

**INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y  
MINERALÓGICAS DEL FILLER SOBRE LA RIGIDEZ DE LAS  
MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**LEIDY CAROLINA RANGEL DUEÑAS  
MAYRA SARMIENTO ROMERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2010**

**INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y  
MINERALÓGICAS DEL FILLER SOBRE LA RIGIDEZ DE LAS  
MEZCLAS ASFÁLTICAS**

**LEIDY CAROLINA RANGEL DUEÑAS  
MAYRA SARMIENTO ROMERO**

**Director:  
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN  
Ingeniero Civil, M. Sc., Doctor.**

**Trabajo de grado modalidad investigativa  
Para optar al título de:  
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2010**

*Dedicado a  
mis Padres Elpidia Dueñas y Leopoldo Rangel  
en recompensa a sus esfuerzos y a toda mi familia  
por sus manifestaciones de apoyo y confianza en mí.  
A mis compañeros y amigos por vivir conmigo estos momentos  
de gran importancia en mi carrera y en mi vida.*

*Leidy Carolina Rangel Dueñas*

*Dedicado a  
mis padres Pablo Antonio Sarmiento y Adela Romero  
por su apoyo incondicional, dedicatoria y esfuerzo,  
a mi hermana Luz Aída y sobrinita María Paula  
por estar siempre a mi lado y a mis amigos, compañeros  
y familiares por su ayuda y buenos consejos,  
sin todos ellos no hubiese podido alcanzar esta meta.*

*Mayra Sarmiento Romero*

## **AGRADECIMIENTOS**

Ante todo a Dios por permitirnos dar este paso tan importante en nuestras vidas y guiarnos en el transcurso de la carrera, para así culminar esta etapa con orgullo y satisfacción.

A nuestro director el Ingeniero Eduardo Castañeda por la dedicación que tuvo con nosotras, aportándonos conocimientos y experiencias que sabremos aprovechar en la vida profesional.

A Jairo, Germán y Jaime por su gran paciencia hacia nosotras y ayuda cuando la necesitamos. Mil gracias.

A la universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Civil por abrirnos las puertas y brindarnos lo necesario para obtener una buena educación y llegar a ser excelentes profesionales.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
OBJETIVO GENERAL.....	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
<b>1. MEZCLAS ASFÁLTICAS</b> .....	<b>23</b>
1.1 DEFINICIÓN.....	23
1.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE .....	23
1.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	24
1.4 FORMULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	26
<b>2. LLENANTE MINERAL</b> .....	<b>27</b>
2.1 DEFINICIÓN.....	27
2.2 EFECTO DEL LLENANTE MINERAL COMO COMPONENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	28
2.3 ELECCIÓN DEL FILLER ADECUADO.....	29
2.4 PRINCIPALES ENSAYOS PARA LLENANTES MINERALES .....	29
2.4.1 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro/norma I.N.V. E-124-07..	29
2.4.2 Valor de azul de metileno en agregados finos y llenantes minerales/norma I.N.V. E-235-07.....	30
2.4.3 Densidad aparente del llenante mineral en tolueno/norma I.N.V. E-225-07 .....	31
2.4.4 Determinación del límite líquido de los suelos/norma I.N.V. E-125-07 .....	32
2.4.5 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos/norma I.N.V. E-126-07 .....	33

2.4.6	Vacíos del llenante compactado en seco/norma I.N.V. E-229-07 .....	34
2.4.7	Concentración crítica de llenante mineral en mezclas de concreto asfáltico/norma I.N.V. E-745.....	36
2.4.8	Coeficiente de emulsibilidad del llenante/norma I.N.V. E-776 .....	37
<b>3.</b>	<b>DISEÑO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
3.1	GRANULOMETRÍA DEL LLENANTE MINERAL .....	38
3.2	MINERALOGÍA DEL LLENANTE MINERAL .....	39
3.3	FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE LLENANTE MINERAL .....	40
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....</b>	<b>43</b>
4.1	ASFALTO .....	43
4.2	LLENANTE MINERAL .....	44
4.2.1	Cenizas volantes .....	45
4.2.2	Material fino de las arenas de río .....	48
4.2.3	Calizas.....	49
4.2.4	Comportamiento de los minerales en las mezclas asfálticas .....	52
<b>5.</b>	<b>CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>55</b>
5.1	SEPARACIÓN POR TAMAÑOS DE LOS LLENANTES MINERALES .....	55
5.2	GRANULOMETRÍA CON HIDRÓMETRO DE LOS LLENANTES MINERALES TAMIZ PASA NO.400.....	58
5.2.1	Granulometría de las cenizas volantes (Central Termoeléctrica TERMOPAIPA, Boyacá).....	59
5.2.2	Granulometría del material fino de las arenas del Río Chicamocha.....	60
5.2.3	Granulometría de calizas de La Mesa de los Santos .....	61
5.3	FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE LOS LLENANTES MINERALES.....	63

5.4 ENSAYO DE DENSIDAD EN KEROSENE PARA LOS LLENANTES MINERALES / NORMA I.N.V. E-225-07 .....	67
5.5 ENSAYO DE CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE LLENANTE MINERAL / NORMA I.N.V. E-745.....	70
5.6 ENSAYO DE VACÍOS DEL LLENANTE COMPACTADO EN SECO / NORMA I.N.V. E-229-07 .....	72
5.7 PODER RIGIDIZANTE DE LAS MEZCLAS (FILLER-LIGANTE).....	75
5.7.1 Ensayo de Poder Rigidizante / PNE_prEN 13179-1.....	75
5.7.2 Ensayo de Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) / NORMA I.N.V. E-712 .....	75
5.7.3 Diseño de la mezcla filler-ligante .....	75
5.7.4 Proceso de fabricación del mástico .....	79
5.7.5 Ensayo de Poder Rigidizante .....	82
<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
6.1 DENSIDAD EN KEROSENE .....	85
6.2 PODER RIGIDIZANTE .....	86
6.3 CONCENTRACIÓN CRÍTICA.....	91
6.4 VACÍOS DEL LLENANTE COMPACTADO EN SECO.....	92
6.5 PENETRACIÓN.....	94
6.6 FORMA DE LAS PARTÍCULAS .....	96
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>98</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>100</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>102</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b>	Propiedades técnicas del asfalto 60-70 de Barrancabermeja.....	43
<b>Tabla 4.2</b>	Valores del azul de metileno.....	44
<b>Tabla 5.1</b>	Granulometría de cenizas volantes de Termopaipa pasa Tamiz No.400 .....	59
<b>Tabla 5.2</b>	Granulometría del material fino de las arenas del río Chicamocha pasa Tamiz No.400.....	60
<b>Tabla 5.3</b>	Granulometría de calizas de la Mesa de Los Santos Pasa No.400 .	61
<b>Tabla 5.4</b>	Resultados de densidad en Kerosene .....	69
<b>Tabla 5.5</b>	Resultados Concentración Crítica del llenante mineral. ....	72
<b>Tabla 5.6</b>	Resultados Vacíos de llenante compactado en seco. ....	74
<b>Tabla 5.7</b>	Granulometría del agregado para mezclas densas en caliente. ....	76
<b>Tabla 5.8</b>	Gravedades específicas. ....	77
<b>Tabla 6.1</b>	Resultados de Punto de ablandamiento y Poder Rigidizante de los llenantes minerales.....	87
<b>Tabla 6.2</b>	Penetración de los másticos .....	94

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Ensayo de granulometría de filler por medio del hidrómetro.....	30
<b>Figura 2.2</b>	Ensayo de azul de metileno.....	31
<b>Figura 2.3</b>	Ensayo de densidad aparente del filler en tolueno. ....	32
<b>Figura 2.4</b>	Equipo de límite líquido con muestra de suelo dividida. ....	33
<b>Figura 2.5</b>	Ensayo de límite plástico de los suelos. ....	34
<b>Figura 2.6</b>	Aparato para la compactación en seco del filler. ....	35
<b>Figura 2.7</b>	Ensayo de concentración crítica de llenante mineral en mezclas asfáltica.....	37
<b>Figura 3.1</b>	Forma de las partículas según su esfericidad y angularidad. ....	41
<b>Figura 3.2</b>	Forma de las Partículas de Agregado Pétreo. i-Redondeada, ii- Irregular, iii-Angular, iv-Lajosa, v-Alargada, vi-Alargada-Lajosa. ....	42
<b>Figura 4.1</b>	Formaciones geológicas de la Mesa de los Santos.....	52
<b>Figura 5.1</b>	Tamizado del material en seco. ....	55
<b>Figura 5.2</b>	Tamizado del material con lavado. ....	56
<b>Figura 5.3</b>	Secado de la muestra en el horno ....	56
<b>Figura 5.4</b>	Secado de la muestra en la estufa y retirado del recipiente. ....	57
<b>Figura 5.5</b>	Ensayo de granulometría del material fino.....	58
<b>Figura 5.6</b>	Cenizas volantes Pasa No.200 Retiene No.325 .....	63
<b>Figura 5.7</b>	Cenizas volantes Pasa No.325 Retiene No.400 .....	63
<b>Figura 5.8</b>	Cenizas volantes Pasa No.400 .....	64
<b>Figura 5.9</b>	Arenas de Río Pasa No.200 Retiene No.325 .....	65
<b>Figura 5.10</b>	Arenas de Río Pasa No.325 Retiene No.400 .....	65
<b>Figura 5.11</b>	Arenas de Río Pasa No.400 .....	65
<b>Figura 5.12</b>	Calizas Pasa No.200 Retiene No.325 .....	66
<b>Figura 5.13</b>	Calizas Pasa No.325 Retiene No.400 .....	66

<b>Figura 5.14</b>	Calizas Pasa No.400 .....	67
<b>Figura 5.15</b>	Deshidratación y filtración del kerosene. ....	68
<b>Figura 5.16</b>	Sedimentación de la muestra. ....	68
<b>Figura 5.17</b>	Deshidratación y filtración del kerosene. ....	70
<b>Figura 5.18</b>	Extracción de burbujas .....	71
<b>Figura 5.19</b>	Medición de volumen después de 24h. ....	71
<b>Figura 5.20</b>	Peso y adición del llenante. ....	73
<b>Figura 5.21</b>	Compactación y limpieza del material adherido al aparato.....	73
<b>Figura 5.22</b>	Peso de la pastilla de filler. ....	74
<b>Figura 5.23</b>	Calentado del filler en el horno. ....	80
<b>Figura 5.24</b>	Calentado del asfalto en la estufa.....	80
<b>Figura 5.25</b>	Adición del filler al ligante asfáltico .....	81
<b>Figura 5.26</b>	Mezcla del mástico. ....	82
<b>Figura 5.27</b>	Ensayo de punto de ablandamiento para el asfalto. ....	83
<b>Figura 5.28</b>	Mezcla del mástico. ....	83
<b>Figura 5.29</b>	Ensayo de punto de ablandamiento para el mástico. ....	84
<b>Figura 6.1</b>	Caliza Pasa No.400 (vista lejana) y Caliza Pasa No.400 (máx. zoom) .....	89
<b>Figura 6.2</b>	Caliza Pasa No.200 Retiene No.325 .....	90

## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 5.1</b> Granulometría de las muestras Pasa No.400 .....	62
<b>Gráfica 6.1</b> Variación de la densidad en kerosene .....	85
<b>Gráfica 6.2</b> Tendencia del poder rigidizante según el tamaño de filler .....	88
<b>Gráfica 6.3</b> Variación de la Concentración Crítica.....	91
<b>Gráfica 6.4</b> Variación del Porcentaje de vacíos compactado en seco.....	93
<b>Gráfica 6.5</b> Variación de penetración .....	95

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b>	ENSAYO DE AZUL DE METILENO PARA LOS LLENANTES MINERALES.....	103
<b>ANEXO B</b>	ENSAYO DE INDICE DE PLASTICIDAD EN LOS LLENANTES MINERALES TAMIZ PASA No 400 .....	107
<b>ANEXO C</b>	PODER RIGIDIZANTE (NORMA FRANCESA) .....	111

## RESUMEN

**TITULO: INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y MINERALÓGICAS DEL FILLER SOBRE LA RIGIDEZ DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.\***

**AUTORAS:**

LEIDY CAROLINA RANGEL DUEÑAS\*\*

MAYRA SARMIENTO ROMERO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Mástico, Llenante mineral, Rigidez, Ensayo de Poder Rigidizante, Granulometría, Mineralogía, Forma de las partículas.

**DESCRIPCIÓN:**

Los asfaltos son modificados con el fin de mejorar propiedades de las mezclas asfálticas como su durabilidad, impermeabilidad y rigidez. Un ejemplo de estos son los másticos que son mezclas de llenante mineral con asfalto y se encargan de proporcionar cohesión y rellenar los vacíos del agregado mineral en las mezclas asfálticas.

Los llenantes minerales poseen diversas características físicas y químicas que son poco estudiadas en la caracterización de materiales utilizados en las mezclas asfálticas. Características como la granulometría, mineralogía y forma de las partículas que contienen los llenantes son importantes al momento de estudiar la influencia que tienen en la rigidez de las mezclas asfálticas. Variar las propiedades de los llenantes minerales es una forma básica de determinar la variación de su comportamiento y así observar la mejora que produce esta adición al asfalto en su estado natural.

En el presente estudio se han escogido tres materiales como llenantes minerales (Pasa Tamiz No.200), con diferente mineralogía y se han separado en tres tamaños permitiendo observar la variación que se presenta en algunos ensayos incluyendo el ensayo de Poder Rigidizante, el cual determina el aumento de rigidez del asfalto o ligante con la adición de llenante. También se realiza un análisis de la forma, textura y color de las partículas de los materiales en cada uno de los tamaños, observando la variación de estas características mediante un estereoscopio.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto: Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

## ABSTRACT

**TITLE: INFLUENCE OF GRANULOMETRIC AND MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF FILLER ON THE STIFFNESS OF ASPHALTIC MIXTURES.\***

**AUTHORS:**

LEIDY CAROLINA RANGEL DUEÑAS\*\*

MAYRA SARMIENTO ROMERO\*\*

**KEYWORDS:** Mastic, Mineral filler, Stiffness, Stiffening power test, Granulometry, Mineralogy, Particle shape.

**DESCRIPTION:**

The asphalts are modified in order to improve properties of asphalt mixtures such as durability, impermeability and stiffness. An example of these above are the mastic which are mixtures of mineral filler with asphalt which are the responsible of providing cohesion and fill the hollows of mineral aggregate in asphalt mixtures.

The mineral filler has different physical and chemical characteristics which are no longer studied on the characterization of materials that are used in asphalt mixtures. Characteristics such as granulometry, mineralogy and shape of particles containing the mineral filler are important when studying the influence on the stiffness of asphalt mixtures. To modify the properties of mineral filler is a basic way to determine the variation of its behavior and thus, the improvement produced is observed by this addition to the asphalt in its natural state.

In the present study, three materials have been chosen as mineral filler (Pass Sieve No.200), with different mineralogy and they were separated into three sizes allowing observing the variation that occurs in some test including stiffening power, which determines increased stiffness of asphalt or binder with the addition of mineral filler. Also, it is realized an analysis of the shape, texture and color of the particles of the materials in each of the sizes, observing the variation of these characteristics by means of a stereoscope.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director de proyecto: Ing. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

## **INTRODUCCIÓN**

El filler como llenante mineral en mezclas asfálticas aglomera los distintos elementos del árido proporcionando la cohesión necesaria para aumentar la rigidez del material. Dicho filler (material Pasa tamiz No.200) posee ciertas características fundamentales que influyen en su comportamiento dentro de la mezcla como su mineralogía, forma y tamaño de sus partículas.

La adición de llenante mineral al asfalto es una de las modificaciones que se hace para mejorar las características de este, debido a comportamientos poco favorables en los pavimentos, su estado normal provoca en ocasiones fallas en las carpetas asfálticas.

La mineralogía del filler, como la de todos los agregados, es uno de los factores más importantes en el comportamiento de una mezcla asfáltica, es importante conocer los minerales que componen el llenante para determinar la influencia que tienen en la rigidez de las mezclas. Al igual el tamaño y forma de las partículas de filler, aunque por facilidad siempre se ha utilizado el Pasa No.200, es interesante saber cómo influye el cambio de tamaño y forma de las partículas de llenante, separándolas con tamices de diferente diámetro. Éste cambio puede ocasionar pequeñas alteraciones en la rigidez del asfalto que son importantes al momento de ser estudiados.

Dicha variación de las propiedades de los llenantes minerales es un tema poco estudiado en la rama de Ingeniería Civil, pues la finura que posee el filler es alta comparada con los demás agregados que tiene la mezcla asfáltica, siendo necesario realizar ensayos de laboratorio poco convencionales y llevar dicho estudio a una visualización microscópica y detallada de las partículas.

El trabajo presenta un estudio acerca de la influencia que tiene la variación de las características granulométricas y mineralógicas del filler en la rigidez de las mezclas asfálticas, reportando los resultados obtenidos en los ensayos realizados para muestras de cenizas volantes, calizas y material fino de arena de río y buscando con esto hacer un aporte para nuevos estudios sobre el tema.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el comportamiento del Poder Rigidizante del filler en las mezclas asfálticas, según la variación de sus características granulométricas y mineralógicas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener granulometrías de tres muestras diferentes de filler mediante tamizado y sedimentación.
- Establecer la forma que poseen las partículas de los llenantes minerales.
- Definir la concentración crítica, peso unitario y porcentaje de vacíos del filler según su granulometría.
- Determinar el comportamiento rigidizante de los másticos (fillers-betún) analizados mediante el ensayo de Poder Rigidizante.
- Analizar los resultados obtenidos y presentar recomendaciones para una posible continuación de los estudios.
- Hacer un aporte a las plantas productoras de concreto asfáltico, con información significativa en el comportamiento y caracterización del filler como rigidizante.

## 1. MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 1.1 DEFINICIÓN

Las mezclas asfálticas son utilizadas en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o capas inferiores y su función es proporcionar una superficie cómoda, segura y económica en las vías para facilitar la circulación de vehículos sobre esta. También se conocen como concreto asfáltico que es la combinación del agregado y cemento asfáltico, mezclados mientras se mantiene una temperatura determinada, aproximadamente de 135°C a 185°C, que garantice la máxima adherencia del asfalto con las partículas de agregado. Las mezclas asfálticas en caliente son diseñadas actualmente por medio de procedimientos empíricos de laboratorio, por lo que se requieren años de experiencia para correlacionar el comportamiento del pavimento con los trabajos de laboratorio.

### 1.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

- **Asfalto:** El asfalto realiza la función de ligante en la mezcla asfáltica, este puede ser de origen natural o modificado y su función es aglutinar las partículas de agregados. Son considerados como los ideales en la pavimentación debido a sus propiedades físicas como la durabilidad, flexibilidad y alta resistencia con los ácidos, sales y alcoholes.

Existe una serie de asfaltos clasificados de acuerdo a su aplicación, entre los que se encuentran los asfaltos modificados, los cuales se alteran con el fin de obtener mayor durabilidad y elasticidad en las mezclas. Un ejemplo de asfalto modificado son los másticos o masticos bituminosos.

- **Agregado mineral:** Los agregados minerales son materiales triturados de varios tamaños, los cuales están encargados de proporcionar resistencia y rigidez a la mezcla. El agregado constituye entre el 90 y el 96% en peso y entre el 75 y 85% en volumen de la totalidad de la mezcla.
- **Aire:** El aire corresponde a los vacíos de la mezcla asfáltica.
- **Filler o llenante mineral:** Es el material fino (Pasa No. 200) que mezclado con el asfalto conforman el mástico encargado de proporcionar la cohesión, a través de este se mantiene unido el esqueleto mineral y es el principal responsable de la impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

### 1.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

- **Contenido de asfalto:** La cantidad de asfalto utilizada en la mezcla asfáltica tienen que ser óptima, un exceso de asfalto, especialmente en mezclas con elevado porcentaje de agregados puede dar lugar a ondulaciones de la superficie y un contenido de asfalto insuficiente puede ocasionar agrietamientos o desintegración en la capa.
- **Contenido de vacíos:** Son los espacios ocupados por el asfalto cuando este se expande debido al sometimiento de la capa a cargas del tráfico o cambios de temperatura. Un bajo porcentaje de vacíos en la mezcla ocasiona que el pavimento se reviente ante la expansión del asfalto y un exceso de vacíos permite la penetración de agua y oxígeno causando stripping y oxidación.

- **Estabilidad:** La estabilidad es la capacidad que tiene el pavimento para resistir las deformaciones producidas por las cargas del tráfico. Una mezcla asfáltica inestable produce canalizaciones y ondulaciones en el pavimento.
- **Durabilidad:** La durabilidad es la habilidad de la mezcla asfáltica para resistir la desintegración por efecto del desgaste y las cargas de tráfico. La durabilidad aumenta incrementando el contenido de asfalto, utilizando granulometrías densas y logrando altos grados de compactación en el terreno.
- **Resistencia a la fatiga:** Es la resistencia que poseen los pavimentos a los esfuerzos repetitivos, sin fisurarse, causados por los cargas del tráfico.
- **Resistencia al deslizamiento:** Es la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, que estando impedidos de rotar, se deslizan a los largo de la superficie.
- **Impermeabilidad:** La impermeabilidad es la capacidad que posee la mezcla asfáltica compactada de no ser filtrada por agua o por aire.
- **Maniobrabilidad:** Es la facilidad de producción, colocación y compactación de la mezcla en la vía.
- **Flexibilidad o Rigidez:** Es la capacidad que poseen las mezclas asfálticas para sufrir deformaciones a causa del tráfico sin fisurarse. Los pavimentos serán más flexibles cuanto mayor sea su resistencia a las deformaciones elásticas, para lo cual se recomienda el empleo de ligantes de alta viscosidad.  
La flexibilidad o rigidez es la relación entre la fuerza aplicada y la deformación producida, esta debe estar dentro de unos rangos aceptables para que no se

produzca deformaciones y fisuras en los pavimentos ocasionado por el tráfico diario de los vehículos.

#### **1.4 FORMULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas es el método más común, fue desarrollado durante la segunda guerra mundial (1930) y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Este procedimiento está descrito en la norma AASHTO T245 (ASTM 1559) y su procedimiento consta de:

- Preparación de probetas (calentamiento, mezclado y compactación) manteniendo constante el peso del agregado y variando el contenido de asfalto en cada una de ellas.
- Ensayo de las probetas bajo una serie de esfuerzos simuladores de las cargas del tráfico.
- Análisis de resultados para seleccionar la fórmula de la mezcla asfáltica que más se ajuste a las especificaciones requeridas.

## 2. LLENANTE MINERAL

### 2.1 DEFINICIÓN

Los llenantes minerales o fillers son material incorporado al ligante asfáltico con el fin de modificar sus propiedades mecánicas, consistencia y complementar la fracción granulométrica en la mezcla asfáltica producida en caliente, para generar una mezcla bien gradada y un mejor comportamiento de esta.

Usualmente son sustancias minerales como cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc. El efecto general de la adición de fillers es endurecer el asfalto. En términos prácticos significa que existirá una reducción en su deformación o fluencia producida por una carga, un incremento en su punto de ablandamiento, una reducción de su penetración y un incremento en su rigidez.<sup>1</sup>

El filler tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas debido a que:<sup>2</sup>

- Forma parte del esqueleto mineral y soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre partículas.
- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto.
- Sustituye parte del asfalto que de otra manera sería necesario para conseguir unos vacíos en mezcla suficientemente bajos.

---

<sup>1</sup> [www.e-asfalto.com/propiedades](http://www.e-asfalto.com/propiedades)

<sup>2</sup> PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Universidad Politécnica de Cataluña., España. 2004.

- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los agregados más gruesos.

## **2.2 EFECTO DEL LLENANTE MINERAL COMO COMPONENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

- Uno de los principales efectos que tiene el llenante mineral sobre los pavimentos es el aumento considerable de durabilidad debido a que se reduce el contenido de vacíos y disminuye la penetración del agua a las capas.
- Al incrementarse el contenido de llenante aumenta la estabilidad de la mezcla hasta un valor máximo, perdiendo luego estabilidad gradualmente.
- Un aumento excesivo de llenante en la mezcla asfáltica también genera problemas en su comportamiento, consigue que el pavimento se endurezca demasiado y consecuentemente se vuelva frágil ocasionando fisuras en su capa asfáltica.
- En la caracterización físico-química del filler, el factor más significativo es la intensidad de absorción, ésta depende del tipo de filler principalmente, sus características como la composición mineralógica, características estructurales, textura entre otras.

### 2.3 ELECCIÓN DEL FILLER ADECUADO

- Fillers de asbestos no son adecuados para aplicaciones en la cual la mezcla es utilizada como un sellante o un protector en continuo contacto con un líquido, debido a que las fibras de asbestos pueden transportar el líquido a través del asfalto.
- Fillers que pueden absorber agua no deben ser utilizados cuando el asfalto está en contacto con el agua.
- Si el asfalto va a ser utilizado como un protector resistente a los ácidos, los fillers deben ser sílices.
- El uso de cal como filler mejora la adhesión del asfalto a las superficies minerales (piedra, vidrio, etc.) en presencia de agua.<sup>3</sup>

### 2.4 PRINCIPALES ENSAYOS PARA LLENANTES MINERALES

En la normatividad sobre mezclas asfálticas se encuentra una gran serie de ensayos acerca del llenante mineral, estos con el fin de valorar sus propiedades como la finura, actividad hidrofílica, forma, textura, granulometría y consecuente las propiedades que genera el mástico en las mezclas asfálticas. Con algunos de estos ensayos es suficiente para determinar si el llenante mineral es apto para ser utilizado y entre ellos se encuentran:

#### 2.4.1 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro/norma I.N.V. E-124-07

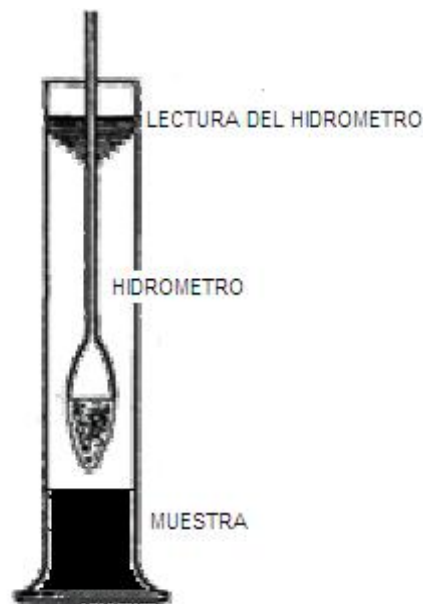
Cuando las partículas de suelo son demasiado pequeñas (Pasa No. 200) se hace más difícil realizar una granulometría por tamizado, siendo necesario determinar la

---

<sup>3</sup> [www.e-asfalto.com/propiedades](http://www.e-asfalto.com/propiedades)

distribución de los tamaños de las partículas, se lleva a cabo el ensayo de granulometría de filler por medio del hidrómetro. Este método de prueba se realiza mediante un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro en especial (151H ó 152H). Se toma una serie de datos durante determinados tiempos y mediante algunas fórmulas y características del suelo se calcula el porcentaje de finos y el diámetro de las partículas.

**Figura 2.1** Ensayo de granulometría de filler por medio del hidrómetro.



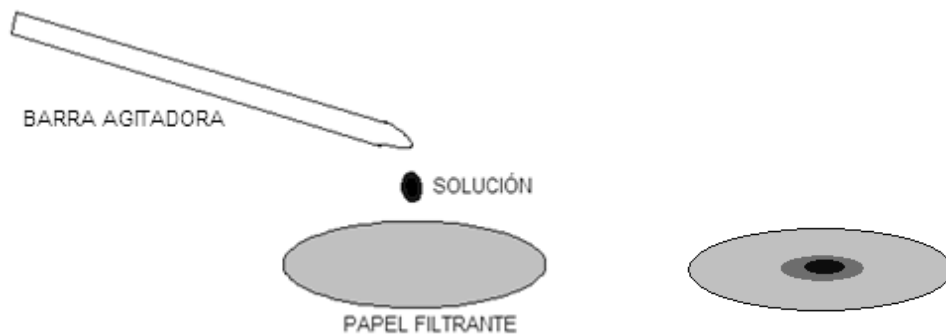
**Fuente.** Elaboración propia.

#### **2.4.2 Valor de azul de metileno en agregados finos y llenantes minerales/norma I.N.V. E-235-07**

Para los llenantes minerales no es recomendable utilizar suelos con finos de arcilla, porque estos requieren más cantidad de agua, se contraen, su resistencia es variable y su mezclado pegajoso. El objetivo del ensayo es determinar la cantidad de material arcilloso u orgánico presente en la muestra fina mediante el empleo de azul de metileno. Este se basa en la absorción que tienen las arcillas y

efecto decolorante sobre las soluciones acuosas, siendo esto consecuencia de la actividad superficial físico-química de dichos materiales. El procedimiento consta de la mezcla de material con agua destilada y azul de metileno colocada en un papel filtrante hasta formar un aro azul alrededor de las gotas ensayadas. Con la concentración y peso de la muestra y del reactivo se calcula el valor de azul de metileno empleado para la estimación de la cantidad de arcillas y materia orgánica.

**Figura 2.2** Ensayo de azul de metileno.



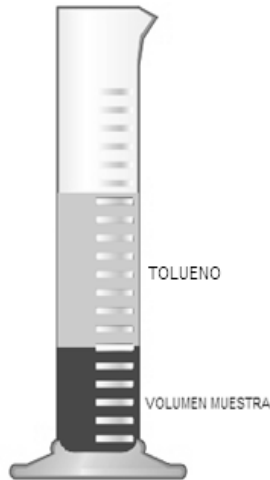
**Fuente.** Elaboración propia.

### 2.4.3 Densidad aparente del llenante mineral en tolueno/norma I.N.V. E-225-07

La mayor o menor actividad hidrofílica del filler suele estar unida a su grado de finura. Cuanto mayor es el grado de finura de un filler mayor suele ser su actividad frente al agua. Por otra parte, una falta de finura del filler hace que éste sea poco activo, tanto frente al betún como frente al agua. Es por ello que se suele tomar esta característica del filler, o su valoración indirecta a través de su densidad aparente, como índice de su calidad. No obstante, la densidad aparente en tolueno no se relaciona muy bien con la superficie específica debido a la influencia de factores tales como la actividad, carga de partículas, etc. que pueden influir en

el proceso de sedimentación<sup>4</sup>. El ensayo busca medir el volumen de filler sedimentado, mezclado en una probeta con una determinada cantidad de tolueno, para ser utilizado en el cálculo de la densidad aparente de la mezcla.

**Figura 2.3** Ensayo de densidad aparente del filler en tolueno.



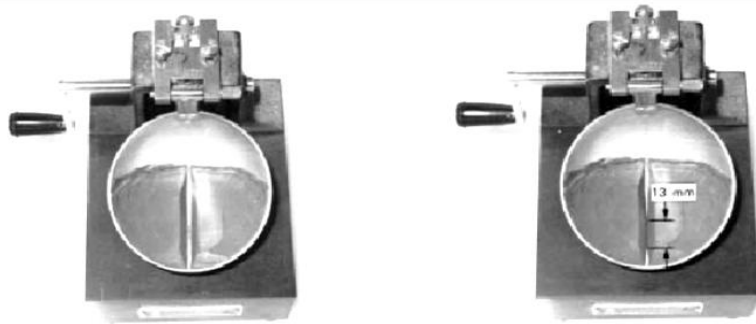
**Fuente.** Elaboración propia.

#### 2.4.4 Determinación del límite líquido de los suelos/norma I.N.V. E-125-07

La plasticidad de un suelo es muy importante al momento de ser utilizado éste para diversos fines en los pavimentos. Para calcular el índice de plasticidad es necesario determinar el límite líquido del suelo que es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico. El ensayo se realiza utilizando una porción de material húmedo disperso en una cazuela y sometido a una serie de golpes hasta obtener la unión del material. Los cálculos se realizan con los determinados pesos de la muestra en estado húmedo y seco para consiguiente hallar el índice de plasticidad.

<sup>4</sup> MIRO RECASENS, Jorge Rodrigo. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de Caminos, canales y puertos. Barcelona, 1994.

**Figura 2.4** Equipo de límite líquido con muestra de suelo dividida.

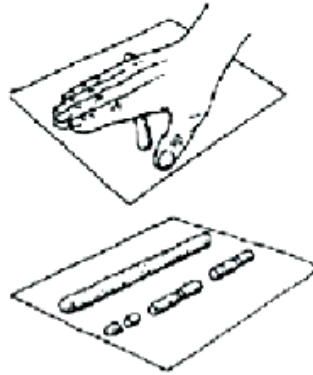


**Fuente.** Norma I.N.V. E-125-07

#### **2.4.5 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos/norma I.N.V. E-126-07**

El límite plástico de un suelo es el contenido mínimo de agua en el cual el material permanece en estado plástico. Es indispensable establecer este límite para determinar el índice de plasticidad que es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el suelo está en un estado plástico. El índice de plasticidad sirve para determinar qué tipo de suelo se está ensayando y que tan compresible es. Según la norma ASTM-D242 donde especifica los requerimientos necesarios para que un suelo pueda ser utilizado como llenante mineral aclara que el índice de plasticidad no puede estar superior a 4 teniendo algunas excepciones como la cal hidratada y el cemento hidráulico. El ensayo es sencillo y se utiliza una pequeña porción de muestra, formando rollitos de masa hasta quebrantarse, pesando la muestra en estado húmedo y seco y calculando el límite y el índice con las fórmulas indicadas por la norma.

**Figura 2.5** Ensayo de límite plástico de los suelos.

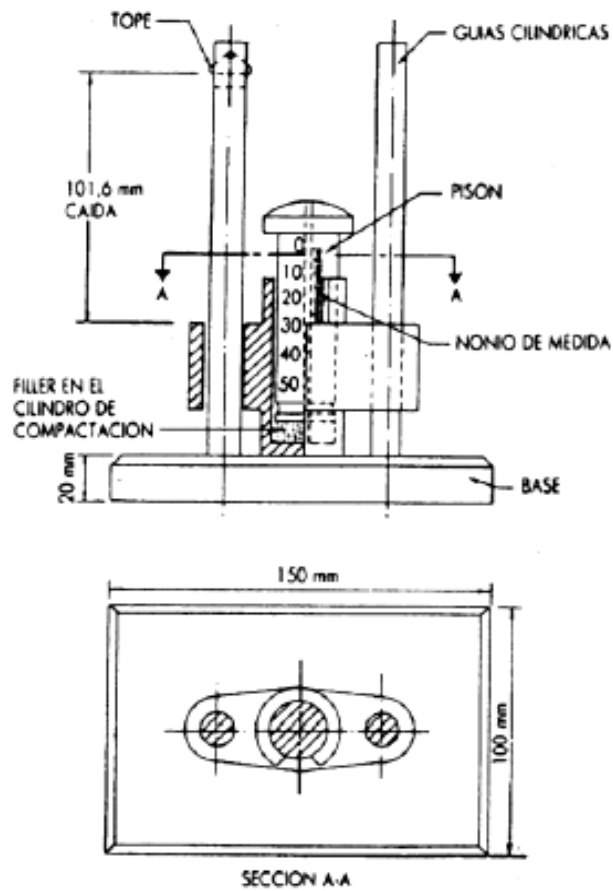


**Fuente.** [www.forestaes.net](http://www.forestaes.net)

#### **2.4.6 Vacíos del llenante compactado en seco/norma I.N.V. E-229-07**

La determinación del volumen de vacíos en el llenante, es una aproximación del contenido óptimo del ligante bituminoso que da un mástico de máxima viscosidad para ser utilizado en vías. Para la determinación de éste influyen características físicas del material tales como finura, forma y textura de las partículas ensayadas. Esta prueba se realiza compactando una pequeña muestra de filler, siguiendo unas condiciones determinadas, a través de un aparato compactador fabricado totalmente en acero y con dimensiones precisas.

Figura 2.6 Aparato para la compactación en seco del filler.



Fuente. Norma I.N.V. E-229-07

Al terminar la compactación se obtiene la muestra en forma de pastilla, la cual es pesada y medida para determinar el contenido de vacíos existentes en el filler.

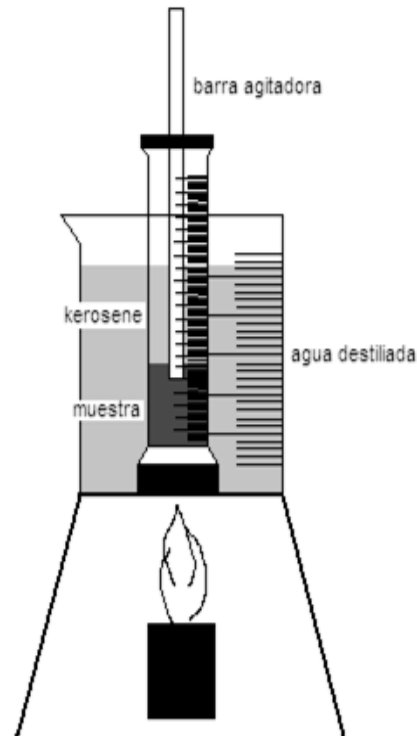
#### **2.4.7 Concentración crítica de llenante mineral en mezclas de concreto asfáltico/norma I.N.V. E-745**

Con el fin de evitar problemas de rigidez en los pavimentos es indispensable saber la concentración en volumen de llenante mineral a utilizar en una mezcla asfáltica. La concentración crítica es aquella en la cual el mástic comienza a rigidizarse. El sistema se hace más frágil, acentuándose dicho proceso a bajas temperaturas, lo que conlleva al empeoramiento de ciertas características buscadas como la flexibilidad, la cohesión y la durabilidad. Esta concentración corresponde a una dispersión de las partículas de filler en el betún en el estado más suelto posible pero con contacto entre ellas, es decir cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo bituminoso y la resistencia friccional entre las partículas tiende a un mínimo. Dicho acomodamiento de las partículas es el que aproximadamente cabe esperar en el sedimento obtenido por simple reposo de dispersiones de filler en un medio líquido fluido y con parentesco químico con los betunes, tal como el kerosene.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> BIANCHETTO, Hugo D. MIRO RECASENS, Jorge Rodrigo. PÉREZ JIMÉNEZ, Félix. *Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales.* Universidad Nacional de La Plata, Facultad de ingeniería. La Plata, Argentina.

**Figura 2.7** Ensayo de concentración crítica de llenante mineral en mezclas asfáltica.



**Fuente.** Elaboración propia.

#### 2.4.8 Coeficiente de emulsibilidad del llenante/norma I.N.V. E-776

Es importante saber cómo reacciona el llenante mineral frente a la acción del agua en una mezcla asfáltica y por esta razón se hace necesario realizar dicho ensayo que determina el valor del coeficiente de emulsibilidad que se define como la máxima cantidad de ligante asfáltico que se puede dispersar en forma de emulsión directa en agua mediante un gramo de asfalto. El método se fundamenta en la determinación del punto de inversión, aprovechando el hecho de que las emulsiones directas "ligante en agua" se diluyen en agua, mientras las inversas "agua en ligante" no se diluyen.

### **3. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Los llenantes minerales poseen diversas características químicas y físicas las cuales están ligadas al comportamiento que presentan cuando son utilizados como material en las mezclas asfálticas. Para conocer las propiedades que los componen es necesario someterlos a una serie de ensayos que arrojen resultados precisos para caracterizar el material.

Como objetivo del estudio se variaron dos propiedades importantes de los llenantes minerales que son la granulometría o separación por tamaños y la mineralogía del material, adicionando también el análisis de la forma de las partículas. Con dicha variación se realizaron ensayos con el fin de observar el cambio de rigidez y características como densidad, concentración crítica, vacíos en seco y penetración.

#### **3.1 GRANULOMETRÍA DEL LLENANTE MINERAL**

La granulometría del llenante mineral va directamente ligada con la finura que tienen las partículas y es una de las características más importantes que influyen al momento de obtener un filler óptimo para ser utilizado en mezclas asfálticas. Debido a la finura del llenante mineral, este presenta una mayor actividad química frente al asfalto y al agua.

Es técnicamente conveniente conocer la distribución de tamaños de las partículas menores al tamiz No. 200, debido a que estas ejercen una influencia importante en las propiedades del material, ayudando también a prever su comportamiento a futuro. Por tal motivo se decide separar las muestras de filler Pasa No.200 en tres tamaños: Pasa Tamiz No.200 Retiene Tamiz No.325, Pasa Tamiz No.325 Retiene

Tamiz No.400 y Pasa Tamiz No.400 por medio del proceso de tamizado en lavado y sedimentación y así observar cual tamaño rigidiza más la mezcla con el ensayo de Poder Rigidizante.

Los resultados obtenidos ayudaran a crear granulometrías de filler teniendo en cuenta la rigidez de cada tamaño, aunque para esto sea necesario definir el comportamiento de otras características es una forma de dar mayor importancia a la influencia que tiene el llenante mineral en la mezcla asfáltica.

### 3.2 MINERALOGÍA DEL LLENANTE MINERAL

Desde un punto práctico, la mineralogía de los materiales más comunes como llenantes minerales, puede clasificarse en siete grupos que son:

- **Silicatos:** Los silicatos son abundantes en las rocas ígneas y metamórficas y poco en la sedimentarias, por lo que se pueden encontrar de forma abundante en la corteza terrestre. En este grupo entran los feldespatos, micas, olivino, piroxenos, anfíboles y minerales arcillosos.
- **Óxidos:** Son los materiales compuestos principalmente por oxígeno como el cuarzo, hematita limonita y magnetita.
- **Carbonatos:** Entre los carbonatos se encuentra la calcita y anhidrita.
- **Sulfatos:** El grupo de los sulfatos lo conforman los minerales como el yeso y la anhidrita.
- **Sulfuros:** El principal representante de los sulfuros es la pirita que se distingue por su brillo intenso y poco clivaje.
- **Fosfatos:** Los fosfatos están representados principalmente por el apatito.
- **Materiales de alteración:** Entre los principales minerales de este grupo se pueden citar la clorita, el talco, la serpentina y la vermiculita.

La composición mineralógica del llenante mineral es un factor importante al momento de evaluar la adhesión de las partículas. Si se utiliza un filler calizo, al adicionarlo al asfalto se presenta una adhesión mecánica causada por el aumento de viscosidad del mástico. Por otra parte si se utiliza cemento o cal apagada, además de la adhesión mecánica presenta también una adhesión físico-química.<sup>6</sup> La mineralogía de la mayoría de materiales utilizados como llenantes minerales para mezclas asfálticas está constituida de minerales compuestos por sílice o dióxido de silicio, con más cantidad en algunos y con menos en otros. Siendo dicho componente el más importante en cuanto al comportamiento de los materiales con el asfalto.

Los materiales escogidos para el estudio serán debidamente analizados en cuanto a su mineralogía, ayudados de expertos en el tema e información proporcionada por las empresas distribuidoras. Respecto al comportamiento que ejercen sobre la rigidez será necesario acudir a la teoría y experiencia que se tenga de estudios anteriores.

### **3.3 FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE LLENANTE MINERAL**

La forma como la textura son aspectos importantes en el papel del filler dentro de la mezcla. La irregularidad en las partículas afecta directamente el contenido óptimo de asfalto y también influyen en el comportamiento estructural y mecánico de las mezclas. Cuando las partículas presentan más índice de rugosidad, el mástico presenta mejor consistencia y su comportamiento mejora dentro de la mezcla asfáltica.

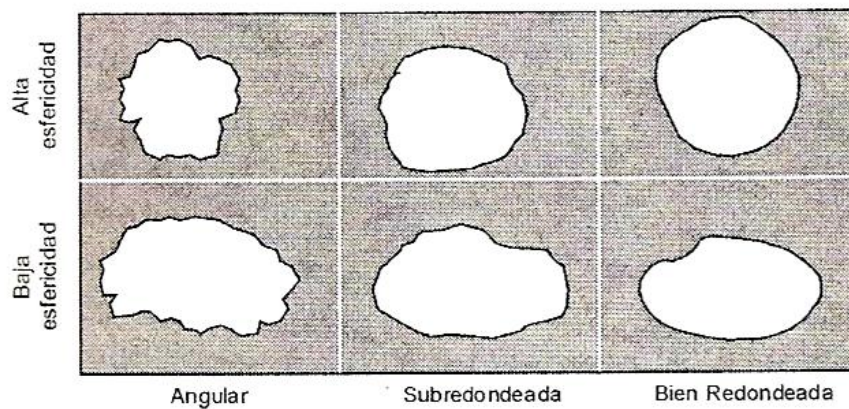
---

<sup>6</sup> ISHAI, I; CRAUS, J. *Effect the filler on aggregate-bitumen adhesive properties in bituminous mixtures. Asphalt Paving Technology. Association of asphalt Paving Technologists. Volume 46, pp. 228-259. San Antonio. Texas. 1997*

Las características geométricas de las partículas de filler- forma, angulosidad y textura- actúan como “núcleos potenciales” para intensificar la superficie activa del filler en la interface filler-betún. Cuantas más irregularidades geométricas posea el filler con idéntica composición mineralógica y relación filler / betún, los másticos alcanzan, para una temperatura dada, mayor consistencia, Ishai y Craus [65]. Este aumento de consistencia se debe a la mayor capacidad de absorción, lo que implica un descenso en el contenido de betún libre del mástico.<sup>7</sup>

La textura y la forma de las partículas se pueden clasificar según las figuras siguientes:

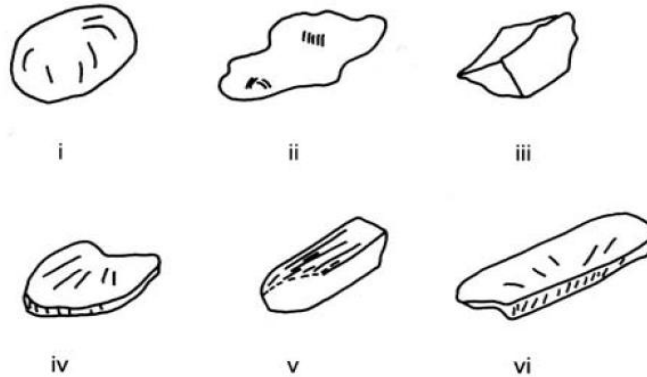
**Figura 3.1** Forma de las partículas según su esfericidad y angularidad.



**Fuente.** Manual de laboratorio Geología-Física 2005

<sup>7</sup> MIRO RECASENS, Jorge Rodrigo. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de Caminos, canales y puertos. Barcelona, 1994.

**Figura 3.2** Forma de las Partículas de Agregado Pétreo. i-Redondeada, ii-Irregular, iii-Angular, iv-Lajosa, v-Alargada, vi-Alargada-Lajosa.



**Fuente.** Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista.

Para la visualización de la forma de las partículas, ya separadas por tamaños se utilizará un estereoscopio con cámara incluida para captar imágenes y bastante zoom para lograr obtener fotografías claras de todas las partículas. De acuerdo a la teoría expuesta se determinará la forma y textura de las partículas que componen los llenantes minerales, tratando de realizar un trabajo certero, ya que se contará con tamaños muy pequeños.

## 4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 4.1 ASFALTO

El asfalto utilizado en la fabricación de las mezclas corresponde a un bitumen de penetración 60-70, distribuido por la empresa ECOPETROL. Dicho asfalto es el más utilizado por las plantas de concreto asfáltico de la región de Santander y por esta razón fue escogido como objeto de estudio. Sus especificaciones se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1** Propiedades técnicas del asfalto 60-70.

ENSAYO	NORMA	VALOR REPORTADO		REFERENCIA	
		F	°C	F	°C
Punto de Ablandamiento	ASTM D 36	118	47.78	107-131	42-55
Punto de Inflamación	ASTM D 92	496	-	Min 450	Min 232
Penetración a 25°C, 100 g y 5 s (0.1 mm) al asfalto original	ASTM D 5	66		60 – 70 mm/10	
% Pérdida de masa RTFOT	ASTM D 2872	0.9833		< 1 %	
Solubilidad en tricloroetileno (% peso)	ASTM D 2042	99.90		Min 99.0	
Contenido de agua (% volumen)	ASTM D 95	0.00		Máx 0.2	
Ductilidad a 25°C	ASTM D 113	>130		Min 100	
Penetración a 25°C, 100 g y 5 s (0.1 mm) al asfalto envejecido TFOT		36.1		-	
Penetración residual (%)	ASTM D 5	52.1%		Min 52	
Viscosidad Dinámica @ 60°C (P)	ASTM D 4402	2980		Min 1500	
Temperatura de Mezcla (°C)	ASTM D 1559	135 - 139		Reportar	
Temperatura de Compactación (°C)	ASTM D 1559	145 - 150		Reportar	
Índice de penetración	I.N.V. E-724	0.692		-1 hasta +1	

Fuente. [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)

## 4.2 LLENANTE MINERAL

Para el estudio se tomaron cenizas volantes de la central termoeléctrica TERMOPAIPA, Boyacá, material fino de las arenas del Río Chicamocha y calizas procedentes del municipio de Los Santos, Santander. Los tres materiales fueron escogidos por la diferencia en cuanto a su origen y características, esperando observar diversos comportamientos y establecer diferencias en la rigidez de las mezclas. Estos materiales cumplieron con las especificaciones indicadas en la norma ASTM-D242 en la cual indica que los materiales deben ser esencialmente libres de material orgánico o impurezas y tener un índice de plasticidad no superior a 4 como se muestra en los anexos.

**Tabla 4.2** Valores del azul de metileno.

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

**Fuente.** Norma I.N.V. E-235-07

Todo el material fue pasado por el tamiz No.200 para garantizar que su máximo tamaño fuera de 75 micrones. Para la separación del material en tres tamaños fue utilizado el tamiz No.325 y No.400. El tamizado se realizó con lavado y secado del material para lograr una separación más precisa, ésta se realizó en el laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

#### 4.2.1 Cenizas volantes

Las cenizas volantes son residuos sólidos obtenidos en el proceso de combustión realizado en las centrales termoeléctricas que son alimentadas por carbonos pulverizados. Las cenizas volantes tienen una granulometría bastante fina y poseen altos contenidos de aluminio y silicio en fases reactivas.

La reutilización de las cenizas volantes como material de ingeniería proviene sobre todo por su puzonalidad, forma esférica, y uniformidad relativa. Estas son usadas en:

- Cemento Portland y lechadas
- Terraplenes estructurales
- Estabilizaciones de suelos
- Terraplenes fluidos
- Concreto asfáltico

Una puzolana es un material silíceo que es altamente vítreo, este material en forma independiente tiene menos propiedades que el cemento, pero en presencia de un medio rico en cal como el hidróxido de calcio muestra un mejor comportamiento. Las puzolanas se clasifican en dos grandes grupos, puzolanas naturales como las rocas volcánicas y puzolanas artificiales como las cenizas volantes que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado.

Según la norma ASTM C 618, existen tres tipos de puzolanas:

- **De clase N:** Puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumplan con los requisitos aplicables para la clase como lo indica la norma. Puzolanas como las tierras diatomáceas, esquistos opalinos, cenizas volcánicas, piedra pómez entre otros y varios materiales que requieran su

calcinación para generar propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y esquistos.

- **De clase F:** Cenizas volantes que surgen de quemar antracitas duras y viejas y carbón bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedad puzolánica y debe cumplir con los requisitos aplicables a la norma.
- **De clase C:** Las cenizas volantes de clase C proceden de la combustión de lignitos jóvenes y carbón subbituminoso, cumplen con los requisitos aplicables en su clase y además de tener características puzolanas también posee propiedades cementicias.

Las cenizas son utilizadas con el fin de mejorar la fluidez, incrementar la resistencia a largo plazo y reducir la densidad, la exudación, la retracción y la permeabilidad de las mezclas. Se ha comprobado que entre más fina es una ceniza volante menor es su contenido de carbón, mayor es la actividad puzolánica y más elevada es la contribución a la resistencia mecánica de pastas, morteros y hormigones. Para concretos asfálticos se pueden utilizar cenizas volcánicas de clase F ó C, como llenante mineral, para llenar vacíos y proporcionar unión entre partículas de agregados mas grandes encontradas en la mezcla. Estas cenizas deben cumplir con las especificaciones encontradas en la norma ASTM D242.

Su mineralogía depende de las características y de los constituyentes del carbón quemado y procesado en la central térmica y de todo el tratamiento recibido. Están compuestas en su mayor parte de material mineral (70-80%), en forma de partículas fundamentalmente vítreas con una pequeña proporción de fase cristalina. El estado vítreo del material se debe a la elevada temperatura de combustión y al rápido enfriamiento que a su vez influye en la composición mineralógica final.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> SANTAELLA VALENCIA, Luz Elena. *Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.*

Los minerales más importantes que contienen las cenizas volantes dentro de la fase vítrea o depositados en la superficie de las partículas son: mullita, magnetita, gran cantidad de sílice, hematites, aluminatos cálcicos, anhidrita y óxido de calcio libre. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.2 a 2.8 y su color es gris o beige.

Las cenizas volantes utilizadas para el estudio fueron extraídas de La Central Termoeléctrica TERMOPAIPA, que es generadora de energía eléctrica a base de vapor a través de carbón bituminoso pulverizado; está ubicada en el Kilómetro 3 vía Paipa - Tunja, Municipio de Paipa, Departamento de Boyacá; cuenta con una capacidad instalada de 321Mw.

En el proceso de generación de energía de la planta IV de Termopaipa se producen dos tipos de cenizas como residuo de la combustión del carbón: Las cenizas de fondo que caen en el cenicero de la cámara de combustión, donde se mezclan con agua y se retiran del sistema y las cenizas volantes que salen con los gases de la cámara por los ductos de conducción, captadas a la salida de la chimenea mediante filtros electrostáticos. Durante el proceso de combustión se generan pérdidas por incineración que reflejan las deficiencias de las termoeléctricas colombianas en dicho proceso.

Las cenizas volantes generadas de la Termoeléctrica TERMOPAIPA, como la mayoría de las cenizas volantes de Colombia, se encuentran dentro de la clase o tipo F. Se componen en su mayoría de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en una cantidad de aproximadamente 61.3% de su contenido total. También poseen óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en una cantidad de 23.5%, óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 4.78% y pequeñas cantidades de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ).

#### 4.2.2 Material fino de las arenas de río

La arena de río es un árido fino de grano más angular e irregular que la arena de playa, esto debido a que el arrastre y la abrasión no han desgastado el grano al máximo. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea. Su composición depende de la geología del recorrido del cauce del río y se pueden identificar dos tipos principales que son:

- Arenas compuestas principalmente por fragmentos de todo tipo de rocas volcánicas con cantidades variables, pero pequeñas de cuarzo.
- Arenas con gran cantidad de cuarzo, feldespato, mica, fragmentos de rocas ígneas y algo de detritus volcánico.

El material de río es utilizado para proyectos como recubrimientos de muros, pegadas con mortero, pavimentos, cimientos ciclópeos entre otros y es el más utilizado como llenante mineral en las principales plantas de concreto asfáltico de la región.

Su mineralogía depende de los minerales que componen la roca de la cual se desprende, este material es producto del rompimiento en pedazos más y más pequeños hasta convertirse en arena. Cuando las plantas comienzan a brotar sobre la arena, está pasa de apenas ser pequeños pedacitos de roca a convertirse en suelo.

Las arenas escogidas como llenante mineral fueron las arenas del Río Chicamocha, la mayor extracción de estas la realiza la arenera Los Pinos, ubicada en jurisdicción del municipio de Aratoca, Santander, sector La Playa, Potreritos, vereda El Verde, 3km adelante del puente Pescadero en la vía Bucaramanga-San Gil, a 900m de dicha vía. Se explota el material a una profundidad de 2m el cual

está conformado por gravas redondeadas y cantos envueltos en una matriz arenosa. En los alrededores del lugar de explotación del material afloran rocas metamórficas como la formación Silgará, rocas ígneas como el granito de pescadero, rocas sedimentarias como la formación de Girón, sabiendo que los depósitos que forman el yacimiento son producto de la meteorización, erosión y transporte que realiza el río Chicamocha y sus afluentes como el río Manco.

La mineralogía del material del Río Chicamocha está compuesta principalmente de cuarzo o dióxido de silicio con 35%, micas y anfíboles, 20% cada uno y una cantidad del 10% de feldespatos, 5% de piroxenos y algunos accesorios como la calcita, epidota y cireón.

#### **4.2.3 Calizas**

La caliza es una roca sedimentaria, porosa, se forma en los mares cálidos y de poca profundidad, en climas tropicales, zonas en la cuales hay poco aporte detrítico. En su estado puro es de color blanca, aunque generalmente se le encuentra en colores como gris y negro, esto se debe a la presencia de impurezas (otros elementos o compuestos) presentes en la formación mineral. El color es un indicador importante que nos puede dar una primera idea del tipo de impureza que se encuentra en la formación de una caliza, por ejemplo: La presencia de óxido ferroso da un color amarillento, rojo, pardo y los sulfatos tales como la pirita, la marcasita y la siderita al oxidarse con el contacto atmosférico se tornan de color rojizo superficial. Están compuestas principalmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita, aunque a veces tienen alta proporción de carbonatos de magnesio y se les conoce como dolomitas.

Existen diferentes tipos de calizas según su formación, entre la cuales están:

- **Las Biohérticas:** formadas por esqueletos acuáticos formadores de arrecifes
- **Las Bostrónicas:** Igual formación a las biohérticas pero con áreas más extensas e intercaladas con capas de arcillas.
- **Las Bituminosas:** Son de color negro por su alto contenido de compuestos orgánicos como el queroseno y asfaltos.
- **Crinoides:** Son calizas con dolomitas (calizas de magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )
- **Calizas fétidas:** Contienen azufre
- **Calizas Pelágicas:** Formadas por restos de organismos marinos microscópicos y ciertas algas. Característica principal la finura del grano.
- **Nummulíticas:** formados en el terciario (era de formación geológica) a partir de caparazones de protozoos (organismos microscópicos unicelulares)
- **Oolíticas:** Son calizas que contienen pequeñas esferas calcáreas producidas por la aglutinación de fango calcáreo.
- **Pisolíticas:** formadas por restos de algas en forma de pequeñas esferas.

El uso de las calizas es muy extenso, su mayor utilización es en la parte de construcción, como la estabilización de suelos y componente para un buen cemento. También posee usos para fundiciones, productos químicos, vidrio, plásticos, agroquímicos, etc.

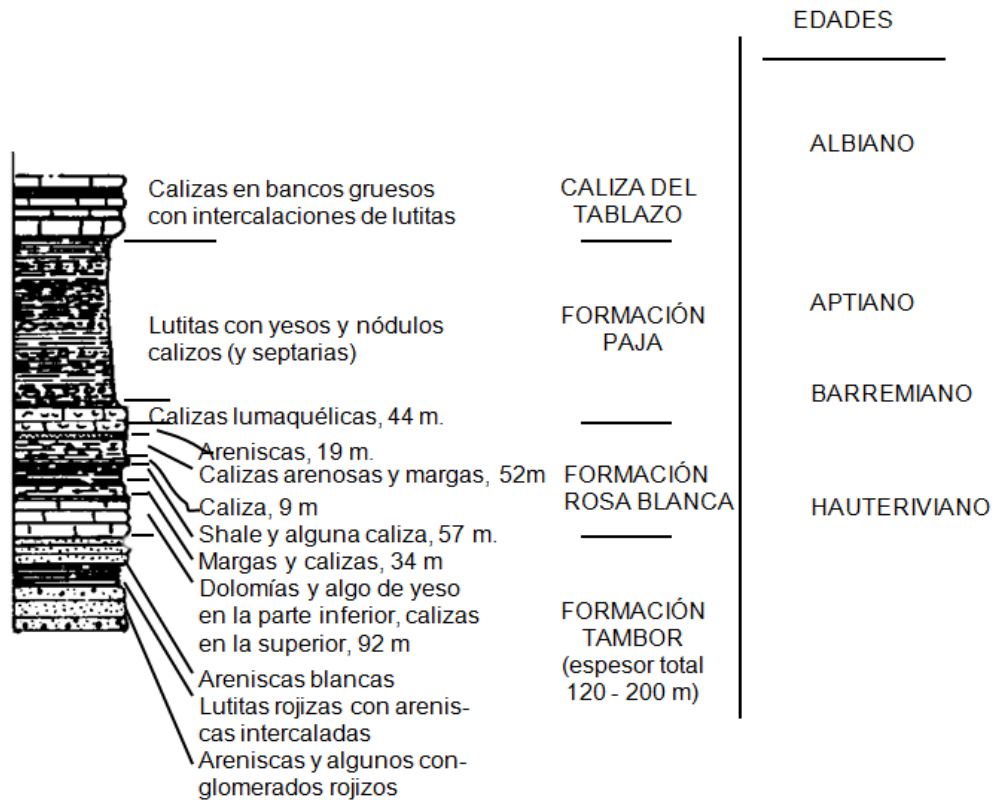
Las calizas utilizadas provienen de La Mesa de Los Santos en el departamento de Santander. Las formaciones rocosas de esta zona son principalmente compuestas por materiales calcáreos o calizas, que se dan entre las formaciones Rosablanca, El tablazo, Pajas y Simití. Estas formaciones son de alto contenido de rocas

calcáreas y presencia de fósiles marinos, lo que permite deducir que el ambiente de deposiciones es marino somero, dato que concuerda al tener en cuenta la formación del nororiente colombiano en el tiempo cretáceo que obtuvo inmersión de aguas saladas.

La formación el Tablazo, se encuentra compuesta por una sucesión de calizas de un espesor aproximado de 150m y 325m. En su estratificación se pueden encontrar calizas de gris-azulosas, fosilíferas, arcillosas de color negro y algunos niveles intercalados de arcillolitas gris a gris azulado, calcáreas, fosilíferas en capas medianas a gruesas.

Con estudios de mayor precisión y tecnología como es el uso de rayos x, se pueden encontrar en las calizas además de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la presencia de algunos elementos y compuestos como son: sílice y alúmina, el hierro, compuestos de sodio y de potasio.

Figura 4.1 Formaciones geológicas de la Mesa de los Santos



Fuente. ZAMARREÑO DE JULI- VERT, 1963.

#### 4.2.4 Comportamiento de los minerales en las mezclas asfálticas

En los tres materiales utilizados para el estudio, priman dos minerales que son el sílice o dióxido de silicio y la alúmina u óxido de aluminio. Estos minerales cumplen un papel importante ya que sus componentes pueden influir en el comportamiento y características de las mezclas asfálticas.

- **Sílice o Dióxido de silicio**

El sílice está compuesto de silicio y oxígeno, es el constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena. También lo contiene en abundancia las aguas

volcánicas. Actúa como desecante, es decir que quita la humedad del lugar en que se encuentra.

Su comportamiento en las mezclas asfálticas se basa en gran importancia debido a su contenido de silicio, este elemento electropositivo es el más abundante de la corteza terrestre después del oxígeno, tiene un punto de fusión de 1.411°C, un punto de ebullición de 2.355°C, una densidad relativa de 2,33 y su masa atómica es 28,086. A temperaturas normales el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide continuar la reacción.

Es una creencia general que el agregado que posee silicio, algunas veces llamado “hidrofilico” por su sed de agua, es apto para el strip y que los agregados con bajo contenido de silicio, llamados “hidrófobos” por su rechazo al agua, no. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que existen algunos agregados que resisten completamente la acción del agua bajo todas las condiciones de su empleo. Los agregados de silicio son empleados con éxito en muchas áreas donde, se centra la atención en el diseño de la mezcla, sus propiedades y la práctica constructiva.<sup>9</sup>

- **Alúmina u Óxido de Aluminio**

La alúmina junto con el sílice son los componentes más importantes de las arcillas y los esmaltes, sus propiedades la hacen apta para aplicaciones donde la temperatura es un factor crítico. Ésta en su forma activada tiene la propiedad de secar el aire hasta dejarle muy poca humedad y posee buenas propiedades de adsorción del flúor del agua.

Su comportamiento en las mezclas asfálticas está ligado al comportamiento de la sílice, estos dos elementos cumplen con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones, destacándose la propiedad de fraguar y endurecer una

---

<sup>9</sup> AVELLANEDA MENDOZA, William Miguel. *Control de Calidad en Mezclas Asfálticas Calientes*. Universidad de Los Andes. Bogotá. 2005

mezcla, aún bajo el agua. La combinación de sílice con alúmina se puede presentar de forma de arcilla, como feldespato o como mica, aunque en la mayoría de las aplicaciones puede no tenerse en cuenta el contenido de sílice, ya que para el tamaño de las partículas de sílice aproximadamente igual a la de los granos de arena no sufren alteraciones, permanecen inertes.

- **Hierro**

Se presenta normalmente como limonita (hidróxido férrico) y pirita  $FeS_2$  donde los silicatos que contienen hierro no se descomponen. Los compuestos de hierro son pocas veces nocivos en las calizas.

- **Compuestos de Sodio y de Potasio**

Su cantidad no es significativa en las calizas, estos compuestos son de gran volatilidad por lo que su pérdida a altas temperaturas es inevitable.

- **Azufre**

Lo poseen las cenizas volantes en pequeñas cantidades como trióxido de azufre. Éste en condiciones normales es un sólido incoloro de textura fibrosa que al entrar en contacto a temperaturas mayores de  $25^{\circ}C$  se convierte en gas.

## 5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 5.1 SEPARACIÓN POR TAMAÑOS DE LOS LLENANTES MINERALES

- Para comenzar se pasaron las muestras de cenizas, arenas y calizas por el tamiz No.200 para retirar material granular que no cumplía con el tamaño adecuado para los ensayos y facilitar la tamizado.
- Seguidamente se pasaron las muestras por los tamices No.325 y No.400 hasta obtener la separación en tres tamaños de las muestras en estado seco a temperatura ambiente.

**Figura 5.1** Tamizado del material en seco.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Al observar que tamizando las muestras en seco, algunas de las partículas finas no pasaban el tamiz debido a su poco peso, se hizo necesario lavar el material para tamizarlo nuevamente.

**Figura 5.2** Tamizado del material con lavado.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Las muestras retenidas en el tamiz No.325 y No.400 fueron secadas en el horno a una temperatura controlada de 110°C para retirar la humedad y obtener de nuevo los materiales en estado seco.

**Figura 5.3** Secado de la muestra en el horno



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- El material que pasó por el tamiz No.400, que contenía mayor cantidad de agua, fue calentado en una estufa, controlando también su temperatura que llegaba a 96°C, hasta secarlo nuevamente, retirándolo del recipiente con un cepillo metálico.

**Figura 5.4** Secado de la muestra en la estufa y retirado del recipiente.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

## 5.2 GRANULOMETRÍA CON HIDRÓMETRO DE LOS LLENANTES MINERALES TAMIZ PASA NO.400

Para determinar los tamaños del material que pasó por el tamiz No.400 se realizó el ensayo de granulometría por hidrómetro.

**Figura 5.5** Ensayo de granulometría del material fino.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

### 5.2.1 Granulometría de las cenizas volantes (Central Termoeléctrica TERMOPAIPA, Boyacá)

**Hidrómetro No. 152H**

**Agente Dispersante:** Hexametáfosfato de sodio

**Gs Sólidos (g/cm<sup>3</sup>):** 2,17

**Corrección por menisco (g/litro):** 1

**Corrección Agente dispersante y Punto cero ( g/litro):** 4

**Ws (g):** 60     $\alpha$ : 1,155

**Tabla 5.1** Granulometría de cenizas volantes de Termopaipa pasa Tamiz No.400

Tiempo (minutos)	Temp. (°C)	Lectura del hidrómetro (Ra)	Lectura corregida del hidrómetro (Rc)	% Finos	Diámetro (mm)
				100	0,038
1	24	28	25	48,12	0,037
2	24	27	24	46,19	0,034
5	24	21	18	34,64	0,025
15	24	15	12	23,10	0,015
30	24	10	7	13,47	0,011
60	24	9	6	11,55	0,008
120	25	8,5	5,5	10,59	0,005
250	26	7,5	4,5	8,66	0,004
1440	24	6,5	3,5	6,74	0,002

**Fuente.** Elaboración propia

## 5.2.2 Granulometría del material fino de las arenas del Río Chicamocha

**Hidrómetro No.** 152H

**Agente Dispersante:** Hexametáfosfato de sodio

**Gs Sólidos (g/cm<sup>3</sup>):** 2,71

**Corrección por menisco (g/litro):** 1

**Corrección Agente Dispersante y Punto cero ( g/litro):** 4

**Ws (g):** 60     $\alpha$ : 0,987

**Tabla 5.2** Granulometría del material fino de las arenas del río Chicamocha pasa Tamiz No.400

Tiempo (minutos)	Temp. (°C)	Lectura del hidrómetro (Ra)	Lectura corregida del hidrómetro (Rc)	% Finos	Diámetro (mm)
				100	0,038
1	26	41,5	38,5	63,32	0,036
2	26	37,5	34,5	56,74	0,028
5	26	29	26	42,76	0,019
15	25	21,5	18,5	30,43	0,012
30	24	17,5	14,5	23,85	0,009
60	24	14	11	18,09	0,006
120	24	12,5	9,5	15,62	0,004
250	24	11	8	13,16	0,003
1440	23	8	5	8,22	0,001

**Fuente.** Elaboración propia

### 5.2.3 Granulometría de calizas de La Mesa de los Santos

**Hidrómetro No.** 152H

**Agente Dispersante:** Hexametáfosfato de sodio

**Gs Sólidos (g/cm<sup>3</sup>):** 2,89

**Corrección por menisco (g/litro):** 1

**Corrección Agente Dispersante y Punto cero ( g/litro):** 4

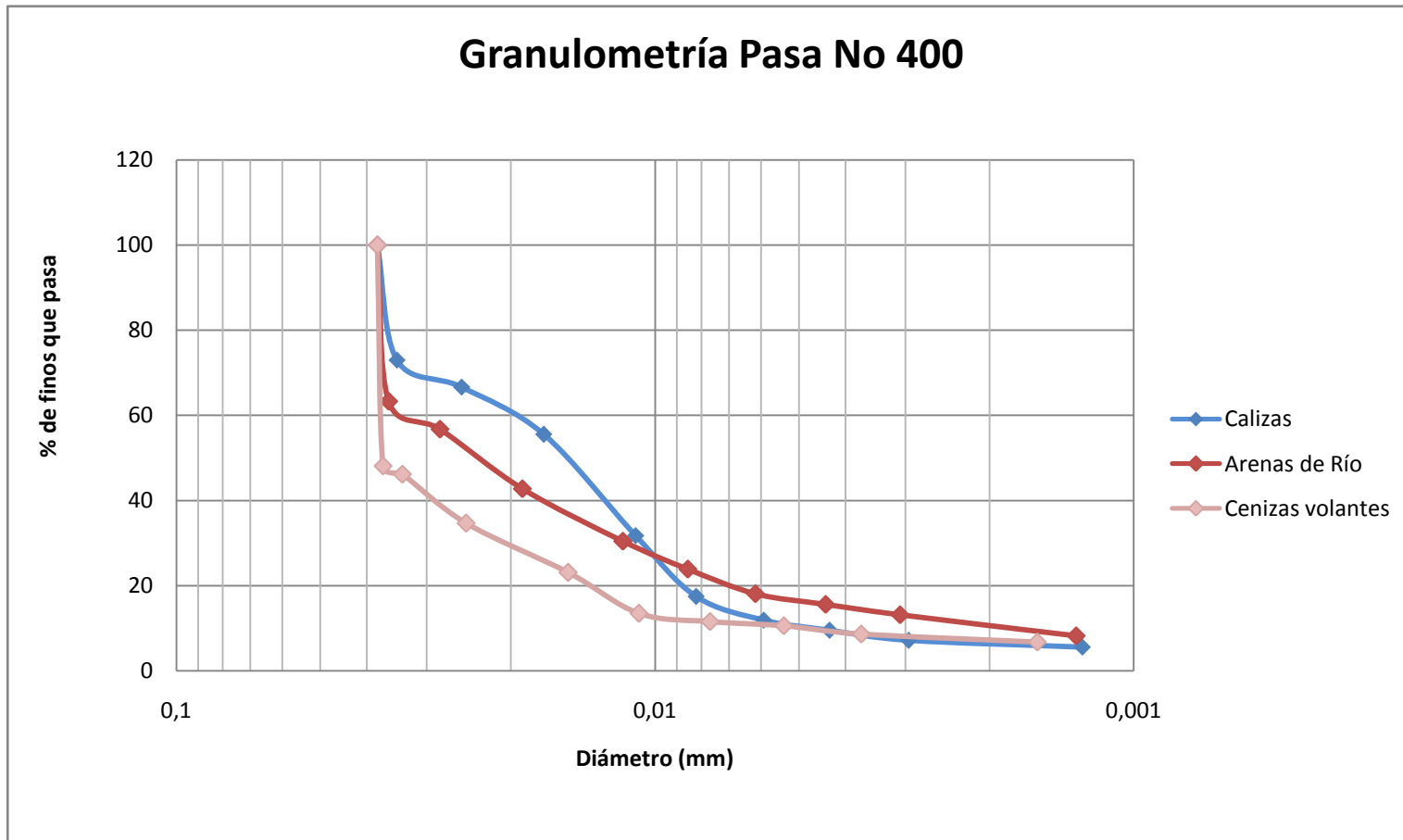
**Ws (g):** 60    **α:** 0.952

**Tabla 5.3** Granulometría de calizas de la Mesa de Los Santos Pasa No.400

Tiempo (minutos)	Temp. (°C)	Lectura del hidrómetro (Ra)	Lectura corregida del hidrómetro (Rc)	% Finos	Diámetro (mm)
				100	0,038
1	24	49	46	72,99	0,035
2	24	45	42	66,65	0,025
5	24	38	35	55,54	0,017
15	24	23	20	31,74	0,011
30	24	14	11	17,45	0,008
60	24	10,5	7,5	11,90	0,006
120	23	9	6	9,52	0,004
250	23	7,5	4,5	7,14	0,003
1440	22	6,5	3,5	5,55	0,001

**Fuente.** Elaboración propia

Gráfica 5.1 Granulometría de las muestras Pasa No.400

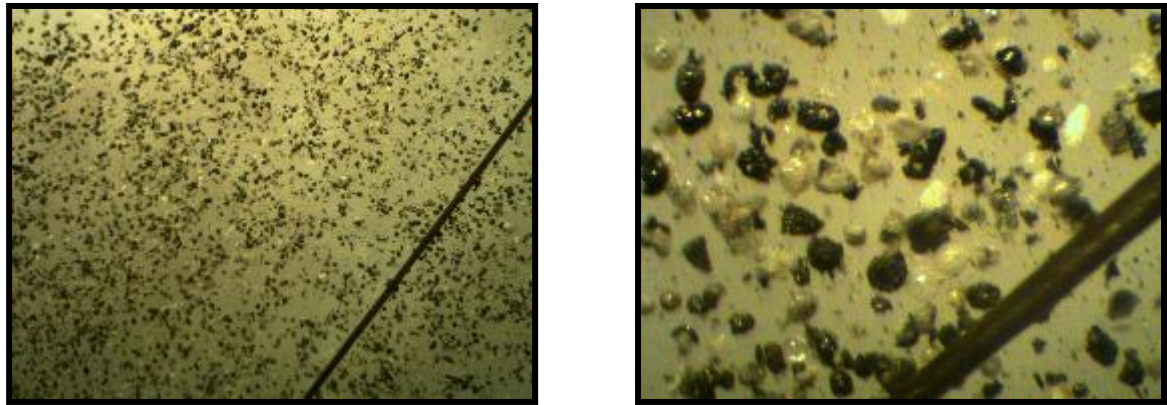


Fuente. Elaboración propia.

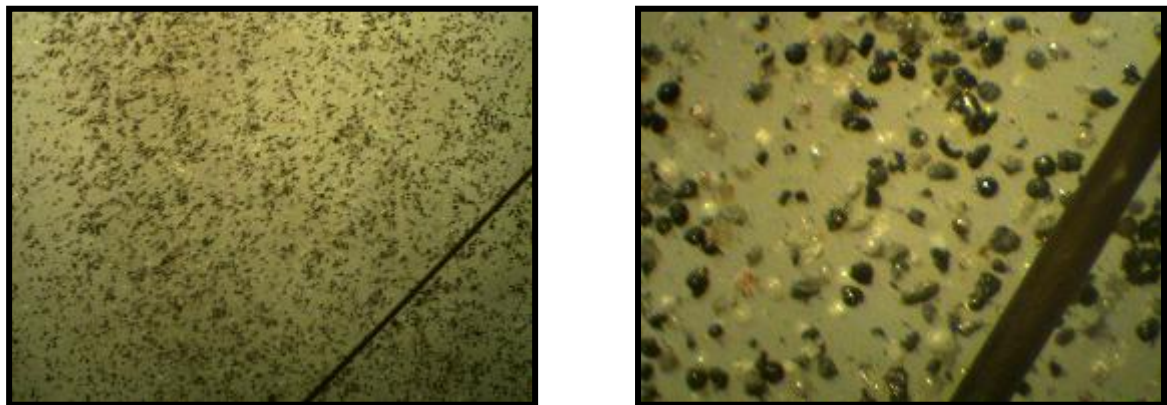
### 5.3 FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE LOS LLENANTES MINERALES

La visualización de la forma de las partículas se llevó a cabo mediante un stereo microscopio trinocular con zoom de 0.65 a 6.0 proporcionado por la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en el cual se tomaron las siguientes fotografías, colocando como referencia para idealizar los tamaños, un cabello de persona. Las fotos fueron tomadas con un zoom diferente para cada muestra, esto con el fin de observar las partículas en general y su aspecto detallado.

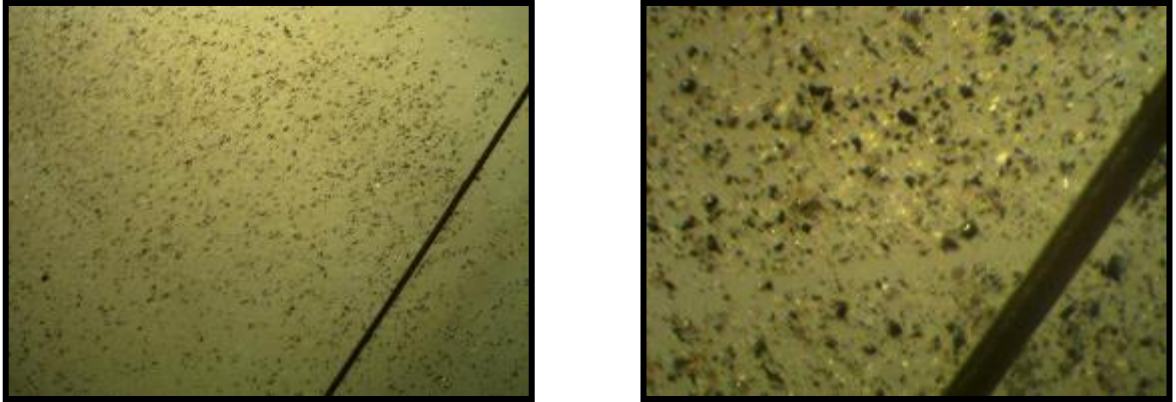
**Figura 5.6** Cenizas volantes Pasa No.200 Retiene No.325



**Figura 5.7** Cenizas volantes Pasa No.325 Retiene No.400



**Figura 5.8** Cenizas volantes Pasa No.400

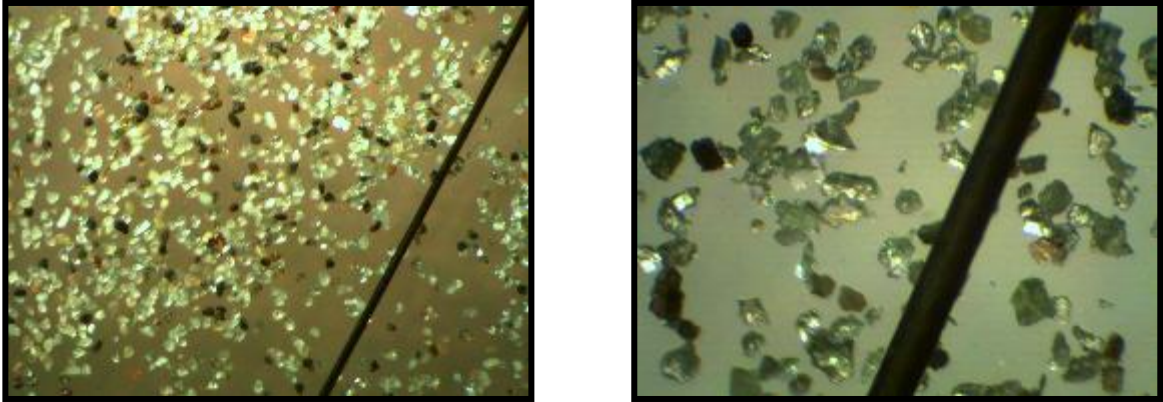


**Fuente.** Registro fotográfico propio.

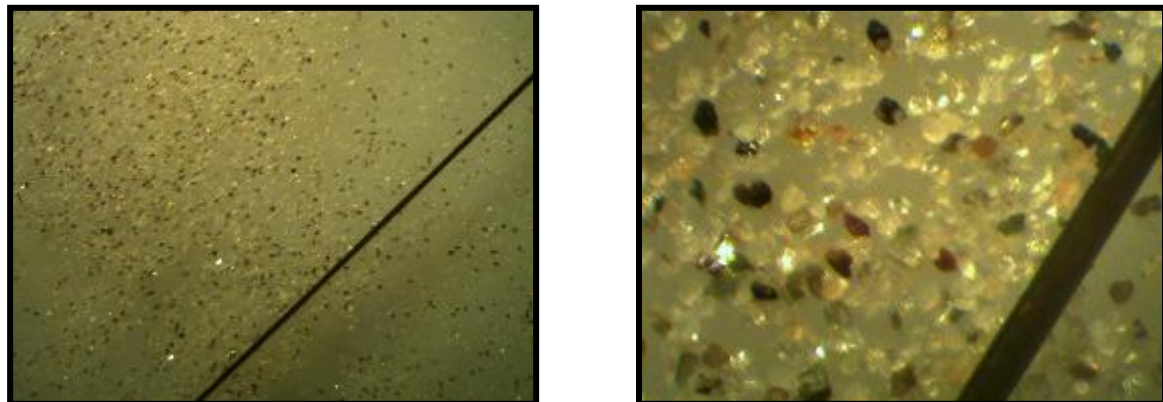
Las cenizas volantes, como su teoría lo dice, es un material vítreo, lo cual se puede comprobar observando las fotografías, donde gran parte de las partículas son transparentes y brillantes. La fácil separación entre ellas permite una mejor visualización de sus características físicas desde la muestra de tamaño mayor hasta la muestra más fina.

En las cenizas volantes, hay una variedad de formas presentes, entre las cuales se destacan la presencia de las partículas esféricas con textura lisa, aunque no es despreciable la cantidad de partículas con forma irregular y angulosa. Esta característica se mantiene en todos los tamaños del material.

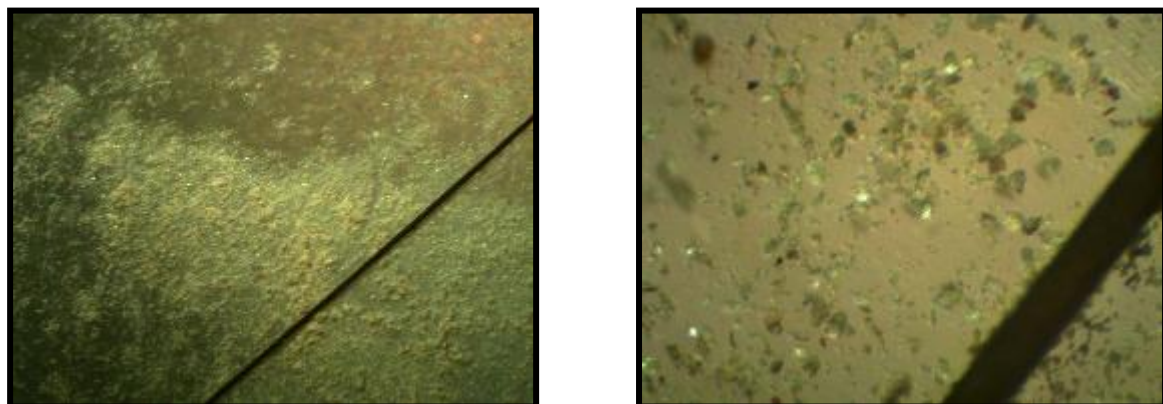
**Figura 5.9** Arenas de Río Pasa No.200 Retiene No.325



**Figura 5.10** Arenas de Río Pasa No.325 Retiene No.400



**Figura 5.11** Arenas de Río Pasa No.400

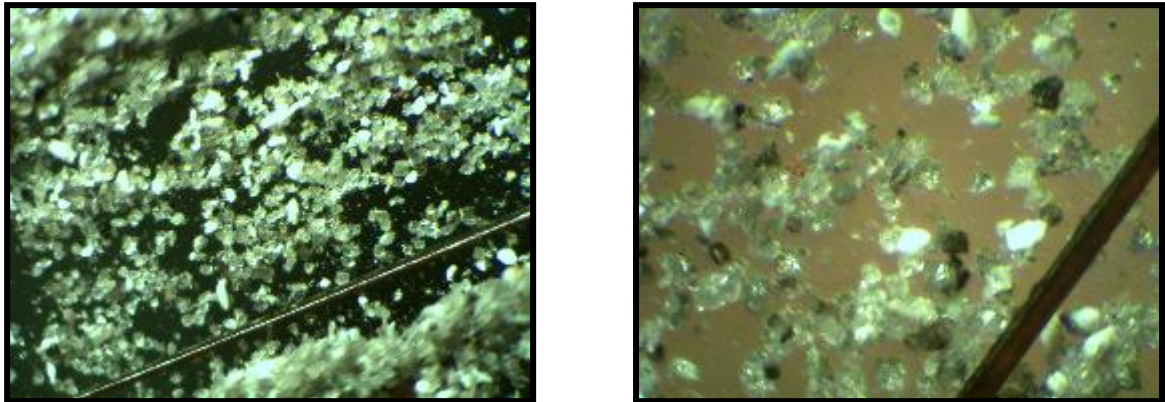


**Fuente.** Registro fotográfico propio.

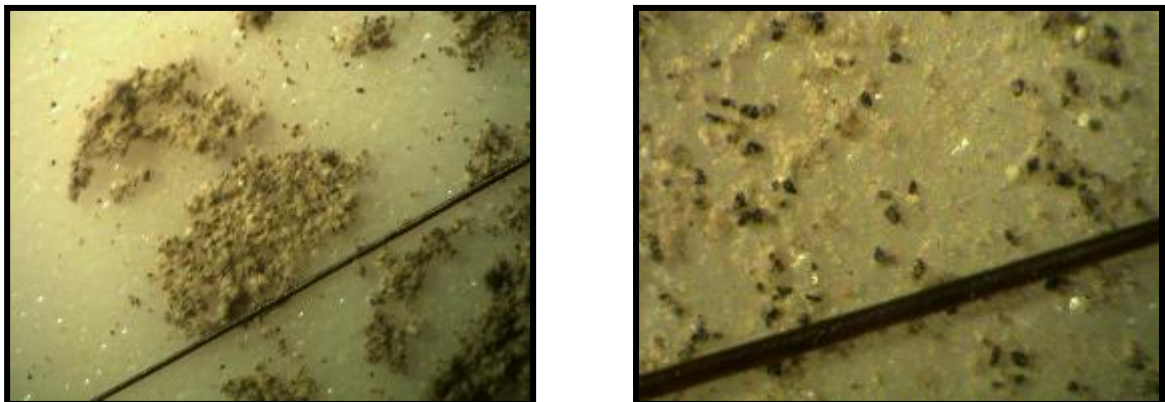
El material fino de las arenas de río es un material de fácil separación y su definición en forma y angularidad se encuentran bien definidas. La variedad de colores en sus granos es índice de los minerales presentes en la muestra, debido al desgaste natural de las rocas de las cuales se desprendieron.

La forma de los tamaños mayores (Pasa Tamiz No.200 y Pasa Tamiz No.325) son angulosas, aunque en las partículas Pasa Tamiz No.325 su esfericidad es mayor, las caras fracturadas persisten. En la muestra Pasa No.400 se puede observar partículas mas laminares y traslucidas, lo que hace interpretar que poseen forma lajosa.

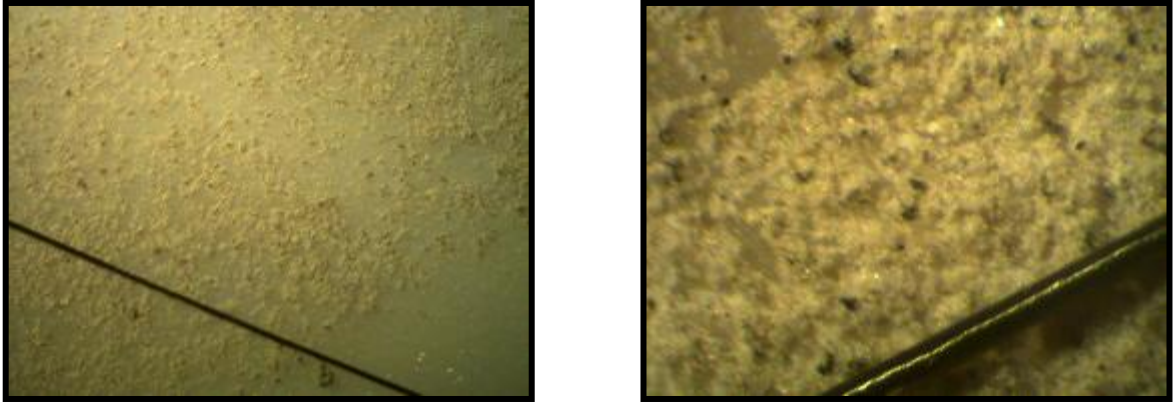
**Figura 5.12** Calizas Pasa No.200 Retiene No.325



**Figura 5.13** Calizas Pasa No.325 Retiene No.400



**Figura 5.14** Calizas Pasa No.400



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

En las calizas, más detallado en las Pasa No.200, se pueden observar partículas oscuras y claras, algunas transparentes que priman sobre las demás. Las partículas oscuras o grisáceas son impurezas que contiene la caliza, como se ve, es poca la cantidad que dichas muestras poseen. A medida que disminuye el tamaño se puede visualizar un polvillo blanco que no permite la fácil separación de las partículas, este polvillo pasa el tamiz No. 400 haciendo que la visión de las fotos con este tamaño no sean claras al momento de detallar la forma y textura de las partículas, las de mayor tamaño son angulosas en su totalidad y su forma es de alta esfericidad. Esto se discutirá de manera más detallada en el numeral 11 Análisis de resultados.

#### **5.4 ENSAYO DE DENSIDAD EN KEROSENE PARA LOS LLENANTES MINERALES / NORMA I.N.V. E-225-07**

Para el ensayo de densidad relativa del material se decidió reemplazar el tolueno por kerosene. Este posee una densidad similar a la del tolueno y busca reemplazar el asfalto por este material para determinar aproximadamente la densidad que tiene el filler en el ligante. El procedimiento es el siguiente:

**Figura 5.15** Deshidratación y filtración del kerosene.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

**Figura 5.16** Sedimentación de la muestra.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

El ensayo se realizó para las muestras separadas por tamaños, pesando 10g de cada muestra como lo indica la norma y siguiendo los pasos indicados allí se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 5.4** Resultados de densidad en Kerosene

<b>CENIZAS VOLANTES</b>		
<b>Peso muestra (gr)</b>	10	
<b>Tamaño</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Densidad en kerosene (gr/ml)</b>
Pasa #200 - Retiene	22	0,45
Pasa #325 - Retiene	21	0,48
Pasa #400	18	0,56

<b>MATERIAL FINO DE ARENA DE RÍO</b>		
<b>Peso muestra (gr)</b>	10	
<b>Tamaño</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Densidad en kerosene (gr/ml)</b>
Pasa #200 - Retiene #325	10,3	0,97
Pasa #325 - Retiene #400	13	0,77
Pasa #400	16,5	0,61

<b>CALIZAS</b>		
<b>Peso muestra (gr)</b>	10	
<b>Tamaño</b>	<b>Volumen (ml)</b>	<b>Densidad en kerosene (gr/ml)</b>
Pasa #200 - Retiene #325	11	0,91
Pasa #325 - Retiene #400	13,5	0,74
Pasa #400	15	0,67

**Fuente.** Elaboración propia.

## 5.5 ENSAYO DE CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE LLENANTE MINERAL / NORMA I.N.V. E-745

Con el ensayo de concentración crítica se busca encontrar la máxima cantidad de llenante mineral apropiada para utilizar en másticos, dicho ensayo se realizó con materiales semejantes a los estipulados en la norma, debido al fácil reemplazo que tenían por materiales de uso más frecuente.

El ensayo se llevó a cabo, para cada muestra, las veces necesarias para conseguir que su volumen después de 24 horas fuera el indicado en la norma, el cual se encuentra entre 8 y 12ml y su realización se muestra a continuación:

**Figura 5.17** Deshidratación y filtración del kerosene.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

**Figura 5.18** Extracción de burbujas



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

**Figura 5.19** Medición de volumen después de 24h.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

**Tabla 5.5** Resultados Concentración Crítica del llenante mineral.

	Tamices		Gravedad Específica (gr/ml)	Peso muestra (gr)	Vol. 24h después (ml)	Concentración Crítica en volumen
	Pasa	Retiene				
<b>ARENA DE RÍO</b>	200	325	2,78	12	9	0,480
	325	400	2,74	10	8	0,456
	400	....	2,71	10	12	0,308
<b>CALIZA</b>	200	325	2,97	9	8,5	0,357
	325	400	2,92	8	8,5	0,322
	400	....	2,89	8	10	0,277
<b>CENIZA VOLANTE</b>	200	325	1,97	5	8	0,317
	325	400	2,08	7	12	0,280
	400	....	2,17	7	10	0,323

**Fuente.** Elaboración propia.

## 5.6 ENSAYO DE VACÍOS DEL LLENANTE COMPACTADO EN SECO / NORMA I.N.V. E-229-07

Para el ensayo de vacíos del llenante compactado en seco se realizaron dos ensayos por muestra para encontrar el valor del porcentaje de vacíos que corresponde, aproximadamente, al contenido óptimo de ligante que da un adhesivo asfáltico de máxima viscosidad. Las muestras se secaron durante 4 horas a una temperatura de 110°C siguiendo el procedimiento como lo describe la norma.

Figura 5.20 Peso y adición del llenante.



Fuente. Registro fotográfico propio.

Figura 5.21 Compactación y limpieza del material adherido al aparato.



Fuente. Registro fotográfico propio.

Figura 5.22 Peso de la pastilla de filler.



Fuente. Registro fotográfico propio.

Tabla 5.6 Resultados Vacíos de llenante compactado en seco.

	TAMICES		Masa de la pastilla (g)	Espesor de la pastilla (cm)	Gravedad específica (g/ml)	Porcentaje de vacíos (%)
	PASA	RETIENE				
<b>CENIZAS VOLANTES</b>	200	325	9,6	2,63	1,97	62,24
	325	400	8,9	1,92	2,08	54,47
	400	....	9,3	1,64	2,17	46,75
<b>MATERIAL FINO DE ARENA DE RÍO</b>	200	325	9,6	1,34	2,78	47,49
	325	400	9,8	1,36	2,74	46,41
	400	....	9,9	1,39	2,71	46,25
<b>CALIZAS</b>	200	325	9,9	1,27	2,97	46,52
	325	400	9,9	1,31	2,92	47,26
	400	....	9,9	1,34	2,89	47,91

Fuente. Elaboración propia.

## 5.7 PODER RIGIDIZANTE DE LAS MEZCLAS (FILLER-LIGANTE)

### 5.7.1 Ensayo de Poder Rigidizante / PNE\_prEN 13179-1

El ensayo de poder rigidizante está propuesto por normativas francesas, acerca de ensayos aplicados a fillers utilizados en mezclas bituminosas, con el fin de observar y analizar comportamientos, como la rigidez de las mezclas asfálticas en caliente frente a la incorporación de diferentes llenantes minerales. Para el ensayo de poder rigidizante del filler se utiliza el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada a una temperatura determinada (30 a 80°C) y se realiza llevando a cabo el ensayo de punto de ablandamiento, según la norma **I.N.V. E-712**, para el asfalto escogido y posteriormente se realiza el mismo ensayo al mástico. El poder rigidizante se considera como la diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) entre el punto de ablandamiento del asfalto y el punto de ablandamiento del mástico.

### 5.7.2 Ensayo de Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) / NORMA I.N.V. E-712

Los asfaltos son materiales viscoelásticos, por lo cual no se puede hablar de un punto de fusión determinado, por esta razón se hace necesario definir un punto de ablandamiento convencional. El ensayo consta de dos discos horizontales de asfalto, fundidos entre anillos de bronce, sumergidos en un baño líquido con una temperatura controlada y soportando una bola de acero. El punto de ablandamiento es el valor promedio de las temperaturas a las cuales los discos permiten que la bola caiga desde una distancia de 1”.

### 5.7.3 Diseño de la mezcla filler-ligante

La cantidad de ligante asfáltico y de llenante mineral está estipulada en algunas normas y se define mediante una relación filler-asfalto que depende de una serie

de requisitos como los son: la capa para la cual se destine la mezcla, el tipo de mezcla, la categoría del tráfico y la zona en que se encuentre la vía.

Para determinar las cantidades de asfalto y filler a utilizar en una mezcla Marshall hay que tener en cuenta los porcentajes indicados en el artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras que indica el conjunto de agregado grueso, agregado fino y **llenante mineral** que deberá ajustarse a alguna de las siguientes gradaciones:

**Tabla 5.7** Granulometría del agregado para mezclas densas en caliente.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alternativo	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-100	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	43-54	51-68	65-87
2.00 mm	No.10	29-45	38-52	43-61
425 mm	No.40	14-25	17-28	16-29
180 mm	No.80	8-17	8-17	9-19
<b>75 mm</b>	<b>No.200</b>	<b>4-8</b>	<b>4-8</b>	<b>5-10</b>

**Fuente.** Artículo 450 Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

De acuerdo con la tabla anterior para una gradación MDC-2 los valores especificados para agregados finos (75mm) están entre el 4 y 8% de la mezcla y siguiendo el rango de valores de la relación filler- asfalto expresada en peso de cada uno de sus componentes, según el programa SUPERPAVE, que se encuentran entre 0,6 y 1,5 se determina la cantidad de asfalto a utilizar en la mezcla, lo que conlleva a deducir que las cantidades de asfalto utilizadas para

obtener las anteriores relaciones se encuentran en el rango de 5.3% a 6% en peso de la mezcla.

Para realizar el ensayo de Poder Rigidizante se recurrió a la norma francesa **PNE\_prEN 13179-1** donde especifica los porcentajes en peso de filler y ligante asfáltico a utilizar para la prueba, que son el 40% de asfalto y 60% de filler. Con dichas cantidades se obtiene una relación filler/asfalto de 1.5 en peso, la cual es la máxima relación estipulada en el programa SUPERPAVE mencionado anteriormente.

La norma también indica los porcentajes de filler y asfalto que debe manejarse si la dosificación se realiza en volumen, que son el 62.5% de asfalto y 37.5% de filler. Para los ensayos de Poder Rigidizante se decidió dosificar en volumen debido a la diferencia de gravedades específicas de las tres muestras, calculadas con el ensayo **I.N.V. E-128-07**, lo cual hacía variar en gran proporción sus volúmenes. Estos porcentajes son demostrados mediante cálculos, los cuales parten de una cantidad inicial en peso, como se mencionó anteriormente, para concluir que si se puede dosificar con los porcentajes en volumen que indica la norma. Los cálculos se realizaron tomando como ejemplo las calizas Pasa No200 Retiene No325 y las cenizas volantes Pasa No200 Retiene No325 que presentan las gravedades específicas más altas y más bajas como se explica a continuación:

**Tabla 5.8** Gravedades específicas.

	Tamices		Gravedad Específica (g/ml)
	Pasa	Retiene	
<b>CENIZAS VOLANTES</b>	200	325	1,97
	325	400	2,08
	400	....	2,17

	Tamices		Gravedad
	Pasa	Retiene	Específica (g/ml)
<b>ARENA DE RÍO</b>	200	325	2,78
	325	400	2,74
	400	....	2,71

	Tamices		Gravedad
	Pasa	Retiene	Específica (g/ml)
<b>CALIZAS</b>	200	325	2,97
	325	400	2,92
	400	....	2,89

**Fuente.** Elaboración propia.

Peso asumido de la mezcla: 100g

40g de asfalto y 60g de filler

Gs asfalto: 1.010g / ml

**Calizas Pasa No200 Retiene No325:**

**Gs:** 2.97g / ml

$$Vol.asfalto: \frac{40g}{1.010g / ml} = 39.6ml$$

$$Vol.filler(Caliza): \frac{60g}{2.97g / ml} = 20.20ml$$

La suma de los volúmenes obtenidos es de 59.80ml, siendo esta el 100% de la mezcla en volumen. Como se puede observar realizando una regla de tres, el volumen de asfalto es el **66.22%** y el volumen del filler el **33.78%** de la mezcla total.

Para las cenizas volantes se realiza el mismo procedimiento como se indica a continuación:

**Cenizas volantes Pasa No200 Retiene No325:**

**Gs:** 1.97 g / ml

$$\text{Vol.asfalto: } \frac{40\text{g}}{1.010\text{g/ml}} = 39.6\text{ml}$$

$$\text{Vol.filler(Caliza): } \frac{60\text{g}}{1.97\text{g/ml}} = 30.45\text{ml}$$

La suma de los volúmenes obtenidos es de 70.05ml, el volumen de asfalto es el **56.53%** y el volumen del filler el **43.47%** de la mezcla total.

Observando los porcentajes obtenidos, se puede deducir que estos se aproximan a los valores indicados en la norma de **62.5%** de asfalto y **37.5%** de filler en volumen.

El objetivo no es encontrar la dosificación para la cual el filler proporcionará una rigidez óptima a la mezcla, si no observar el cambio que tiene el poder rigidizante mediante la variación de algunas de las características del llenante. Todas las muestras de mástico se manejaron con un volumen de 60ml, buscando mantener constantes los parámetros y facilitar la comparación de los resultados.

**5.7.4 Proceso de fabricación del mástico**

- Teniendo el filler debidamente separado por tamaños, se pesa en una tara o recipiente de vidrio de tal forma que su peso sea el 40% en volumen de la mezcla. Se pone a calentar en un horno durante 30 minutos, controlando que su

temperatura no pase de 150°C y cuando alcance dicha temperatura se retira del horno cuidando que no se enfríe antes de ser adicionado a la mezcla.

**Figura 5.23** Calentado del filler en el horno.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- El asfalto es calentado en otro recipiente, cuando éste se encuentre fluido es pesado y calentado nuevamente controlando que su temperatura se encuentre a 150°C para ser mezclado junto con el filler.

**Figura 5.24** Calentado del asfalto en la estufa.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Para iniciar el proceso de mezclado se coloca el material que contiene el ligante asfáltico caliente en la cámara de mezclado y se comienza a mezclar con una velocidad de 500 RPM mientras se va adicionando el llenante mineral manualmente, de forma constante y cuidando que no se riegue por fuera del recipiente.

**Figura 5.25** Adición del filler al ligante asfáltico



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Cuando el filler ya se haya adicionado, se aumenta la velocidad de mezclado hasta 1500 RPM durante 30 minutos, manteniendo la mezcla caliente y finalizando con retirar el recipiente de la mezcladora obteniendo el mástico deseado.

**Figura 5.26** Mezcla del mástico.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

### **5.7.5 Ensayo de Poder Rigidizante**

El ensayo de Poder Rigidizante se llevó a cabo siguiendo los pasos estipulados en las normas Francesas referentes al Poder Rigidizante en las mezclas asfálticas.

- Como primer paso se realiza el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto para obtener la temperatura en la cual caen las bolas de acero y tomar ésta como referencia para calcular el delta que será el mismo Poder Rigidizante de los másticos.

**Figura 5.27** Ensayo de punto de ablandamiento para el asfalto.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Se realiza la mezcla de forma cuidadosa, siguiendo las instrucciones anteriormente mencionadas y controlando la velocidad de la mezcladora para obtener una mezcla homogénea en su totalidad.

**Figura 5.28** Mezcla del mástico.



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

- Se finaliza con el ensayo de punto de ablandamiento para los másticos, realizando este, una serie de veces hasta que los valores de las temperaturas sean cercanos, con lo que se da por hecho la certeza de estos.

**Figura 5.29** Ensayo de punto de ablandamiento para el mástico.



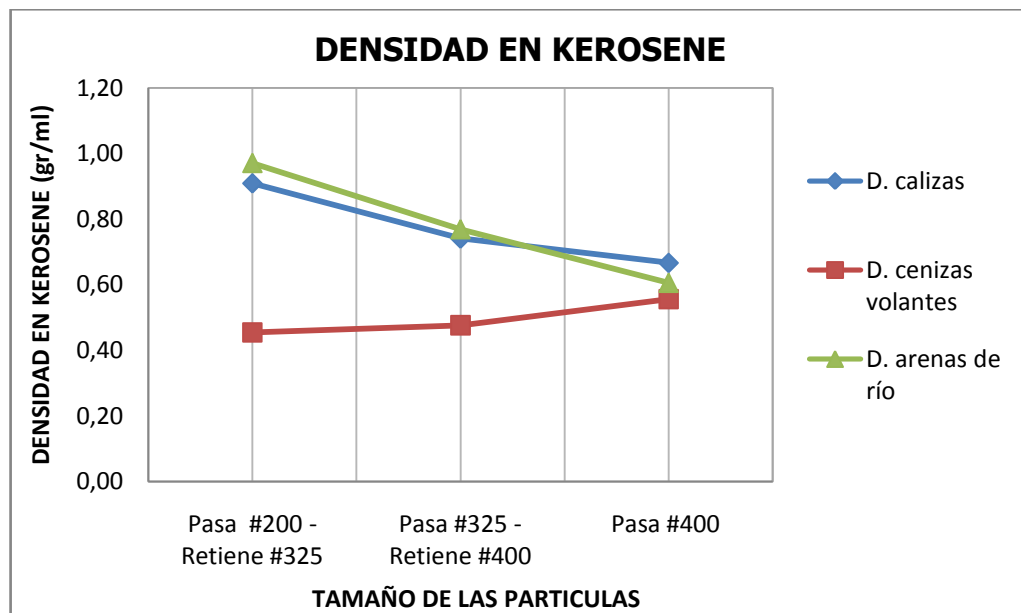
**Fuente.** Registro fotográfico propio.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de terminar el ensayo de Poder Rigidizante, que concluye el proyecto, se realiza el cálculo de datos y análisis de resultados obtenidos en los ensayos, esto con el objetivo de mostrar gráficamente los cambios producidos con las variaciones de dos características importantes, mencionadas en el estudio, que son la granulometría (tamaño) y la mineralogía (diferentes materiales).

### 6.1 DENSIDAD EN KEROSENE

**Gráfica 6.1** Variación de la densidad en kerosene



**Fuente.** Elaboración propia

En la gráfica anterior se puede observar que para las calizas y el material fino de arena de río las densidades disminuyen a medida que el tamaño de las partículas disminuye también, una excepción ocurre en las cenizas volantes que su densidad aumenta cuando el tamaño de las partículas disminuye, esto debido posiblemente

a que las partículas que componen las cenizas son cenosferas, algunas huecas y otras macizas, de modo que las cenizas menos densas son las de mayor proporción de partículas huecas que en dicho caso serían las de mayor tamaño. Las cenosferas son ligeras, inertes, compuestas principalmente de sílice y alúmina, estas pueden presentar otras esferas más pequeñas en su interior llamadas pleurosferas.

Diferente a la variación de la densidad de las cenizas volantes, estas también presentaron los valores más bajos, ya que gran parte de sus partículas son volátiles y demasiado finas.

## 6.2 PODER RIGIDIZANTE

Para iniciar con los ensayos de Punto de Ablandamiento se realizó como principio el ensayo al asfalto, obteniendo como resultado una temperatura promedio de **44.75°C**. Después se realizaron dos ensayos de Punto de Ablandamiento por cada muestra y cada tamaño. Los valores obtenidos de temperatura se promediaron como se explica a continuación tomando como ejemplo la caliza Pasa No.400:

$$Temperatura(ensayo1) = \frac{Temp.bola.1 + Temp.bola.2}{2} = \frac{65.7^{\circ}C + 65.9^{\circ}C}{2} = 65.8^{\circ}C$$

$$Temperatura(ensayo2) = \frac{Temp.bola.1 + Temp.bola.2}{2} = \frac{61.7^{\circ}C + 61.8^{\circ}C}{2} = 61.75^{\circ}C$$

$$PromedioTemperaturas = \frac{Temp.1 + Temp.2}{2} = \frac{65.8^{\circ}C + 61.75^{\circ}C}{2} = 63.78^{\circ}C$$

De esta forma se llevó a cabo el cálculo de los resultados de todas las muestras con sus diferentes tamaños, resumiendo en una tabla a continuación los datos obtenidos junto con los resultados de Poder Rigidizante.

**Tabla 6.1** Resultados de Punto de ablandamiento y Poder Rigidizante de los llenantes minerales.

	Pasa	Retiene	Punto de ablandamiento(°C)	Poder Rigidizante
<b>CALIZAS</b>	200	325	59,50	14,75
	325	400	60,28	15,53
	400	,,,	63,78	19,03
<b>CENIZAS VOLANTES</b>	200	325	94,08	49,33
	325	400	86,30	41,55
	400	,,,	72,83	28,08
<b>ARENA DE RÍO</b>	200	325	69,78	25,03
	325	400	68,80	24,05
	400	,,,	64,23	19,48

**Fuente.** Elaboración propia

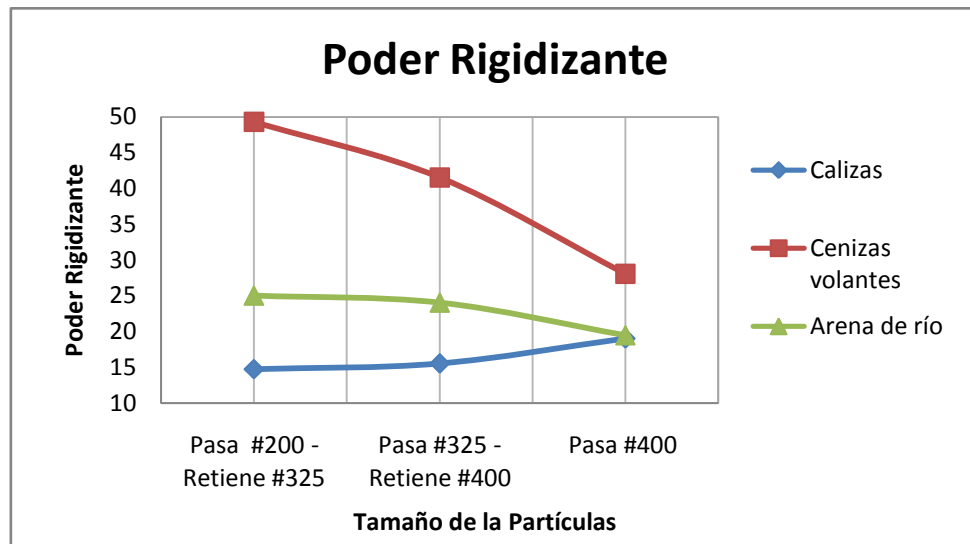
Como se puede observar el cambio de temperatura del punto de ablandamiento de las muestras es considerable al cambiar el tamaño de las partículas de filler, con lo que se demuestra que al hacer variar esta característica del llenante se consigue un aumento o disminución del Poder Rigidizante en la mezcla asfáltica, en mayor o menor proporción dependiendo del material. El Poder Rigidizante se conoce como la variación de la temperatura del punto de ablandamiento del mástico y la del asfalto en el ensayo de anillo y bola.

También se puede observar que las calizas fueron el único material que cumplió con las especificaciones de la norma francesa acerca del rango de temperaturas que debe tener una mástico para valorar su Poder Rigidizante, rango que se encuentra entre 10°C y 20°C. Pero como ya se mencionó el fin del proyecto no es buscar la rigidez óptima para la mezcla, si no observar el cambio que presenta esta con las variaciones realizadas y proporcionar información sobre el comportamiento de cada material utilizado.

El material fino de las arenas de río y las cenizas volantes proporcionan bastante rigidez, lo que implica que al realizar una mezcla con dichas cantidades de filler sobre el asfalto, esta se encontraría con riesgo de quebrantarse debido a su fragilidad. La explicación a este comportamiento se encuentra en el análisis de concentración crítica.

Es importante también ver la tendencia que presenta el Poder Rigidizante de cada filler según el tamaño de sus partículas, en esta se encuentra una diferencia entre los resultados de las calizas y los resultados de las otras muestras como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

**Gráfica 6.2** Tendencia del poder rigidizante según el tamaño de filler.

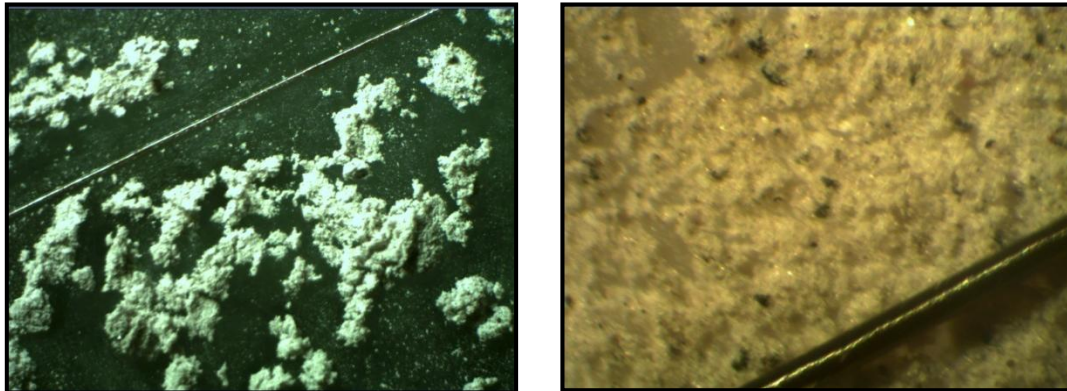


**Fuente.** Elaboración propia

El comportamiento de las cenizas volantes y las arenas de río indica que a mayor tamaño de las partículas (Pasa No.200 Retiene No.325) se rigidiza mas el mástico, contrario a los resultados arrojados por el ensayo de las calizas donde el tamaño que mas rigidiza es el más pequeño (Pasa No.400). Siendo dos resultados contra uno, se decidió analizar lo ocurrido con las calizas.

Según las imágenes obtenidas de las calizas mediante el estereoscopio, (ver Figura 6.1), en las fotografías del tamaño de las partículas Pasa No.400 se observa un material fino, de color blanco, con un poder de adherencia muy alto, el cual no permitió la separación de las partículas en el estudio de forma y textura, creando una especie de floc.

**Figura 6.1** Caliza Pasa No.400 (vista lejana) y Caliza Pasa No.400 (máx. zoom)



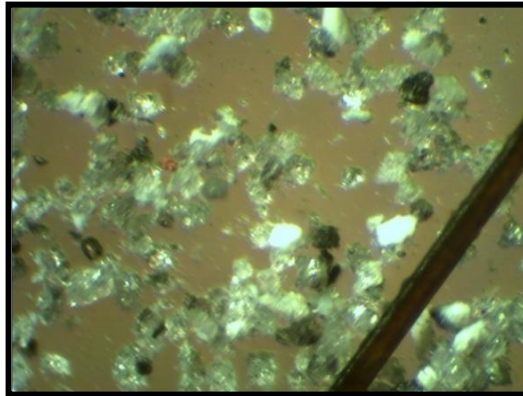
**Fuente.** Registro fotográfico propio.

Un floc es una masa formada por la unión de varias sustancias, o partículas por medio de un proceso químico (atracción iónica), teniendo como propósito alcanzar un tamaño y por ende una densidad mayor al obtenido individualmente por cada una de sus partículas.

Este comportamiento ocurre a medida que disminuye el tamaño de las partículas, con el tamaño Pasa No.325 Retiene No.400 se presenta el mismo caso con menos adherencia. Dicha conducta se pudo haber generado por reacción química que produce la caliza al ser pulverizada, humedecida y secada a una temperatura de aproximadamente 96°C. En el tamaño Pasa No.200 (ver figura 6.2) este polvillo se encontró en un porcentaje mínimo, debido a que en el proceso de tamizado

por lavado, se limpió gran cantidad, depositándose finalmente en el material Pasa No.400.

**Figura 6.2** Caliza Pasa No.200 Retiene No.325



**Fuente.** Registro fotográfico propio.

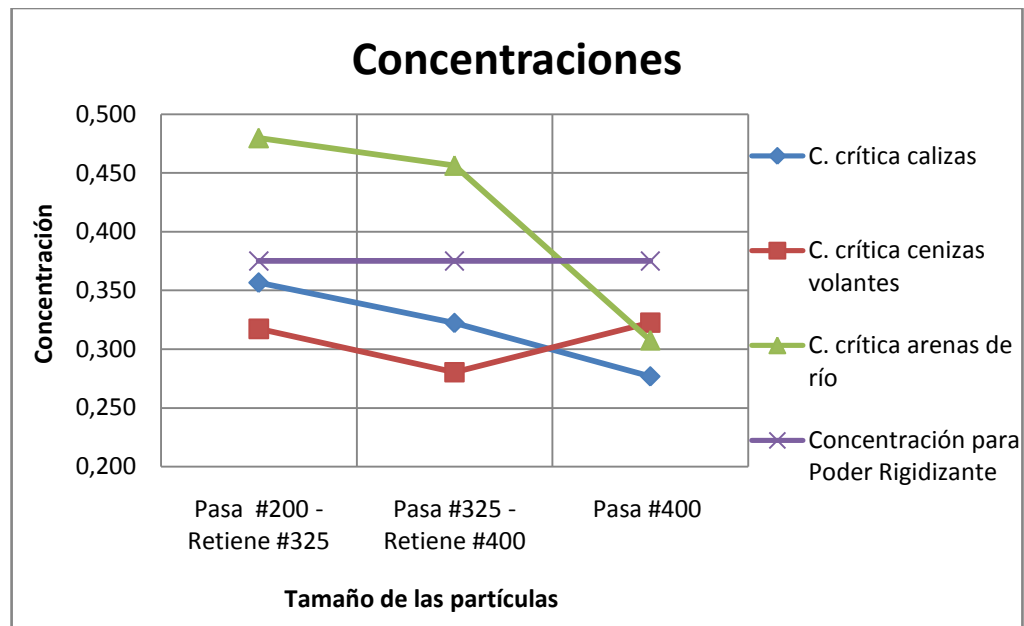
La formación de estos flocs podría dar explicación al comportamiento del Poder Rigidizante del mástico con caliza como filler, arrojando como resultado del análisis el mismo obtenido con las cenizas volantes y las arenas de río, que fueron mayor poder rigidizante a mayor tamaño de las partículas.

El alto Poder Rigidizante que presentaron las cenizas volantes puede estar ligado a su mineralogía, estas a diferencia de las arenas de río y las calizas posee un alto contenido de dióxido de silicio, también llamado sílice, que según la teoría de los llenantes minerales es el componente más utilizado que contienen los materiales para ser utilizados como fillers en mezclas asfálticas.

### 6.3 CONCENTRACIÓN CRÍTICA

Los resultados obtenidos en el ensayo de concentración crítica se pueden observar en la siguiente gráfica:

**Gráfica 6.3** Variación de la Concentración Crítica



**Fuente.** Elaboración propia

Analizando los resultados según el tamaño, no se puede generalizar un comportamiento similar para todos los materiales, en el caso de las cenizas volantes no se da una tendencia uniforme como se puede observar en la gráfica, por lo que se puede concluir que la variación de tamaños no influye directamente en la variación de la concentración crítica de un mástico, por lo cual se recomienda analizar más detalladamente dicha característica en las cenizas aumentando el número de tamaños a estudiar de sus partículas.

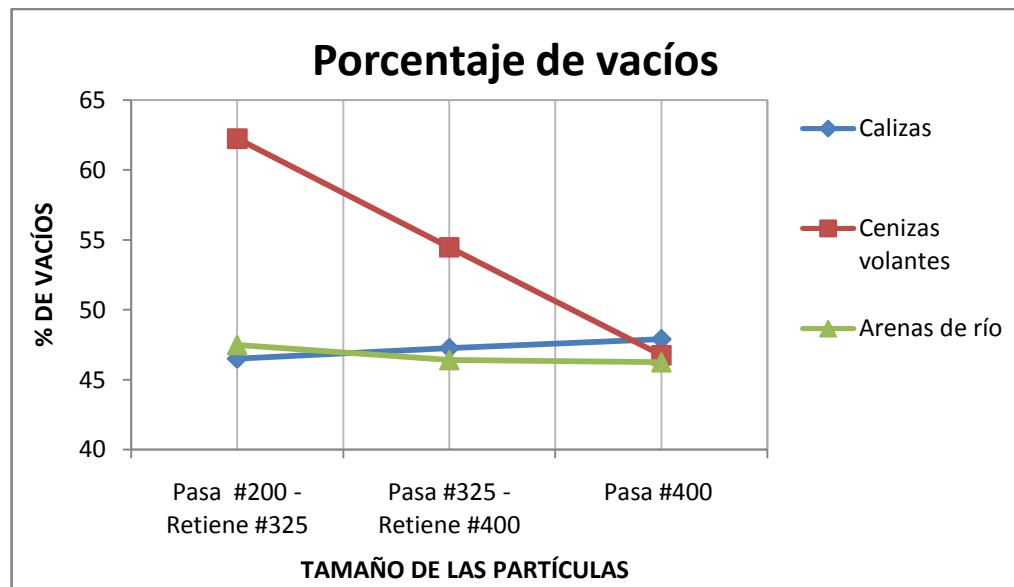
Ahora, si se deja como constante el tamaño y se varía la mineralogía como un cambio de material, se puede observar que el rango de manejo de la concentración filler-asfalto es mayor en las arenas y menor en las cenizas volantes, lo cual ayuda a que la búsqueda de la concentración óptima se haga más fácil en las arenas por su amplio espacio para determinar cantidades al momento de realizar ensayos, lo que permite menos probabilidad de cometer errores.

Teniendo en cuenta los valores de Poder Rigidizante analizados anteriormente, para la mayoría de los ensayos la concentración utilizada de (37.5% de filler y 62.5% de asfalto) es mayor a la concentración crítica del llenante mineral en cada uno de sus tamaños, como se puede observar en la gráfica 6.3. La norma específica que el valor de la concentración en volumen del llenante en una determinada mezcla asfáltica no puede ser mayor a la concentración crítica del material, esto con el fin de evitar problemas de rigidez en el pavimento, lo que explica por una parte el aumento tan exagerado en el índice de Poder Rigidizante obtenido en algunos materiales (ver tabla 6.1). Pero en el presente informe se trabaja con másticos de alta la rigidez para hacer más fácil diferenciar la variación que tienen las características mencionadas de los fillers de acuerdo al cambio de tamaño y mineralogía de las partículas.

#### **6.4 VACÍOS DEL LLENANTE COMPACTADO EN SECO**

El porcentaje de vacíos calculado con el ensayo de vacíos del llenante compactado en seco es aproximadamente la cantidad mínima de ligante utilizada en un mástico con máxima viscosidad, por lo que se recomienda no adicionar menos asfalto del porcentaje indicado para evitar problemas de rigidez en las carpetas asfálticas. Los resultados obtenidos con los tres materiales separados por tamaños se observan en la siguiente gráfica:

**Gráfica 6.4** Variación del Porcentaje de vacíos compactado en seco.



**Fuente.** Elaboración propia.

La variación del porcentaje de vacíos del llenante compactado en seco es similar a la variación que presentó el Poder Rigidizante con el cambio de tamaño de las partículas, el comportamiento de las cenizas volantes y las arenas de río es diferente al que presenta las calizas, esto debido a la formación de flocs, difíciles de separar, que se generan en las muestras secas. Según los resultados obtenidos es mayor el porcentaje de vacíos o ligante asfáltico en las cenizas volantes que en las otras muestras, ya que las cenizas son un material con alto Poder Rigidizante, lo que indica que no se necesita gran porcentaje de este filler para obtener la rigidez óptima en una mezcla.

## 6.5 PENETRACIÓN

El ensayo de penetración se le realizó a los mismos másticos ensayados en el Poder Rigidizante, Los datos obtenidos en estos ensayos se promediaron teniendo en cuenta que para cada muestra se penetró una cantidad de veces las cuales no se diferenciaron en más de 3 (1/10mm). Siguiendo con el mismo ejemplo, caliza Pasa No. 400, los resultados se determinaron así:

$$Pr\ omedioPenetración = \frac{Pen.1 + Pen.2 + Pen.3}{3} = \frac{15.5 + 16 + 15(\frac{1}{10} mm)}{3}$$

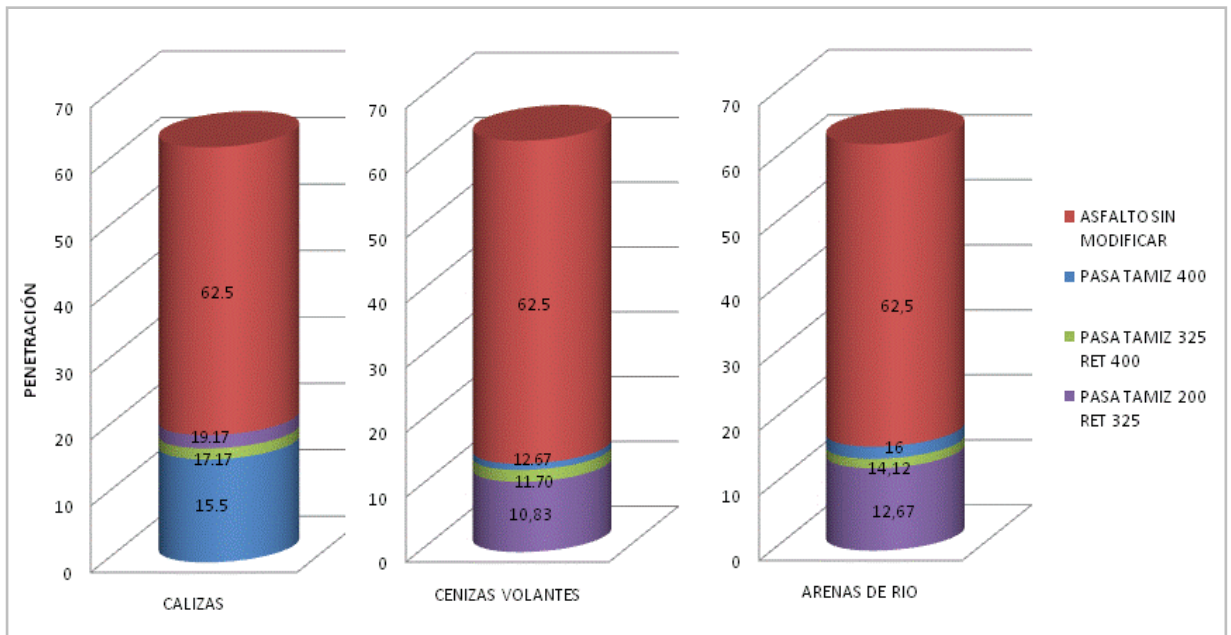
$$Pr\ omedioPenetración = 15.5(\frac{1}{10} mm)$$

**Tabla 6.2** Penetración de los másticos

	Pasa	Retiene	Penetración (1/10) mm
<b>ASFALTO SIN MODIFICAR</b>	.....	.....	62,5
<b>CALIZAS</b>	200	325	19,17
	325	400	17,17
	400	...	15,5
<b>CENIZAS VOLANTES</b>	200	325	10,83
	325	400	11,7
	400	...	12,67
<b>ARENAS DE RIO</b>	200	325	12,67
	325	400	14,12
	400	...	16

**Fuente.** Elaboración propia.

**Gráfica 6.5** Variación de penetración



**Fuente.** Elaboración propia

Al analizar los resultados también se puede determinar que el cambio de penetración varía de acuerdo con el Poder Rigidizante, este disminuye con el aumento de rigidez del mástico, siendo esta variación la esperada según la teoría. A su vez se puede observar que la diferencia de resultados entre los tamaños de cada uno de los materiales no es muy grande. Con dichos ensayos se ratifica que la variación de tamaños de las partículas si influye en la rigidez de los másticos, por lo que su análisis va ligado al del ensayo de Poder Rigidizante.

## **6.6 FORMA DE LAS PARTÍCULAS**

Basándose en las fotos anteriores de las partículas de filler la forma y textura no es uniforme en todas las muestras, ésta cambia con la variación de mineralogía del material y tamaño de las partículas. La procedencia o derivado del filler juega un papel importante en la forma que pueden tomar las partículas, estas pueden ser trituradas de manera natural o artificial.

El tamaño y la forma cambian a medida que el proceso de fricción entre algunas partículas es mayor o el contacto es más frecuente. Por esta razón la forma de las partículas más pequeñas puede llegar a ser más esférica que las de mayor tamaño.

El análisis de la formas y textura de las partículas según el material y el cambio de tamaños se encuentra ya analizado en el subtítulo 5.3. Forma de las partículas del llenante mineral.

## **7. CONCLUSIONES**

- Los resultados con las partículas de caliza muestran que no todos los llenantes minerales se comportan de la misma forma al variar el tamaño de sus partículas, también influyen características químicas que generan adherencia entre las fracciones de menor tamaño formando flocs que modifican el comportamiento del mástico. En general las partículas de filler de mayor tamaño proporcionan mayor Poder Rigidizante a las mezclas asfálticas.
- No todas las partículas poseen la misma forma, esta depende de su mineralogía y proceso de obtención, cada fracción de partículas tiene diferente forma.
- Las cenizas volantes rigidizaron más que las arenas de río y las calizas. Para ser utilizado como llenante mineral es de especial cuidado ya que su volatilidad y alto Poder Rigidizante son difíciles de controlar y pueden ocasionar diversos problemas.
- Hay una relación directa entre la porosidad del material, obtenida en ensayos sobre muestra compactada, con el Poder Rigidizante del material. No sucede lo mismo con la porosidad que presenta el material en ensayos con muestra en estado suelto (ensayo de concentración crítica).

## **8. RECOMENDACIONES**

- Es recomendable hacer un estudio microscópico detallado de la forma y textura de las partículas para definir exactamente estas características de los fillers. También se sugiere visualizar el comportamiento de dichas partículas cuando son mezcladas con el asfalto y mediante un análisis químico y físico definir la influencia que tienen en la rigidez de las mezclas asfálticas.
- El manejo del material fino o filler debe tener especial cuidado al momento de tamizar, su baja densidad no permite que las partículas pasen por el tamiz indicado de acuerdo a su tamaño, lo que implica tener que lavar el material y secarlo a una temperatura máx. de 110°C para perder la menor cantidad posible y obtener un tamizado efectivo.
- Al adicionar el filler al asfalto caliente, se debe hacer constantemente y en lo posible contar con los instrumentos indicados como una mezcladora eléctrica en buen estado y una estufa en la cual se pueda controlar la temperatura necesaria, esto con el fin de obtener una mezcla homogénea y libre de grumos.
- En el Artículo 450-07 de las especificaciones de construcción de INVIAS, que son usualmente las mas empleadas en Colombia, no se incluyen ensayos de rigidez del mástico, pero las proporciones de asfalto y filler se controlan mediante los ensayos de concentración crítica. Se recomienda estudiar la inclusión de ensayos de rigidez del mástico como parámetro que define de mejor manera la conveniencia de utilizar un llenante u otro.
- Se recomienda realizar la dosificación para el mástico en volumen, ya que al dosificar en peso la diferencia de cantidad de asfalto y material es bastante

diferente, lo cual ocasiona problemas de rigidez al mezclar debido al alto contenido de filler.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- **AVELLANEDA MENDOZA, William Miguel.** *Control de Calidad en Mezclas Asfálticas Calientes.* Universidad de Los Andes. Bogotá. 2005.
- **CIFUENTES PACHÓN, Álvaro. FERRER JARAMILLO, Carlos Iván.** Director: Ingeniero Dalton Moreno Girardot. *Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adicción de cenizas volantes de Termopaipa.* Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Civil. UIS. Bucaramanga. 2006.
- **FORERO AMAYA, Ronald Ferney. GONZALEZ VARGAS, Edgard Mauricio.** Director: Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón. *Poder Rigidizante del filler en mezclas asfálticas.* Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Civil. UIS. Bucaramanga. 2003.
- **GUERRERO HERNÁNDEZ, Cirilo Joaquín.** *Rocas Calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas de la Mixteca Oaxaqueña.* Universidad Tecnológica de Mixteca. Oaxaca. 2001.
- **Instituto Nacional de Vías (INVIAS).** Normas de ensayo para materiales de carreteras.
- **MIRÓ RECASENS, Jorge Rodrigo,** Director: Félix Edmundo Pérez Jiménez. *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona, marzo de 1994.

- **Norma Francesa PNE\_prEN 13179-1.** Ensayos sobre fillers utilizados en mezclas bituminosas.
- **PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro.** *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista.* Universidad Politécnica de Cataluña, España. 2004.
- **PARRA ARENAS, Mauricio Alberto.** Director: Jorge E. Zambrano. *Estudio geológico de fuentes de materiales en la Arenera Los Pinos, sobre el Río Chicamocha, municipio de Aratoca (Santander).* Tesis de grado. Escuela de Geología. UIS. Bucaramanga. 2003.

## **10. ANEXOS**

**ANEXO A. ENSAYO DE AZUL DE METILENO PARA LOS LLENANTES  
MINERALES / NORMA I.N.V. E-235-07**

El ensayo de azul de metileno para llenantes minerales se realizó de acuerdo a la norma I.N.V. E-235-07. Se analizaron muestras de 10g secadas a temperatura ambiente y muestras secadas en estufa a temperaturas de 96°C aproximadamente, esto con el fin de corroborar la pérdida de material dañino por evaporación durante el calentamiento.

**Concentración de la solución de azul de metileno: 5mg/ml**

**S:** Muestra seca a temperatura ambiente

**L:** Muestra seca en estufa a 96°C

**1** (cenizas volantes)

**2** (calizas)

**3** (arenas de rio)

**RESULTADOS:**

MUESTRA	PESO DE LA MUESTRA	SOLUCIÓN DE AZUL DE METILENO (ml)	VALOR DE AZUL DE METILENO (mg/g)
S1	10,0012	5,5	2,75
S2	10,0000	4,5	2,25
S3	10,0002	3,5	1,75
L1	10,0019	4,0	2,00
L2	10,0018	4,0	2,00
L3	10,0009	3,0	1,50

**PROCEDIMIENTO:**

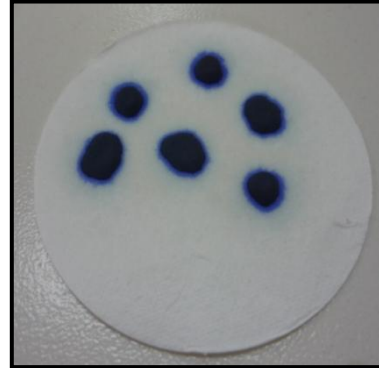
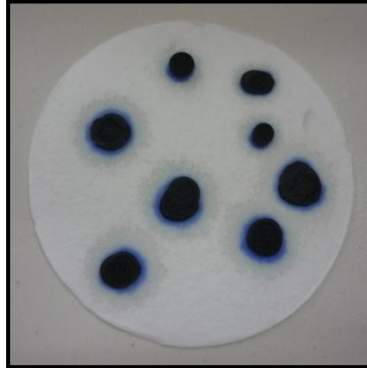
- **Mezcla de las muestras.**



- **Mezcla de la muestra con azul de metileno.**

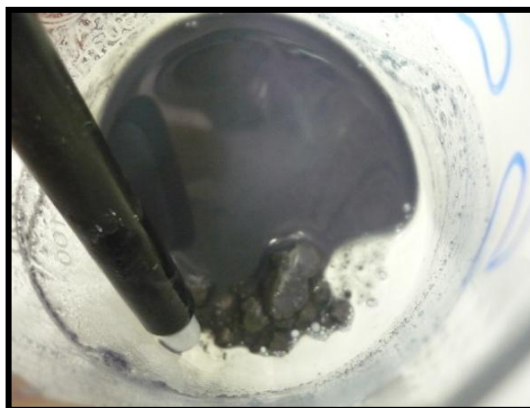


- **Aro azul alrededor de la muestra.**



### OBSERVACIONES:

- Al momento de realizar la mezcla de las calizas con el agua es recomendable llevar a cabo al instante la mezcla con el azul de metileno, esto debido que al hacer contacto las calizas con el líquido tienden a endurecerse rápidamente, debido a sus propiedades cementantes, ocasionando problemas al momento de mezclar, por la formación de brumos en su contenido.



- El aro azul se va formando poco a poco alrededor de la muestra, el ensayo se da por terminado cuando el aro tenga un color azul intenso.

**ANEXO B. ENSAYO DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD EN LOS LLENANTES  
MINERALES TAMIZ PASA No 400 / NORMA I.N.V. E-125-07 - I.N.V. E-126-07**

El ensayo de índice de plasticidad se llevó a cabo para las tres muestras Pasa No.400, teniendo en cuenta que son las que más tienden a ser plásticas por el pequeño tamaño de sus partículas.

## RESULTADOS:

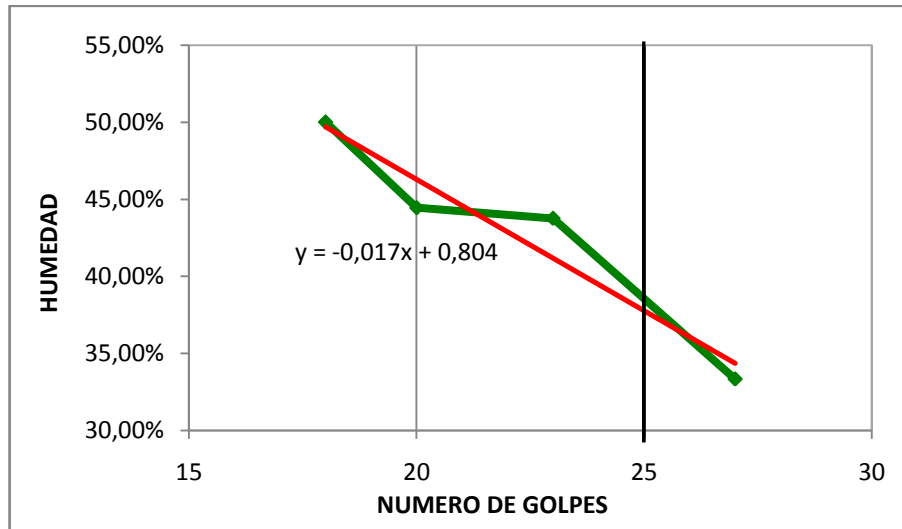
### CALIZAS MESA DE LOS SANTOS

#### Límite líquido

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	CONTENIDO DE AGUA (%)
25-30	27	8,70	9,90	9,60	0,30	0,90	33,33%
20-30	23	10,00	12,30	11,60	0,70	1,60	43,75%
20-30	20	7,70	9,00	8,60	0,40	0,90	44,44%
15-25	18	6,90	10,20	9,10	1,10	2,20	50,00%

#### Límite Plástico

DATO No.	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	11,10	12,40	12,10	0,30	1,00	30,00%
2	6,90	8,10	7,80	0,30	0,90	33,33%
3	11,10	12,10	11,80	0,30	0,70	42,86%



LÍMITE LIQUIDO : 38%

LIM. PLÁSTICO : 35%

INDICE DE PLASTICIDAD : **3%**

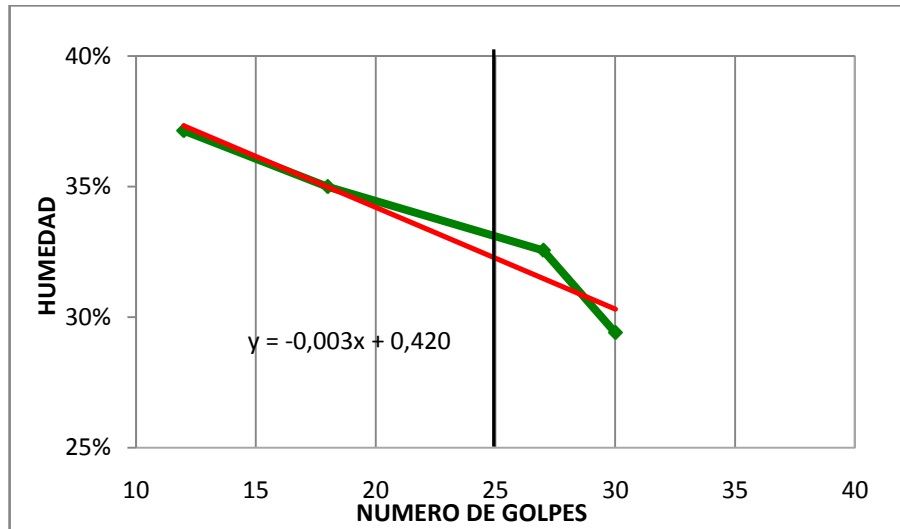
### MATERIAL FINO DE ARENAS DEL RIO CHICAMOCHA

#### Límite líquido

RANGO GOLPES	NUMERO DE GOLPES	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	CONTENIDO DE AGUA (%)
25-30	30	8,90	11,10	10,60	0,50	1,70	29,41%
20-30	27	8,80	14,50	13,10	1,40	4,30	32,56%
15-25	18	10,00	15,40	14,00	1,40	4,00	35,00%
10-15	12	10,00	14,80	13,50	1,30	3,50	37,14%

### Límite Plástico

DATO No.	PESO CAPSULA (gr)	PESO CAPSULA + SUELO HÚMEDO (gr)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (gr)	PESO DEL AGUA (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	11,10	12,70	12,30	0,40	1,20	33,33%
2	11,10	12,50	12,20	0,30	1,10	27,27%
3	8,72	9,60	9,40	0,20	0,68	29,41%



LÍMITE LIQUIDO : 34%

LIM. PLÁSTICO : 30%

ÍNDICE DE PLASTICIDAD : **4%**

### CENIZAS VOLANTES TERMOPAIPA

El índice de plasticidad de las cenizas volantes no se pudo determinar debido a la complejidad en el manejo de dicho material, así que se define como **NP**.

**ANEXO C. PODER RIGIDIZANTE (NORMA FRANCESA)**

## PODER RIGIDIZANTE (Delta de anillo y bola)

Referencia de base: **prEN 13179-1** (marzo 2000), Ensayos sobre los llenantes utilizados en las mezclas bituminosas – Parte 1: Ensayo de anillo y bola.

### 1. Objetivo del ensayo:

Evaluar el Poder Rigidizante de llenantes determinando el punto de ablandamiento de las mezclas filler-bitumen realizados con un asfalto de referencia.

### 2. Principio del método:

Midiendo el aumento del punto de ablandamiento de una mezcla filler-bitumen compuesta en volumen de 37.5% de filler y 62.5% de bitumen a una temperatura de  $(25,0 \pm 0,1)$  °C, en relación al punto de ablandamiento del bitumen de referencia.

### 3. Equipo:

- Los equipos previstos en la norma NBN T 54-202.
- Bitumen de clase B 70-100.
- Dos recipientes de vidrio resistentes al calor.
- Un recipiente de evaporación en porcelana, de fondo redondo, con una capacidad de 140 ml.
- Manta para calentar adaptada al recipiente de evaporación utilizado.
- Tela de asbesto (Rondelle de liège)
- Placa en vidrio o metal de 150mm por 150mm que soporte el calor.
- Tamiz de 0,125mm de abertura de la malla.

#### 4. Modo de operación:

**4.1.** Tamizar el filler en el tamiz de 0,125mm de abertura de la malla y cuartear las muestras que se van a ensayar de acuerdo a la norma NBN EN 932-2. Utilizar un divisor rotativo (Cuarteador de muestras).

Secar la muestra a  $(110 \pm 5)$  °C hasta obtener masa constante y dejar enfriar a temperatura ambiente en un desecador.

Evitar la presencia eventual de grumos en la muestra y en caso que los haya romperlos con precaución con una espátula. Mezclar los grumos rotos con el resto de la muestra.

**4.2.** Determinar la gravedad específica del filler de acuerdo a la norma NBN B11-224.

**4.3.** Colocar en el horno un recipiente de vidrio que contenga 30 a 40g de asfalto 70-100 de clase B como se especifica en la norma T NBN 54-101, otro recipiente de vidrio con al menos 60g de filler, el recipiente de evaporación en porcelana y cuatro anillos de bronce y llevarlos a una temperatura de  $(150 \pm 5)$  °C en  $(4,0 \pm 0,5)$  h.

Después de calentar, colocar el recipiente de evaporación de porcelana en la balanza utilizando una tela de asbesto para aislar el calor y llenar el recipiente de porcelana con 20g de bitumen (mb). Colocar dos anillos de bronce sobre la placa de vidrio o de metal y llenar con el resto del asfalto contenido en el recipiente de porcelana.

Colocar el recipiente de porcelana que contiene el bitumen sobre la manta calentadora y regular de manera que el bitumen se mantenga a una temperatura de  $(150 \pm 10)$  °C.

Reemplazar el recipiente de porcelana que contiene el bitumen sobre la balanza aislando de nuevo con la ayuda de la tela de asbesto y adicionar  $m_f$  gramos de filler al bitumen calculando esta masa con ayuda de la ecuación:

$$m_f = \frac{12 \cdot r_f}{1,025}$$

Donde:

$m_f$ = Masa del filler adicionado, expresada en gramos.

$m_b$ = Masa del asfalto, expresada en gramos.

$r_f$ = Densidad real del filler, Expresada en gramos por centímetro cúbico.

1,025= Densidad real del bitumen a 25°C, expresada en gramos por centímetro cúbico.

**Nota:** Estos datos periten llegar a una mezcla de 37.5% de filler y 62.5% de bitumen en volumen.

Colocar el recipiente de porcelana sobre la manta calentadora y mezclar el filler con el bitumen a una temperatura máxima de  $(150 \pm 5)$  °C hasta obtener una mezcla homogénea.

Colocar los otros dos anillos de bronce en la placa de vidrio o de metal y llenar con la mezcla de filler-bitumen.

Determinar el punto de ablandamiento del bitumen ( $t_{b1}$  y  $t_{b2}$ ) y después la mezcla de filler-bitumen ( $t_{bf1}$  y  $t_{bf2}$ ) tal como lo indica la norma T NBN 54-202. Para cada

parte del ensayo utilizar un anillo de bronce en el cual haya sido vertido el bitumen y un anillo de bronce en el cual haya sido vertido el filler-bitumen.

Repetir el ensayo en conjunto si:

$$|t_{b1} - t_{b2}| > 3 \quad \text{ó} \quad |t_{bf1} - t_{bf2}| > 3$$

### 5. Cálculo:

Calcular la media de las dos temperaturas de los puntos de ablandamiento del bitumen y la media de la temperatura del punto de ablandamiento de la mezcla filler-bitumen  $t_{Bf}$  con precisión de 0,1°C:

$$t_B = \frac{t_{b1} + t_{b2}}{2}$$

$$t_{Bf} = \frac{t_{bf1} + t_{bf2}}{2}$$

Calcular la diferencia ( $\Delta_{A\&B}$ ) entre las dos medias de 0,5°C utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta_{A\&B} = t_{BF} - t_B$$

### 6. Expresión de los resultados:

El informe debe mencionar:

- El Poder Rigidizante del filler, llamado  $\Delta_{A\&B}$ , y los valores individuales de  $t_{b1}$ ,  $t_{b2}$ ,  $t_{bf1}$ ,  $t_{bf2}$ ,  $t_B$  y  $t_{BF}$ .
- Identificación de la muestra.