33
2.5.2 Resumen de la incidencia de las propiedades del filler .....	34

<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>39</b>
<b>3. TRABAJO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
3.2 Estudio de los fillers seleccionados .....	40
3.2.1 Determinación de la granulometría .....	40
3.2.2 Límites de consistencia .....	42
3.2.3 Prueba de Azul de Metileno.....	43
3.2.4 Ensayo de densidad .....	44
3.2.5 Concentración crítica .....	46
3.2.6 Composición química .....	47
3.3 Estudio del cemento asfáltico empleado.....	48
3.4 Estudio de los másticos preparados con los diferentes fillers .....	48
3.4.1 Preparación de los másticos en el laboratorio .....	48
3.4.2 Pruebas realizadas a los másticos.....	51
3.4.2.1 Prueba de viscosidad.....	53
3.4.2.2 Prueba de gravedad específica.....	57
3.4.2.3 Prueba de penetración .....	58
3.4.2.4 Prueba de punto de ablandamiento (anillo y bola) .....	60
3.4.2.5 Prueba de ductilidad .....	62
3.5 Valoración de la calidad de los fillers y másticos utilizados.....	66
3.5.1 Fillers.....	66
3.5.2 Másticos .....	68
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>73</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>

4.1	Conclusiones.....	73
4.2	Recomendaciones.....	74
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>76</b>
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 1. Equipamiento para granulometría con tamices .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2. Equipamiento para pruebas de plasticidad .....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 3. Equipamiento para prueba de densidad .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 4. Equipo para porosidad Ridgen .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 5. Permeabilímetro de Blaine .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 6. Esquema de equipo de difracción láser para evaluar granulometría.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 7. Resultado de prueba SEM .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 8. Espectrómetro láser .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 9. Mecanismo LIBS para la detección química / elemental .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 10. Esquema de análisis empleando un XRF .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 11. Valores característicos en el análisis dinámico de imágenes ...</b>	<b>21</b>
<b>Figura 12. Ejemplo de composición obtenida por difracción de rayos X. ...</b>	<b>22</b>
<b>Figura 13. Representación del significado de la concentración crítica .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 14. Trabajo con el volumenómetro Le Chatelier .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 15. Probetas graduadas con fillers .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 16. Tolva de filler en una planta discontinua .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 17. Captación de gases más filler en un tambor secador .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 18. Captación de gases más filler en un tambor secador mezclador .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 19. Sistema para transportar fillers recuperados al tambor secador-mezclador .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 20. Fillers empleados en el estudio .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 21. Representación gráfica de las granulometrías de los fillers .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 22. Colocación de bandejas en horno con filler para secado .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 23. Proceso de mezclado realizado .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 24. Viscosidad del mástico M4 sin envejecer a 155°C.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 25. Representación del efecto del filler en la viscosidad .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 26. Variación de la viscosidad en los másticos sin envejecer .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 27. Viscosidades sin y con envejecimiento a 115°C .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 28. Viscosidades sin y con envejecimiento a 135°C .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 29. Viscosidades sin y con envejecimiento a 155°C .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 30. Equipos empleados para determinar la gravedad específica ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 31. Resultados de las pruebas de gravedad específica .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 32. Penetración del mástico M4 sin envejecer .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 33. Resultados de las pruebas de penetración.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 34. Inicio de prueba de punto de ablandamiento Anillo y Bola .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 35. Resultados de las pruebas de punto de ablandamiento .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 36. Prueba de ductilidad en M2 con envejecimiento .....</b>	<b>63</b>

<b>Figura 37. Resultados de las pruebas de ductilidad .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 38. Ensayo de recuperación elástica en el mástico M4 envejecido</b>	<b>65</b>
<b>Figura 39. Resultados de las pruebas de recuperación elástica.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 40. Relación entre el módulo de finura y la concentración crítica ..</b>	<b>67</b>
<b>Figura 40. Relación entre el módulo de finura y la concentración crítica ..</b>	<b>67</b>
<b>Figura 41. Relación viscosidad versus penetración .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 42. Relación viscosidad versus punto de ablandamiento .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 43. Relación penetración versus punto de ablandamiento .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 44. Módulo de finura versus penetración.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 45. Relación recuperación elástica versus ductilidad.....</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 1. Proporciones de filler de aportación a emplear según PG-3 de España.....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla 2. Requisitos granulométricos en ASTM D242/D242M.....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 3. Requisitos granulométricos en UNE-EN 13043 .....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 4. Relación ponderal (*) F/B para mezclas densas (rodadura), intermedia y gruesas para las categorías de tráfico pesado T00 a T2 en España.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 5. Pruebas a los asfaltos de acuerdo a la NTE INEN 2515 .....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 6. Granulometrías de los diferentes fillers.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 7. Módulos de finura calculados .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 8. Resultados de las pruebas de consistencia.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 9. Valor de azul de metileno y el comportamiento de la mezcla asfáltica .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 10. Resultados de las pruebas de azul de metileno .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 11. Resultados de las pruebas de densidad .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 12. Resultados de las pruebas de concentración crítica .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 13. Composición química de los fillers .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 14. Resultados de las pruebas al cemento asfáltico .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 15. Dosificación de másticos.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 16. Resumen de resultados en los másticos ensayados.....</b>	<b>52</b>

## RESUMEN

Los fillers minerales afectan significativamente el comportamiento de la mezcla asfáltica en aspectos relacionados con su rigidez, durabilidad y laborabilidad. Este material, muy estudiado internacionalmente desde hace muchos años, no se le presta atención prácticamente en Ecuador, donde solo se emplean en las plantas fillers recuperados por los colectores de polvo. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es valorar la incidencia de diferentes tipos de fillers, algunos potencialmente de aportación, en la calidad de los másticos preparados con el cemento asfáltico de la Refinería de Esmeraldas, sin y con envejecimiento, mediante pruebas de control rutinarias, para formular recomendaciones sobre su utilización en las mezclas. Se emplearon como fillers: cal, cemento Portland, basalto, pizarra tobácea y arena-limosa, siendo los dos primeros potenciales fillers de adición. En la preparación de los másticos se cumplió siempre con una relación entre la concentración volumétrica y la concentración crítica igual a uno. Como conclusiones se considera que dos propiedades del filler son las que más impactarán en su comportamiento formando parte del mástico: la granulometría (física) y la composición (química). Las granulometrías más finas asociadas a los elevados contenidos de CaO de la cal y el cemento permitieron tener másticos de menor consistencia y mejor capacidad elástica tanto envejecidos como no. Pueden observarse las desventajas de utilizar en el país como únicos fillers los obtenidos por recuperación, en especial para mezclas asfálticas cuyo destino son las vías principales.

**Palabras claves:** Filler – mástico asfáltico – ligante asfáltico

## ABSTRACT

Mineral fillers significantly affect the behavior of asphalt mixtures in aspects related to their stiffness, durability, and workability. Although this material has been extensively studied internationally for many years, it receives little attention in Ecuador, where only recovered fillers collected by dust collectors at asphalt plants are used. For this reason, the objective of this study is to assess the impact of different types of fillers—some potentially used as additives—on the quality of mastics prepared with asphalt cement from the Esmeraldas Refinery, both unaged and aged, through routine control tests, in order to formulate recommendations for their use in asphalt mixtures.

The fillers used were: lime, Portland cement, basalt, tuffaceous slate, and silty sand, with the first two considered as potential additive fillers. In the preparation of the mastics, the ratio between volumetric concentration and critical concentration was always maintained at one.

It is concluded that two properties of the filler are the most influential in its behavior as part of the mastic: particle size distribution (physical) and composition (chemical). Finer gradations, associated with high CaO contents in lime and cement, resulted in mastics with lower consistency and better elastic capacity, both aged and unaged. The disadvantages of using only recovered fillers in the country are evident, especially for asphalt mixtures intended for main roads.

**Keywords:** Filler - asphalt mastic - asphalt binder - asphalt binder

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

El filler o polvo mineral se define generalmente como la parte más fina de la curva granulométrica del agregado que pasa por el tamiz de 0,075 mm, teniendo un papel importante en las mezclas asfálticas, ya que junto con el cemento asfáltico formarán el mástico que le dará cohesión a la mezcla. Si bien internacionalmente a esta fracción mineral se le presta gran atención en los diseños y controles de calidad, teniendo exigencias que cumplir, en el Ecuador se maneja estrictamente como parte del agregado fino (tamaños menores a 4,76 mm).

En la literatura, se informó por primera vez en 1914 que los fillers o rellenos minerales no solo llenan los vacíos entre los agregados, sino que también pueden causar algunos cambios en la propiedad fisicoquímica del ligante asfáltico y que la dispersión de los fillers en el asfalto puede formar un sistema de suspensión coloidal (Richardson, 1914).

En los años 30 fueron notables los trabajos de Traxler (1937). Él concluyó: (a) que la viscosidad relativa (definida como la viscosidad del dividida por la viscosidad del betún) para diferentes concentraciones de filler, fue independiente de la naturaleza y la consistencia del medio de suspensión, (b) que el efecto de rigidización del filler no siempre podía predecirse adecuadamente mediante el porcentaje de huecos en el filler compactado seco, y (c) que solo ensayando las mezclas de filler y asfalto se podría hacer una

predicción confiable de la rigidización resultante. Traxler consideró el tamaño y la distribución granulométrica como los parámetros fundamentales del filler en el sentido de que afectan el contenido de huecos y el diámetro medio de los huecos de los polvos empaquetados.

Mitchell y Lee (1939) también llevaron a cabo investigaciones en un intento de encontrar un parámetro que prediga adecuadamente la capacidad de un filler mineral para reforzar el asfalto al que se añade. Sus datos fueron tomados para concentraciones de sólidos relativamente pequeñas e indicaron que el volumen bulk del filler sedimentado en benceno es un buen predictor del reforzamiento esperado. Ha sido demostrado por otros investigadores que el volumen sedimentado en benceno está directamente relacionado con la finura, siendo actualmente la prueba de densidad en benceno un ensayo usual para fillers en Europa.

Rigden (1947) propuso un método para medir la porosidad de los fillers minerales, que se demostró posteriormente que estaba estrechamente relacionado con el efecto de rigidización de los fillers sobre los másticos asfálticos (Lackner et al., 2005; Little & Petersen, 2005; Wang et al., 2011). En otros trabajos, Rigden (1954) también concluyó que a las concentraciones más altas de filler, tanto la susceptibilidad a la temperatura como el grado de flujo complejo son funciones de la concentración volumétrica. Heukelem y Wluga (1971) desarrollaron un método para expresar la viscosidad relativa de las dispersiones en función de la concentración volumétrica y la velocidad de cizallamiento. Cualquier aumento en la viscosidad relativa se atribuyó al grado de peptización.

Además del aglutinante asfáltico, las propiedades del mástico (mezcla del asfalto con el filler) también se ven significativamente afectadas por las características del filler, como la forma de las partículas, la textura, el tamaño de las partículas, la distribución del tamaño de las partículas, el área de superficie específica (SSA) así como la densidad, y las partículas más finas o de menor densidad específica tienen un efecto beneficioso en el sistema filler-asfalto (Lee, 1964; Ferrigno, 1987). Se informó que el efecto de refuerzo sobre el aglutinante asfáltico dependía de la fuente y el tamaño de partícula de los fillers minerales (Anderson y Goetz, 1973).

Varios estudios han demostrado que los fillers también realizan otras funciones importantes. Dependiendo del tamaño y estructura de sus partículas, ellos pueden rigidizar en mayor o menor medida el asfalto (Kandhal & Parker, 1998), lo que incide en los fenómenos de deformación y fatiga. Los fillers también pueden modificar los procesos de envejecimiento (Recasens, Martínez, Jiménez & Bianchetto, 2005). En tiempos más recientes, se evaluaron los datos de las pruebas del reómetro de corte dinámico (DSR) de tres tipos de másticos con diferentes fillers (piedra caliza, granito y andesita) y se concluyó que el SSA es uno de los principales factores que afectan la interacción interfacial entre el ligante asfáltico y el filler mineral (Guo, Tan, Hou, Wang & Wang, 2017).

Finalmente, en una profunda revisión del tema, los investigadores (Chen, Xu, Tebaldi & Romeo, 2020) encontraron que la distribución del tamaño de las partículas y el SSA son las dos características físicas más importantes de los fillers en términos de su impacto en el comportamiento del mástico. Los fillers como diatomita, cal hidratada y cemento Portland, pueden mejorar el desempeño ante altas temperaturas, así como la durabilidad. Concluyendo que

es importante seleccionar cuidadosamente el tipo y la proporción de filler mineral para mejorar la calidad de las mezclas asfálticas.

El filler es la fracción de mayor superficie específica en su interacción con el ligante en la mezcla asfáltica y el componente de los áridos que en el proceso de producción, luego de pasar por el tambor secador, es captado por los extractores de aire y retenido en los colectores de polvo para luego reincorporarse a la mezcla. En el proceso de secado el filler puede sufrir contaminaciones, alteraciones granulométricas, así como, disminuir su porcentaje en el peso esperado, debido a los contenidos de fillers que van al pozo de sedimentación (piscina), muy usuales en las plantas existentes en el país.

Por estas razones, en especial en los países europeos, es usual el empleo del filler de aportación, que podrá ser un producto comercial o especialmente preparado. Se suelen emplear como tales rocas básicas bien trituradas, cal o cemento Portland. De esta forma el material recuperado del proceso antes mencionado puede reincorporarse solo en ciertos porcentajes a la mezcla que se fabrica en planta. Por ejemplo, en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales, PG 3, de España (2015), se establecen las proporciones de polvo mineral (filler) de acuerdo al tipo de tráfico y el tipo de capa. Ver Tabla 1.

La clasificación del tráfico se basa en la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) en el carril de diseño, en el año de la puesta en servicio de la vía. Por ejemplo, de acuerdo a la Tabla 1, para mezclas de capas de rodadura

con IMDp entre más de 4000 vehículos y hasta 200 vehículos, todo el filler a emplear será de aportación.

**Tabla 1. Proporciones de filler de aportación a emplear según PG-3 de España**

TIPO DE CAPA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00	T0 Y T1	T2	T3 y ARCENES	T4
RODADURA	100			≥ 50	
INTERMEDIA	100		≥ 50		
BASE	100	≥ 50			

## 1.2 Justificación e importancia del tema

En Ecuador no se emplean fillers de aportación en ningún caso, no existiendo en las plantas ni las tolvas de filler necesarias para su almacenaje, ni sistema de entrada directa al mezclador. Tampoco se realiza ninguna prueba de calidad para valorar este componente esencial, por lo que se hace necesario iniciar con este trabajo una investigación que permita mostrar en la práctica métodos básicos de control de calidad a los fillers, así como su impacto en la calidad de los másticos.

De manera preliminar se considera posible realizar una comparación entre el comportamiento de másticos confeccionados con diferentes fillers, sin y con procesos de envejecimiento aplicados, teniendo como referencia algunas exigencias internacionales y la información que se obtendrá de fillers de referencia, como la cal y el cemento Portland. Dado el impacto del tipo y proporción del filler en el comportamiento de los másticos y de las mezclas

asfálticas, se considera de suma importancia emprender investigaciones sobre este tema en el país.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Valorar la incidencia de diferentes tipos de fillers, algunos potencialmente de aportación, en la calidad de los másticos preparados con el cemento asfáltico de la Refinería de Esmeraldas, sin y con envejecimiento, mediante pruebas de control rutinarias, para formular recomendaciones sobre su utilización en las mezclas.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Estudiar los tipos de fillers a utilizar mediante pruebas físicas y químicas.
2. Caracterizar el comportamiento de los másticos asfálticos, sin y con envejecimiento, mediante las pruebas rutinarias al asfalto.
3. Comparar el comportamiento obtenido en los diferentes másticos bajo las condiciones estudiadas.

### **1.4 Alcance**

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas), consultores y técnicos en general vinculados a la temática.

Los resultados que se obtendrán a partir de la investigación permitirán mostrar las diferencias de los fillers que se emplean en nuestra región, visualizar sus características intrínsecas y su impacto en los másticos, lo que sin dudas

influirá también en la calidad de las futuras mezclas asfálticas fabricadas con ellos.

### **1.5 Metodología**

Se realizará con la aplicación del método general de análisis y síntesis. Se hará estudio bibliográfico, procesamiento de datos experimentales y aplicación de modelos estadísticos. El desarrollo experimental se lo va a ejecutar en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

La metodología de trabajo seguirá los siguientes pasos:

1. Revisión de la información y estudio de las metodologías de los ensayos a realizar tanto a los fillers como a los másticos.
2. Selección de los tipos de fillers a emplear. Se proponen 5 tipos: Cal, cemento Portland, basalto (Chivería), pizarra (Durán) y arena-arcillosa (zona del río Bulu-Bulu).
3. Caracterización de fillers. Pruebas a realizar: densidad, concentración crítica, azul de metileno, plasticidad, granulometría y composición química.
4. Caracterización de másticos con relación  $C_v/C_c$  igual a uno, sin y con envejecimiento en RTFOT. Siendo  $C_v$  la concentración volumétrica de filler en el mástico y  $C_c$  la concentración crítica de filler en el mástico. Pruebas a realizar: viscosidad Brookfield (3 temperaturas), penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, gravedad específica y recuperación elástica.
5. Comparación y análisis de resultados.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Control de calidad al filler o relleno mineral

En general, todas las normativas reconocen que el filler estará compuesto por materia mineral finamente dividida, como polvo de roca, polvo de escoria, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes, loess u otra materia mineral adecuada. Además, que al momento de su uso, deberá estar lo suficientemente seco para fluir libremente y esencialmente libre de aglomeraciones. Las pruebas específicas propuestas en diferentes normativas se muestran a continuación:

##### 2.1.1 Norma ASTM D242/D242M

Dicha norma establece como requerimientos:

- 1- Que el filler cumpla con los límites granulométricos que se muestran, obtenidos según la norma ASTM D 546. Ver Tabla 2 y Figura 1.

**Tabla 2. Requisitos granulométricos en ASTM D242/D242M**

Tamiz	Porcentaje pasado (en masa)
1,18 mm (No. 16)	100
600 $\mu$ m (No. 30)	97 - 100
300 $\mu$ m (No. 50)	95 - 100
75 $\mu$ m (No. 200)	70 - 100



**Figura 1. Equipamiento para granulometría con tamices**

Fuente: <https://morphola.com/kit-de-analisis-para-composicion-granulometrica/>

2- Que se encuentre libre de impurezas orgánicas y con un índice de plasticidad no mayor a 4, de acuerdo con la norma ASTM D 4318. Ver Figura 2. Se aclara que este límite no es apropiado para la cal hidratada y el cemento Portland.



**Figura 2. Equipamiento para pruebas de plasticidad**

Fuente: [https://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de\\_25.html](https://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_25.html)

El contenido de materias orgánicas suele obtenerse mediante la prueba de pérdida por ignición, cuyo procedimiento se encuentra en la norma AASHTO 267-86.

### 2.1.2 Norma europea UNE-EN 13043

Esta norma sobre áridos para mezclas bituminosas establece en su sección 5, las pruebas a realizar a los fillers, las cuales permiten un control más exhaustivo que las recogidas en la ASTM.

*Requisitos geométricos:*

- 1- Granulometría. Se debe determinar conforme a la Norma Europea EN 933-10. Ver Tabla 3.

**Tabla 3. Requisitos granulométricos en UNE-EN 13043**

Tamíz	Porcentaje pasado (en masa)
2 mm	100
125 µm	85 - 100
63 µm	70 - 100

- 2- Finos nocivos. Cuando se requiera, la existencia de finos nocivos se debe determinar por el ensayo de azul de metileno, conforme a la Norma Europea EN 933-9. El valor obtenido se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente.

*Requisitos físicos:*

- 3- Contenido en agua. Determinado conforme a la Norma EN 1097-5, no debe ser superior al 1% en masa.

4- Densidad de partículas. Se determinará conforme a la Norma EN 1097-7, y se deben declarar los resultados. El principio se basa en la sustitución de una cantidad determinada de líquido de densidad conocida por la muestra de ensayo. Se rellena con el líquido un picnómetro de volumen conocido que contiene la muestra. El volumen de este líquido se calcula dividiendo la masa del líquido añadido entre su densidad. El volumen de la muestra de ensayo se calcula restando este volumen del volumen del picnómetro. Los elementos necesarios para la prueba se muestran en la Figura 3.



**Figura 3. Equipamiento para prueba de densidad**

Fuente: [https://viresa.com.mx/blog\\_picnometro\\_densidades](https://viresa.com.mx/blog_picnometro_densidades)

5- Porosidad del polvo mineral seco compactado (Ridgen). Cuando se requiera, la porosidad del filler seco compactado se debe determinar conforme a la Norma EN 1097-4, y se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente. El equipo en particular se muestra en la Figura 4. Se llama la atención a que los pesos y dimensiones manejados en la prueba europea presentan ciertas diferencias con los del diseño original de Ridgen en 1947 y con los empleados por NAPA (National Asphalt Pavement Association) en Estados Unidos.



**Figura 4. Equipo para porosidad Ridgen**

Fuente: <https://www.abmbv.nl/en/products/laboratory/aggregates/mechanical-and-physical-properties/other/rigden-apparatus/groups/g+c+s+ss+a+view>

*Propiedades químicas:*

- 6- Solubilidad en agua. Cuando se requiera, la solubilidad se debe determinar conforme al capítulo 16 de la Norma Europea EN 1744-1, y se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente.
- 7- Susceptibilidad al agua. Cuando se requiera, la susceptibilidad al agua se debe determinar conforme a la Norma EN 1744-4, y se deben declarar los resultados.
- 8- Contenido en carbonato cálcico del filler de piedra caliza. Cuando se requiera, el contenido en carbonato cálcico se debe determinar conforme a la Norma EN 196-21, (Fluorescencia de rayos X) y se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente.
- 9- Contenido en hidróxido cálcico del polvo mineral mixto. Cuando se requiera, este contenido se debe determinar conforme a la Norma EN 459-2, y se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente.

*Requisitos de homogeneidad de la producción de filler:*

La homogeneidad de la producción de polvo mineral se debe medir, al menos, por una de las siguientes propiedades:

- 11- Número de bitumen del filler de aportación. Cuando se requiera, la viscosidad aparente (número de bitumen) del filler, que afecta a la homogeneidad de las propiedades de rigidización, se debe determinar conforme a la Norma EN 13179-2, y se debe declarar de acuerdo con la categoría correspondiente. Esta Norma Europea especifica el procedimiento para determinar la viscosidad aparente de una mezcla de agua y árido de relleno, expresada numéricamente. El procedimiento de ensayo es aplicable al árido de relleno utilizado en mezclas bituminosas para regular el control de la producción.
- 12- Densidad de partículas del polvo mineral de aportación. La densidad de estas partículas se debe determinar conforme al anexo B de la Norma EN 1097-3. El intervalo declarado por el fabricante no debe ser superior a 0,2 g/cm<sup>3</sup>.
- 13- Densidad aparente en queroseno. Esta densidad se debe determinar conforme al Anexo B de la Norma EN 1097-3. El intervalo declarado por el fabricante debe quedar comprendido entre 0,5 g/cm<sup>3</sup> y 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Este criterio permite evitar el empleo de fílleres demasiado finos que demanden una cantidad significativa de ligante bituminoso en la mezcla.  
Se recuerda que la densidad aparente es el cociente entre la masa de producto y el volumen aparente del mismo (volumen que incluye los huecos entre partículas minerales). Por otro lado, la densidad real es el cociente entre la masa del producto y su volumen real (volumen que excluye los huecos entre los granos).
- 14- Ensayo de superficie específica Blaine. Se debe determinar conforme a la Norma EN 196-6. Ver Figura 5. El ensayo consiste en medir el tiempo en

que una columna de agua desciende una altura dada. Este método depende del flujo de aire a través de un lecho de cemento preparado en la celda del aparato Blaine. El flujo de aire es función del tamaño y número de poros, lo cual es función del tamaño de partícula. Para determinar la superficie específica, se considera a las partículas como esferas. El intervalo declarado por el fabricante no debe ser superior a 140 m<sup>2</sup>/kg de acuerdo con la norma antes mencionada.



**Figura 5. Permeabilímetro de Blaine**

Fuente: <https://www.cuevadelcivil.com/2011/04/superficie-especifica-del-cemento.html>

### **2.1.3 Otras pruebas adicionales**

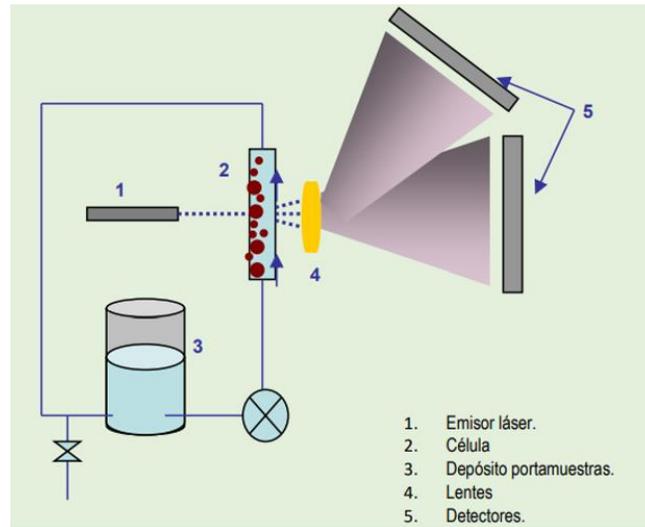
- Superficie específica de sólidos mediante la adsorción de gas o Método BET. Según ISO 9277:2022, que permite la determinación de la superficie específica externa e interna general tanto de sólidos dispersos (por ejemplo, nanopulvos) o porosos, midiendo la cantidad de gas adsorbido físicamente según el método de Brunauer, Emmett y Teller.
- Concentración crítica de filler. Este parámetro es fundamental para evaluar la demanda de betún del polvo mineral valorando, implícitamente, características

del filler como su finura o superficie específica y su rugosidad o textura superficial. Se recoge en la norma IRAM 1542.

- German filler test. La prueba es una medida de la cantidad de filler mineral necesaria para absorber 15 gramos de aceite hidráulico. Se pone el aceite hidráulico en un bol pequeño, luego se añaden 45 gramos de filler y se mezclan. Se intenta formar una bola con la mezcla. Si se forma una bola y se sostiene unida, se agrega más filler, en incrementos de 5 g. Este proceso se continúa hasta que la mezcla pierde cohesión. En este punto, todo el aceite hidráulico está fijado en los huecos del material pasante por el tamiz 200 (P200) y no hay exceso para mantener unidas las partículas. La cantidad total de P200 sumada a el aceite hidráulico se informa como el valor de prueba (NCAT Report 98-2). Esta prueba se basa indirectamente en el concepto de vacíos de Rigden.

- Granulometría del filler mediante difracción láser. Permite análisis de partículas por encima de 0.002mm. En esta técnica se emplea un haz de luz monocromática colimado que incide sobre las partículas de la muestra que se hace pasar a través de una célula óptica. Las partículas dispersadas provocan la difracción de la luz. De acuerdo con la teoría de Fraunhofer la intensidad de la luz difractada es proporcional al cuadrado del tamaño de partícula, pero el ángulo de difracción varía inversamente con el tamaño de partícula, por lo que es posible medir el tamaño de las partículas y representarlo estadísticamente a partir de la medida de los ángulos de difracción que provocan. Ver Figura 6.

El procedimiento se encuentra descrito en la norma ASTM D4464-15(2020) “Standard Test Method for Particle Size Distribution of Catalytic Materials by Laser Light Scattering”.

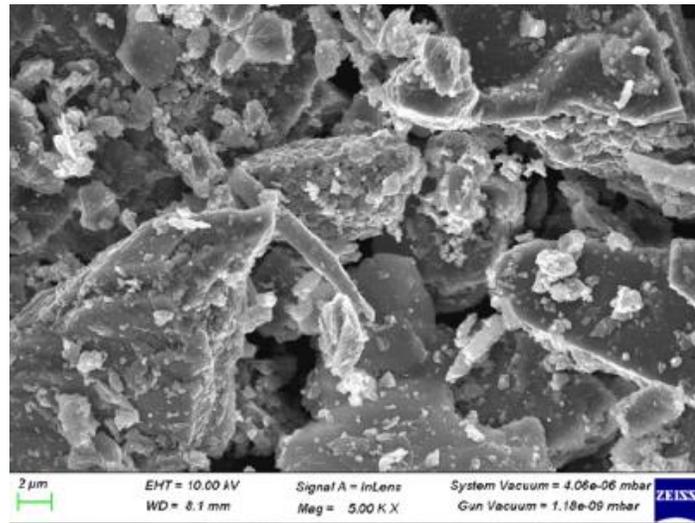


**Figura 6. Esquema de equipo de difracción láser para evaluar granulometría**

Fuente:

[https://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2022/11/Granulometria\\_Difraccion\\_Laser.pdf](https://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2022/11/Granulometria_Difraccion_Laser.pdf)

- Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM). Permite determinar la microestructura de los fillers, incluyendo su forma y textura. Su procedimiento se encuentra en la norma ASTM E986-04. Ver ejemplo de resultado en Figura 7.



**Figura 7. Resultado de prueba SEM**

Fuente: Abhijit, G.D., & Ransinchung, R.N. Evaluating the engineering properties of asphalt mixtures containing RAP aggregates incorporating different wastes as fillers and their effects on the ageing susceptibility. 2022, pp. 8.

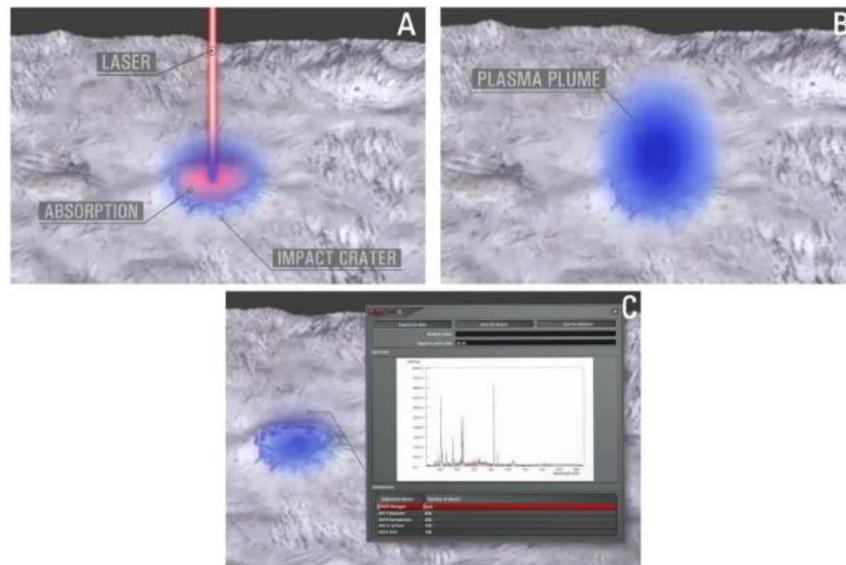
- Composición química con espectroscopía de plasmas producidos por láser. La espectroscopia de descomposición inducida por láser (LIBS) permite el análisis de la composición del material (ver Figura 8). El mecanismo para lograrlo se produce en varios pasos básicos, como se muestra a continuación en la Figura 9.



**Figura 8. Espectrómetro láser**

Fuente: “Vea la estructura con microscopía: conozca la composición con espectroscopía láser”. Sitio: <https://www.bairesac.com/blog/archivo/2325>

Un pulso de láser de alta energía golpea un área específica de la superficie del material analizado (A); la energía del láser se absorbe causando la ablación del área local y la formación de cráteres (B); se induce un plasma (átomos libres y electrones) con emisión simultánea de luz (espectro continuo); la descomposición del plasma (relajación) sigue inmediatamente con la emisión de espectros de líneas elementales; los espectros de línea se detectan y los elementos correspondientes se identifican (C).



**Figura 9. Mecanismo LIBS para la detección química / elemental**

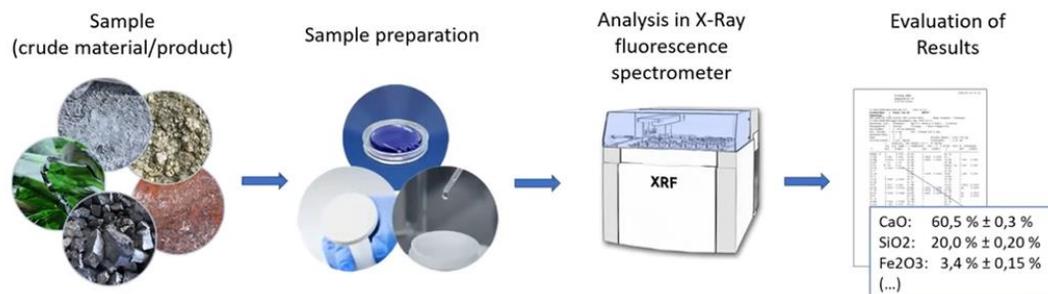
Fuente: “Vea la estructura con microscopía: conozca la composición con espectroscopía láser”. Sitio: <https://www.bairesac.com/blog/archivo/2325>

- Análisis por métodos de pruebas químicas. Los aparatos y materiales para los métodos de prueba incluyen balanzas, pesas, cristalería y recipientes de laboratorio, desecadores, papel de filtro, crisoles y hornos de mufla. Se deben utilizar reactivos estándar para el método de prueba dentro de los límites de la especificación. Estos reactivos incluirán agentes de pureza, agua, reactivos reenvasados, ácidos concentrados e hidróxido de amonio, soluciones no estandarizadas y soluciones indicadoras.

Los métodos y procedimientos de prueba de referencia incluyen la determinación de residuos insolubles, dióxido de silicio, grupo hidróxido de amonio, óxido férrico, pentóxido de fósforo, dióxido de titanio, óxido de zinc, óxido de aluminio, óxido de calcio, óxido de magnesio, azufre, pérdida por ignición, óxidos de sodio y potasio, óxido mangánico, cloruro y sustancias orgánicas solubles en cloroformo.

El método de trabajo se encuentra en la norma ASTM C114-18 “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement”, en parte aplicable a otros fillers.

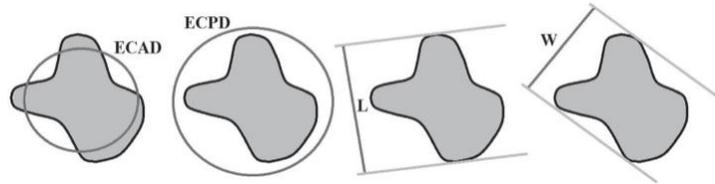
- Análisis en espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF). Un procedimiento usual es emplear parcialmente la norma ASTM C114-18, pero auxiliada por un XRF, que es un método más rápido que permite determinar más elementos o compuestos sin tener que aplicar diversos procedimientos químicos básicos y con mayor precisión. Ver Figura 10. El procedimiento de trabajo se encuentra en la norma ASTM E1621-13 “Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry”.



**Figura 10. Esquema de análisis empleando un XRF**

- Análisis dinámico de imágenes. Puede investigar la forma de las partículas del filler. Para ello, este se dispersa en una solución y luego pasa a un analizador. Las partículas de filler se captan utilizando una cámara de alta resolución y una unidad de flash de alta velocidad. Las imágenes de partículas individuales se graban directamente y se capturan como archivos gráficos de alta resolución para su posterior procesamiento. La trayectoria de flujo dinámico y turbulento permite la orientación aleatoria de las partículas y una visión directa de las partículas en movimiento dentro de la zona capturada. Varias propiedades de las formas de grano se pueden describir a través de las imágenes obtenidas de

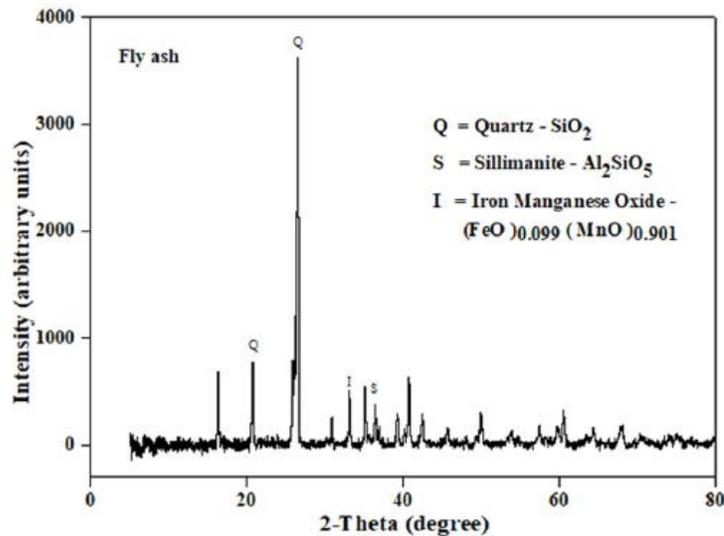
cada partícula. La Figura 11 muestra los parámetros característicos de este análisis.



**Figura 11. Valores característicos en el análisis dinámico de imágenes**

Fuente: Steineder, M. & Hofko, B. Assessing the impact of filler properties, moisture, and aging regarding fatigue resistance of asphalt mastic. 2023, pp. 6.

- Análisis de difracción de rayos X (XRD). Para determinar la composición mineralógica de los fillers. En un difractómetro de rayos X, las diferentes fases cristalinas muestran diferentes patrones de difracción. La identificación de fases se puede realizar mediante la comparación de los patrones de difracción de rayos X obtenidos de muestras desconocidas con los patrones de las bases de datos de referencia. Este proceso es como hacer coincidir las huellas dactilares en la investigación de una escena del crimen. Las fuerzas relativas de los patrones de diferentes fases en una mezcla multifásica se utilizan para determinar la composición completa de una muestra. Ver ejemplo de resultado en Figura 12. Este análisis se detalla en ASTM C1365-18 “Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis”.



**Figura 12. Ejemplo de composición obtenida por difracción de rayos X.**

Fuente: Abhijit, G.D., & Ransinchung, R.N. Evaluating the engineering properties of asphalt mixtures containing RAP aggregates incorporating different wastes as fillers and their effects on the ageing susceptibility. 2022, pp. 7.

## **2.2 Manejo de la dosificación de filler en la mezcla asfáltica**

### **2.2.1 Introducción**

La cantidad de filler en la mezcla es crítica, ya que existe un porcentaje óptimo para rellenar los vacíos, que si se sobrepasa va a abrir la estructura en vez de cerrarla, y para garantizar una adecuada rigidez, la cual aumentaría con porcentajes excesivos de filler en detrimento de la flexibilidad.

### **2.2.2 Relación filler-betún**

Desde hace algún tiempo, la relación filler-betún (F/B) se utiliza como indicador de la trabajabilidad de una mezcla asfáltica. Esta relación se calcula dividiendo el peso del filler por el peso del ligante asfáltico efectivo en la mezcla. Una recomendación típica para mezclas en EE.UU. es una F/B entre 0.6 y 1.2 (Brown et al., 2009), rango también recomendado en la India (MoRTH, 2013). En Ecuador, para tráfico pesado se exige cumplir con F/B en el rango de 0.8 a

1.2. La dosificación recomendada en la norma española depende del tipo de capa y de la zona térmica estival según la Tabla 4, que se muestra a continuación.

**Tabla 4. Relación ponderal (\*) F/B para mezclas densas (rodadura), intermedia y gruesas para las categorías de tráfico pesado T00 a T2 en España**

TIPO DE CAPA	ZONA TÉRMICA ESTIVAL	
	CÁLIDA Y MEDIA	TEMPLADA
RODADURA	1,2	1,1
INTERMEDIA	1,1	1,0
BASE	1,0	0,9

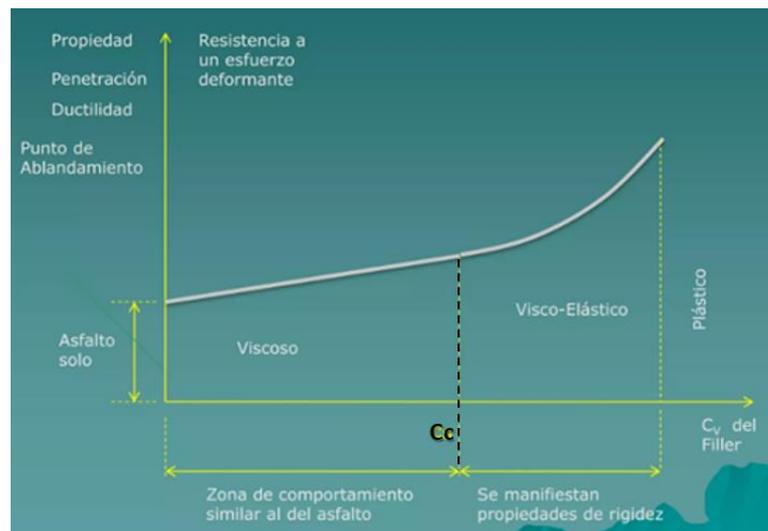
Nota: (\*) Relación entre el porcentaje de polvo mineral y el de ligante expresados ambos respecto de la masa total del árido seco, incluido el polvo mineral

La especificación de materiales de Portugal, JAE (Junta Autónoma de Estradas), ha prescrito que el rango permitido para F/B sea de 1,1 a 1,5, mientras que la especificación china JTG F-40 (2004) sugiere el rango de 0,6 a 1,5. En general, este enfoque de relaciones de pesos, ha tenido cuestionamientos dada la gran variación en las densidades de los fillers.

### **2.2.3 Concentración crítica de filler**

En el año 1960 el Dr. Celestino Ruiz, a partir de estudios sobre másticos, presentó una publicación en la cual definía un nuevo parámetro denominado concentración crítica (máxima) del filler "Cs", el cual se caracterizaba por ser el límite donde el sistema deja de ser viscoso. O sea, que para conservar la capacidad de deformación viscosa del mástico sin rotura es necesario que la

concentración volumétrica de filler en ese sistema betún-filler sea igual o menor que  $C_s$ . Ver Figura 13. Posteriormente, los investigadores Ishai y Craus (1977) corroboraron mediante numerosos análisis los estudios realizados por el Dr. Ruiz y llegaron a la conclusión de que cuanto más irregular era la forma de las partículas y mayor era su finura (elevada superficie específica), menor era la concentración crítica  $C_c$ .



**Figura 13. Representación del significado de la concentración crítica**

Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/filler-244504501/244504501#9>

Este criterio de dosificación volumétrica se empleará en este trabajo de investigación, de acuerdo a lo establecido en la Norma IRAM 1542 del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Esta norma describe los procedimientos a seguir para determinar la Densidad Real ( $\rho$ ) y la Concentración Crítica ( $C_c$ ) del filler:

**Densidad real del filler ( $\rho$ )**

La densidad del filler se obtiene mediante la expresión:

$$\rho = \frac{m}{V_f - V_i}$$

Siendo:

$\rho$  = densidad del filler, g/cm<sup>3</sup>

m = masa del filler, g

V<sub>i</sub> = Volumen del queroseno, cm<sup>3</sup>

V<sub>f</sub> = Volumen del queroseno más filler, cm<sup>3</sup>

En la Figura 14, se muestra la colocación de las muestras de filler en el volumenómetro de “Le Chatelier”, que luego serán sumergidas en queroseno. El volumenómetro se coloca a su vez en un baño de agua a una temperatura de 20 °C, por un tiempo aproximado de 30 minutos, para hacer las lecturas correspondientes.



**Figura 14. Trabajo con el volumenómetro Le Chatelier**

Fuente: Autor

### **Concentración Crítica (Cc)**

Se calcula a través de la siguiente expresión:

$$C_c = \frac{m}{\rho \cdot V}$$

Donde:

Cc = Concentración crítica del filler ensayado

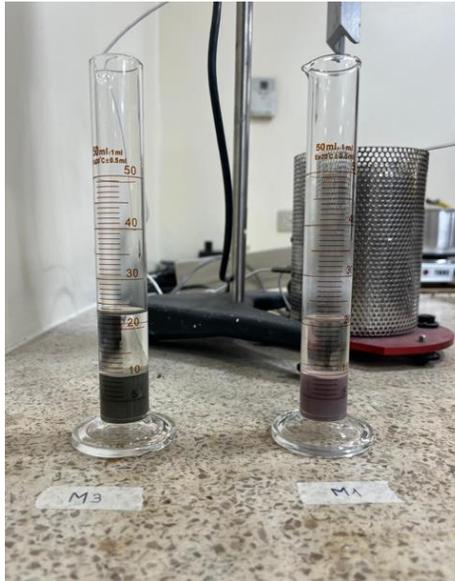
m = masa del filler, g

$\rho$  = densidad del filler, g/cm<sup>3</sup>. Valor determinado previamente

V = volumen ocupado por el filler sedimentado, cm<sup>3</sup>

En la Figura 15 pueden observarse probetas graduadas con queroseno y distintos fillers, después de haber sido calentadas con agua hirviendo por un

tiempo aproximado de 1 hora y dejándose reposar por 24 horas, antes de hacer las mediciones correspondientes.



**Figura 15. Probetas graduadas con fillers**

Fuente: Autor

En estudios realizados por la Universidad Politécnica de Cataluña (España) en asociación con la Universidad de la Plata (Argentina), se presentaron una serie de resultados ligados al método funcional denominado “Universal de Caracterización de Ligantes” más conocido como Método UCL, en los cuales se demostraba que si la proporción en volumen del filler no excedía de la relación concentración volumétrica / concentración crítica ( $C_v/C_c$ ), se obtendría una buena resistencia al envejecimiento (Movilla et al., 2014).

La concentración volumétrica de filler ( $C_v$ ) puede determinarse por la siguiente expresión:

$$C_v = \text{Volumen de filler} / (\text{volumen de filler} + \text{volumen de asfalto})$$

## **2.3 Empleo adecuado del filler en el proceso de producción en planta**

El empleo adecuado del filler en el proceso de producción en planta de asfalto es fundamental para garantizar la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas. El filler, compuesto por partículas finas, mejora la cohesión y estabilidad de la mezcla. Como se conoce, las mezclas asfálticas están compuestas por agregados minerales de diferentes tamaños (incluido el filler) y asfalto. El filler, que normalmente es el material que pasa el tamiz de abertura 0.074 mm, representa en las mezclas de rodadura usuales en Ecuador entre el 2 y 10% del peso total de los agregados. A continuación, se presenta un resumen de su correcto manejo en la planta de producción, bien sea como filler de adición, ya mencionado en el Capítulo 1, o como filler de recuperación en el proceso de producción en planta.

### **2.3.1 Utilizando filler de adición**

#### a) Selección del filler de adición

Es esencial seleccionar un filler que cumpla con las especificaciones técnicas del proyecto. Comúnmente se utiliza polvo de piedra caliza, cemento o cenizas volantes. El filler debe ser compatible con el asfalto y los agregados para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

#### b) Almacenamiento

El filler debe almacenarse en condiciones secas y protegidas para evitar la absorción de humedad, lo cual puede afectar su comportamiento en la mezcla. Debe evitarse la segregación de las partículas del filler durante su almacenamiento y transporte dentro de la planta. En general, las plantas asfálticas de tipo superior tienen sistemas de alimentación separados para introducir el filler comercial en la mezcla. Ver Figura 16.



**Figura 16. Tolva de filler en una planta discontinua**

c) Dosificación en la Mezcla

La dosificación del filler debe ser precisa y controlada. Se recomienda que la dosificación sea automatizada para asegurar la consistencia. Un exceso de filler puede hacer la mezcla demasiado rígida y propensa a grietas, mientras que una cantidad insuficiente reduce la cohesión y estabilidad. Se recuerda que el filler de adición no necesariamente es el 100% que la mezcla requiere. Es decir, también podrían entrar al mezclado fillers de recuperación que forman parte de los agregados finos, lo que se expondrá en el numeral 2.3.2.

d) Integración en el Proceso de Mezclado

El filler debe integrarse de manera homogénea con el asfalto y los agregados. Se recomienda la adición del filler durante la etapa de mezclado seco, antes de la incorporación del asfalto. Es importante mantener la temperatura adecuada durante la producción para garantizar la correcta integración del filler y evitar problemas de compactación.

e) Monitoreo y Control de Calidad

Realizar las pruebas de control de calidad en la planta, es decir, los parámetros volumétricos y resistentes sobre briquetas confeccionadas. La planta debe

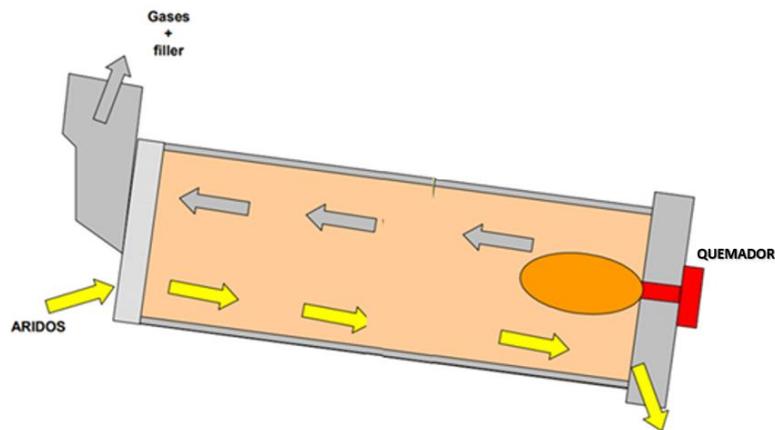
contar con sistemas para realizar ajustes en la dosificación del filler en tiempo real, basados en los resultados de los ensayos.

#### f) Impacto en la Producción y Colocación

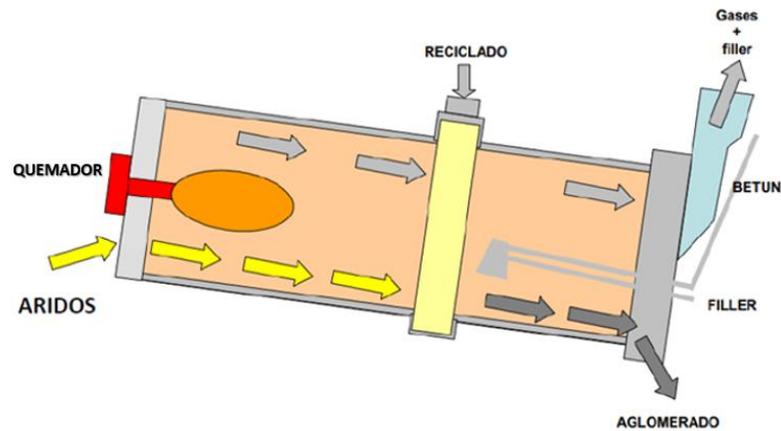
Un manejo adecuado del filler garantiza una mezcla asfáltica con propiedades mecánicas consistentes, facilitando su colocación y compactación en el campo. La correcta dosificación y mezcla del filler contribuye a una mayor durabilidad de la mezcla.

### 2.3.2 Utilizando el filler de recuperación

Todas las plantas poseen colectores de polvo que operan adyacentes y en combinación con el secador, esto es necesario para que la planta trabaje eficientemente. Los colectores permiten eliminar o reducir el efecto perjudicial que causa el polvo (incluye fillers) cuando sale junto con el aire del secador. En una planta de tambor secador la aspiración arrastra hasta un 80 – 85% de las partículas más finas (ver figuras 17 y 18), lo que se reduce sustancialmente en las plantas de tambor secador – mezclador, donde llega a ser entre 20 – 25%.



**Figura 17. Captación de gases más filler en un tambor secador**



**Figura 18. Captación de gases más filler en un tambor secador mezclador**

Generalmente los colectores de polvo cuentan con dispositivos para devolver el polvo recogido al agregado caliente: a medida que este sale del secador y es recogido por el elevador caliente en plantas discontinuas con tambor secador o directamente a la zona de mezclado en plantas con tambor secador-mezclador. Ver Figura 19.

En general los colectores de polvo pueden ser de diferentes tipos: colectores ciclónicos, colectores de filtros secos o de mangas (bag house) y colectores de vía húmeda. El empleo adecuado de los mismos permite la recuperación y reutilización de los finos de ser necesario, y que los gases que se expulsan por la chimenea no contengan partículas perjudiciales para el medio ambiente.



**Figura 19. Sistema para transportar fillers recuperados al tambor secador-mezclador**

#### **2.4 Ensayos de control a los másticos**

El mástico asfáltico resulta de la mezcla de ciertas proporciones de filler con el cemento asfáltico, proporciones que en los diseños se establecen o chequean a partir de la relación filler/betún (F/B) o bien de la relación concentración volumétrica / concentración crítica (Cv/Cc). En general, las pruebas a los másticos se corresponden con algunas pruebas de consistencia a los cementos asfálticos.

Es conocido que en Ecuador las pruebas a los asfaltos se encuentran normadas en la NTE INEN 2515, Enmienda 1, de acuerdo a su viscosidad, lo que se muestra en la Tabla 5, y que el asfalto empleado es del tipo AC-20 siendo producido en la Refinería de Esmeraldas.

**Tabla 5. Pruebas a los asfaltos de acuerdo a la NTE INEN 2515**

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, <sup>c</sup>	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración <sup>b</sup>		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad <sup>a</sup> , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
<sup>a</sup> Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
<sup>b</sup> Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$												
donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
<sup>c</sup> Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Las pruebas más usuales a los másticos son la viscosidad, la penetración y el punto de ablandamiento.

## 2.5 Impacto del filler en la calidad del mástico y de la mezcla asfáltica

### 2.5.1 Generalidades

El ahuellamiento, el agrietamiento térmico y la fatiga son las principales causas de daño en los pavimentos asfálticos. El envejecimiento del asfalto acelera el agrietamiento. Los fallos prematuros de las capas superficiales que se producen en el Ecuador no pueden ser atribuidos solamente a factores climáticos o a las cargas excesivas del tráfico, sino también a la selección de los materiales a emplear. Los materiales que componen las capas superiores del pavimento flexible tienen que ser de la más alta calidad.

Actualmente se puede afirmar que los daños principales de una mezcla asfáltica en un pavimento son causados en parte por el comportamiento de los másticos asfálticos, o sea, la mezcla del filler con el asfalto. Es conocido que agregar filler al asfalto se aumenta la rigidez y la resistencia a la deformación bajo carga (Hesami et al., 2013; Rochlani et al., 2019), pero también se tiene como resultado una mayor cohesión y adhesión en el espesor de película de cubrimiento de los agregados (Cardone et al., 2015; Kuity et al., 2014).

Los estudios sugieren además que diferentes composiciones mineralógicas, contenido de arcilla y características físicas como tamaño de partícula, forma, textura, gravedad específica y la porosidad afectan el comportamiento de la mezcla asfáltica (Choudhary et al., 2020; Huang et al., 2007; Islam et al., 2021; Pasandín et al., 2016; Wang et al., 2011). En los últimos años, la evaluación del comportamiento a la fatiga ha pasado en prioridad del betún al nivel del mástico (Airey et al., 2004). En general, se supone que las microfisuras cohesivas y adhesivas en las mezclas asfálticas inician el agrietamiento por fatiga y las propiedades esenciales del mástico afectan dicho fenómeno del agrietamiento (Kim et al., 2003).

La elección del filler también afecta el envejecimiento y la sensibilidad a la humedad del mástico asfáltico (Choudhary et al., 2020). Los fillers influyen el envejecimiento de la mezcla ya sea retardando la difusión de oxígeno en el mástico o como catalizador de la oxidación (Recasens et al., 2005). Es conocido que el envejecimiento del ligante se reduce debido a la presencia de los componentes CaO o Ca (OH)<sub>2</sub> en los fillers (Lesueur et al., 2016).

### **2.5.2 Resumen de la incidencia de las propiedades del filler**

#### Huecos Rigden (porosidad).

- Los fillers que tienen altos huecos Rigden (RV) pueden convertir el betún libre en betún estructural (betún que llena los huecos entre las partículas de filler), creando así una estructura más rígida de mástico asfáltico que

puede dar como resultado una mayor resistencia a la formación de ahuellamientos en la mezcla asfáltica (Kandhal et al., 1998; Wang et al., 2011).

- Los fillers que tienen un RV excesivamente alto tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades de trabajabilidad y compactación de las mezclas asfálticas (Brown et al., 2009).

#### Forma de partícula.

- La esfericidad o redondez de las partículas de filler tiene una influencia significativa sobre la viscosidad del mástico (Grabowski & Wilanowicz, 2008).
- Las partículas de filler no esféricas aumentan la resistencia al corte y la rigidez del betún, lo que a su vez aumenta la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla asfáltica y por ende su estabilidad Marshall (Al-Hdabi, 2016).
- Los parámetros morfológicos de los rellenos, como el índice de angularidad, el diámetro promedio y la dimensión fractal, influyen en la resistencia al ahuellamiento de las másticos a altas temperaturas y en la vida útil por fatiga de los mismos a temperaturas intermedias (Xing et al., 2019).

#### Tamaño de partícula.

- Las partículas más finas o una densidad específica más baja tienen un efecto beneficioso en el sistema relleno-asfalto (Ferrigno, 1987).
- Las mezclas asfálticas preparadas con fillers más finos tienen una mayor rigidez, lo que aumenta la resistencia al desvestimiento o peladura (Kandhal et al., 1998).
- La influencia de la distribución del tamaño de las partículas del filler en las propiedades del mástico y de la mezcla no está clara según la literatura (NCHRP 9-45, 2010).

- Con una relación F/B similar, los fillers que tienen partículas medianas y gruesas mejoraron la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento de la mezcla asfáltica (Muniandy et al., 2013).

#### Textura de las partículas.

- Los áridos y fillers de textura rugosa actúan como anclaje del betún para su adherencia, lo que aumenta la resistencia a la humedad de la mezcla (Zhu & Nodes, 2000).
- Los fillers de textura rugosa mejoran la resistencia al ahuellamiento de las mezclas bituminosas (Chen et al., 2011).

#### Área superficial.

- La interacción entre el betún y el filler, debido a su mayor área específica, influye en las propiedades de compactación y el contenido de huecos de la mezcla (Zulkati et al., 2012).
- La mayor superficie del filler absorbe una mayor cantidad de betún, lo que influye en el comportamiento de la mezcla bituminosa (Clopotel & Bahia, 2013).
- La mayor superficie también puede mejorar la interacción entre el betún y el agregado, lo que posteriormente mejora el módulo de resiliencia de las mezclas (Modarres & Rahmanzadeh, 2014).

#### Gravedad específica.

- Los fillers con menor gravedad específica ocupan un mayor volumen en la mezcla compactada y dejan menos espacio para que se acomode el asfalto, lo que reduce el contenido óptimo de este en la mezcla (West & James, 2006).
- El filler con menor gravedad específica tiene una mayor adsorción, lo que resulta en la formación de mezclas resistentes a la humedad (Chen et al., 2011a).

- Los fillers con baja gravedad específica forman másticos con mayor viscosidad, mayor módulo complejo y ángulos de fase más bajos a temperaturas intermedias, lo que puede aumentar su resistencia a la fatiga (Xu et al., 2019).

#### Composición química.

- La cal hidratada como filler retarda el envejecimiento del betún debido a la reacción ácido-base entre las moléculas polares del betún y la superficie de la cal (Petersen et al., 1987).
- El exceso de finos plásticos puede aumentar la susceptibilidad a la fatiga de la mezcla bituminosa y ante el daño por el agua (Kandhal et al., 1998).
- La cal y algunos otros fillers básicos mejoraron la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica al interactuar con el ácido carboxílico presente en el betún y formar sales de calcio insolubles en agua (Read & Whiteoak, 2003).
- La variación en el efecto de rigidización del filler depende de su mineralogía y su concentración en el mástico (Faheem & Bahia, 2010).
- Los fillers silíceos forman un enlace mecánico débil (fuerza de Vanderwall) con el betún, mientras que los rellenos básicos como la cal forman un enlace químico fuerte (Antunes et al., 2015).
- Los fillers con bases fuertes como  $\text{Ca(OH)}_2$  reducen el envejecimiento del betún. Los fillers con bases débiles como el  $\text{Mg(OH)}_2$  no lo reducen (Lesueur et al., 2016).

#### Cantidad de filler.

- Las mezclas que tienen una cantidad excesiva de filler pueden tener dificultades para su mezclado y compactación (Dukatz & Anderson, 1980).

- El contenido excesivo de filler en la mezcla asfáltica puede afectar negativamente el comportamiento a la fractura del pavimento al causar falla por fragilidad y promover además la oxidación y el endurecimiento del betún (Kandhal et al., 1998).
- La resistencia a la fatiga del mástico puede aumentar con el incremento del contenido de filler. A pesar del endurecimiento del betún, la inclusión de filler puede proporcionar una mejor resistencia contra las microfisuras debido a una menor tasa de evolución del daño y una mayor capacidad de acumulación del daño (Kim et al., 2003).
- El contenido óptimo de asfalto de las mezclas disminuye con el aumento del contenido de filler. Al aumentar este se requiere menos cantidad de betún para formar la misma cantidad de mástico para lubricar los agregados (Huang et al., 2007).
- La susceptibilidad a la humedad de las mezclas bituminosas aumenta con el aumento del contenido de filler debido a la subsecuente reducción del contenido óptimo de asfalto (Chandra & Choudhary, 2013).
- El incremento de la viscosidad debido a la inclusión de filler disminuye la severidad del envejecimiento a corto plazo del betún (Lesueur et al., 2016).
- El aumento de la proporción F/B incrementa la rigidez del mástico, así como a la resistencia al ahuellamiento y el módulo resiliente de las mezclas bituminosas (Diab & Eneib, 2018).

Es importante considerar que muchos de estos criterios pertenecen a estudios con particularidades diferentes a las empleadas en esta investigación, por ejemplo, el manejo de dosificaciones a partir de la relación F/B (peso) y no Cv/Cc (volumen), que es la utilizada en este estudio.

## CAPÍTULO III

### 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiales seleccionados como fillers

Los tipos de fillers fueron seleccionados de acuerdo con los materiales más usuales como arenas trituradas o ciscos empleados en las plantas cercanas a la ciudad de Guayaquil, o productos que potencialmente pudieran usarse como fillers de adición. En todo el estudio se utilizó siempre la fracción más fina pasante por el tamiz de abertura 0.074 mm (ASTM No. 200). Los tipos de fillers seleccionados se relacionan a continuación. Ver Figura 20.

- F1 – Cal. Producto manufacturado de la empresa CALMOSACORP en Guayaquil, Tipo hidróxido de calcio, SC - 200.
- F2 – Cemento Portland. Producto manufacturado de la planta HOLCIM en Guayaquil, Tipo GU, Fuerte Ecoplanet.
- F3 – Basalto. Producto natural del tamizado del cisco procedente de la cantera Chivería, de la empresa Hidalgo e Hidalgo.
- F4 – Pizarra tobácea. Producto natural del tamizado del cisco procedente de la cantera en Durán de la empresa Concreto y Prefabricados.
- F5 – Arena-limosa. Producto natural del tamizado de la arena natural extraída en la zona del río Bulu-Bulu por empresa Hidalgo e Hidalgo.



**Figura 20. Fillers empleados en el estudio**

### **3.2 Estudio de los fillers seleccionados**

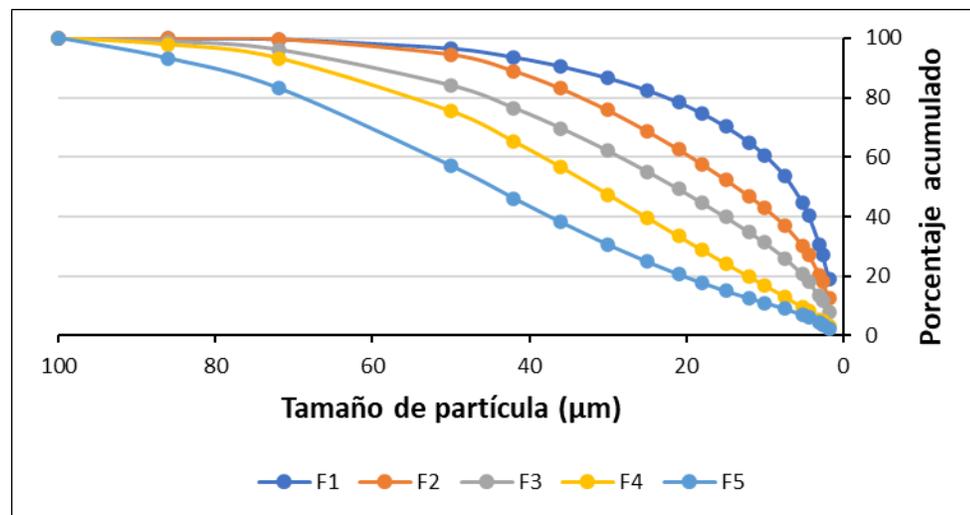
Para la caracterización de los fillers se realizaron las siguientes pruebas:

#### **3.2.1 Determinación de la granulometría**

La misma es fundamental para conocer las proporciones de partículas de diferentes tamaños, las cuales tienen implicaciones en la calidad de la mezcla para pavimentación. Para esta determinación se utilizó la técnica de difracción láser (ASTM D 4464). Ver Tabla 6 y Figura 21.

**Tabla 6. Granulometrías de los diferentes fillers**

Tamaños de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje acumulados menores a los tamaños indicados				
	F1	F2	F3	F4	F5
100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
86	99,99	100,00	98,76	97,78	93,12
75	99,75	99,75	96,03	93,20	83,14
50	96,64	94,58	84,07	75,39	57,07
42	93,68	88,99	76,53	65,22	46,14
36	90,62	83,10	69,74	56,61	38,13
30	86,69	75,80	62,10	47,45	30,60
25	82,59	68,79	55,19	39,65	24,84
20	78,51	62,63	49,30	33,42	20,61
18	74,81	57,70	44,68	28,79	17,69
15	70,41	52,50	39,86	24,24	15,00
12	65,05	46,94	34,81	19,82	12,55
10	60,75	42,94	31,24	16,90	11,01
7,4	53,65	36,99	26,07	13,05	8,97
5,0	44,85	30,36	20,63	9,51	6,96
4,4	40,51	27,27	18,24	8,11	6,10
3,0	30,66	20,47	13,25	5,49	4,36
2,6	27,17	18,10	11,59	4,69	3,79
2,0	18,84	12,50	7,84	3,02	2,53



**Figura 21. Representación gráfica de las granulometrías de los fillers**

Adicionalmente, se determinó el módulo de finura (MF) de los fillers de acuerdo con el criterio expresado en NCHRP Report 9-45, que se calcula dividiendo la suma de los porcentajes del material filler más grueso (retenidos acumulados) que 75, 50, 30, 20, 10, 5, 3 y 1  $\mu\text{m}$  entre 100. Ya que en nuestro análisis

granulométrico el menor tamaño fue de 2  $\mu\text{m}$ , se empleó este valor en vez de 1  $\mu\text{m}$  para el cálculo. Los resultados aparecen en la Tabla 7.

**Tabla 7. Módulos de finura calculados**

FILLER	F1	F2	F3	F4	F5
MF	2,83	3,61	4,36	5,16	5,84

### Análisis de resultados granulométricos

Se obtuvo de manera casual para las identificaciones empleadas en los fillers, una granulometría cada vez más gruesa al pasar del F1 hacia el F5. Esto se nota claramente en la Tabla 6 al observar que los porcentajes acumulados menores a cualquiera de los tamaños indicados, son siempre mayores en el F1 (por ende, más fino) que en los restantes fillers, algo que lógicamente también se aprecia en la Figura 21. Este resultado también lo corroboran los módulos de finura, ya que los fillers más finos dan como resultado MF más pequeños. Es decir, la cal (F1) es el filler de granulometría más fina, seguida por el cemento Portland (F2).

### **3.2.2 Límites de consistencia**

Los límites de consistencia son ensayos que determinan las características plásticas de un suelo o agregado fino en función de su contenido de humedad, estos incluyen:

- Límite Líquido (LL): Es el contenido de humedad en el que el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Este ensayo se realiza en el aparato de Casagrande y evalúa la facilidad con la que el material se deforma bajo un esfuerzo mínimo.
- Límite Plástico (LP): Representa el contenido de humedad en el cual el suelo pasa de ser plástico a semisólido. Para determinarlo, se enrolla el suelo en filamentos finos hasta que comienza a desintegrarse.

- Índice de Plasticidad (IP): Se calcula como la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico ( $IP = LL - LP$ ). Este valor indica el rango de humedad en el que el suelo mantiene su plasticidad.

De acuerdo con la norma ASTM D242/D242M se recomienda esta prueba para el control de calidad a los fillers, tal como se mencionó en el numeral 2.1.1. Se recuerda que dicha norma plantea que el índice de plasticidad no es apropiado para la cal hidratada y el cemento Portland, situación que se debe a la particular acción cementante ante el agua de estos productos. Las pruebas se realizaron de acuerdo con los protocolos indicados por las NTE INEN 691 y 692. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8. Resultados de las pruebas de consistencia**

LÍMITES DE CONSISTENCIA					
FILLER	F1	F2	F3	F4	F5
LÍMITE LÍQUIDO (LL)	NO	NO			
LÍMITE PLÁSTICO (LP)	NO	NO			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	NO	NO	N.P.	N.P.	N.P.

#### Análisis de resultados en la consistencia

En realidad, esta prueba no aportó mucha información para contrastar. Todos los fillers naturales empleados (F3, F4 y F5) resultaron ser no plásticos (N.P.).

#### **3.2.3 Prueba de Azul de Metileno**

El propósito de esta prueba es detectar y cuantificar la presencia de arcillas, que pueden afectar la adherencia entre el asfalto y los agregados en las mezclas asfálticas, comprometiendo la durabilidad del pavimento. El ensayo consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión del filler en agua. Después de cada dosis se comprueba la absorción de solución colorante por una parte de la muestra, realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre.

La prueba se realizó según el procedimiento de la norma INV E-235-07, la que establece cierto criterio de calificación para los resultados que se obtengan. Ver Tabla 9.

**Tabla 9. Valor de azul de metileno y el comportamiento de la mezcla asfáltica**

Valor de Azul de Metileno (mg/g)	Desempeño anticipado
≤ 6	Excelente
7-12	Marginalmente aceptable
13-19	Problemas/Posible falla
≥ 20	Fallado

Fuente: INV E-235-07. Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales. Página 2. Instituto Nacional de Vías. Colombia.

Los resultados obtenidos con los fillers estudiados se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10. Resultados de las pruebas de azul de metileno**

PRUEBA DE AZUL DE METILENO					
FILLER	F1	F2	F3	F4	F5
VALOR OBTENIDO (mg/g)	0,50	4,50	5,30	7,00	4,30
COMPORTAMIENTO ESPERADO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	Excelente	Excelente	Excelente	Marginalmente aceptable	Excelente

#### Análisis de resultados en los valores de azul de metileno

Los valores obtenidos mostraron una gran variabilidad lo que demuestra su efectividad para la evaluación de los fillers. El rango obtenido abarcó desde 0.5 mg/g para el F1 hasta 7.0 mg/g para el F4. Según la normativa INV E-235-07 a dicho último filler que es una pizarra tobácea (F4) le correspondería un comportamiento marginalmente aceptable para su empleo en mezcla asfáltica.

#### **3.2.4 Ensayo de densidad**

Se determinó por el procedimiento clásico empleando el volumenómetro o frasco Le Chatelier, que se recoge en la norma INV E-307-13. Empleando

kerosene o nafta, se llena el frasco de Le Chatelier hasta un punto determinado y se toma una lectura inicial de volumen. Luego se agrega una masa conocida de filler y se toma la lectura del volumen que alcanza el líquido en el frasco debido al desplazamiento que sufre. Se divide la masa de filler añadida por la diferencia de lecturas de volumen. La prueba se realiza a una temperatura constante de 20°C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11. Resultados de las pruebas de densidad**

Filler	Ma, g	Mt, g	Mf, g	Va, cm <sup>3</sup>	Vt, cm <sup>3</sup>	Vf, cm <sup>3</sup>	Df, g/cm <sup>3</sup>
F1	328,12	376,05	47,93	0,5	21	20,5	2,338
F2	329,59	393,22	63,63	0,4	22,4	22,0	2,892
F3	328,30	391,94	63,64	0,7	22,7	22,0	2,893
F4	340,48	394,62	54,14	0,5	22,0	21,5	2,518
F5	329,6	388,77	59,17	0,4	21,8	21,4	2,765

#### SIMBOLOGÍA:

- Ma: Masa frasco con kerosene, g
- Mt: Masa frasco con kerosene más filler, g
- Mf: Masa de filler añadido (Mt-Ma), g
- Va: Lectura inicial en el volumenómetro, cm<sup>3</sup>
- Vt: Lectura final en el volumenómetro, cm<sup>3</sup>
- Vf: Volumen del filler (Vt-Va), cm<sup>3</sup>
- Df: Densidad del filler (Mf/Vf), g/cm<sup>3</sup>

#### Análisis de resultados en las pruebas de densidad

Se obtuvieron valores de densidad muy variables, entre 2.338 g/cm<sup>3</sup> para la cal (F1) hasta 2.893 g/cm<sup>3</sup> para el basalto (F3). Por cierto, este último muy parecido

a la densidad del cemento Portland (F2) que fue de 2.892 g/cm<sup>3</sup>. Debe notarse que estas diferencias pueden tener grandes implicaciones negativas cuando se trabaja en los diseños con las relaciones filler/betún en peso.

### 3.2.5 Concentración crítica

La norma INV E-745-13 describe el procedimiento para determinar la concentración crítica del filler en mezclas asfálticas. Este ensayo identifica el punto crítico en el que la mezcla del filler y el asfalto alcanza una transición entre un comportamiento fluido y uno sólido, o sea, en la que el mástico deja de fluir libremente y se comporta como un material cohesivo. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12. Resultados de las pruebas de concentración crítica**

Filler	m, g	Df, g/cm <sup>3</sup>	V, cm <sup>3</sup>	Cc
F1	4,0	2,338	9,3	0,184
F2	8,0	2,892	10,9	0,254
F3	9,0	2,893	10,0	0,311
F4	9,0	2,518	9,0	0,397
F5	10,0	2,765	8,7	0,416

#### SIMBOLOGÍA:

- m: Masa de filler, g
- Df: Densidad del filler, g/cm<sup>3</sup>. Tomado de la prueba anterior
- V: Volumen ocupado por el filler sedimentado, cm<sup>3</sup>
- Cc: Concentración crítica de filler (m/ (Df. V) )

### Análisis de resultados de la concentración crítica

La concentración crítica (Cc) se define como el estado en que los granos de filler están en el seno del asfalto lo más suelto posibles, pero en contacto entre sí y representa la dosificación máxima que permite conservar la flexibilidad de la mezcla. Los valores obtenidos variaron entre un valor muy bajo de 0.184 para la cal (F1) y uno más elevado de 0.416 para la arena limosa (F5).

### 3.2.6 Composición química

La composición química de los fillers se determinó empleando parcialmente la los métodos básicos de la norma ASTM C114-18, pero auxiliada por un espectrómetro XRF. Ver Tabla 13.

**Tabla 13. Composición química de los fillers**

Componentes químicos	Porcentajes en peso				
	F1	F2	F3	F4	F5
SiO <sub>2</sub>	7,09	21,94	49,03	57,29	58,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,32	3,80	13,50	13,00	13,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,28	2,29	11,40	8,79	9,28
CaO	64,87	53,29	10,11	6,25	4,77
MgO	0,29	0,90	4,95	1,36	2,23
SO <sub>3</sub>	0,40	1,90	1,20	0,20	0,00
K <sub>2</sub> O	0,05	0,18	0,16	0,95	0,91
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,13	2,20	2,97	2,21
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,20	0,69	0,87	1,15
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24	0,13	0,12	0,22	0,17
LOI	23,86	14,57	5,86	7,62	5,64
TOTAL	98,45	99,33	99,22	99,52	98,50

### Análisis de resultados obtenidos de la composición química

Puede observarse que los dos primeros fillers (F1 y F2) presentan una composición básica con altos porcentajes de CaO, mientras que en los tres restantes (F3, F4 y F5) predomina una composición ácida con altos porcentajes de cuarzo o SiO<sub>2</sub>. Desde el punto de vista de la calidad son preferibles los fillers básicos que forman enlaces más fuertes con el betún, mejorando el envejecimiento de la mezcla y su comportamiento ante el agua.

### 3.3 Estudio del cemento asfáltico empleado

Las pruebas al cemento asfáltico de referencia, utilizado también en la preparación de los másticos, fueron las indicadas en la norma INEN-2515, Enmienda 1. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14. Resultados de las pruebas al cemento asfáltico**

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS INEN 2515		RESULTADOS
			AC-20	AC-30	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	244
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	371
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	299
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1,0148
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	ASTM D-5			64
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D-36			48,2
Índice de penetración		ASTM D 5/D5M	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-1,1
<b>RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)</b>					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1250
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	-0,22
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	37

#### Análisis de resultados

Se observa que el ligante supera ligeramente el rango de viscosidad para clasificarse como AC 20, entrando en el rango de AC 30. Por otra parte, el residuo RTFOT no cumple en dos pruebas con los valores especificados, mostrando una viscosidad elevada y una ductilidad baja, resultados que son típicos de los asfaltos producidos en la Refinería de Esmeraldas y que constituyen sus principales insuficiencias (Vila & Mera, 2024).

### 3.4 Estudio de los másticos preparados con los diferentes fillers

#### 3.4.1 Preparación de los másticos en el laboratorio

La dosificación de los másticos se realizó considerando criterios volumétricos y no de pesos, dadas las grandes diferencias entre las densidades de los diferentes fillers. Para ello se consideró mantener en todos los másticos una

relación  $C_v/C_c$  igual a uno. Se recuerda que concentraciones  $C_v$  por encima de  $C_c$  hacen que el mástico comience a perder su carácter viscoso y por ende la evaluación de varias propiedades basadas en pruebas similares al cemento asfáltico perderían su significado. En la Tabla 15, se muestra la determinación de las dosificaciones. Como identificación a los másticos se empleó el criterio de que al filler F1 le corresponderá el mástico M1, y así sucesivamente.

**Tabla 15. Dosificación de másticos**

Masa de asfalto, g	800,0				
Densidad del asfalto, g/cm <sup>3</sup>	1,0148				
Volumen de asfalto, cm <sup>3</sup>	788,3				
<b>MÁSTICO</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>
<b>FILLER</b>	Cal	Cemento	Basalto	Pizarra	Arena limosa
Densidad del filler, g/cm <sup>3</sup>	2,338	2,892	2,893	2,518	2,765
Concentración crítica, $C_c$	0,184	0,254	0,311	0,397	0,416
$C_v/C_c =$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Concentración volumétrica, $C_v$	0,184	0,254	0,311	0,397	0,416
<b>TANTEO Volumen de filler, cm<sup>3</sup></b>	<b>178,0</b>	<b>268,0</b>	<b>356,0</b>	<b>518,0</b>	<b>561,0</b>
COMPARACIÓN con $C_v$	0,184	0,254	0,311	0,397	0,416
Masa necesaria de filler, g	416,2	775,1	1029,9	1304,3	1551,2

Para la preparación de los másticos los fillers empleados se sometieron a un proceso de secado en horno a 110°C durante 24 horas. Ver Figura 22.



**Figura 22. Colocación de bandejas en horno con filler para secado**

Fuente: Autor

Luego la temperatura se elevó a 150°C durante aproximadamente 2 horas, para la mezcla con el cemento asfáltico a similar temperatura. Se empleó para el procedimiento un taladro eléctrico con una paleta mezcladora del tipo que regularmente se usa para la preparación de pinturas. La forma de mezclado se muestra en la Figura 23. El peso total del filler añadido se obtuvo mediante vertidos parciales del mismo al recipiente de mezclado, con un tiempo total de 10 minutos hasta alcanzar una mezcla uniforme.



**Figura 23. Proceso de mezclado realizado**

Fuente: Autor

### **3.4.2 Pruebas realizadas a los másticos**

Las pruebas a los másticos se corresponden en general con las del cemento asfáltico convencional, con la excepción de la inclusión de la prueba de recuperación elástica que corresponde a asfaltos modificados con polímeros. En el caso de la viscosidad, realizada con un viscosímetro Brookfield, se seleccionaron 3 temperaturas: 115, 135 y 155°C dada la alta consistencia de los másticos. Ver Figura 24. En la Tabla 16, se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos, tanto para las pruebas a másticos no envejecidos como envejecidos. El proceso de envejecimiento se realizó mediante la aplicación de la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFOT: Rolling Thin-Film Oven Test) de acuerdo con la norma ASTM D-2872-22.



Figura 24. Viscosidad del mástico M4 sin envejecer a 155°C

Fuente: Autor

Tabla 16. Resumen de resultados en los másticos ensayados

ENSAYO	MÁSTICO				
	M1	M2	M3	M4	M5
<b>SIN ENVEJECIMIENTO</b>					
Viscosidad, 115 °C, Pa.s	3,63	3,30	10,10	120,00	38,08
Viscosidad, 135 °C, Pa.s	1,11	1,03	2,90	23,00	11,83
Viscosidad, 155 °C, Pa.s	0,43	0,39	1,13	5,90	4,52
Gravedad específica 25°C/25°C	1,251	1,478	1,588	1,589	1,736
Penetración, 25 °C, 100 g, dmm	36	33	31	25	27
Punto de ablandamiento, °C	58	54	61	81	74
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm	18,5	28,3	14,1	2,0	4,3
Recuperación elástica, 25 °C, %	3,9	7,2	2,2	0,8	1,4
<b>CON ENVEJECIMIENTO</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>
Viscosidad, 115 °C, Pa.s	9,40	9,77	27,50	218,00	122,00
Viscosidad, 135 °C, Pa.s	2,38	2,45	6,33	44,67	19,83
Viscosidad, 155 °C, Pa.s	0,83	0,80	2,35	10,80	7,13
Gravedad específica 25°C/25°C	1,253	1,481	1,573	1,586	1,717
Penetración, 25 °C, 100 g, dmm	24	24	23	19	23
Punto de ablandamiento, °C	65	66	70	90	81
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm	7,6	5,5	3,3	1,0	1,3
Recuperación elástica, 25 °C, %	3,3	2,8	1,4	0,3	1,1

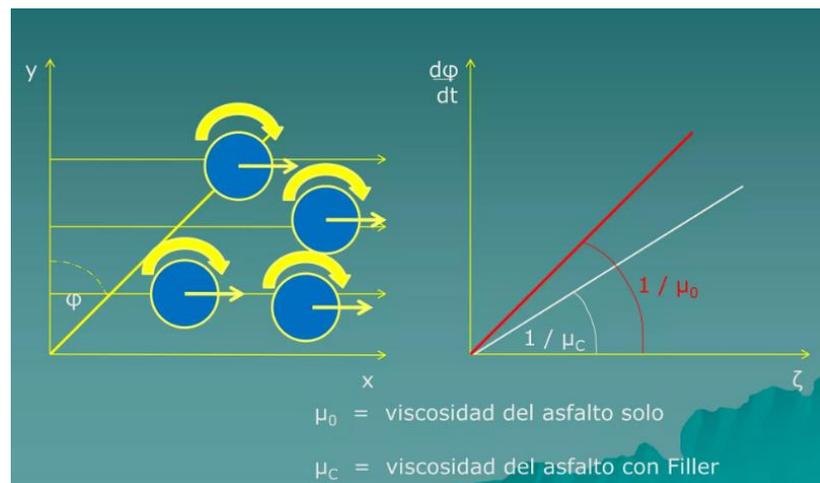
Fuente: Autor

### 3.4.2.1 Prueba de viscosidad

La viscosidad puede definirse como la relación entre el esfuerzo de corte aplicado ( $\zeta$ ) y la gradiente de velocidad de deformación ( $d\phi/dt$ ). Es decir:

$$\mu = \zeta / (d\phi/dt)$$

Si a un cemento asfáltico se le añade cierta cantidad de filler, con granos supuestamente esféricos en la Figura 25, bajo un mismo ritmo de incremento del esfuerzo de corte la gradiente de velocidad se haría más baja en el mastico (asfalto + filler), lo que implicaría una viscosidad más alta en el mismo.

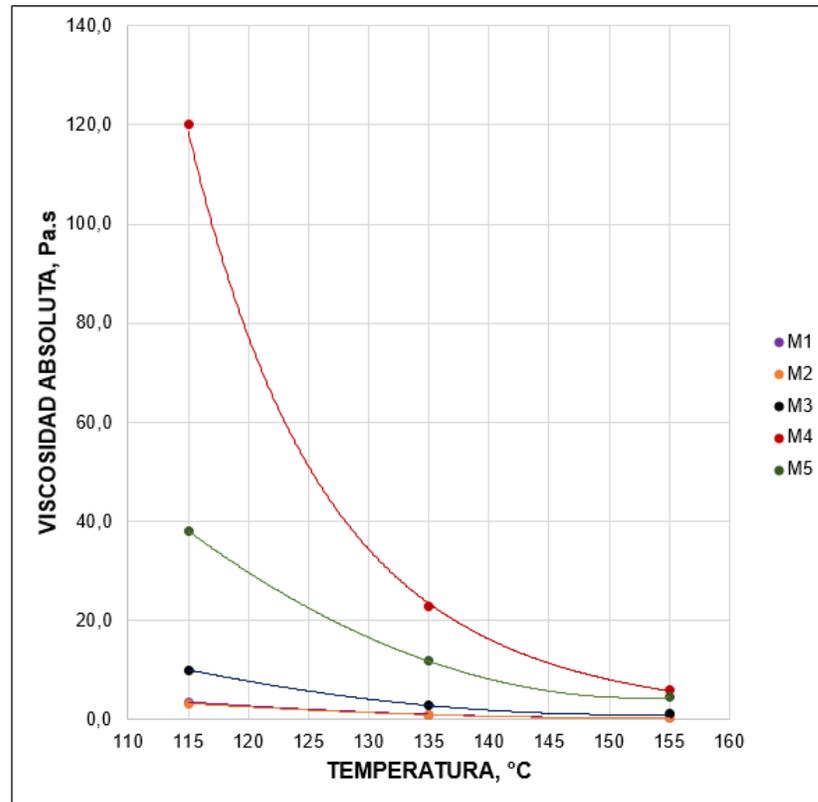


**Figura 25. Representación del efecto del filler en la viscosidad**

Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/filler-244504501/244504501#9>

Es conocido que a mayor viscosidad el material es más espeso, mientras que una menor viscosidad indica que fluye más fácilmente. A temperaturas más altas, la viscosidad disminuye, lo que permite mayor trabajabilidad del material durante el mezclado y la compactación de la mezcla asfáltica.

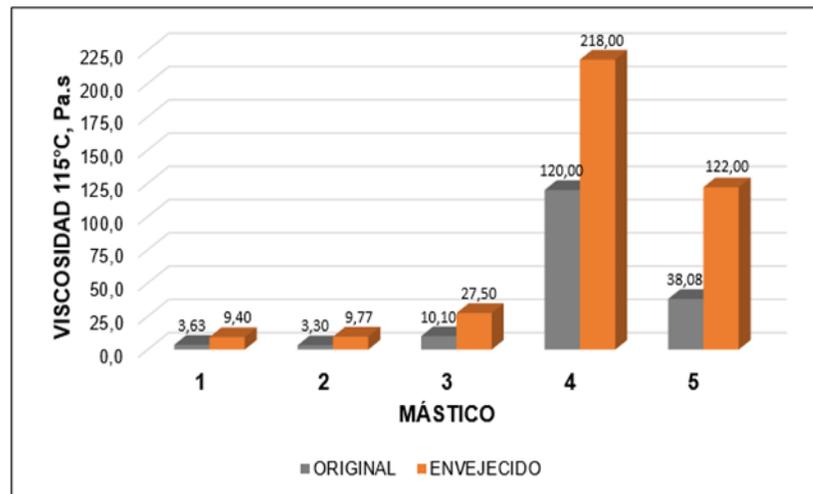
En la Figura 26 se muestra el comportamiento de las viscosidades en los másticos sin envejecer. Notar que el incremento más elevado de la viscosidad en el asfalto con los fillers se detecta en el M4 y el más bajo, de manera casi coincidente, en los másticos M1 y M2.



**Figura 26. Variación de la viscosidad en los másticos sin envejecer**

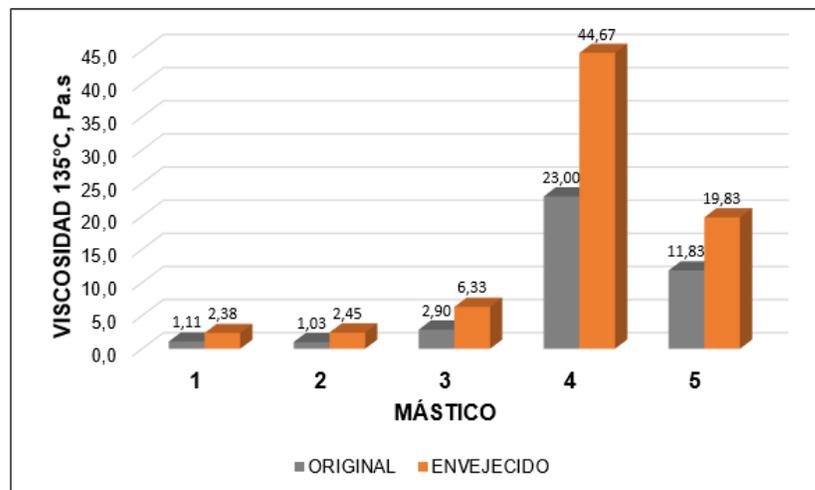
Fuente: Autor

El impacto del envejecimiento en la viscosidad a las tres temperaturas utilizadas aparece en las figuras 27, 28 y 29.



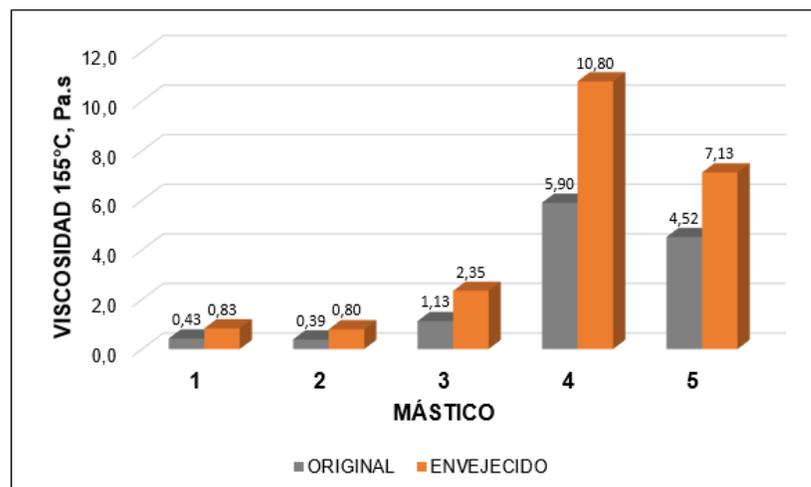
**Figura 27. Viscosidades sin y con envejecimiento a 115°C**

Fuente: Autor



**Figura 28. Viscosidades sin y con envejecimiento a 135°C**

Fuente: Autor



**Figura 29. Viscosidades sin y con envejecimiento a 155°C**

Fuente: Autor

#### Análisis de resultados de la viscosidad

Si bien en la mayoría de los casos, y para todas las temperaturas, se obtuvieron viscosidades en los másticos envejecidos que duplicaban o triplicaban a las viscosidades sin envejecimiento, es importante destacar:

- un comportamiento muy uniforme en cada uno de los másticos respecto a las temperaturas, lo que se observa en las figuras 27, 28 y 29.
- los elevados valores de viscosidad que se obtuvieron principalmente en el mástico M4 y en menor medida en el M5. Por ejemplo, para la temperatura de 135°C (Figura 28), en el M4 la viscosidad absoluta se incrementó de 23.0 a 44.7 Pa. s con el envejecimiento y en el M5 de 11.8 a 19.8 Pa.s. Por otra parte, en los restantes másticos los mayores valores envejecidos no superan los 6.3 Pa.s.

Estos resultados indican que de fabricarse mezclas asfálticas con los másticos M4 y M5 las mismas tendrían mayor rigidez que las correspondientes a M1, M2 y M3, lo que implicaría mayor resistencia a las deformaciones plásticas pero

menor resistencia al agrietamiento, que es el principal problema de nuestras capas asfálticas.

### 3.4.2.2 Prueba de gravedad específica

Este ensayo determina la relación entre el peso de un volumen de asfalto o mástico a 25°C y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. La muestra es colocada en un picnómetro calibrado. El picnómetro y la muestra son pesados, luego queda un remanente de volumen el cual es completado con agua. El picnómetro lleno es colocado en un baño a temperatura y se determina su masa. La densidad de la muestra se calcula considerando la masa de la muestra y la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno. En la Figura 30 se muestra el picnómetro y la balanza de precisión empleada.

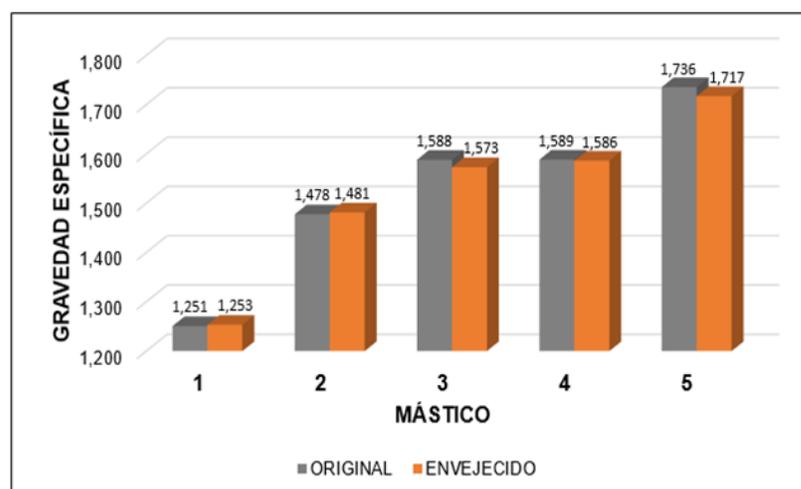


**Figura 30. Equipos empleados para determinar la gravedad específica**

Fuente: Autor

La gravedad específica es útil para el cálculo de proporciones en la mezcla y la determinación de propiedades volumétricas, pero debe considerarse que en el

proceso de envejecimiento su valor variará debido a la oxidación y pérdida de componentes volátiles, entre otros. Los resultados obtenidos en los másticos antes y después del envejecimiento en RTFOT se muestran en la Figura 31.



**Figura 31. Resultados de las pruebas de gravedad específica**

Fuente: Autor

#### Análisis de resultados de la gravedad específica

Lo más llamativo con estos resultados fueron las bajas gravedades específicas obtenidas en el mástico M1 respecto a los otros másticos y los altos valores generados en M5. Por otra parte, se observa que en M1 y M2 el proceso de envejecimiento provocó un pequeño incremento en la gravedad específica, mientras que en los restantes másticos una ligera disminución. Este comportamiento se considera asociado a la composición química de los fillers en su interacción con el asfalto.

#### **3.4.2.3 Prueba de penetración**

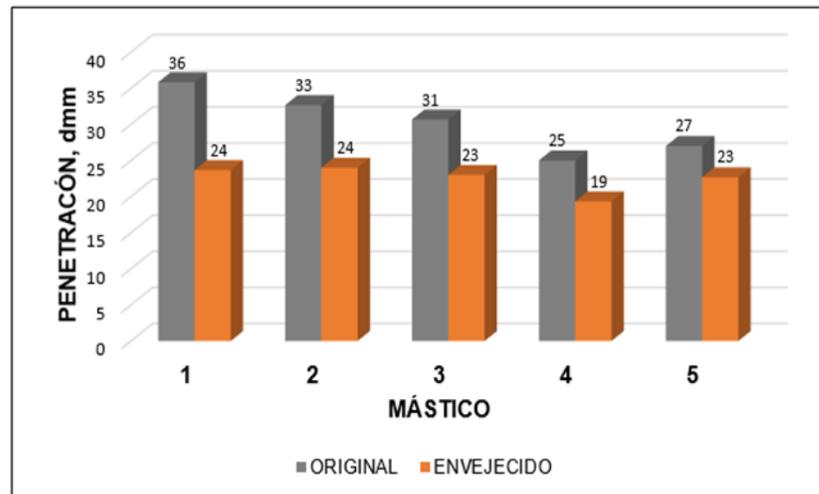
Este ensayo mide la profundidad que penetra una aguja estándar en una muestra de ligante asfáltico o mástico en ciertas condiciones controladas, que usualmente son: muestra a 25°C y penetración bajo 100g de carga durante 5 segundos. Ver Figura 32.



**Figura 32. Penetración del mástico M4 sin envejecer**

Fuente: Autor

El valor de la penetración es una medida empírica de la consistencia del material, valores altos indican que el material asfáltico es más blando y flexible, mientras que bajos indican que el material es más duro y más susceptible al agrietamiento. Con el envejecimiento se produce una disminución de la penetración. En la Figura 33 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 33. Resultados de las pruebas de penetración**

Fuente: Autor

#### Análisis de resultados de la penetración

En los másticos sin envejecer se observa que M1, M2 y M3 presentan un comportamiento aproximadamente parecido, con valores de penetración entre 36 y 31 dmm. El mástico M4 presenta el valor más bajo, de solo 25 dmm, seguido de M5 con 27 dmm, es decir, estos son los másticos de mayor dureza. En todos los casos se presentó una marcada disminución de la penetración producto del proceso de envejecimiento, aunque la mayor disminución ocurrió en el M1, con una caída de 12 dmm. El comportamiento más problemático lo presenta el M4 que pasa de 25 a 19 dmm al envejecerse.

#### **3.4.2.4 Prueba de punto de ablandamiento (anillo y bola)**

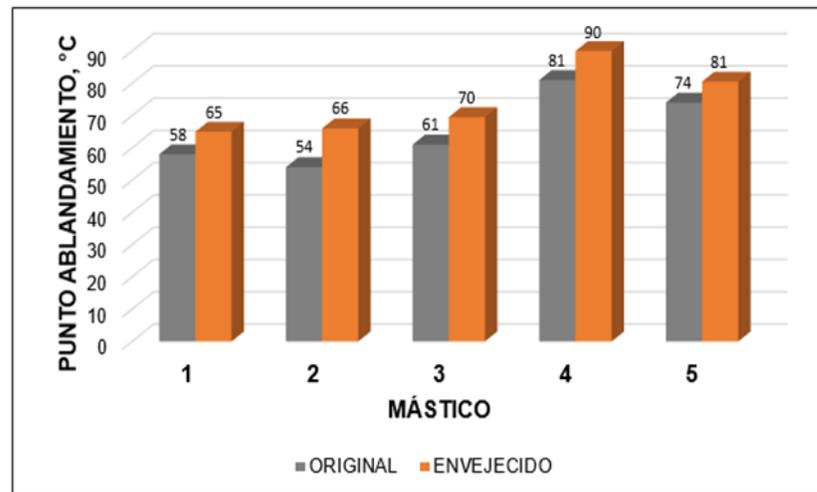
En esta prueba se determina la temperatura a la cual el asfalto o mástico se ablanda y comienza a fluir. Esto es crucial para evaluar el comportamiento del material a altas temperaturas. Ver dispositivo utilizado en la Figura 34.



**Figura 34. Inicio de prueba de punto de ablandamiento Anillo y Bola**

Fuente: Autor

Al realizar el ensayo sin envejecer el punto de ablandamiento es más bajo, lo cual indica que a temperaturas más bajas se ablanda. Mientras que, con el material envejecido, el punto de ablandamiento aumenta ya que el material se vuelve más resistente al flujo debido a la pérdida de componentes volátiles y oxidación. Pueden observarse en la Figura 35 los resultados obtenidos.



**Figura 35. Resultados de las pruebas de punto de ablandamiento**

Fuente: Autor

#### Análisis de resultados del punto de ablandamiento

En general se observa que M1, M2 y M3 presentan un comportamiento aproximadamente parecido, con valores entre 54 y 61°C sin envejecer y entre 65 y 70°C ya envejecidos. Sin embargo, los valores del punto de ablandamiento en M4 y M5 son muy elevados, en especial luego de envejecidos. El comportamiento más problemático, al igual que en la penetración, lo presenta el M4 con valores de 81 y 90°C respectivamente.

#### **3.4.2.5 Prueba de ductilidad**

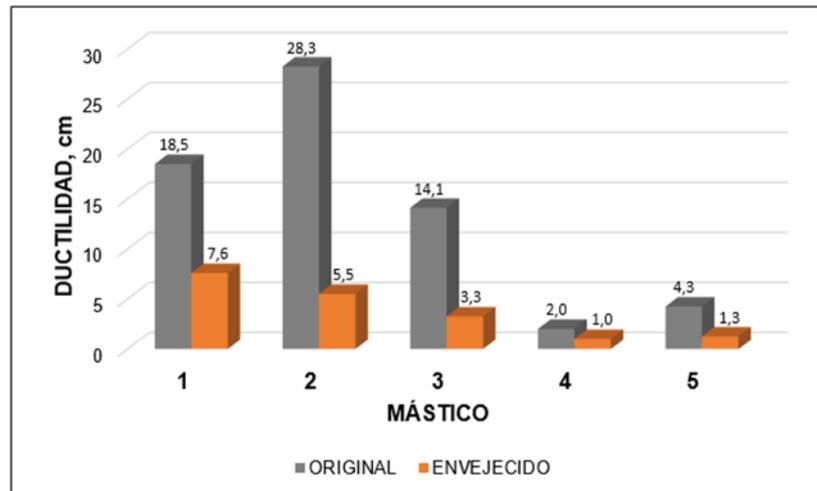
Este ensayo mide la capacidad del asfalto o mástico de estirarse sin romperse, reflejando su flexibilidad y resistencia a la fractura. La muestra moldeada se estira a una velocidad de 5cm/min a 25°C hasta que se rompe. Ver Figura 36.



**Figura 36. Prueba de ductilidad en M2 con envejecimiento**

Fuente: Autor

La ductilidad es mayor en el material sin envejecer, lo que indica una mayor flexibilidad y menos propensa a agrietarse, mientras que con el material envejecido la ductilidad disminuye porque el asfalto se vuelve más frágil y rígido, lo que puede llevar a problemas como el agrietamiento por fatiga. Ver en la Figura 37 los resultados obtenidos.



**Figura 37. Resultados de las pruebas de ductilidad**

Fuente: Autor

#### Análisis de resultados de la prueba de ductilidad

Los mejores resultados se han obtenido con los másticos M1 y M2. Si bien M2 presenta por mucho la mayor ductilidad en el material sin envejecer (28.3 cm), M1 conserva la mayor ductilidad luego del envejecimiento (7.6 cm). Los peores resultados, que sin dudas pueden comprometer el comportamiento de la mezcla asfáltica, pertenecen a los másticos M4 y M5, presentando el M4 los valores más bajos.

#### **3.4.2.6 Prueba de recuperación elástica**

Esta permite evaluar la capacidad del asfalto o mástico de recuperar su forma original después de ser deformado, lo cual es una medida de su elasticidad. El equipo empleado se muestra en la Figura 38.



**Figura 38. Ensayo de recuperación elástica en el mástico M4 envejecido**

Fuente: Autor

Con el material sin envejecer la recuperación elástica es mayor, lo que significa que puede absorber deformaciones sin sufrir daños permanentes. Por otra parte, debido al endurecimiento del material con el envejecimiento, la recuperación elástica se reduce, es decir, lo hace menos capaz de resistir deformaciones permanentes y aumenta el riesgo de grietas. Ver resultados en la Figura 39.

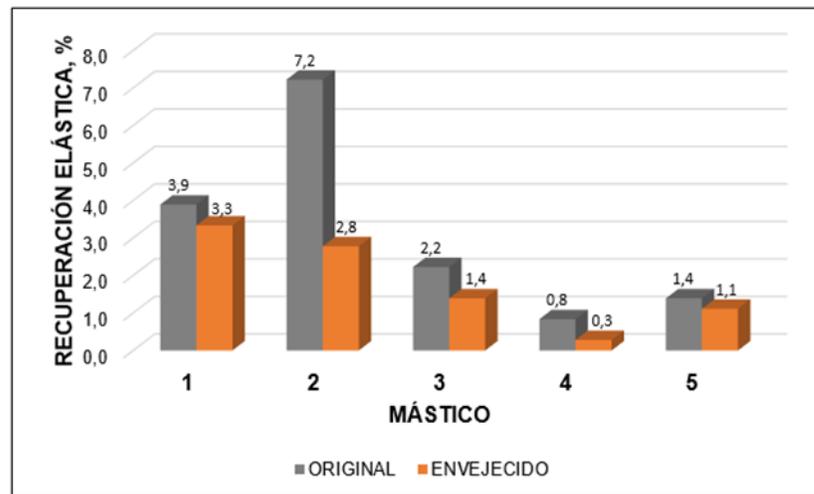


Figura 39. Resultados de las pruebas de recuperación elástica

Fuente: Autor

### Análisis de resultados de la recuperación elástica

Los resultados de esta prueba siguen la tendencia obtenida en la prueba de ductilidad. Los mejores resultados los presentan los másticos M1 y M2. Si bien M2 presenta la mayor recuperación elástica en el material sin envejecer (7.2%), M1 conserva la mayor recuperación luego del envejecimiento (3.3%). Los resultados más bajos, que indican másticos muy rígidos, pertenecen a los másticos M4 y M5, teniendo el M4 el peor comportamiento.

## **3.5 Valoración de la calidad de los fillers y másticos utilizados**

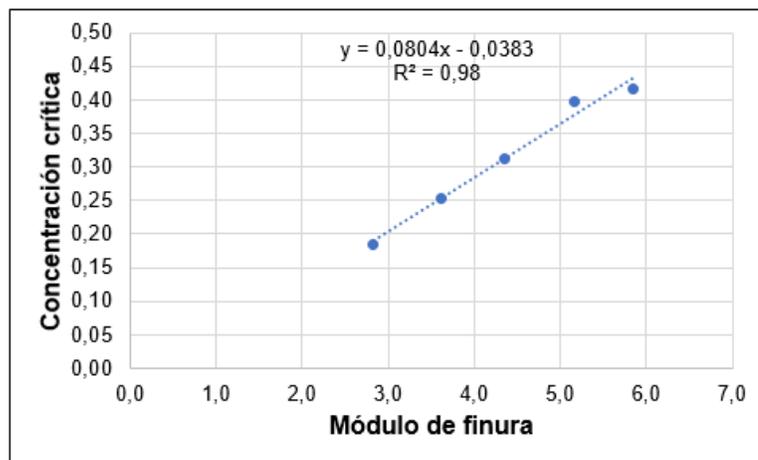
### **3.5.1 Fillers**

En general los fillers evaluados presentan dos propiedades que definen su comportamiento, la granulometría y la composición química. Evidentemente la granulometría permite que el filler actúe como un relleno respecto a los agregados de mayor tamaño disminuyendo los espacios libres o vacíos entre partículas, esto permite mejorar la estabilidad de la mezcla y su durabilidad, ya que dificulta la entrada de agentes agresivos como el agua. Los materiales

donde se detectaron granulometrías más finas fueron precisamente los manufacturados, es decir, F1 (cal) y F2 (cemento Portland).

En nuestro estudio, se encontró una llamativa relación lineal entre el módulo de finura asociado a la granulometría y la concentración crítica. Ver Figura 40. Es decir, a menor módulo de finura se espera una menor concentración crítica de filler y viceversa. Si bien esta relación debe comprobarse con otras informaciones existentes o estudios adicionales, potencialmente nos permitiría una estimación de la Cc sin tener que hacer pruebas adicionales.

**Figura 40. Relación entre el módulo de finura y la concentración crítica**



**Figura 41. Relación entre el módulo de finura y la concentración crítica**

Fuente: Autor

Los fillers también mejoran la cohesión del asfalto y su adherencia con los agregados. En este caso la cal (F1) y el cemento Portland (F2), que son fillers clásicos para mezclas asfálticas, tanto por su finura como por su composición química, permiten garantizar ambas propiedades. Notar que en la Tabla SSS los contenidos de CaO más elevados son precisamente 64,87% para F1 y 53,29% para F2. Este componente es fundamental para películas de asfalto muy cohesivas, adherentes y más resistentes al envejecimiento en las mezclas.

Sin embargo, para F3, F4 y F5 el porcentaje de CaO disminuye notablemente y se incrementa hasta valores muy elevados el porcentaje de SiO<sub>2</sub>.

Se recuerda que: “los agregados son comúnmente clasificados según su afinidad con el agua como hidrofílicos, es decir, aquellos con mayor preferencia al agua que al asfalto, o hidrofóbicos, en este caso aquellos con mayor preferencia al asfalto que al agua. Comúnmente se acepta que los agregados hidrofílicos son de naturaleza química ácida, con un alto contenido de SiO<sub>2</sub>. Por otra parte, los agregados hidrofóbicos son químicamente básicos o alcalinos con un bajo contenido de SiO<sub>2</sub>” (Vila & Jaramillo, 2020).

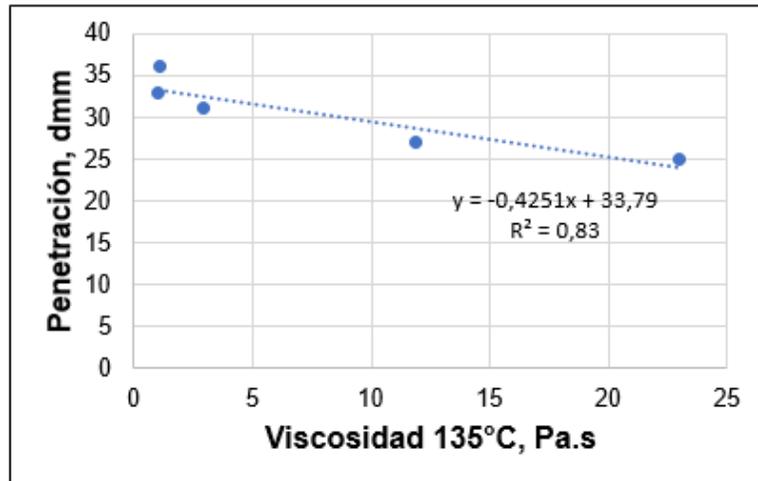
El contenido de CaO en F1 y F2 es mayor que en los restantes fillers estudiados; por lo tanto, su alcalinidad es mayor. En la preparación de una mezcla asfáltica, el componente alcalino reacciona con el componente ácido del asfalto para producir una sustancia con fuerte adhesión (Guo et al., 2017). Esto resulta en una fuerte unión del agregado y el asfalto, que mejora también su resistencia ante el daño por el agua o peladuras. Sin dudas, el empleo de fillers tipo F1 o F2 sería más conveniente en las mezclas que los restantes.

Otro componente importante asociado a la composición química son los materiales arcillosos, que en este trabajo se evaluaron por los límites de consistencia y por el valor de azul de metileno. Los límites de consistencia mostraron sus limitaciones para esta identificación, de hecho, tampoco aplicable a materiales cementantes. La prueba que resultó ser más efectiva fue la de azul de metileno, que mostró un valor sumamente bajo para F1 (0.50 mg/g) y no tan bajo para F2 (4.50 mg/g). El filler F4 (7.00 mg/g) resultó ser el más problemático.

### **3.5.2 Másticos**

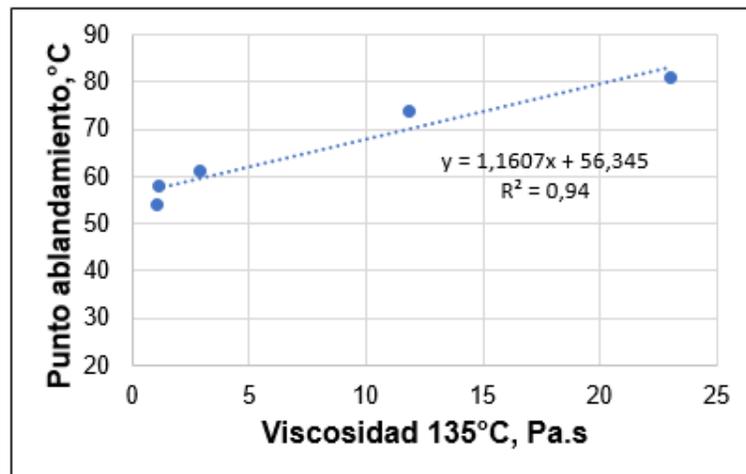
Las pruebas a los másticos comprendieron dos direcciones fundamentales, evaluar su consistencia y de alguna forma su capacidad elástica. Para la consistencia se emplearon las pruebas de viscosidad, penetración y punto de

ablandamiento. En las figuras 41,42 y 43, se muestran las relaciones obtenidas entre los resultados de dichas pruebas en los másticos sin envejecer.



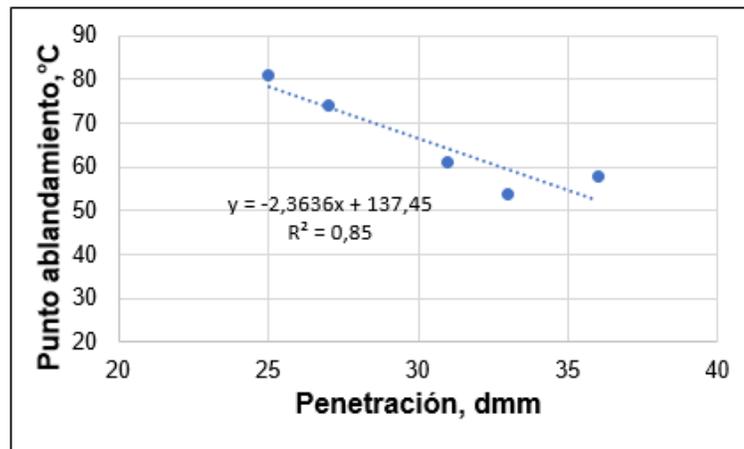
**Figura 42. Relación viscosidad versus penetración**

Fuente: Autor



**Figura 43. Relación viscosidad versus punto de ablandamiento**

Fuente: Autor



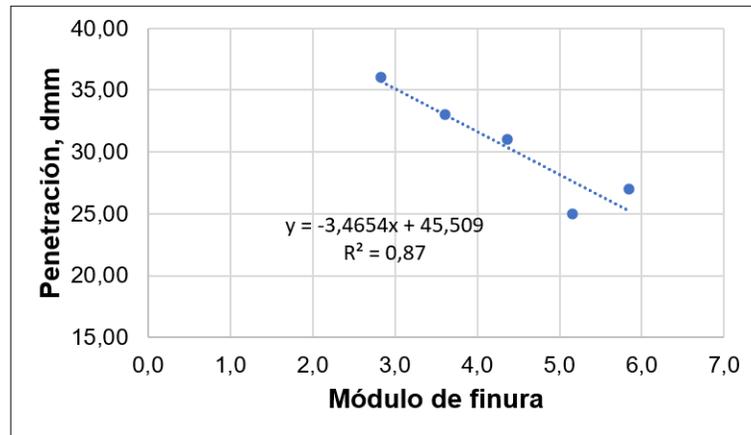
**Figura 44. Relación penetración versus punto de ablandamiento**

Fuente: Autor

En las figuras 41 y 42 se relaciona la viscosidad a 135°C medida en el viscosímetro Brookfield, con las pruebas de penetración y punto de ablandamiento, que son pruebas más simples que se realizan comúnmente en los laboratorios de materiales de construcción. Los coeficientes de determinación  $R^2$  obtenidos fueron 0.83 y 0.94 respectivamente, mostrando ambos un ajuste adecuado, pero mejor aún para el punto de ablandamiento. En la Figura 43 se evaluó la relación entre la penetración y el punto de ablandamiento, obteniéndose un  $R^2$  de 0.85, también adecuado. Estos resultados permiten visualizar que, en la práctica, el empleo de cualquiera de estos ensayos sería efectivo para evaluar la consistencia de un mástico.

En general los másticos M1, M2 y en menor medida M3, tuvieron un mejor comportamiento en las pruebas de consistencia, es decir, que los másticos resultantes de mezclar el asfalto con los fillers respectivos fueron menos duros y rígidos que los identificados como M4 y M5. Para chequear la consistencia de los másticos respecto a la finura de los fillers, utilizando su módulo de finura, se llegaron a los resultados de la Figura 44. Puede observarse en la Figura 44, que a mayor módulo de finura (materiales más gruesos) la penetración disminuye, o

sea, se aumenta la consistencia del mástico. Relaciones similares de a mayor módulo de finura mayor consistencia, también se obtuvieron con el punto de ablandamiento y la viscosidad a 135°C, pero con menores coeficientes  $R^2$ , de 0.68 y 0.54 respectivamente.

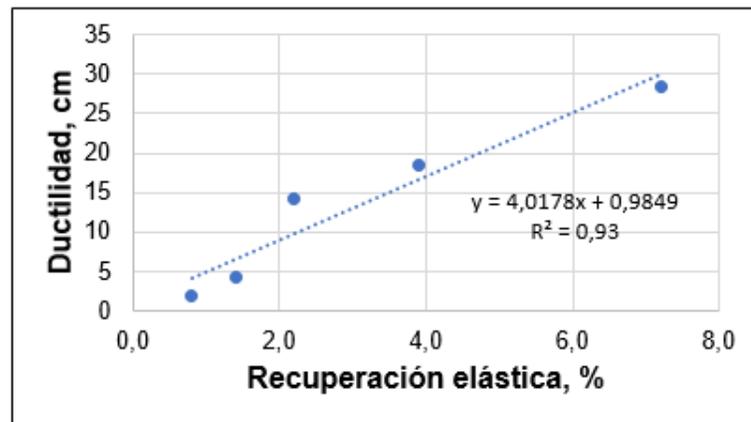


**Figura 45. Módulo de finura versus penetración**

Fuente: Autor

Las pruebas de viscosidad, penetración y punto de ablandamiento también permitieron evaluar el impacto del envejecimiento, aunque este se aprecia de manera más notoria mediante la viscosidad. Por ejemplo, los másticos M1 y M2 alcanzaron en sus muestras envejecidas viscosidades a 135°C de 2.38 y 2.45 Pa.s respectivamente, mientras que la muestra envejecida M4 llegó a alcanzar un valor de 44.67 Pa.s. Se observan en las pruebas de consistencia las bondades de los materiales más finos y con más contenido de CaO.

Las pruebas relacionadas con la capacidad elástica fueron la ductilidad y la recuperación elástica por torsión. En la Figura 45 se presenta la relación obtenida entre los resultados de ambas. Puede verse que el coeficiente  $R^2$  calculado fue de 0.93, que puede considerarse muy bueno, por lo que se considera que en la práctica pudiera emplearse al menos una de estas dos pruebas.



**Figura 46. Relación recuperación elástica versus ductilidad**

Fuente: Autor

Los resultados de las pruebas de ductilidad y recuperación elástica indican un mejor comportamiento para los materiales M1 y M2. Para el caso de las muestras no envejecidas el M2 presentó los mejores resultados, pero en las envejecidas el mejor comportamiento lo tuvo M1, lo que corrobora el buen trabajo de la cal para el control del envejecimiento del asfalto, que provoca su rigidización y pérdida de flexibilidad.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

De las propiedades evaluadas a cinco tipos de fillers, dos que pudieran emplearse como fillers de adición y tres fillers recuperados en distintas plantas, se considera que dos propiedades son las que más impactarán en su futuro comportamiento formando parte del mástico: la granulometría (física) y la composición (química). No obstante, también se consideran de interés la densidad del cemento asfáltico y del filler y la determinación de la concentración crítica del filler.

Los fillers de adición posibles de emplear, es decir, F1 (cal) y F2 (cemento Portland) son los que presentan las granulometrías más finas y por ende los menores módulos de finura, características que asociadas a sus elevados contenidos de CaO favorecen el alcanzar películas de asfalto muy cohesivas, adherentes y más resistentes al envejecimiento en las mezclas y al daño por el agua.

Se determinó una llamativa relación lineal entre el módulo de finura (MF) asociado a la granulometría y la concentración crítica (Cc) que potencialmente permitiría una estimación de la Cc sin tener que hacer pruebas adicionales.

Los ensayos de límites de consistencia o plasticidad para evaluar los materiales arcillosos mostraron sus limitaciones en este estudio. La prueba que resultó ser más efectiva relacionada con la arcilla fue la de azul de metileno, que mostró un valor de 0.50 mg/g para F1 y de 7.00 mg/g para F4, valor muy alto.

En los másticos preparados con una relación Cv/Cc igual a uno, se obtuvo que la mayor consistencia evaluada, bien sea mediante la prueba de viscosidad, penetración o punto de ablandamiento, correspondía a los másticos con fillers

de granulometría más gruesa, en especial M4 y M5. Es decir, dichos fillers causaron una mayor dureza y rigidización en los másticos M4 y M5, lo que provocó adicionalmente un mal desempeño en las pruebas relacionadas con la capacidad elástica (ductilidad y recuperación elástica). En el trabajo se obtuvo una relación lineal entre los resultados de ambas pruebas, por lo que en la práctica pudiera emplearse al menos una de estas dos pruebas para evaluar la capacidad elástica.

Las pruebas de consistencia también permitieron evaluar el impacto del envejecimiento, aunque este se aprecia de manera más notoria mediante la viscosidad. Por ejemplo, los másticos M1 y M2 alcanzaron en sus muestras envejecidas viscosidades a 135°C de 2.38 y 2.45 Pa.s respectivamente, mientras que la muestra envejecida M4 llegó a alcanzar 44.67 Pa.s, un valor sumamente elevado. Los resultados de las pruebas de ductilidad y recuperación elástica indican también un mejor comportamiento para los másticos envejecidos M1 y M2 respecto a M4 y M5, teniendo M3 un comportamiento intermedio. Se observan en las pruebas a másticos envejecidos las bondades de los materiales más finos y con más contenido de CaO.

El trabajo muestra las desventajas de utilizar como único filler los obtenidos por recuperación de los colectores de polvo de las plantas, en especial para mezclas asfálticas cuyo destino son las vías principales del país.

## **4.2 Recomendaciones**

1- Se requiere revisar las exigencias de calidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas más pruebas a los denominados rellenos minerales (fillers). En la Sección 8.11-2.02 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (MOP, 2002) vigente se plantea: "El relleno mineral deberá cumplir con los requisitos especificados en la Norma AASHTO M 17". Dicha norma es similar a la ASTM D 242 descrita en el Capítulo 2 de este estudio y

solo presta atención a la granulometría por tamizado, la plasticidad y el contenido de materia orgánica. Las dos primeras no son trascendentes a efectos prácticos. Lo ideal sería atender a:

- Análisis granulométrico (ASTM D 6444).
- Composición química (ASTM C114). En especial el contenido de CaO.
- Valor de azul de metileno (AASHTO TP 57).

2- A manera de ganar experiencias e información para ajustes posteriores, se recomienda realizar a másticos preparados con relaciones Cv/Cc igual a uno, sin envejecer y con el cemento asfáltico procedente de la Refinería de Esmeraldas, las siguientes pruebas:

Punto de ablandamiento (exigencia tentativa: menos de 70°C).

Ductilidad (exigencia tentativa: más de 10 cm a 25°C y 5 cm/min).

3- Se recomienda al MTOP el analizar a profundidad si el control de las dosificaciones de filler debe realizarse por peso (F/B) o volumen (Cv/Cc). Si bien la primera es la establecida, ante fillers de gravedades específicas disímiles la incidencia en la mezcla sería muy variable.

4- En el Ecuador deben utilizarse fillers de adición en obras de pavimentación asfáltica importantes, o sea, en las vías principales.

## CAPÍTULO V

### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, G. D., Thom, N. H., Osman, S., Huang, H., & Collop, A. C. (2004). A comparison of bitumen/mastic fatigue data from different test methods. Proceedings of the 5th international conference on cracking in pavements, Limoges, France, 5 May 2004
- Al-Hdabi, A. (2016). "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler." *Construction and Building Materials*, 126, 544-551.
- Anderson, D. A., & Goetz, W. H. (1973). Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures, *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, Houston, TX (pp. 37–66).
- Antunes, V., Freire, A. C., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2015). "Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler–bitumen interaction." *Construction and Building Materials*, 76, 322-329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.008>
- Brown, E. R. et al. (2009). *Hot mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. Third Edition. NAPA Research and Education Foundation. Lanham. Maryland.
- Cardone, F., Frigio, F., Ferrotti, G., Canestrari, F., 2015. Influence of mineral fillers on the rheological response of polymer-modified bitumens and mastics. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)* 2 (6), 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.06.003>
- Chandra, S. & Choudhary, R. (2013). Performance characteristics of bituminous concrete with industrial wastes as filler, *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000730)
- Chaudhary, M., Saboo, N., Gupta, A., Hofko, B., & Steineder, M. (2020). Assessing the effect of fillers on LVE properties of asphalt mastics at intermediate temperatures. *Materials and Structures*, 53(4), 1–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01532-6>
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., & Liu, C. H. (2011). "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture." *Construction and Building Materials*, 25(4), 1532-1536 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>

- Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G. & Romeo, E. (2020). Role of mineral filler in asphalt mixture, *Road Materials and Pavement Design*.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351>
- Choudhary, J., Kumar, B., Gupta, A., 2020. Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: a review. *Constr. Build. Mater.*, 234 (2020), Artic.,117271.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- Clopotel, C., & Bahia, H. (2013). “The effect of bitumen polar groups adsorption on mastics properties at low temperatures.” *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 38-51.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774745>
- D. Movilla, A. C. Raposeiras, D. Castro, M. A. Calzada, A. Vega. (2014). Optimización de la adhesividad y la adherencia en mezclas bituminosas en función de la naturaleza del filler y la dotación de riego utilizada. Cuaderno Tecnológico de la PTC N° 01/2014. España.
- Diab, A., & Enieb, M. (2018). “Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales.” *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 213-224.
- Dukatz, E., and D. Anderson. The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior of Asphalt and Asphaltic Concrete. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*. Volume 49. 1980.
- Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). “Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction.” *Road Materials and Pavement Design*, 11(1), 281-303. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690335>
- Ferrigno, T. H. (1987). *Principles of filler selection and use*. Van Nostrand Reinhold.
- Ferrigno, T.H. (1987) *Principles of Filler Selection and Use*. In: Katz, H.S. and Milewski, J.V., Eds., Van Nostrand Reinhold, New York, 80-97.
- Grabowski, W., Wilanowicz, J. (2008). The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics. *Mater Struct* 41, 793–804. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9283-4>
- Guo, M., Tan, Y., Hou, Y., Wang, L., & Wang, Y. (2017). Improvement of evaluation indicator of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers. *Construction and Building Materials*, 151, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.003>
- Guo, M.; Tan, Y.; Yu, J.; Hou, Y.; Wang, L. (2017). A direct characterization of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers by atomic force microscopy. *Materials and Structures*. Volumen 50, Article Number 141.

- Hesami, E., Birgisson, B., & Kringos, N. (2013). Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler–bitumen interface in mastics. *Materials and Structures*, 47(8), 1325–1337.
- Heukelem, W., and Wlja, P. W. O. (1971). Viscosity of Dispersions as Governed by Concentration and Rate of Shear. *Proceedings, AAPT*, Vol. 30, p. 418.
- Huang, B., Shu, X., Chen, X., 2007. Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. *Int. J. Pavement Eng.* 8 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/10298430600819170>
- Ishai, I & Craus, J. (1977). Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures. *Proc. Association Asphalt Paving Technologists*, 43, pp.228–258, 1977.
- Islam, S.S., Ransinchung, G.D., Choudhary, J., 2021. Analyzing the effect of waste jarosite as an alternative filler on the engineering properties of asphalt mixes. *Constr. Build. Mater.* 270, 121466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121466>
- Kandhal, P., Lynn, C., & Parker, F. (1998). “Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixes.” NCAT Report No 98-2.
- Kandhal, P.S. & Parker, F. (1998). *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. NCHRP Report 405. Transportation Research Board, National Research Council.
- Kim, Y.-R., Little, D., & Song, I. (2003). Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanistic evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832(1), 1–8. <https://doi.org/10.3141/1832-01>
- Kuity, A., Jayaprakasan, S., Das, A., 2014. Laboratory investigation on volume proportioning scheme of mineral fillers in asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.* 68, 637–643.
- Lackner, R., Spiegl, M., Blab, R., & Eberhardsteiner, J. (2005). Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? -arguments from multiscale analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 485–491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(485))
- Lee, D. (1964). *The effect of filler on asphalt cement mastics*. Iowa State University.
- Lesueur, D., Teixeira, A., Lazaro, M. M., Andaluz, D., & Ruiz, A. (2016). A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on

- bitumen ageing. *Construction and Building Materials*, 117, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildm>
- Lesueur, D., Teixeira, A., Lázaro, M., Andaluz, D., Ruiz, A., 2016. A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on bitumen ageing (2016). *Constr. Build. Mater.* 117 (Aug), 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.003>
- Little, D. N., & Petersen, J. C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207–218. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207))
- Mitchell, J. G. & Lee, A. R. (1939). Evaluation of Fillers for Tar and Other Bituminous Surfacing. *J. Soc. Chem. Ind.*, Vol. 58, p. 299.
- Modarres, A., & Rahmanzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476-483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002>
- MoRTH. (2013). “Specifications for Road and Bridge Works (Fifth Revision).” Ministry of Road Transport and Highways. Indian Road Congress
- Muniandy, R., Aburkaba, E., & Taha, R. (2013). “Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements.” *TJER*, 10(2), 13-32.
- Pasandín, A.R., Pérez, I., Ramírez, A., Cano, M.M., 2016. Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. *Journal of Cleaner Production* 112, 853–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- Petersen, J. C., Plancher, H., & Harnsberger, P. M. (1987). “Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties.” In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings Technical Sessions*, Vol. 56, Reno, Nevada, USA.
- Read, J. & Whiteoak D. (2003). “The Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition.” Thomas Telford Publishing, London
- Recasens, R. M., Martinez, A., Jiménez, F.P., & Bianchetto, H. (2005). Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1901, pp. 10–17.
- Recasens, R.M., Martinez, A., Jimenez, F.P., Bianchetto, H., 2005. Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures. *Trans. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board* 1901, 10–17.
- Richardson, C. (1914). *The modern asphalt pavement*. J. Wiley and Sons, New York.

- Rigden, P. J. (1947). The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 66(9), 299-309. <https://doi.org/10.1002/jctb.5000660902>
- Rigden, P. J. (1954). Road Research Technical Paper No. 28, Road Research Laboratory, Hammondsworth, Middlesex, H. M. S. O., London.
- Rochlani, M., Leischner, S., Falla, G. C., Wang, D., Caro, S., & Wellner, F. (2019). Influence of filler properties on the rheological, cryogenic, fatigue and rutting performance of mastics. *Construction and Building Materials*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116974>
- Ruiz, C. (1960). Concentración Crítica de Filler, su Origen y Significado en la Dosificación de Mezclas Asfálticas. Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires. Publicación No. 11.
- Traxler, R. N. (1937). The Evaluation of Mineral Powders as Fillers for Asphalt. *Proceedings, AAPT*, Vol. 8, p. 60.
- Vila, R. & Mera, W.A. (2024). El envejecimiento del asfalto ecuatoriano y su impacto en la durabilidad de los pavimentos. Dirección de Publicaciones. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S. H., & Reinke, G. H. (2011). Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2208(1), 33–39. <https://doi.org/10.3141/2208-05>
- Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S. H., & Reinke, G. H. (2011). "Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential." *Transportation Research Record*, 2208(1), 33-39. <https://doi.org/10.3141/2208-05>
- Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S.-H., & Reinke, G. H. (2011). Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential. *Transportation Research Record*, 2208(1), 33-39. <https://doi.org/10.3141/2208-05>
- West, R.C., & James, R. S. (2006). "Evaluation of a lime kiln dust as a mineral filler for stone matrix asphalt." *Transportation Research Board*, 750, 1–18.
- Xing, B., Fan, W., Zhuang, C., Qian, C., & Lv, X. (2019). "Effects of the morphological characteristics of mineral powder fillers on the rheological properties of asphalt mastics at high and medium temperatures." *Powder Technology*, 348, 33-42.

- Xu, P., Chen, Z., Cai, J., Pei, J., Gao, J., Zhang, J., & Zhang, J. (2019). "The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures." *Construction and Building Materials*, 203, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.088>
- Zhu, H., & Nodes, J. E. (2000). "Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity." *Mechanics of Materials*, 32(3), 193-202.
- Zulkati, A., Wong, Y. D., & Sun, D. D. (2012). "Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1299-1305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000668](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000668)



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, Alfredo Gregorio Alcívar Bastidas con C.C: #0924820210 y Víctor Hugo Rosero Monserrate C.C: #0925789950, autores del trabajo de titulación: **INCIDENCIA DEL TIPO DE FILLER EN LAS PROPIEDADES DEL MÁSTICO ASFÁLTICO**, previo a la obtención del grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de graduación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 19 de junio de 2025

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Alfredo Gregorio Alcívar Bastidas

C.C: 0924820210

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Víctor Hugo Rosero Monserrate

C.C: 0925789950



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE GRADUACIÓN

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Incidencia del tipo de filler en las propiedades del mástico asfáltico.		
<b>AUTOR(ES)</b> (apellidos/nombres):	Alcívar Bastidas Alfredo Gregorio Rosero Monserrate Víctor Hugo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b> (apellidos/nombres):	Alcívar Bastidas Stefany Esther		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>UNIDAD/FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>MAESTRÍA/ESPECIALIDAD:</b>	Maestría en Ingeniería de la Construcción		
<b>GRADO OBTENIDO:</b>	Magíster en Ingeniería de la Construcción		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	19 de junio del 2025	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	81 páginas
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Asfalto – Pavimentos		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Filler – mástico asfáltico – ligante asfáltico		
<b>RESUMEN/ABSTRACT</b> (150-250 palabras):	<p>Los fillers minerales afectan significativamente el comportamiento de la mezcla asfáltica en aspectos relacionados con su rigidez, durabilidad y laborabilidad. Este material, muy estudiado internacionalmente desde hace muchos años, no se le presta atención prácticamente en Ecuador, donde solo se emplean en las plantas fillers recuperados por los colectores de polvo. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es valorar la incidencia de diferentes tipos de fillers, algunos potencialmente de aportación, en la calidad de los másticos preparados con el cemento asfáltico de la Refinería de Esmeraldas, sin y con envejecimiento, mediante pruebas de control rutinarias, para formular recomendaciones sobre su utilización en las mezclas. Se emplearon como fillers: cal, cemento Portland, basalto, pizarra tobácea y arena-limosa, siendo los dos primeros potenciales fillers de adición. En la preparación de los másticos se cumplió siempre con una relación entre la concentración volumétrica y la concentración crítica igual a uno. Como conclusiones se considera que dos propiedades del filler son las que más impactarán en su comportamiento formando parte del mástico: la granulometría (física) y la composición (química). Las granulometrías más finas asociadas a los elevados contenidos de CaO de la cal y el cemento permitieron tener másticos de menor consistencia y mejor capacidad elástica tanto envejecidos como no. Pueden observarse las desventajas de utilizar en el país como únicos fillers los obtenidos por recuperación, en especial para mezclas asfálticas cuyo destino son las vías principales.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593- 939619850 +593- 988533875	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:alcivar.alfredob@gmail.com">alcivar.alfredob@gmail.com</a> <a href="mailto:vh_rmonse@hotmail.com">vh_rmonse@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:</b>	<b>Nombre:</b> Rommel Yela Acosta <b>Teléfono:</b> +593 99 593 4871 <b>E-mail:</b> <a href="mailto:rommel.yela@cu.ucsg.edu.ec">rommel.yela@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO</b> (en base a datos):			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL</b> (tesis en la web):			