

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA DENSA EN  
CALIENTE MODIFICADA CON CENIZA PROVENIENTE DE LOCACIONES  
PETROLERAS**

**GUILLERMO ANDRES OROZCO MUÑOZ  
JUAN PABLO MURILLO CHACON**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERA  
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2011**

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA DENSA EN  
CALIENTE MODIFICADA CON CENIZA PROVENIENTE DE LOCACIONES  
PETROLERAS**

**GUILLERMO ANDRES OROZCO MUÑOZ  
JUAN PABLO MURILLO CHACON**

**Tesis de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director (a):  
MARIA FERNANDA SERRANO GÚZMAN  
PhD. Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2011**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Presidente del jurado

\_\_\_\_\_  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Jurado

Bucaramanga, Noviembre 2011.

## DEDICATORIAS

*Este libro va dedicado al ser más especial que me dio oportunidad de conocer y disfrutar la vida, mi madre que desde el lugar donde se encuentra descansando en la paz del señor a mandado toda su luz para ayudarme a culminar mi carrera.*

*Es dedicado a mi padre porque a pesar de todos los momentos que no compartimos siempre de una u otra forma pude contar con su apoyo incondicional para poder terminar mi ciclo como estudiante.*

*Guillermo Andrés Orozco Muñoz.*

*Primeramente a Dios por haberme dado las capacidades intelectuales y económicas para culminar mi carrera y el proyecto de grado, a toda mi familia especialmente a mi madre Martha Cecilia Chacón y a mi padre Luis Francisco Murillo que siempre me han apoyado en todos mis estudios.*

*Juan Pablo Murillo Chacón.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad pontificia bolivariana, por brindarnos una educación integral e intelectual, para así convertirnos en profesionales capaces de promover la formación ética, científica, tecnológica, cultural y administrativa.

Al Director del Proyecto, DRA María Fernanda serrano Guzmán por todas esas horas dedicadas para la culminación de este proyecto, así como su gran aporte cognitivo y humano para formarnos como personas.

A nuestros padres por todos los años de educación y lucha, por todas las oportunidades brindadas y toda la fe en nosotros.

Al personal del laboratorio Vicente Páez y Heli Rueda por todas las horas de acompañamiento y orientación en el laboratorio.

A todos los docentes por enseñarnos que lo primordial antes de ser un académico es ser una gran persona.

A nuestros amigos, por su apreciada amistad que en momentos difíciles nos ayudaron y apoyaron desinteresadamente.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>PAG.</b>
INTRODUCCION	14
1. GENERALIDADES	15
1.1 JUSTIFICACIÓN	15
1.2 ALCANCE	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo general.	16
1.3.2 Objetivo Especifico.	16
1.4 RELEVANCIA DEL ESTUDIO	16
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	17
2. MARCO TEORICO	18
2.1 ASFALTO	18
2.1.1 Definición de una mezcla Asfáltica.	18
2.1.2 Clasificación de las mezclas asfálticas.	19
2.2 MEZCLA ASFALTICA DENSA EN CALIENTE.	21
2.2.1 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.	22
2.2.2 Mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3	23
2.2.3 Mezcla M1:	23
2.2.4 Stone Matrix Asphalt (SMA	23
2.2.5 Tipos de Pavimentos:	24
2.2.5.1 Pavimentos flexibles	24
2.2.5.2 Pavimentos rígidos:	24
2.2.5.3 Pavimentos semi-rígidos	24
2.3 CENIZAS VOLANTES	25
2.3.1 Clasificación de las cenizas volantes.	25
2.3.2 Propiedades físicas de las cenizas volantes.	26
2.4 ESTUDIOS REALIZADOS ALREDEDOR DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS	26
3. METODOLOGIA	29
3.1 MATERIALES EMPLEADOS	29
3.1.1 Material Granular	29
3.1.1.1 Descripción de los procedimientos utilizados para la caracterización del material granular.	30
3.1.2 Asfalto.	34
3.1.2.1 Ensayos realizados al material bituminoso:	35
3.1.3 Ceniza Volante.	37
3.1.3.1 Ensayos realizados a la ceniza volante:	39
3.1.4 Briquetas realizadas según diseño Marshall.	40

3.1.4.1 Ensayos realizados a la mezcla densa en caliente MDC-2	40
3.1.4.2 Resistencia de mezclas bituminosas por medio del aparato Marshall.	41
3.1.4.3 Ensayos siguientes a la compactación de la probetas	43
4. RESULTADOS	46
4.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR.	46
4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE.	50
4.3 ASFALTO	52
4.4 RESULTADOS DE LA PRUEBA MARSHALL.	53
5. ANALISIS DE RESULTADOS	57
5.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR.	57
5.2 CARACTERIZACION DELA CENIZA VOLANTE.	58
5.3 CARACTERIZACION DEL ASFALTO.	58
5.4 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA MARSHALL.	59
6. CONCLUSIONES.	60
7. RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFIA	63
ANEXOS	65

## LISTA DE FIGURAS

	<b>PAG.</b>
Figura 1. Organigrama ECOPETROL S.A- CONVENIO ICP-UNIVERSIDAD	38
Figura 2. Curva de los agregados gruesos	46
Figura 3 Curva de los agregados finos	47
Figura 4. Curva granulométrica de la Ceniza volante No 1	50
Figura 5. Curva granulométrica de la Ceniza volante No 2	51
Figura 6. Peso unitario vs porcentaje asfalto	54
Figura 7 Porcentaje devacios de los agregados vs porcentaje asfalto	54
Figura 8 Porcentaje devacios de la mezcla vs porcentaje asfalto	55
Figura 9 Estabilidad vs porcentaje asfalto	55
Figura 10 Flujo vs porcentaje asfalto	56



## LISTA DE TABLAS

	<b>PAG.</b>
Tabla 1 Ficha técnica de calidad de ensayos de laboratorio ASFALTO 60-70 realizados en ASFALTART LTDA.	34
Tabla 2 Escala de vidrios de color normalizado.	39
Tabla 3 Cantidad en gramos de material granular por briqueta con 5.5% de contenido de asfalto para mezcla densa en caliente (MDC-2)	41
Tabla 4 Combinaciones para la elaboración de briquetas.	41
Tabla 5 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente.	42
Tabla 6 Mezcla densa en caliente MDC-2 Franjas granulométricas y franja de diseño con el punto medio.	42
Tabla 7 Gravedad específica y absorción de los agregados Gruesos.	47
Tabla 8. Resultados de gravedad específica y absorción de los agregados finos.	48
Tabla 9 Resultados resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles.	48
Tabla 10 Caras fracturadas.	49
Tabla 11 Equivalente de Arena.	49
Tabla 12 Índice de Aplanamiento y Alargamiento.	50
Tabla 13 Contenido de materia orgánica	51
Tabla 14 Gravedad Específica en la ceniza volante.	52
Tabla 15. Resumen caracterización del Asfalto.	52
Tabla 16 Resumen del ensayo para una MDC-2 sin ceniza	53
Tabla 17 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 5% ceniza.	53
Tabla 18 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 10% ceniza.	53
Tabla 19 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 15% ceniza.	53
Tabla 20 Contenido de Asfalto.	56
Tabla 21 Caracterización de los agregados.	57
Tabla 22 Caracterización de la ceniza volante.	58
Tabla 23 Resultados para el Diseño por el método Marshall.	59

## LISTA DE ANEXOS

	PAG.
ANEXO 1. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS	65
ANEXO 2. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES	66
ANEXO 3. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES	67
ANEXO 4. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS	68
ANEXO 5. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS	69
ANEXO 6. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS	70
ANEXO 7. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL APLICADOS A LAS 72 MUESTRAS	72
ANEXO 8. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS	73
ANEXO 9. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LOS AGREGADOS FINOS	76
ANEXO 10. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS	79
ANEXO 11. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS	80
ANEXO 12. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES	82
ANEXO 13. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS	84
ANEXO 14. EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS	85
ANEXO 15. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS	86
ANEXO 16. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LA CENIZA	88
ANEXO 17. CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGANICA EN ARENAS USADAS	92
ANEXO 18. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE LA CENIZA	93
ANEXO 19. FICHA TECNICA DE CALIDAD ASFALTAR	94
ANEXO 21. ANALISIS GRANULOMETRICO EN PROPORCIONES DIFERENTES PARA ENCONTRAR LA FORMULA DE TRABAJO	103
ANEXO 22. ENSAYOS DE LOS ASFALTOS INCLUYENDO LOS CONTENIDOS DE CENIZA	109
ANEXO 23. CONTENIDO DE ASFALTO	112



## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON CENIZA PROVENIENTE DE LOCACIONES PETROLERAS

**AUTORES:**Guillermo Andrés OrozcoMuñoz. Juan Pablo Murillochacòn

**DIRECTOR(A):** Maria Fernanda Serrano Guzmàn.

La ingeniería civil tiene la vital responsabilidad de promover el desarrollo, mejoramiento e innovación de los recursos que se pueden manipular, por lo tanto el área de los pavimentos desarrolla proyectos para el mejoramiento de los materiales con los que disponemos en la actualidad, este proceso se promueve desde hace más de media década, con esta constante experimentación se pretende obtener mejores resultados en la estabilidad y durabilidad de las mezclas asfálticas. De esta necesidad de mejorar las condiciones en las mezclas asfálticas nacieron los pavimentos modificados y el interesante estudio de estos genero que el siguiente proyecto obtuviera su razón de ser.

En este estudio se presentan todos los valores obtenidos experimentalmente luego de ensayar una mezcla densa en caliente MDC-2 con adicción de ceniza volante. Para obtener estos resultados fue necesario realizar diferentes ensayos algunos para caracterizar el material granular y la ceniza. La mezcla asfáltica fue realizada por medio del diseño Marshall para el cual se trabajaron tres diferentes porcentajes de asfalto los cuales fueron 4.5%, 5.5%y 6.5%. Además de esos tres porcentajes a cada porcentaje de asfalto se le adicionó ceniza volante en porcentajes del 0%,5%,10% y 15% para tener un total de 72 briquetas.

Los agregados naturales, mezclados en proporción del 70% finos y 30% gruesos cumplieron las condiciones de calidad establecidas en Colombia.La mezcla asfáltica preparada con 4.675% de asfalto y 15% de ceniza, lo que representa un 5.5 del asfalto en mezcla convencional, arrojo estabilidades y resistencia mayores..

**PALABRAS CLAVES:** Asfalto, pavimento, mezcla asfáltica, ceniza volante.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** Mechanical behavior of hot mixture modified with fly ash

**AUTHOR:** Guillermo Andrés OrozcoMuñoz. Juan Pablo MurilloChacòn

**DIRECTOR:**María Fernanda Serrano Guzmán

Civil engineering is responsible to promote the development, improvement and innovation of the resources which can be used in building projects. Therefore, pavement area develops projects about improvement materials used in roads. This topic has been evaluated more than a half decade ago. This research shows a modification that is added to asphalt, increasing the durability and stability. The interesting topic about modified pavements comes from the necessity to improve mixture asphalt conditions.

This work shows a hot mixture design type 2 (MDC-2 in Spanish) prepared with fly ash as an addition to the asphalt. Preliminary characterization to the granular material and fly ash were done, followed by the characterization of asphalt materials. Moreover, a total of 72 specimens were done Marshall procedure, using percentage of asphalt of 4.5%, 5.5% and 6.5% with addition of fly ash in percentage of 0%, 5%, 10% y 15%. Natural aggregates were mixed in proportions of fine – coarse aggregate (70%-30% respectively).

The asphalt mixture prepared with 4.675% of asphalt and 15% of fly ash, which represents 5.5% of conventional mixture, shown the best behavior in stability and strength.

**KEYWORDS:** asphalt, fly ash, paving,

## INTRODUCCION

Los cambios climáticos que se están viviendo en nuestros días afectan a la infraestructura. Se hace necesaria la búsqueda de nuevos materiales o modificaciones de los existentes para aportar al desarrollo de la población. En el argot popular se dice que un país se conoce por su infraestructura vial, y es aquí en donde se propondrá una nueva forma de modificación del asfalto para obtener una mezcla en caliente MDC-2 que se utiliza para la pavimentación.

Los asfaltos modificados llevan más de 30 años trabajándose. Generalmente se ha estudiado la adición de polímeros de tipo elastómero y plastómero los cuales logran mejorar algunas de sus propiedades tales como la estabilidad pero como contraparte se tiene un alto costo en la fabricación de los mismos originando que la implementación de éstos no se pueda generar para todo tipo de proyecto. (Reyes y otros 2007).

En nuestro país se ha visto una tendencia de aumento del número de ejes equivalentes y cargas suministradas por el paso del tráfico pesado, lo cual genera en las carpetas asfálticas mayores esfuerzos y deformación. Por tal razón, este estudio pretende encontrar una alternativa de solución a las necesidades existentes para poder mejorar las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de los asfaltos con la intención de aumentar la resistencia y la rigidez utilizando un material sobrante de las refinerías en Ecopetrol: cenizas. A lo largo de este trabajo se evaluaron los cambios que una mezcla en caliente tipo 2 (MDC-2), presentó con la adicción de cenizas al asfalto en porcentajes de 5%, 10%, 15%. De esta manera, se aportó a la ingeniería civil una opción de un material para asfaltos y se contribuyó a la aplicación de una solución al problema de contaminación ambiental generado por la posible inadecuada disposición de este producto. La hipótesis es proveer una metodología alternativa para la construcción de carpetas asfálticas.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 JUSTIFICACIÓN**

La construcción de pavimento flexible en Colombia ha sido una de las soluciones a la infraestructura vial más utilizada para la movilidad en Colombia, principalmente en vías primarias, y algunas secundarias. En general, este tipo de pavimento brinda soluciones eficaces a problemas de movilización y desarrollo.

El aumento de las magnitudes de las cargas generadas por los ejes equivalente el cual se transmiten y someten a esfuerzos los pavimentos, generan desgasten las carpetas asfálticas, obligando a tratar de implementar la incentivo del estudio de nuevos materiales con los cuales se cumpla con estos esfuerzos, reduciendo con ello el tamaño de las carpetas asfálticas, obteniendo una producción a un costo menor. De esta forma surge la iniciativa de incorporar la ceniza al asfalto, verificando el cumplimiento de su estabilidad, resistencia y durabilidad en las nuevas mezclas asfálticas, para luego de ser estudiadas y evaluadas, puedan ser implementadas con seguridad.

Las cenizas obtenidas de locaciones petroleras son residuos que se generan luego de un proceso de quemado de materiales para generar calor y producir procesos en las plantas ubicadas en Ecopetrol. Las cenizas son consideradas en este momento como un material no reciclable que difícilmente se podrían reutilizar, es por esta razón que este proyecto adquiere su razón de ser al generar una alternativa de disposición de este material.

Otro aspecto a considerar de la modificación de estas mezclas asfálticas es tratar de generar un asfalto más económico, estable, y durable para la implementación en todo tipo de vías existente y así ofrecer una alternativa de uso en pavimentación para mejorar los problemas de movilidad en las regiones.

### **1.2 ALCANCE**

Para el siguiente estudio se necesitara realizar la caracterización de materiales pétreos y ceniza volante para ello se seguirán los procedimientos descritos en la norma y especificaciones invias. Después de tener el material granular y la ceniza volante derivada de locaciones petroleras caracterizadas se procede a caracterizar el cemento asfaltico tanto en forma natural como con adicción de un 5%,10% y

15% de ceniza volante. Posteriormente se realizara el diseño Marshall en el cual se hará una dosificación de asfalto considerando 4.5%, 5.5% y 6.5% de asfalto a los cuales también se les adicionara 5%,10% y 15% de ceniza. Para cada contenido de asfalto y de ceniza se realizaran 6 probetas las cuales serán 24 para cada contenido de asfaltos, es decir 72 briquetas en total, las cuales arrojaran como resultado el contenido optimo de asfalto para el diseño. Lo que se busca con esta investigación es obtener una mezcla asfáltica que tenga estabilidad y durabilidad para poder ayudar con la disposición final de la ceniza volante en locaciones petroleras.

### **1.3OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica tipo MDC2 y con la mezcla modificada con 5%, 10% y 15% de ceniza volante de locaciones petroleras como adición del ligante.

#### **1.3.2 Objetivo Especifico.**

- Caracterizar el material granular y la ceniza volante de locaciones petroleras.
- Realizar los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento del cemento asfáltico sin ceniza volante de locaciones petroleras y con ceniza volante de locaciones petroleras añadiéndole al 5%, 10% y 15% con respecto al peso total de asfalto en muestras de 1200 gr.
- Evaluar los resultados del ensayo Marshall en mezcla asfáltica MDC2 convencional y modificada con ceniza volante de locaciones petroleras añadida al cemento asfáltico.

### **1.4 RELEVANCIA DEL ESTUDIO**

Este estudio se desarrolló mediante una alianza Universidad-empresa. La ceniza derivada de locaciones petroleras ha sido suministrada por Ecopetrol-ICP, quienes contactaron al grupo de Investigación en Detección de Contaminantes y Remediación DeCoR para buscar alternativas de aprovechamiento de este residuo. Este estudio arrojó resultados relevantes tanto para la ingeniería como la empresa privada. Se entrego un artículo para la revista científica ciencia y tecnología futuro de Ecopetrol.



## **1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

Para el desarrollo del siguiente trabajo de grado se distribuyó la información de capítulos en los cuales se iban seccionando y desglosando las actividades que se realizaron detalladas a continuación: en el capítulo 1 se encuentra el Planteamiento del problema, alcance, justificación, objetivos, relevancia del tema tratado y este capítulo finaliza con la organización de la tesis. Posteriormente en el capítulo 2 se presentan el marco teórico con algunos conceptos relevantes acerca de la metodología de los asfalto y los tipos de mezclas asfálticas y se citan algunos estudios previos realizados alrededor del diseño de mezclas asfálticas, en el capítulo 3 se describe la metodología empleada en este estudio con una pequeña descripción de las dos empresas que suministraron materiales con los cuales fue posible continuar con este proyecto de grado. En el capítulo 4 se presentan todos los resultados obtenidos en este estudio. En el capítulo 5 se expone en análisis de resultados realizando una comparación con la norma invias. En el capítulo 6 se presentan todas las conclusiones para luego pasar al capítulo 7 en el cual se dan las recomendaciones necesarias para futuras investigaciones. Finalmente se presenta todo el material bibliográfico y se termina con los anexos y registro fotográfico.

## 2. MARCO TEORICO

El estudio de las mezclas asfálticas se hace necesario partiendo de la necesidad de movilidad en cualquier lugar, por lo tanto si se desea comprender el tema en algún porcentaje se debe realizar un estudio de los conceptos básicos que este tema nos presenta. En este capítulo se encuentran las definiciones más relevantes acerca de este material bituminoso muy utilizado en estos tiempos. Se puede apreciar cómo se define, clasifica, evalúa y lo más importante se presenta algunos resúmenes de investigaciones realizadas por personas interesadas en implementar nuevas mezclas y adicciones para el mejoramiento de las mismas.

### 2.1 ASFALTO

El asfalto es el residuo de un proceso físico aplicado en aceites crudos seleccionados llamado destilación. En otras partes del mundo es conocido también como bitumen. El asfalto es la sustancia que se usa como agente adhesivo, protector y para la impermeabilización de construcciones. Es un elemento líquido o semisólido pegajoso, de color negro y altamente viscoso encontrado en gran parte de los petróleos crudos y algunos depósitos naturales. (Reyes y otros, 2007)

Uno de las principales dificultades que tienen los asfaltos es su condición termoplástica, ya que al aumentar la temperatura se presentan las características de un flujo newtoniano; esto es, que la velocidad de desplazamiento es proporcional al esfuerzo del corte, facilitando o acelerando la falla por deformaciones inducidas a la mezcla asfáltica. Al disminuir la temperatura se comporta como un fluido no newtoniano, es decir un flujo visco elástico cuando ha sufrido envejecimiento o se ha sometido a bajas temperaturas. (Arenas y Serrano ,2006)

**2.1.1 Definición de una mezcla Asfáltica.** Las mezclas asfálticas son también llamadas aglomerados, se forman al combinar agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de tal manera que al cubrirse los agregados con una película continua de ligante se realiza la mezcla. Este tipo de material se puede fabricar en centrales fijos o móviles, para luego transportarse a la obra y poder extenderse y compactarse. (Kraemer et al, 2004)

Las mezclas asfálticas son de gran importancia para el desarrollo de una nación. La mayoría de veces están presentes en la construcción de carreteras,

pavimentos industriales, aeropuertos entre otros; además, también se utilizan para mejorar las condiciones de las capas inferiores de las carpetas asfálticas cuando se hace necesario por el paso del tráfico pesado.

Las mezclas asfálticas están constituidas la mayoría de sus veces por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de llenante mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico. Para que se pueda obtener una mezcla asfáltica de buenas propiedades se debe garantizar que todos aquellos elementos que la constituyan estén dosificados y cumplan a cabalidad. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en el costo total de la misma. (Arenas y Serrano, 2006)

**2.1.2 Clasificación de las mezclas asfálticas.** Existen varias maneras para la clasificación de una mezcla asfáltica, a continuación se mostrarán algunas para enmarcar la diversidad de las mismas:

**a) Por fracciones de agregado pétreo empleado.**(Padilla,2004)

- Masilla asfáltica: Son mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de tal manera que si llega a existir un agregado grueso, éste se distribuye uniformemente a través de la película que se genera por la mezcla del filler (llenante) y las altas cantidades de asfalto que lo recubren. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que pueda tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral, mejorando el ligante con adiciones de fibras.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

**b) Por la temperatura puesta en obra.** (Padilla,2004)

Las mezclas asfálticas en caliente se fabrican con asfalto, generalmente a una temperatura aproximada de 150 grados centígrados, dependiendo de la viscosidad del ligante se debe someter a un proceso de calentamiento de los agregados para evitar el enfriamiento del asfalto al entrar en contacto. Cuando el asfalto hace su disposición final en las obras se debe realizar a temperaturas superiores al ambiente para poder llevar a cabo la extensión de los mismos y realizar una compactación apropiada.

Existen otro tipo de mezclas asfálticas llamadas mezclas asfálticas en frío, el ligante suele ser una emulsión asfáltica, estos se usan en algunos lugares en

los que se manejan los asfaltos fluidificados, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

**c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.**(Padilla,2004)

La consideración de este parámetro reviste importancia en la vida útil de la estructura que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: la proporción de vacíos no supera el 6%. Esta mezcla puede ser preparada en frío o en caliente. La mezcla asfáltica en frío **son aquellas** fabricadas con emulsiones asfálticas y su principal utilización es la construcción de vías secundarias. Para obtener una mejor mezcla en frío se suele utilizar lechadas asfálticas para retrasar el envejecimiento. Las mezclas densas en caliente serán discutidas en una sección aparte.
- Estas mezclas se caracterizan por su trabajabilidad, debido a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja, esto se debe en gran parte a las emulsiones de asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios. Por lo tanto el realizar mezclas en frío es viable desde el punto de vista de almacenamiento, pero después de puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas extendidas debido a la evaporación del fluidificante.
- Mezclas Semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.
- Mezclas Drenantes: la proporción de vacíos supera el 12%. Se utiliza principalmente para vías de circulación rápida, para su elaboración se tienen que utilizar asfaltos modificados en proporciones que varían en un rango desde 4,5% hasta el 5% de la masa de los agregados. Se aplican en vías secundarias, urbanas o para mejorar la base en los pavimentos rígidos.

**d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.**(Padilla,2004)

- Mezclas gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se tratan de mezclas que se conforman por un árido fino en el que va incluido el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se puede trabajar y extenderse la mezcla.

**e) Por la estructura del agregado pétreo** (Padilla, 2004).

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Un ejemplo claro son las mezclas abiertas y los llamados concretos asfálticos aunque una parte de su resistencia se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

**f) Por la granulometría.**

- Mezclas continuas: una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.(Padilla, 2004)

g) **Por su alto módulo:** para la elaboración de estas mezclas se debe realizar por método caliente, utilizando asfaltos muy duros y en ocasiones modificados. Los contenidos asfálticos para utilizarse son aproximadamente del orden del 6% de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral es alta, entre los 8% y el 10%, estas mezclas tienen un elevado modulo de elasticidad alrededor de los 13.000 Mpa a 20 grados centígrados obteniendo una resistencia a la fatiga elevada. Se usa en muchas ocasiones para hacer reparcho de vías principales aunque también suele utilizarse en carpetas asfálticas nuevas. Su principal ventaja es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción. Con respecto a las mezclas convencionales posee una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga y un menor espesor. ( Padilla, 2004)

Teniendo en cuenta que este trabajo de grado se centró en la evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas densas en caliente tipo 2. A continuación se presenta una reseña histórica de la evolución del uso de los métodos de diseño de mezclas asfálticas.

## **2.2 MEZCLA ASFALTICA DENSA EN CALIENTE.**

En la mayoría de los casos, es el tipo de mezcla mas empleado para la construcción. Se define una mezcla asfáltica en caliente a la combinación de materiales finos seleccionados y bien gradados incluyendo polvo de tamaños finos (filler) con un ligante hidrocarbonado y en algunos casos adicionándole algún aditivo. Las partículas de agregados después del mezclado deben presentarse

muy bien recubiertas por una película homogénea del ligante. Para que una muestra de mezcla densa en caliente funcione y se deje compactar, la temperatura puesta en obra debe ser muy superior a la ambiente. (Fiallo y Remolina, 2009)

**2.2.1 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.** Según padilla en que en el año 2004 expuso las técnicas para poder trabajar desde hace más de 90 años en el desarrollo de técnicas y modelos para la elaboración de un sistema vial. Las mezclas densas en caliente han llevado un arduo proceso de investigación por la gran importancia que las mismas tienen para la movilidad de una nación.

- a) Thehubbar- field (1920's). fue uno de los primeros métodos de mezclas asfálticas, evaluaba el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado del material. Compara con una estabilidad ya obtenida para medir la deformación, este método funcionó adecuadamente para la evaluación de mezclas la cuales contenían agregado de tamaño pequeño o granulometrías finas, pero no se obtuvieron resultados deseados en mezclas asfálticas en caliente con agregados de tamaños máximos nominales altos.
- b) Método Marshall (1930's). Es el método con el cual se desarrolló esta tesis de grado, fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. El método se desarrolló y ha funcionado de una manera adecuada desde su creación, salvo algunas modificaciones en algunas de sus especificaciones en los años 40`s
- c) Método Hveem (1930's). Es un método de diseño de mezclas asfálticas contemporáneo con el método Marshall, a diferencia que el principal parámetro de evaluación de este es la estabilidad pseudotriaxial.
- d) Metodo de la Western Association Of State highway on Trasportation Officials WASTHO (1984). Este método de diseño de mezclas fue recomendado para realizar cambios que se requerían en los materiales y las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas en caliente para mejorar la resistencia a las roderas.
- e) Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). Después de muchos años de desarrollo y evolución de los métodos de diseño para mezclas asfálticas, se da la necesidad de encontrar un nuevo método de compactación de las mezclas en el laboratorio y la evaluación de sus propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

- f) Método SUPERPAVE(Superior Performing Asphalt Pavements1993) Fue un método el cual vio sus inicios tomando aspectos de diseño del método AAMAS. El método superpave contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla. El funcionamiento de dicho método predice a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por baja temperatura. Después de un largo proceso de investigación en laboratorio por 7 años, los modelos estuvieron listos en el año 2000.

El diseño volumétrico de mezclas en el superpave es actualmente implementado en varios estados de Estados Unidos de América. Esto se debe al reconocimiento de la conexión que existe entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Superpave promete ser un diseño confiable el cual se basa en métodos de ensayos de laboratorios que pueden ser usados para la identificación de la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

**2.2.2 Mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3:** las mezclas MDC-1, MDC-2 y MDC-3 son mezclas densas en caliente; también son llamadas concreto asfáltico y están definidas como la combinación uniformemente dosificada de agregado y cemento asfáltico, mezclado a una temperatura previamente determinada, que garantiza una mejor adherencia entre ellos (Arenas y Serrano, 2006):

Según vivas en el 2011

- **MDC-1:** Las mezclas densas en caliente tipo MDC-1 se pueden utilizar como capa intermedia (base asfáltica) con un espesor compacto mayor a 50 mm y como capa de rodadura con un espesor compacto mayor a 60 mm.
- **MDC-2:** Las mezclas densas en caliente tipo MDC-2 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 40 y 60 mm y mayores a 60mm.
- **MDC-3:** Las mezclas densa en caliente tipo MDC-3 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 30 Y 40 mm.

**2.2.3 Mezcla M1:** Esta mezcla hace parte de los llamados microaglomerados discontinuos en caliente, basados en el uso de cementos asfálticos modificados (aunque pueden usarse los convencionales) y la adición, en algunos casos, de fibras poliméricas, celulósicas o de fibra de vidrio, emplean cementos asfálticos de alta calidad con tamaño máximo de 12 mm (Arenas y Serrano, 2006).

**2.2.4 Stone Matrix Asphalt (SMA):** En los últimos 20 años se ha incrementado el uso de la matriz de asfalto de piedra tanto en Europa como en los Estados Unidos de América. Su uso obedece al alto desempeño en alto tráfico. Sin embargo, se

conoce que en Alemania su uso surge para ofrecer un buen agarre a las llantas del vehículo en circulación (Sharma y Goyal, 2006). La SMA ha demostrado alta resistencia a la deformación plástica en equipos de un número de ejes equivalente alto y en zonas en donde el asfalto se somete a temperaturas extremas (altas y bajas). Según investigadores citados por Sharma y Goyal (2006) la capacidad antideslizante del SMA se debe a la presencia de piedra sobre piedra en el esqueleto de la mezcla y que la mezcla cuenta con una alta cantidad de ligante, (Serrano, 2006)

**2.2.5 Tipos de Pavimentos:** los pavimentos se pueden clasificar como:

**2.2.5.1 Pavimentos flexibles:** se componen principalmente por una carpeta asfáltica la cual llevan una base y una subbase de carácter no rígido. Existen términos importantes para la construcción de una carpeta asfáltica, los más importantes los mencionaremos a continuación:

- Capa superficial: Esta es la capa superior y la capa que entra en contacto con el tráfico. Puede estar compuesta por uno o varias capas asfálticas.
- Base: Esta es la capa que se encuentra directamente debajo de la capa Superficial, en general se compone de agregados (ya sea estabilizado o sin estabilizar).
- Capa Sub-base: Esta es la capa (o capas), están bajo la capa de base. La Sub-base no siempre es necesaria. (Montejo Fonseca, 2007)

**2.2.5.2 Pavimentos rígidos:** son los pavimentos los cuales están constituidos por una losa de concreto hidráulico apoyada sobre una subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. El comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del Pavimento. (Montejo Fonseca, 2007)

**2.2.5.3 Pavimentos semi-rígidos:** es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento semi-rígido comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico. (Montejo Fonseca 2007)



## 2.3 CENIZAS VOLANTES

Cenizas volantes son un producto el cual resulta de la combustión del carbón pulverizado en la producción de plantas térmicas. Las partículas de ceniza son generalmente de un tamaño menor a  $200 \mu\text{M}$  , tiene una alta resistencia mecánica una gama de densidades entre 0,6 y 3 gr/ cm <sup>3</sup>, un punto de fusión superior a 10.000 ° C , baja conductividad térmica, y son en la mayoría de los casos químicamente inertes.(Herrera Galvis, 1999)

La mayoría de las cenizas volantes apropiadas para la construcción provienen del carbón que es utilizado en la combustión en plantas eléctricas. En este proceso el carbón es primero pulverizado o triturado a un grado específico de finura y luego mezclado con el aire caliente y soplado dentro de una cámara generadora que se enciende inmediatamente para calentar los tubos de la caldera, los componentes orgánicos del carbón son quemados casi inmediatamente, dejando la mayor parte de ceniza inorgánica como subproductos. (Herrera Galvis, 1999)

Como resultado de esta combustión las partículas pesadas de ceniza caen en el fondo de la cámara quemadora mientras que las partículas más livianas permanecen suspendidas en los tubos de gases. Estas partículas representan del 8 al 14 % del peso original del carbón. Para luego ser recopilado en una serie de precipitadores electroestáticos para ser almacenado o desechado. (Herrera Galvis, 1999)

**2.3.1 Clasificación de las cenizas volantes.**La principal forma de clasificación de las cenizas volantes se realiza de acuerdo a su composición química dependiendo del tipo de carbón quemado para producirla

Existen principalmente 3 tipos de carbón utilizados para las plantas generadoras eléctricas los carbones más comúnmente usados son, carbón bituminoso, carbón deantracita y carbón subbituminoso lignito. El carbón bituminoso tiene un contenido más alto de carbón que los demás los cuales tienen una cantidad más alta de carbón no combustible es por esto que la mayoría de las cenizas resultan de la quema de carbón subbituminoso y carbón lignito. (Sáenz Torres, 2006)

La clasificación universal de las cenizas volantes es:

Según la norma **NTC 3493: CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DEL CEMENTO PORTLAND**

**Clase N:** puzolanas naturales, calcinadas o crudas.

**Clase F:** cenizas volantes normalmente producidas en la quema del carbón antra, citico o bituminosos.

**Clase C:** cenizas volantes producidas a partir del carbón lignitico o subbituminoso.

Naturales (N): origen geotérmico, ígneo- volcánico como las puzolanas clásicas italianas, portuguesas y españolas de origen hidrotermico como el ópalo de origen orgánico vegetal como las tierras formadas por esqueletos de plantas de origen animal formada por caparazones animales.

Artificiales (F): son aquellas que resultan de tratamientos térmicos de activación y se dividen en:

- Rocas no reactivas en estado natural las cuales se pueden activar gracias a un tratamiento térmico entre 600 grados C y 900 grados C.
- Subproductos industriales obtenidos entre otros en procesos de fabricación de aluminio y durante la combustión del carbón en las centrales térmicas como las cenizas volantes y humo de sílice.

**2.3.2 Propiedades físicas de las cenizas volantes.** Las cenizas volantes se consideran un material fino-particulado que consta en su mayoría de partículas esféricas y vidriosas algunas partículas también pueden ser angulares o irregulares dependiendo de la fuente extraída, también pueden ser más finas o gruesas que las partículas del cemento portland. (Sáenz Torres, 2006)

## **2.4 ESTUDIOS REALIZADOS ALREDEDOR DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS**

Colombia es un país que provee una provisión interesante de asfaltos naturales en los departamentos de Boyacá, Caquetá, Tolima, meta y Casanare entre otros. Aunque algunos de estos asfaltos se han estudiado aun falta mayor investigación en el tema para aprovechar este recurso natural en el país (Rondón y otros, 2008).

Los estudios más recientes que se han realizado en Colombia tratan de mostrar el comportamiento de las mezclas asfálticas naturales en caliente. Existe otra posibilidad de obtener asfalto la cual consta de realizar una refinación del petróleo este es el más utilizado comúnmente en Colombia y la entidad la cual se encarga de explotar y refinar es Ecopetrol.

Los asfaltos se componen fundamentalmente por asfáltenos los cuales proporcionan sus características estructurales y de dureza, por resinas que asumen las propiedades cementantes o aglutinantes y por aceites que aportan la consistencia para mejor trabajabilidad.(Rondón y otros, 2008)

La mezcla asfáltica es una combinación de agregados pétreos y ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua, se fabrican en centrales fijas o móviles y se transportan a la obra donde se extienden y se compactan. (Fiallo y Remolina, 2009)

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. La falta de alguno de ellos afecta el conjunto y puede sufrir de segregación. (Fiallo y Remolina, 2009)

El uso de una prueba para determinar la tendencia a la segregación ayuda al usuario a determinar si una mezcla necesita ser modificada o si el proceso constitutivo debe ampliarse. (Fiallo y Remolina, 2009)

Los asfaltos tienen propiedades ligantes y aglutinantes compuestos en gran parte por hidrocarburos de consistencia semisólida a temperatura ambiente pero pueden ser mas fluidos a medida que se aumenta la temperatura (Arenas y Serrano, 2006).

Como se mencionó previamente, se han realizado diferentes estudios relacionados con las mezclas asfálticas. Algunos de estos estudios son:

Arenas y Serrano (2006), por ejemplo, evaluaron una comparación de las propiedades de las mezclas M1 Stone matrixasphalt, MCD2, MCD3 encontrando que la mezcla que presenta menor deformación de estas tres estudiadas en la mezcla M1 Stone matrixasphalt. Estas mezclas se compararon utilizando presiones de carga y cambios de temperatura.

Rondón y otros, 2008 realizaron un estudio de caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. Este trabajo demostró que los vasos de icopor triturado mezclados en mezclas densas en caliente (Tipo 2) mejoraban las propiedades elásticas del ligante, mientras que el caucho de llanta molida mejoraba las propiedades de susceptibilidad térmica, resistencia a la fatiga, inflamabilidad y resistencia a los solventes. También se encontró que el porcentaje óptimo para la modificación del asfalto convencional resultó ser un 1% de icopor y 14 % de llanta para lograr un asfalto modificado estable.

Rondón y otros, 2008 evaluaron mezclas en caliente modificadas con desecho de Policloruro de vinilo (PVC). El estudio demostró que el PVC mejoraba significativamente la resistencia mecánica bajo carga monotónica, aumentaba la rigidez y la resistencia a la deformación permanente, toda vez que el procedimiento se realizara por vía húmeda. Otra mejora en los asfaltos modificados con PVC fue la disminución del ahuellamiento a altas temperaturas de servicio ya que la resistencia a fluir obtenida en estos asfaltos es mayor arrojando valores de penetración y punto de ablandamiento con los que se predicen estas mejoras.

### **3. METODOLOGIA**

Para la elaboración de este proyecto de grado fue necesaria obtener materiales provenientes del Departamento de Santander, los materiales que se emplearon cumplieron con los requisitos para una Mezcla Densa en Caliente Tipo 2 (MCD-2).

#### **3.1 MATERIALES EMPLEADOS**

##### **3.1.1 Material Granular**

###### **Procedencia**

El material pétreo empleado proviene de la cantera ubicada junto al río Chicamocha, en el sector conocido como pescadero en el departamento de Santander. Adquirido directamente por medio de la empresa Asfaltart localizada en el kilómetro 5 anillo vial sentido Girón - Floridablanca, 100 metros delante de la hacienda de Vanguardia Liberal

###### **Ensayos realizados al material granular.**

Los agregados naturales fueron sometidos a diferentes tipos de ensayos para así obtener su clasificación:

- granulometría de los agregados gruesos y finos (INV. E-213)
- gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (INV. E-223)
- gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV. E-222),
- Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218)
- Caras fracturadas (INV. E-227)
- Equivalente de Arena (INV. E -133)
- Índice de aplanamiento y alargamiento (INV. E-230)

### **3.1.1.1 Descripción de los procedimientos utilizados para la caracterización del material granular.**

#### **a) Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV.E 213-07)**

La caracterización de los materiales empleados en la construcción de pavimentos flexibles hace necesario conocer la gradación que presentan los estos, paratal estudio se necesito seguir La norma invias(INV E- 213). Para realizar el procedimiento descrito en esta norma se debe primero tener el material extendido en una superficie uniforme en la cual se pueda realizar el proceso de mezclado para que exista homogeneidad en los agregados, inmediatamente se realiza el cuarteo del mismo sea de forma manual o mecánica para tener una muestra representativa de estudio. Del cuarteo se debe tomar dos cuartas partes. A continuación se somete el material a lavado por el tamiz de lavado para limpiar esta muestra de todos los materiales que puedan pasar por el tamiz N 200 aberturas de 75 mm. Posteriormente se lleva el material a un horno a una temperatura de 110° C. Después de 24 horas se retira el material teniendo en cuenta los pesos antes y después del lavado. Inmediatamente se selecciona la serie de tamices y se deben pesar según la norma técnica colombiana NTC 32, para luego ordenarlos descendientemente (de mayor a menor abertura) .Después de pasar todo el material seleccionado por los tamices se realiza el pesado de cada uno de ellos para continuar con la construcción de la curva granulométrica y el análisis del mismo.

#### **b) Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (INV. E-223):**

Esta norma sigue la norma INV. E 223-07, la cual se hace necesaria para la determinación de las gravedades especificas bulk, bulk saturada, superficialmente seca y superficialmente aparente para agregados con tamaño mayor a 4,75 mm (tamiz No 4).La gravedad específica es el cociente entre la masa de un volumen unitario de material a una temperatura específica y la masa del mismo volumen de agua destilada libre de gas a esa temperatura. (Vivas 2011). Para la elaboración de este ensayo se debe someter la mezcla a ensayar a un cuarteo según la norma INV E-202, para posteriormente lavarse y retirar el material inferior a 4.75 mm, las cantidades mínimas se determinan de acuerdo al tamaño máximo nominal el cual se define como el tamiz que retiene entre el 5% y el 15% de material total. En el anexo 1 se muestra la tabla No 3 con las cantidades mínimas de ensayo. El tamaño máximo nominal fue de 1/2 “por lo que tomamos más de 2 kilogramos de material.

El procedimiento a seguir fue tomar el material necesario, llevarlo a un horno a 110 más o menos 5°C, secarlo a temperatura ambiente por mas o menos 3 horas. Posteriormente se toma su peso, y se sumerge en agua a temperatura ambiente durante un periodo de 15 a 19 horas.

Después de transcurrido el tiempo de inmersión, se pesa la muestra y se seca con un paño absorbente para eliminar el agua superficial visible. Se toma la lectura de muestra en estado saturado con superficie seca, para luego colocar la muestra en una canastilla metálica y tomar su peso en estado de masa sumergida en agua. Para finalizar se seca en un horno a temperatura de 110°C hasta masa constante y se toma su peso.

**c) Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV. E-222-07)**

Para la realización de este ensayo se tomaron aproximadamente 1 kg de muestra de material fino, cumpliendo con los procedimientos de la norma INV E-202. Se debe secar el espécimen en un horno a más o menos 110°C al enfriarse se deja sumergido alrededor de 19 horas, posteriormente se elimina el agua teniendo el cuidado de no perder finos, para luego extenderse en una superficie uniforme lisa y dejarla secar con sol o con aire caliente, en el instante que se considere que la muestra se encuentra libre de humedad superficial se realiza la prueba de cono, la cual consiste en tomar un molde metálico con un peso, en el molde metálico se introducen cantidades de material y se compacta ligeramente con el martillo dándole 25 golpes, cada golpe debe dar a una altura de 5 mm de la capa. Cuando se llene nuestro molde se enraza y se retira el molde, si hay húmeda aun presente el agregado fino mantendrá la forma y se continuara secando hasta que se produzca su desmoronamiento superficial.

Posteriormente se llena el picnómetro con aproximadamente 500 gr del agregado fino saturado y superficialmente seco, y se le añade agua hasta aproximadamente un 90% de su capacidad. Se rueda el picnómetro para eliminar el aire atrapado hasta que no existan burbujas. Luego se enraza el picnómetro con agua a temperatura ambiente y se procede a tomar el peso del picnómetro más la muestra. Se remueve todo el agregado fino del picnómetro se seca a una temperatura más o menos 110°C hasta masa homogénea y se toma su peso.

**d) Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½” por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218-07)**

La principal implementación de este procedimiento, se realiza para obtener la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva. Este ensayo nos da un indicador de calidad relativa o competencia de diferentes agregados gruesos.

Primero se deben observar las tablas 1 y 2 de la norma INV 218. ANEXO 2 Y ANEXO 3 respectivamente, para saber a cuál de las gradaciones es parecida

el material a utilizarse. Después se debe tomar una muestra mediante cuarteo y posteriormente se lava y se seca en horno a una temperatura de  $110 \pm 5$ . Cuando el material presente masa constante se selecciona del número de esferas y se toma la masa que describa el anexo 2. Luego se lleva al cuarto acondicionada para realizar el respectivo ensayo, se observa que el tambor se encuentre libre de cualquier masa que no sea de la muestra a estudiar. El siguiente paso a seguir es introducir el material al tambor para posteriormente agregar las esferas que deben girar a una velocidad uniforme, hasta completar 500 revoluciones. Una vez cumplidas la revoluciones se debe a separar el material ensayado, para el material fino se debe utilizar un tamiz con abertura de 1.70 mm (No 12) y el material grueso se debe pasar por un tamiz de abertura mayo a 1.70 mm (No 12). El material grueso se debe lavar y secar en un horno a temperatura  $110 \pm 5^{\circ}$  C hasta masa continua y se determina la masa.

**e) Caras fracturadas (INV.E-227-07)**

Se toma la muestra y se debe pasar por el tamiz de 4.75 mm (No 4) para separar los agregados gruesos de los finos. Se debe observar la tabla suministrada por el instituto nacional de vías ANEXO 4 y después de esto se debe tomar la cantidad de material especificado. Apartir de esta tabla y teniendo un tamaño máximo nominal de  $\frac{1}{2}$ " se tomaron 3000 gr aproximadamente, luego se lava el material para eliminar las partículas finas. Se seca en un horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5^{\circ}$  C. Después del secado se esparce la muestra en una superficie seca y grande, y se procede a inspeccionar cada partícula para poder clasificar si se tiene una o varias caras fracturadas. Con una espátula o herramienta similar se debe clasificar la muestra en tres categorías: (1) partículas fracturadas, (2) partículas que no cumplen con el criterio especificado, (3) partículas de dudosa o en la frontera. Posteriormente se debe determinar el número de partículas de cada grupo o el pesos de las mismas, se debe utilizar la masa para obtener los cálculos del porcentaje de partículas fracturadas.

Si en alguna de las determinaciones, más del 15 % del total, es colocado en el grupo de dudosas, se debe repetir la determinación hasta que no mas del 15 % este presente en la categoría.

**f) Equivalente de Arena (INV. E -133-07)**

Se debe realizar la prueba con materiales gradados que pasen por el tamiz de 4.75 mm (No 4).

*(Método con Agitador Mecánico)*



Se obtienen los 85 ml de material a introducir en el recipiente, se seca la muestra hasta masa constante a  $100 \pm 15$  ° C y se enfría a temperatura ambiente. Después de tener el material se vierte una solución de trabajo de cloruro de calcio en el cilindro graduado hasta una altura de  $101,6 \pm 2,54$  mm, con la ayuda del embudo se vierte la mezcla tratando de no dejar material en las paredes y se golpea el fondo del mismo para liberar de burbuja de aire. Se deja reposar durante 10 minutos. Al finalizar los 10 minutos se tapa el cilindro y se girar el material para desprender el material que se encuentra en el fondo. Se asegura el cilindro y se pone en el agitador metálico por un tiempo de  $45 \pm 1$  seg.

*Procedimiento de irrigación:* se debe mantener el cilindro en posición vertical, se inserta el tubo irrigador dentro del cilindro, se afloja la pinza de la manguera y se lava el material de las paredes del cilindro a medida que se baja el irrigador el cual llega hasta el fondo del cilindro, aplicando suavemente una acción de presión y giro mientras que la presión de trabajo fluye por la boca del irrigador para que esto impulse el material fino que se encuentre en el fondo. Se lavan los finos hasta tener en el cilindro una marca de 381 mm (15”), posteriormente se levanta el tubo irrigador y se observa que el liquido se mantenga a la altura anteriormente mencionada y se deja en reposo la muestra durante  $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$ .

*Determinación de la lectura de Arcilla:* después de pasados los 20 minutos del periodo de sedimentación, se toma la lectura y se anota el nivel de la parte superior, a este valor se denomina lectura de arcilla. Si la lectura no se puede tomar en un periodo máximo de 30 min se debe repetir el procedimiento.

*Determinación de la lectura de arena:* después de tomar la lectura de arcilla, se introduce el conjunto del disco, la barra y el sobrepeso y se hasta que llegue a la arena. Cuando el pie descansa sobre la arena, se inclina el dispositivo hacia las graduaciones del cilindro hasta que el indicador toca la pared del cilindro. Se restan 254 mm (10”) y se registra el valor como lectura de arena.

*NOTA:* Si las lecturas de los meniscos están debajo de un número entero se debe aproximar al número mayor.

**g) Índice de aplanamiento y alargamiento (INV. E-230)**

Se debe realizar el procedimiento de tamizado como se describe en la norma INV E – 213. Se rechazan las partículas retenidas en el tamiz de 63 mm y las que pase el tamiz de 6.3 mm. Se pesan los retenidos en las diferentes

fracciones. La mínima muestra de ensayo se da en función del tamaño máximo nominal del agregado a ensayar ANEXO 5

**INDICE DE APLANAMIENTO:**

Se separan las partículas planas de cada fracción, se tamiza cada fracción por el tamiz de barras paralelas ANEXO 6. Se procede a dejar en un lugar separado las partículas que no pasen para luego determinar la masa de las partículas que pasaron por el tamiz de barra, es decir las planas.

**INDICE DE ALARGAMIENTO:**

Se separa el material con forma alargada de cada una de las fracciones, se pasa la partícula de la fracción en el calibrador de alargamiento por la separación entre las barras, y se toma la masa de las partículas retenidas en el calibrador.

**3.1.2 Asfalto.**El cemento asfáltico al igual que el materia granular fue suministrado por la empresa ASFALTART localizada en el kilometro 5 anillo vial sentido Girón - Floridablanca, 100 metros delante de la hacienda de Vanguardia Liberal, al recibirse el material la empresa ASFALTART LTDA suministro la Tabla 1 la cual contiene propiedades del asfalto (60-70) con el que se trabajara y estudiara este proyecto de grado.

**Tabla 1 Ficha técnica de calidad de ensayos de laboratorio ASFALTO 60-70 realizados en ASFALTART LTDA.**

ENSAYO	NORMA	VALOR REPORTADO		REFERENCIA	
		°F	°C	°F	°C
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	121	50	107-131	42-55
Punto de inflamación	ASTM D 92	518	270	Min 450	Min 232
Penetración a 25°C, 100g y 5 s (0.1mm) al asfalto original.	ASTM D 5	70		60-70 mm/10	
% pérdida de masa RTFOT	ASTM D 2872	0.7925		< 1%	
Solubilidad en tricloroetileno (%peso)	ASTM D 2042	99.35		Min 99.0	
Contenido de agua (% volumen)	ASTM D 95	0.12		Max 0.2	
Ductilidad a 25°C	ASTM D 113	>130		Min 100	
Penetración a 25°C, 100g y 5 s (0.1mm) al asfalto envejecido TFOT	ASTM D 5	36.0			
Penetración residual (%)	ASTM D 5	57.1%		Min 52	

ENSAYO	NORMA	VALOR REPORTADO		REFERENCIA	
		°F	°C	°F	°C
Viscosidad dinámica a 60°C	ASTM D 4402	1965		Min 1500	
Temperatura de mezcla (°C)	ASTM D 1559	142°C - 147°C			
Temperatura de compactación (°C)	ASTM D 1559	132°C - 135°C			
Índice de penetración	I.N.V. E-724	-0.72		-1 hasta +1	

Tomado de la ficha técnica de control de calidad de la empresa ASFALTART, fecha. (09-11-2010)

### 3.1.2.1 Ensayos realizados al material bituminoso:

- Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato anillo y bola) (INV. E- 712-07).
- Penetración de los materiales bituminosos (INV.E-706-07)
- Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (INV. E-709-07)

**Punto de ablandamiento de materiales bituminosos** (aparato anillo y bola) (INV. E- 712-07).

Se debe realizar el montaje del equipo para la elaboración del ensayo. El material bituminoso se debe calentar cuidadosamente hasta que se encuentre fluido y pueda verterse. Se calientan los anillos para luego verter el material bituminoso y se deja reposar por 30 minutos. A partir de este instante no debe tardar más de 240 minutos en terminarse el ensayo. Se debe escoger el baño líquido con agua destilada entre 30° y 80° C, se usa el termómetro 15C la temperatura al iniciar el baño no debe ser mayor a  $5^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ , el baño con glicerina para obtener ablandamientos por encima de 80° hasta 157°C, y bala con glicol etileno para ablandamiento entre 30°y 110°C, después de tener el montaje se procede a llenar el baño líquido hasta una altura de  $105 \pm 3$  mm, con la ayuda de unas tenazas se colocan las dos bolas en el fondo del baño, se centran y se calientan a una tasa de elevación de temperaturas constante.

Se anota para cada anillo y bola la temperatura en el termómetro en el momento en que la bola toque fondo del plato base.

### **Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (INV. E-709-07)**

*Empleando el equipo manual.*

Se llena la copa a cualquier temperatura sin exceder los 56° C, por encima del punto de ignición de tal manera que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado. Se debe tener cuidado si se excede con la cantidad de muestra, en el caso de exceder se debe sacar con una pipeta o algún otro mecanismo que se apto para este ensayo, si se llegara a salir la muestra, se vacía se limpia y se vuelve a llenar, posteriormente se debe quitar las burbujas con un elemento puntiagudo. Se enciende la llama y se ajusta a un diámetro entre 3.8 y 5.4 mm, se aplica calor de tal manera que la rata sea de 14° a 17° C por minuto. Por debajo del punto de ignición se debe disminuir la temperatura para los últimos 28 ° C. se debe pasar la llama por debajo de la copa con movimientos rectos y continuos. El tiempo de barrido de la llama de ensayo debe ser de alrededor de  $1 \pm 0.1$  seg. Cuando persiste espuma por encima del espécimen de ensayo durante los últimos 28° C se eleva la temperatura sin sobrepasar lo esperado para el punto de ignición. Se debe tener mucho cuidado en los cambios que se obtenga en la muestra para poder arrojar resultados adecuados.

Cuando se ensayen materiales donde la temperatura esperada no se conozca se debe calentar antes de llevar a la copa, o se calienta a una temperatura no mayor a 50°C. Se deben registrar el punto de ignición observado. La lectura en el aparato medida de temperatura y el tiempo del ensayo.

Se considera que la muestra tiene ignición cuando una larga flama aparece instantáneamente y se propaga sobre toda la superficie del espécimen, se debe tener cuidado con la aparición de una flama azulado antes del verdadero punto de ignición. Para determinar el punto de llama, se continúa calentando el espécimen con incrementos de temperatura a una rata de 5° a 6° C por minutos, hasta que el espécimen se encienda y las sustancias se quemen por lo menos 5 segundos. Se mantiene ardiendo el espécimen y se observa el punto de llama.

### **Penetración de los materiales bituminosos (INV.E-706-07)**

Se toman de 400 a 500 gramos de material depositados en un recipiente, se calienta con cuidado para que se eviten sobrecalentamientos, al alcanzar la fluidez se vierte en los moldes destinados para el ensayo. Las temperaturas de calentamiento no podrán ser superiores al punto de ablandamiento en más de 90° C y no se podrá pasar de 30 minutos.

Se procederá a llenar los moldes, los cuales deben estar a temperatura semejante al material ensayo para posteriormente llenar dos muestras de ensayo y el material debe ser superior a 10 mm de la penetración esperada.

Cuando se tenga el material bituminoso en el molde se debe tapar para evitar la entrada de polvo u otros elementos en el ambiente. Se deja enfriar a una temperatura entre los 20° y 30° C por un periodo entre 1 y 1.5 horas. Se sumergen los molden a baño de agua a temperatura especificada, se mantienes así durante los primeros dos periodos.

Ejecución del ensayo: se supervisa las condiciones de los materiales para el ensayo y se acondicionan para que cumplan con la norma. El ensayo de penetración se realiza directamente en el baño de agua colocando el penetrometro sobre la plataforma que para este fin debe tener el baño.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión se aproxima la aguja del penetrometro hasta que la punta toque la superficie de la muestra. Se pone en cero el penetrometro y se suelta el mecanismo para que la aguja se libere durante el tiempo especificado. Se lee y anota la distancia expresada en decimas de milímetro. Se realizan por lo menos tres penetraciones en cada recipiente sobre puntos diferentes. Cuando las penetraciones sean más profundas de 200, se usaran al menos tres agujas dejándolas en la muestra hasta que las tres determinaciones se hayan completado. El volumen total del material en el recipiente no debe exceder los 125 ml.

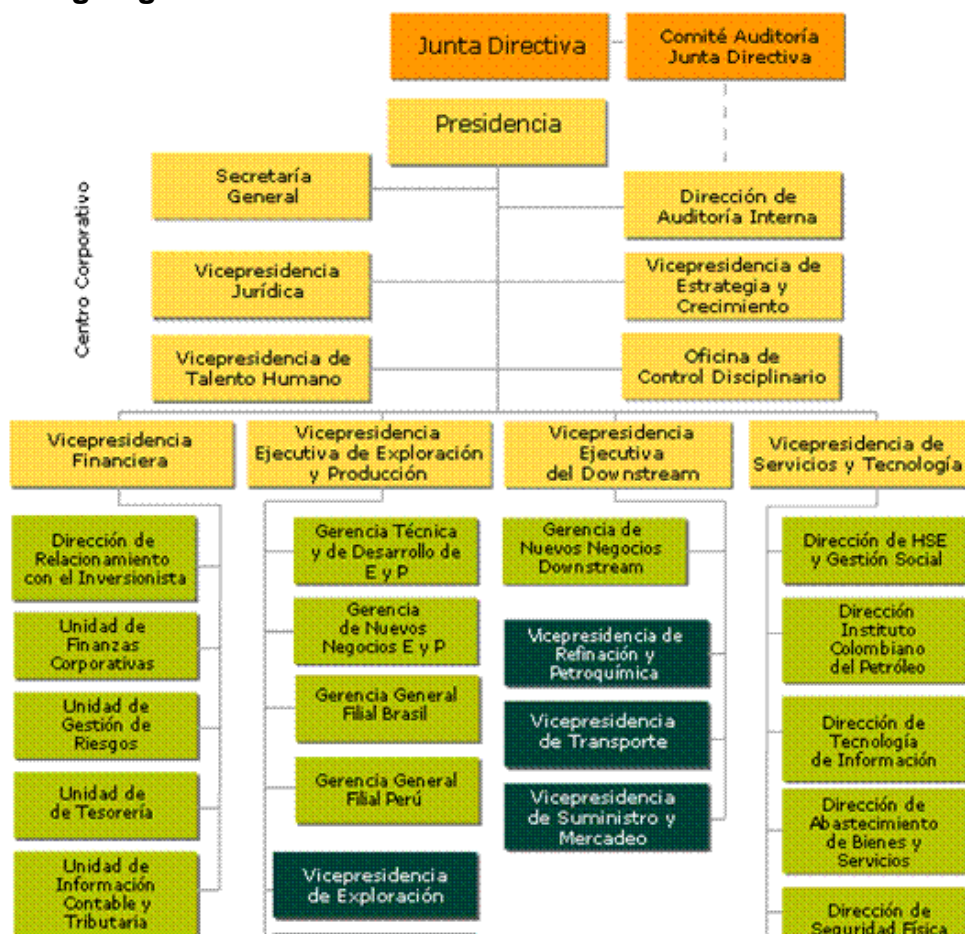
**3.1.3 Ceniza Volante.**La ceniza volante fue suministra por ECOPETROL S.A, esta es un residuo industrial que se deriva de la combustión y quema de materiales pétreos que se convierten en productos derivados del petróleo. ECOPETROL S.A hace parte de la industria petrolera de Colombia.Ecopetrol S.A. es una Sociedad de Economía Mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, de conformidad con lo establecido en la Ley 1118 de 2006, regida por los Estatutos Sociales que se encuentran contenidos de manera integral en la Escritura Pública No. 5314 del 14 de diciembre de 2007, otorgada en la Notaría Segunda del Círculo Notarial de Bogotá D.C. En 2003 el gobierno colombiano reestructuró la Empresa Colombiana de Petróleos, con el objetivo de internacionalizarla y hacerla más competitiva en el marco de la industria global de hidrocarburos. Con la expedición del Decreto 1760 del 26 de Junio de 2003 modificó la estructura orgánica de la Empresa Colombiana de Petróleos y la convirtió en Ecopetrol S.A., una sociedad pública por acciones, ciento por ciento estatal, vinculada al Ministerio de Minas y Energía y regida por sus estatutos

protocolizados. La transformación de la Empresa Colombiana de Petróleos en la nueva Ecopetrol S.A., la Compañía se liberó de las funciones de Estado como administrador del recurso petrolero y para realizar esta función fue creada La ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos).

A partir de 2003, Ecopetrol S.A. inició una era en la que, con mayor autonomía, ha acelerado sus actividades de exploración, su capacidad de obtener resultados con visión empresarial y comercial y el interés por mejorar su competitividad en el mercado petrolero mundial.

Actualmente, Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país con una utilidad neta de \$5,25 billones registrada en 2009 y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, pertenece al grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica.

**Figura 1. Organigrama ECOPETROL S.A- CONVENIO ICP-UNIVERSIDAD**



**3.1.3.1 Ensayos realizados a la ceniza volante:** Se realizaron tres ensayos para la caracterización de este material, el procedimiento empleado fue el mismo seguido para materiales pétreos finos:

- Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV. E-213)
- Peso específico y absorción de los agregados finos (INV. E-222),
- Contenido de materia orgánica.(INV.E-212)

Los ensayos que se realizaron para la ceniza volante fueron idénticos a los realizados para caracterizar el material granular fino, es decir la granulometría de los agregados finos se basó en la norma INV E-213 y el Peso específico y absorción de los agregados finos en la norma INV E-222. Se incluye la descripción del procedimiento para la ceniza volante mediante el ensayo de Contenido de materia orgánica.

**Contenido de materia orgánica. (INV E-212)**

El objeto de este ensayo es dar a conocer las impurezas presentes en el material a estudiar, en este caso la ceniza volante derivada de locaciones petroleras. En la tabla 2 se presenta la escala de vidrios de color normalizado usada para este ensayo.

**Tabla 2 Escala de vidrios de color normalizado.**

<b>COLOR ESTÁNDAR Gardner No.</b>	<b>Placa orgánica No.</b>
5	1
8	2
11	3(estándar)
14	4
16	5

Para la elaboración de este ensayo se toman aproximadamente 450 gramos de ceniza. Posteriormente se coloca la ceniza en una botella hasta completar aproximadamente 130 ml para luego añadir una solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen total del recipiente incluyendo ceniza y líquido sea de 200 ml. Se tapa el frasco y se agita dejándolo reposar por 24 horas. Al final del período de 24 horas de reposo, se llena una botella de vidrio con la solución normal de referencia, la cual debe haber sido preparada dentro de las dos horas anteriores a la comparación, hasta completar un volumen aproximado de 75 ml, y se compara su color con el del líquido que sobrenada en la solución que contiene la arena. La comparación de colores se hace poniendo juntos, el frasco que contiene la muestra

y el que contiene la solución de referencia, y mirando a través de ellos contra un fondo claro. Se anota si el color de la solución que sobrenada es, más claro, más oscuro o igual que el color de referencia.

Método con referencia a la escala de vidrios de colores: Para definir con mayor precisión el color del líquido de la muestra de ensayo, se deben utilizar cinco vidrios de color, de acuerdo con la Tabla 2. La preparación y la comparación se deben hacer conforme el procedimiento descrito anteriormente, el resultado del ensayo es el número de la placa orgánica cuyo color sea más parecido al del color del líquido que sobrenada la muestra.

**3.1.4 Briquetas realizadas según diseño Marshall.** Las briquetas se realizaron de acuerdo al método Marshall cumpliendo con los parámetros para una mezcla en caliente tipo 2 (MDC-2).

Para la elaboración de las muestras se realizaron tres granulometrías con diferentes porcentajes de fino y grueso para observar cual de las tres cumplía las especificaciones in vías, al observar que de las graficas obtenidas mostraban la deficiencia de finos, se tomo la determinación de diseñar la mezcla cumpliendo la norma y tomando el porcentaje en la mitad del parámetro dado.

#### **3.1.4.1 Ensayos realizados a la mezcla densa en caliente MDC-2**

- Estabilidad
- Flujo
- Contenido de asfalto.
- Densidad bulk



**Tabla 3 Cantidad en gramos de material granular por briqueta con 5.5% de contenido de asfalto para mezcla densa en caliente (MDC-2)**

Tamiz	Gradación	Gradación deseada	% Retenido	Peso en gramos
½	80-95	87,5	12,5	141,75
¾	70-88	79	8,5	96,39
# 4	49-65	57	22	249,48
# 10	29-45	37	20	226,8
# 40	14-25	19,5	17,5	198,45
# 80	8-17%	12,5	7	79,38
# 200	4-8%	6	6,5	73,71
p-200	6-0%	0	6	68,04

*Para briqueta de 1200 gramos y 5.5% de asfalto se requerirían 66 gramos de asfalto y 1134 gramos de agregados.*

### 3.1.4.2 Resistencia de mezclas bituminosas por medio del aparato Marshall.

Para la realización de este ensayo la norma 748 del Instituto Nacional de Vías, recomienda realizar un diseño con 6 contenidos de asfalto el cual necesitará por lo menos de 18 probetas, es decir 3 probetas por porcentaje de asfalto. En el siguiente trabajo de grado se realizaron 72 probetas, cada contenido de asfalto tenía la incorporación de diferente porcentaje de ceniza, es decir para una briqueta con 4.5 % de asfalto se tenía 4 tipos de combinaciones, la primeras 6 se realizaron con un 0% de ceniza volante, la siguientes se les adiciono 5% de ceniza volante, posteriormente se les adiciono un 10% ceniza volante y para terminar un 15% de ceniza volanta. De esta forma se tienen 24 briquetas para 4.5% de asfalto, 24 briquetas para 5.5% de contenido de asfalto contando con las 4 combinaciones y 24 briquetas para 6.5% contenido de asfalto con las 4 combinaciones de adición correspondiente. La tabla 2 muestra una matriz sencilla de cómo se diseña las 72 briquetas. En el ANEXO 7 se encuentra la forma más detallada de la matriz experimental empleada.

**Tabla 4 Combinaciones para la elaboración de briquetas.**

CONTENIDO ASFALTO		CONTENIDO DE CENIZA EN %			
		0%	5%	10%	15%
4.5 % DE ASFALTO	24	4.5V	4.5 A	4.5 B	4.5 C
5.5 % DE ASFALTO	24	5.5 V	5.5 A	5.5 B	5.5 C
6.5 % DE ASFALTO	24	6.5 V	6.5	5.5 B	6.5 C
CANTIDAD TOTAL DE BRIQUETAS				72	

La norma INV 748 establece el para el diseño Marshall el siguiente método a seguir, resumido de la siguiente manera:

Para la elaboración de cada una de las 72 briquetas, se necesitaran más o menos 1200 gramos valor que debe ser incrementado en un 20porciento para tener suficiente material disponible por si se presentara algún imprevisto. También se debe contar con alrededor de 7 kilos de cemento asfáltico el cual se le hará un caracterización para observar sus propiedades físicas.

Los agregados se secan hasta pesos constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  y se hará una granulometría, según el siguiente trabajo de grado la granulometría que más seacercó a los parámetros de la norma invias fue de un 70% agregado fino y un 30% agregado grueso. Al observar que el material tenia escasos los tres puntos finales en los que se tenían los tamices de finos como tamiz N 80, N 200 y pasa N200,se realizó un diseño partiendo por la mitad de la cantidad que exigía a retenerse en cada tamiz, de esta forma se garantiza que el diseño cumpliera con las normas. A continuación, en la tabla 3 se presenta los porcentajes requeridos para el cumplimiento de la norma.

**Tabla 5 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente.**

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
		% PASA									
Densa	MDC-1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-2			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-3					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semidensa	MSC-1		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-2			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-0	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-1		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto modulo	MAM		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

**Tabla6 Mezcla densa en caliente MDC-2 Franjas granulométricas y franja de diseño con el punto medio.**

Limite superior	Limite Inferior	punto medio
100	100	100
80	100	90
70	88	79
49	65	57
29	45	37
14	25	19,5
8	17	12,5
4	8	6

Después de tener los materiales tamizados y separados en cada tamiz se procede a preparar las 72 recetas las cuales llevan la gradación adecuada cumpliendo con el diseño de punto medio para una mezcla densa en caliente MDC-2. Se debe contar con un recipiente metálico para calentar los agregados y el cemento asfáltico el cual deberá producir una viscosidad de  $170 \pm 20$  centistokes (1 centistoke=  $1\text{mm}^2/\text{s}$ ). Se mezclan en seco los agregados y se forma a continuación un cráter en su centro y se añade la cantidad requerida de asfalto. Se debe verificar que el asfalto no deberá permanecer a la temperatura de mezcla por más de una hora.

### **COMPACTACION DE LAS PROBETAS**

Se debe calentar el molde, el collar, el martillo en un horno o cocina a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$  a  $140^{\circ}\text{C}$ , seguidamente se tienen listos los materiales a una temperatura adecuada, se coloca un papel filtro y se introduce el material dentro del molde para posteriormente aplicarle 25 golpes para lograr homogeneidad en la mezclas, los golpes deben ser aplicados 10 en el centro de la mezcla y 15 por los bordes del molde, se toma la lectura de temperatura para garantizar que sea adecuada y se procede aplicar 75 golpes por cada cara con un martillo dispuesto para este ensayo a una altura de 18". Se marca con un corrector o crayola se le toman tres medidas de diámetro y tres medidas de altura para luego promediarse y observar sus dimensiones. Se dejan aproximadamente 24 horas para luego ser ensayas.

#### **3.1.4.3 Ensayos siguientes a la compactación de la probetas**

- Determinación del peso específico
- Análisis de la densidad de vacíos
- Ensayo de estabilidad y flujo

#### **PESO ESPECIFICO "BULK"**

$$G_b = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

$W_a$ = peso de la muestra seca en el aire.

$W_{ss}$ = peso de la muestra superficialmente seca e internamente saturada.

Ww= peso de la muestra en el agua, el cual consta de colocar una canastilla en donde se coloca la probeta, que descansa sobre un balde de agua y a su vez suspendido de la balanza que determina este peso.

### **ESTABILIDAD Y FLUJO**

Se lleva la probeta a un baño de María durante un tiempo de 30 minutos a una temperatura de 60°C mediante un sistema de calefacción, se acondiciona el aparato Marshall aplicando una película delgada de aceite a las barras guías y anillos. Cuando esté listo, se seca la probeta y se coloca en medio de los anillos, ajustando el conjunto. Se coloca el Dial de medidor de flujo ajustando su aguja en cero. Se enciende el aparato Marshall observando la máxima carga que es cuando ocurre la falla (ESTABILIDAD) se anota este valor y en ese instante la máxima lectura del Dial que es él (FLUJO). En el formato la carga se escribe en (Lb) por lo cual se debe multiplicar por 2.2046, el valor de flujo será expresado en 0.25mm (1/100"). Si el Dial se deformó 3.8mm en otras palabras 0.15 pulgadas el valor del flujo será de  $0.15" * 100 = 15$

### **ANALISIS DE DENSIDAD Y VACIOS**

Se promedian los pesos específicos "bulk" de las 6 probetas elaboradas con el mismo porcentaje de asfalto. Este mismo valor se multiplica por 62.4 para obtener el dato en el sistema ingles. Se calcula el peso específico promedio del agregado total.

$$PsAgr = \frac{Psagr + Psaf}{2}$$

Psagr = Peso específico de agregado grueso.

Psaf = peso específico de agregado fino.

Se determina el peso específico máximo teórico.

$$Psmt = \frac{100}{\frac{\% \text{ de agregados}}{PsAgr} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{PsAsf}}$$

PsAgr = peso específico del agregado.

PsAsf = peso específico del asfalto.

Se toma el dato de porcentaje de asfalto como porcentaje del volumen total de probetas, para calcular el porcentaje en volumen que ocupa el agregado con respecto al volumen total de la probeta. Se precisa el porcentaje de vacíos con respecto al volumen total de la probeta. Posteriormente se halla el porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada, que es igual a la resta de 100 menos el volumen total de los agregados.

Se calcula el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla total con respecto a la mezcla compactada. Finalmente se calcula la estabilidad corregida que es para aquellas probetas que no tenga la altura de 2.5 pulgadas según los factores que corresponda.

### ***CONTENIDO DE ASFALTO***

El objetivo primordial es obtener la cantidad de bitumen extraído en frío por medio de un solvente. Se debe pesar la muestra y el filtro utilizado para posteriormente colocar la muestra en la taza sumergida en gasolina. Colocar el filtro colocando la campana y un recipiente en el desagüe para el vestidor de gasolina. Se enciende la máquina de centrifugado incrementando su velocidad hasta 3600 r.p.m, a medida que la máquina expulsa la gasolina con el asfalto se debe ir adicionando más gasolina hasta que salga de una manera clara, en ese momento se termina el proceso de lavado y se detiene la máquina. Se retira la cubierta y el filtro se limpia bien que no quede material adherido a este. Se debe pesar el material y filtro para sacar la diferencia del peso inicial con peso final tanto del filtro como del agregado se saca el porcentaje del contenido de asfalto.

## 4. RESULTADOS

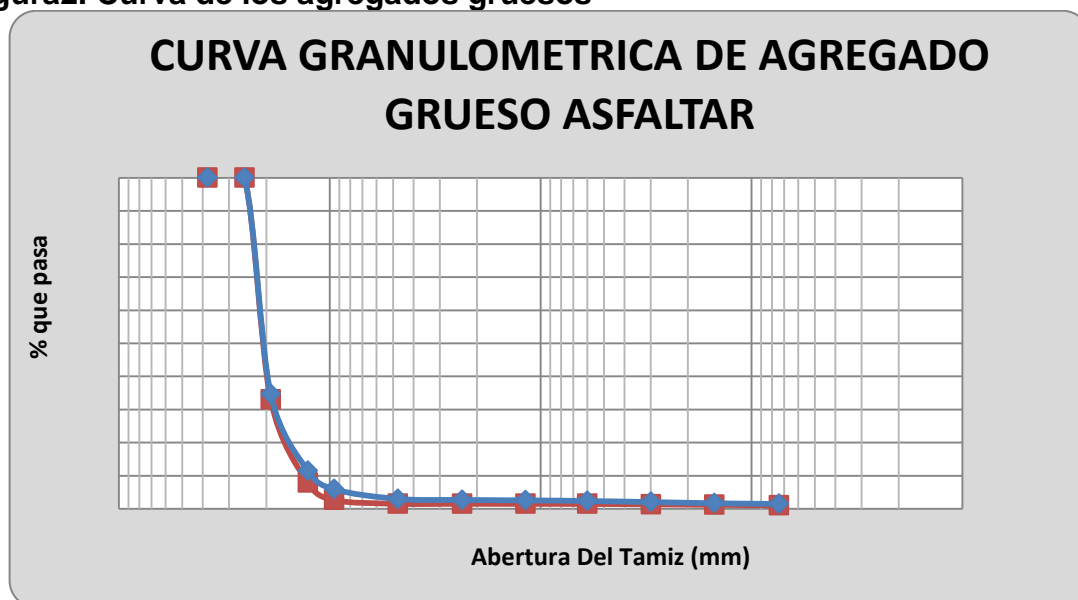
### 4.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR.

A continuación se muestra la caracterización granular de los materiales utilizados para la elaboración de este estudio, procedimientos previo para el diseño de mezclas asfálticas.

#### Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV. E-213)

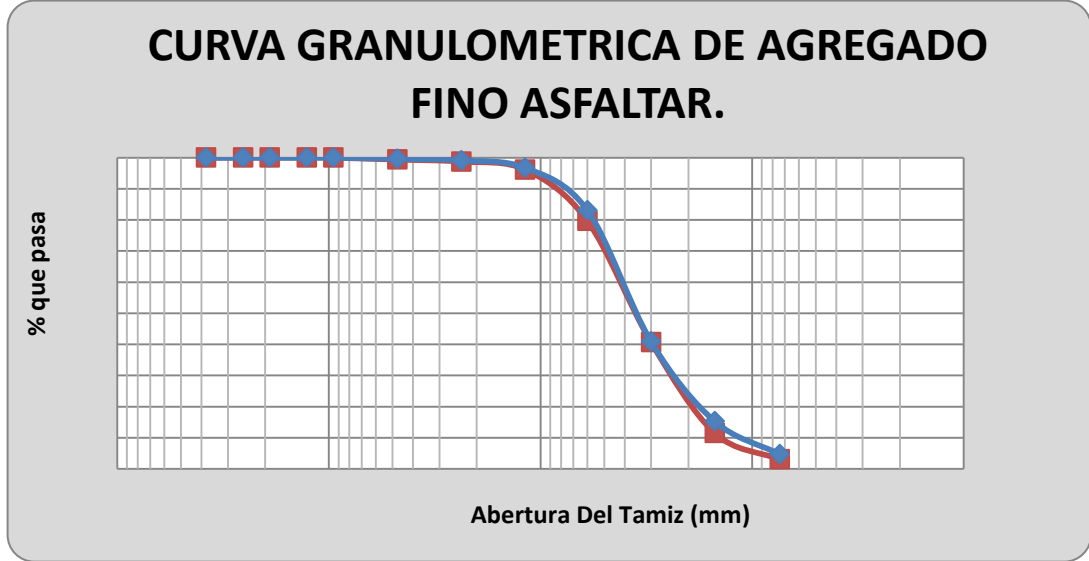
Los procedimientos para obtener los resultados se basaron en la norma antes mencionada y se observa la homogeneidad de los materiales. Se utilizaron las series de tamices descritos para los agregados finos y gruesos (Figura 2).

Figura2. Curva de los agregados gruesos



Se realizaron 2 ensayos para el agregado grueso y se graficaron para obtener su uniformidad. Se observa que los materiales son bastante uniformes. En el ANEXO 8 se muestran los datos completos de este ensayo y en la (Figura 3) se presentan las curvas granulométricas correspondientes.

**Figura 3 Curva de los agregados finos**



Se realizaron dos ensayos de granulometría para agregados finos los cuales mostraron uniformidad según la curva correspondiente. El ANEXO 9 se muestran los datos completos de este ensayo.

**Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (INV. E-223)**

En el ANEXO 10 se muestran los datos completos de este ensayo. La Tabla 7 presenta el resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 7 Gravedad específica y absorción de los agregados Gruesos.**

Gravedad específica aparente Gsa $23^*C/23^*c=(A/(A-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,709
Gravedad específica BULK Gsb $23^*C/238c=(B/(B-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,670
Gravedad específica BULK Gsb $23^*C/23^*c=(A/(B-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,647
Porcentaje de absorción $((B-A)/A)$	%	0,9

### Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV. E-222)

En la Tabla 8 se presentan los resultados de gravedad específica y absorción de los agregados finos para las muestras granulares utilizadas. En el ANEXO 11 se muestran los datos completos de para este ensayo.

**Tabla 8. Resultados de gravedad específica y absorción de los agregados finos.**

PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente 23/23°C = $(A/(B+A-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,689
Gravedad especifica BULK S.S.S 23/23°C = $(S/(B+S-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,646
Gravedad especifica BULK 23/23°C = $(A/(B+S-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,620
Absorción $((S-A)/A)*100$	%	1,0

### Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½” por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218)

La gradación para el ensayo de desgaste dio tipo B, por lo tanto se tomaron 11 esferas como valor de carga abrasiva (Tabla 9). El porcentaje de desgaste cumple con las especificaciones del INVIAS. En el anexo N 12 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Tabla 9 Resultados resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles.**

PRUEBA N	1	2
GRADACION EMPLEADA	B	B
CARGA ABRASIVA	11	11
REVOLUCIONES	500	500
P1(g)	5000,1	5000,1
P2(g)	3756,34	3856,07
PERDIDA DE PESO(g)	1243,76	1144,03
% DE DESGASTE	25	23



### Caras fracturadas (INV.E-227)

Este ensayo se realiza para garantizar la unión de las partículas de los agregados gruesos al utilizarse para la elaboración de carpetas asfálticas. El resultado de caras fracturadas fue de 71,9% el cual indica que es posible confiar en que el material cumple con la norma correspondiente (Tabla 10). En el anexo N 13 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Tabla 10 Caras fracturadas.**

TAMIZ		CARAS FRACTURADAS
Pasa	Retenido	% P
1 1/2"	1"	0
1"	3/4"	75.4
3/4"	1/2"	74.5
1/2"	3/8"	74.5

### Equivalente de Arena (INV. E -133)

Este ensayo se realizó basado en la norma Invias E-133 la cual pide que la lectura sea superior a 50%. El resultado contenido en la Tabla 11 muestra el cumplimiento del material. En el anexo N 14 se muestra los datos completos para este ensayo.

**Tabla 11 Equivalente de Arena.**

Lectura de arcilla	3,25
Lectura de arena	2,8
<b>Equivalente de arena (EA)</b>	86,15

 ≈ 

87
----

### Índice de aplanamiento y alargamiento (INV. E-230)

Este ensayo se realizó para garantizar la calidad de los agregados para el funcionamiento en una carpeta asfáltica. Los resultados se consignan en la Tabla 12. En el anexo N 15 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Tabla 12 Índice de Aplanamiento y Alargamiento.**

INDICE DE APLANAMIENTO:	$\frac{\sum(lap \times Ri)}{\sum Ri}$	22,42
INDICE DE ALARGAMIENTO:	$\frac{\sum(laL \times Ri)}{\sum Ri}$	10,90

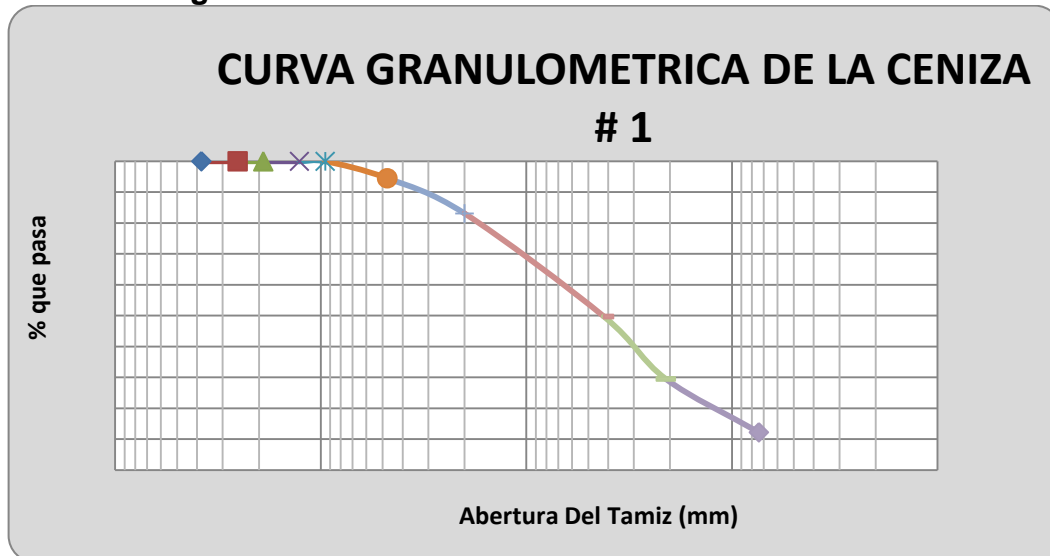
#### 4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE.

A continuación se muestra la caracterización granular de la ceniza.

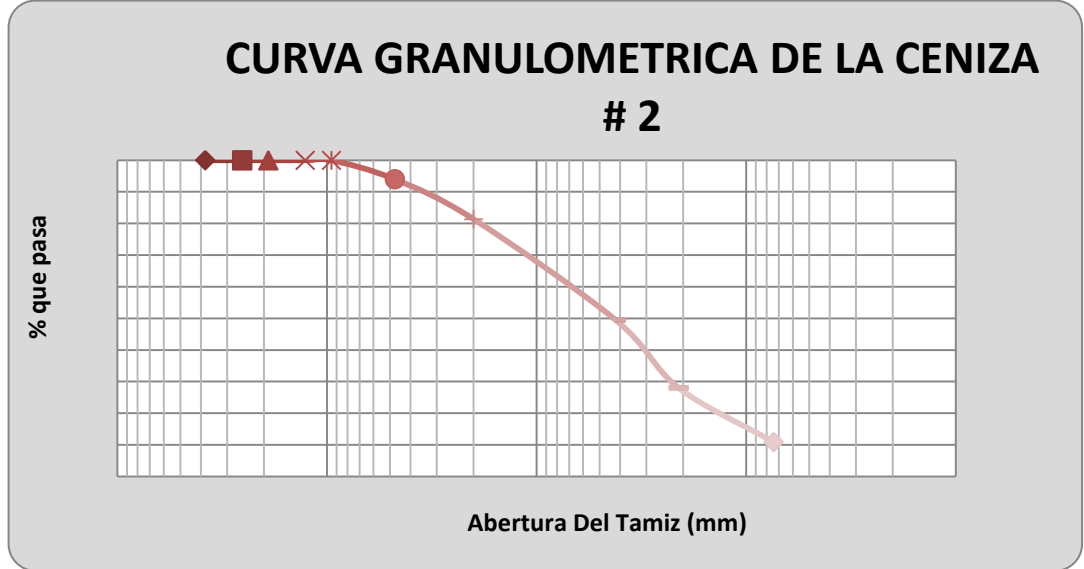
#### Granulometría de la ceniza según la norma para los agregados finos (INV. E-213)

Las granulometrías que se evaluaron para la ceniza se siguieron con los tamices utilizados para la caracterización de un agregado fino, cumpliendo con la norma invias E-213-07 y observando una homogeneidad en el comportamiento de dicho material (Figura 4 y 5).

**Figura 4. Curva granulométrica de la Ceniza volante No 1**



**Figura 5. Curva granulométrica de la Ceniza volante No 2**



En el anexo N 16 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Contenido de materia Orgánica. (INV-212)**

**Tabla 13 Contenido de materia orgánica**

MUESTRA	No. GARDNER	DESCRIPCION
1	11	STANDAR

En el anexo N 17 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Gravedad específica y absorción de la ceniza según la norma para los agregados finos (INV. E-222)**

El peso específico y la absorción se realizó exactamente como la norma invias e-222 presenta el procedimiento. En la tabla 14 se presentan los datos obtenidos en este ensayo. En el anexo N 18 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Tabla 14 Gravedad Especifica en la ceniza volante.**

PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente 23/23°C = $(A/(B+A-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,103
Gravedad especifica BULK S.S.S 23/23°C = $(S/(B+S-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,085
Gravedad especifica BULK 23/23°C = $(A/(B+S-C))$	g/cm <sup>3</sup>	2,069
Absorcion $((S-A)/A)*100$	%	0,8

### 4.3 ASFALTO

El material asfáltico fue sometido a los ensayos de:

Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato anillo y bola) (INV. E-712-07).

Penetración de los materiales bituminosos (INV.E-706-07)

Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (INV. E-709-07)

Los resultados se resumen en la Tabla 15 y en el Anexo N 22 se muestran los datos completos para este ensayo.

**Tabla 15. Resumen caracterización del Asfalto.**

TIPO DE MUESTRA	PUNTO DE IGNICION	PUNTO DE LLAMA	PENETRACION PROMEDIO mm	PUNTO DE ABLANDAMIENTO
ASFALTO SIN CENIZA	240°	290°	85.66 mm	49°
ASFALTO CON 5% CENIZA	155°	260°	82.33 mm	50°
ASFALTO CON 10% CENIZA	160°	280°	78 mm	49°
ASFALTO CON 15% CENIZA	180°	290°	81.33 mm	50°

#### 4.4 RESULTADOS DE LA PRUEBA MARSHALL.

Se presenta un resumen de los resultados de las briquetas realizados por el método Marshall para briquetas con mezcla densa en caliente mdc-2, con adición de ceniza volante derivada de locaciones petroleras suministrada por ECOPETROL. Se trabajaron diferentes tipos de mezclas para tres porcentajes de asfaltos como lo son 4.5%, 5,5%, 6,5% de asfalto y a su vez mezclados con 5%,10% y 15% de ceniza (Tabla 16 a Tabla 19).

**Tabla 16 Resumen del ensayo para una MDC-2 sin ceniza**

% CENIZA	%ASFALTO	% VACIOS	% VACIOS	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	Gbulk
		AGREGADOS	MEZCLA	UNITARIO	(libras)	(mm)	
-	4,5	14,80	4,18	147,28	3282,8	12	2,36
-	5,5	17,10	4,34	144,81	3288,25	15	2,31
-	6,5	16,74	1,43	147,00	2395,12	26	2,36

**Tabla 17 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 5% ceniza.**

% CENIZA	%ASFALTO	% VACIOS	% VACIOS	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	Gbulk
		AGREGADOS	MEZCLA	UNITARIO	(libras)	(mm)	
5%	4,5	16,32	5,89	144,64	3364,75	12	2,31
5%	5,5	16,25	3,36	146,29	3126,84	15	2,34
5%	6,5	16,55	1,21	147,33	2603,64	21	2,36

**Tabla 18 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 10% ceniza.**

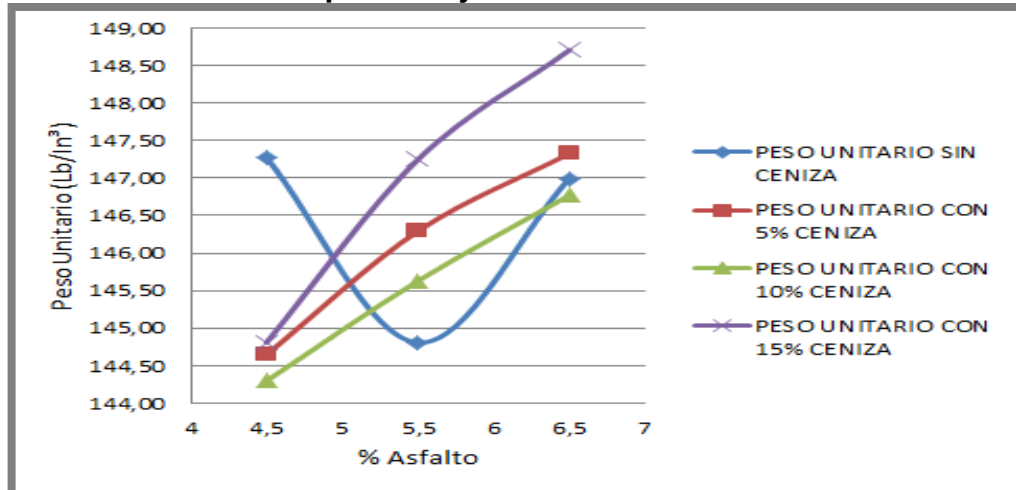
% CENIZA	%ASFALTO	% VACIOS	% VACIOS	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	Gbulk
		AGREGADOS	MEZCLA	UNITARIO	(libras)	(mm)	
10%	4,5	16,52	6,12	144,29	3849,15	12	2,30
10%	5,5	16,63	3,80	145,63	3901,80	16	2,33
10%	6,5	16,87	1,58	146,77	3097,62	21	2,35

**Tabla 19 Resumen del ensayo para una MDC-2 con adicción de 15% ceniza.**

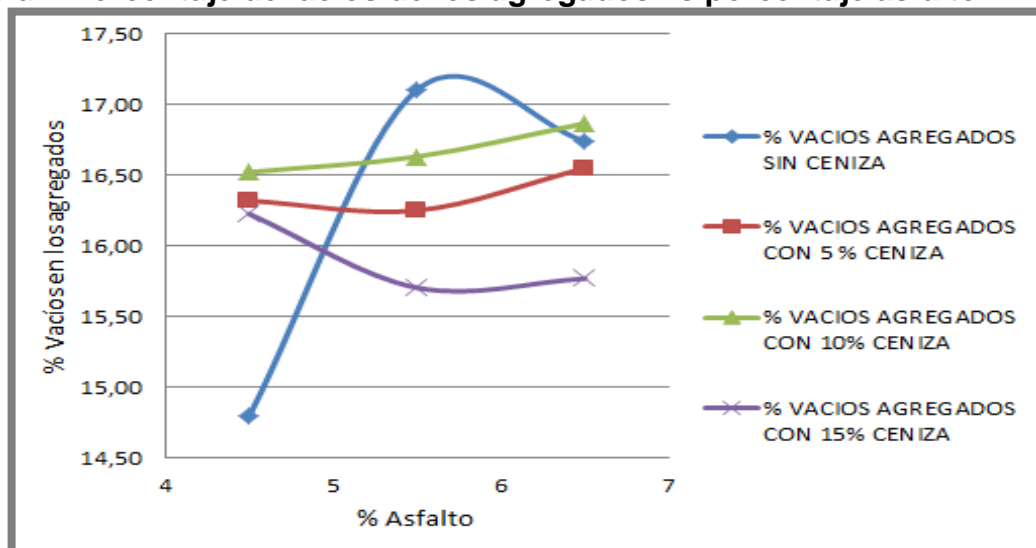
% CENIZA	%ASFALTO	% VACIOS	% VACIOS	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	Gbulk
		AGREGADOS	MEZCLA	UNITARIO	(libras)	(mm)	
15%	4,5	16,23	5,79	144,81	4032,33	12	2,31
15%	5,5	15,71	2,73	147,25	3912,13	16	2,35
15%	6,5	15,77	0,28	148,71	3548,45	17	2,38

El comportamiento del peso unitario vs contenido de asfalto está considerado en la Figura 6. El comportamiento de los vacíos de los agregados vs el contenido de asfalto, se puede observar en la Figura 7. Los vacíos de la mezcla asfáltica vs el porcentaje de asfalto se encuentran en la Figura 8. El comportamiento de la estabilidad y el flujo se encuentran en la Figura 8. Se finaliza con la presentación del comportamiento del flujo vs el contenido de asfalto (Figura 10).

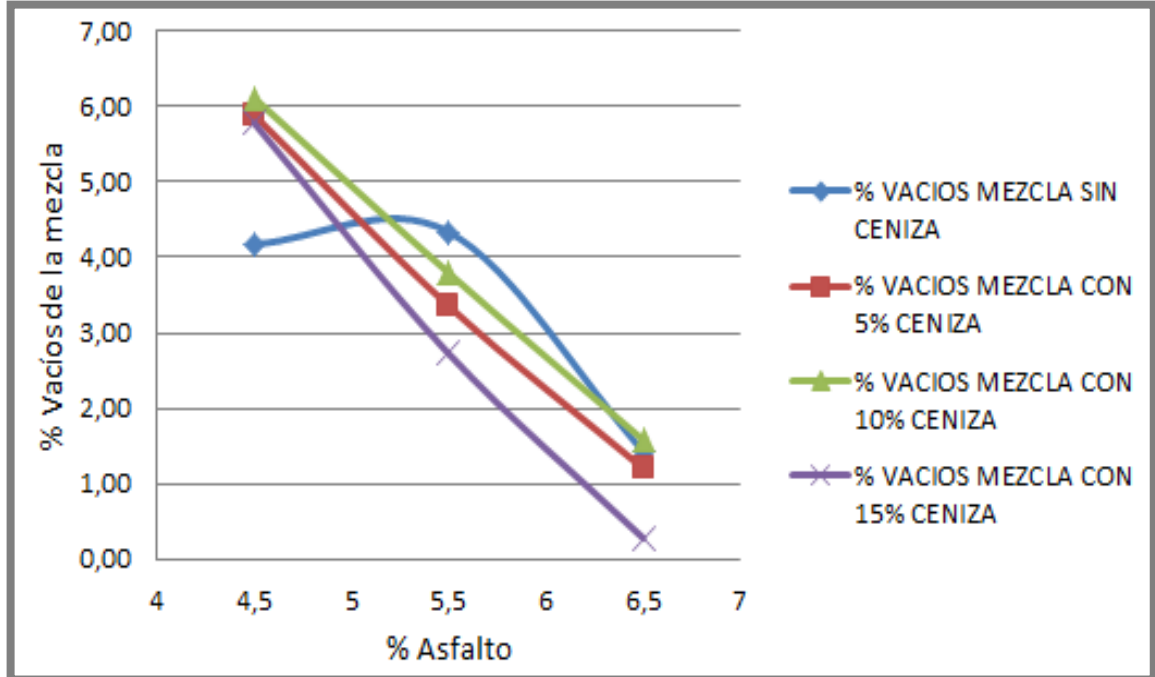
**Figura 6. Peso unitario vs porcentaje asfalto**



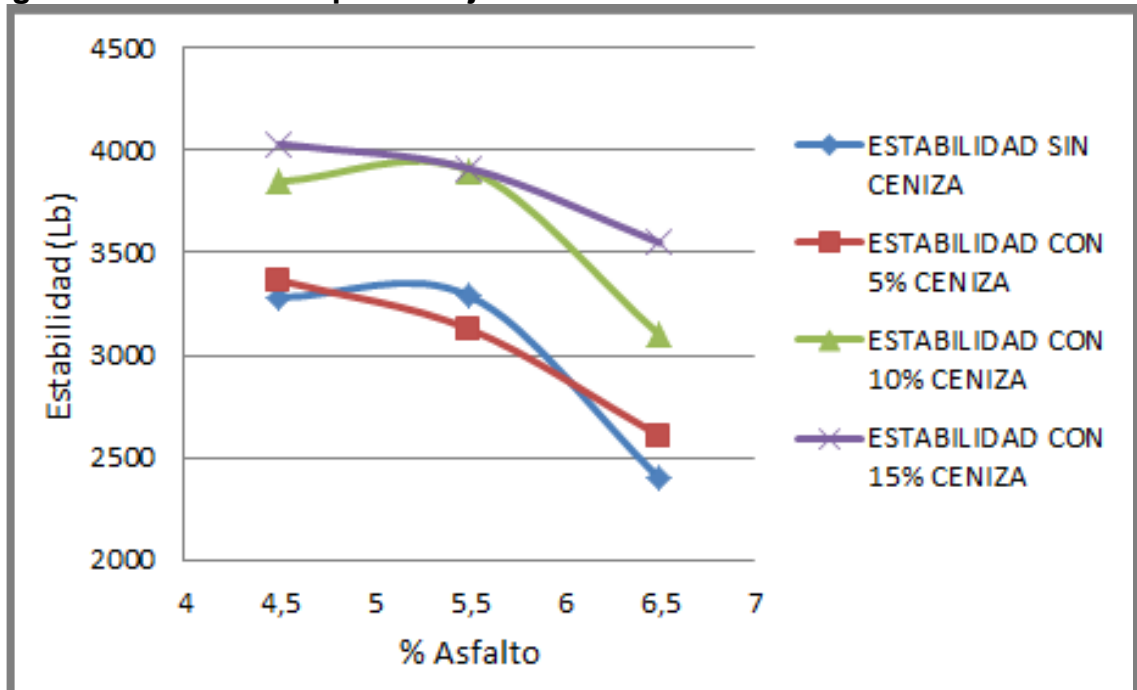
**Figura 7 Porcentaje devacios de los agregados vs porcentaje asfalto**



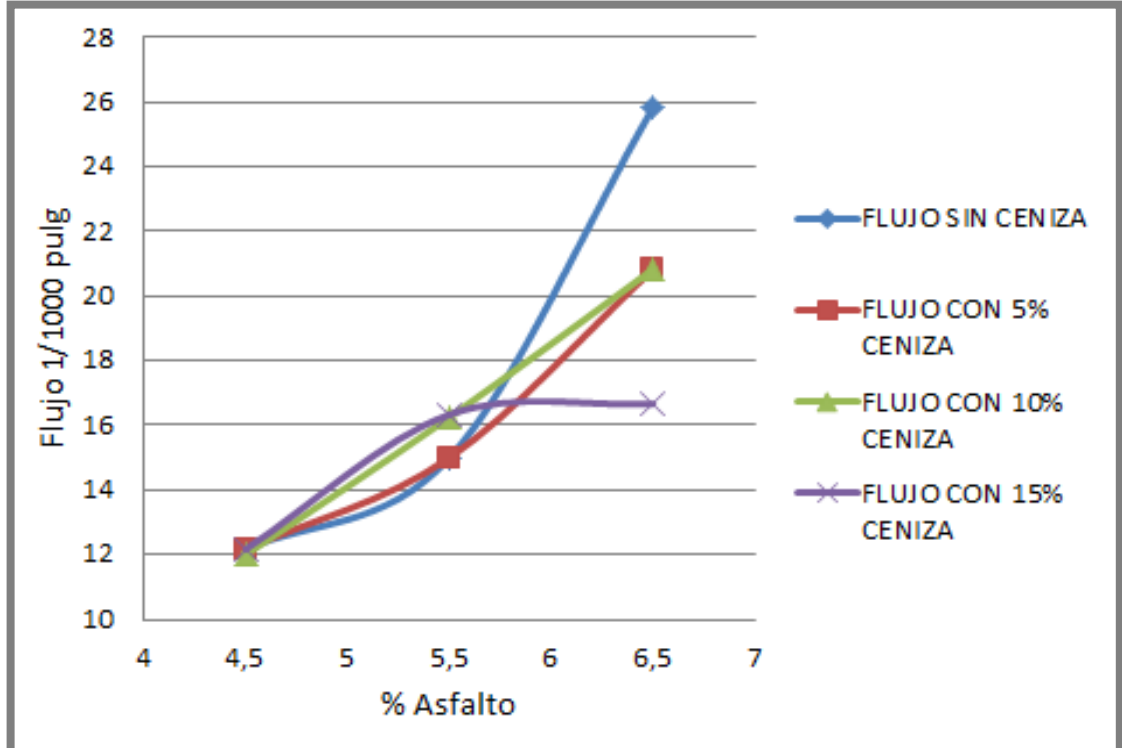
**Figura 8** Porcentaje devacios de la mezcla vs porcentaje asfalto



**Figura 9** Estabilidad vs porcentaje asfalto



**Figura 10 Flujo vs porcentaje asfalto**



**Contenido de asfalto.**

El ensayo de contenido de asfalto se presenta en la tabla 20, se encuentran valores semejantes a los tomados para el diseño por el método Marshall. En el anexo 23 se observan todos los datos para este ensayo.

**Tabla 20 Contenido de Asfalto.**

PORCENTAJE DE ASFALTO					
MUESTRA	PESO INICIAL	PESO FINAL	FILTRO		% ASFALTO
Contenido de asfalto %	gr	gr	PESO INICIAL	PESO FINAL	
4,5	1174,5	1121,56	19,2	19,42	4,49
5,5	1132,05	1070,37	19,42	19,52	5,44
6,5	1164,72	1088,2	19,53	20,85	6,46



## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

Encontrar soluciones para la disposición final de materiales que pueden llegar a ser reutilizables invita a la reflexión para lograrlo. El presente estudio se basó en la adición de ceniza volante derivada de locaciones petroleras las cuales se incorporaron en una mezcla densa en caliente Tipo 2 MDC-2. Para llevar a cabo este proyecto se necesitó la caracterización del tipo de material a utilizar y comprobar que estos cumplieran con las especificaciones dadas. De tal manera, se siguió un procedimiento para caracterizar materiales granulares, a su vez se caracterizó el material asfáltico suministrado por la empresa Asfaltar y se caracterizó mecánicamente la ceniza volante suministrada por la empresa ECOPETROL, para posteriormente realizar un diseño de mezcla asfáltica para los agregados naturales de la región y la ceniza volante.

### 5.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR.

Como se observa en la Tabla 13, los materiales que se utilizaron para la construcción de este estudio resultan de muy buena calidad ya que cumplen con lo especificado en la norma I.N.V- 400. Para la elaboración del diseño Marshall se realizó una mezcla de 70% agregados finos y 30% agregados gruesos la cual cumplió con las especificaciones I.N.V-450 para mezclas densas en caliente. La verificación del cumplimiento de las normas se encuentra en la Tabla 21.

**Tabla 21 Caracterización de los agregados.**

ENSAYO	NORMA	ESPECIFICACION I.NV ART 400	VALOR
	I.N.V	MEZCLA DENSA EN CALIENTE	
Granulometría	E-213	-	-
Gravedad específica gruesos	E-223	-	2,709
Gravedad específica finos	E-222	-	2,689
Desgaste de los Ángeles	E-218	25 % máximo	23
Caras fracturadas	E-227	75 % mínimo	75,20
Ind Aplanamiento	E-213	30 % máximo	22,92
Ind Alargamiento	E-213	30 % máximo	10,90
% Absorción del grueso	E-223	-	0,87
% absorción del fino	E-222	-	0,98
equivalente de arena	E-133	50 % mínimo	87

## 5.2 CARACTERIZACION DELA CENIZA VOLANTE.

La ceniza volante por ser un material pasa tamiz N 4, se tomó como un material fino y se le realizaron los ensayos de granulometrías, contenido de materia orgánica y gravedad específica para finos.

Al realizar la granulometría se tomó la decisión de tomar el material que pasa por el tamiz N10 y se retiene en el tamiz N 80. Este material se le adicionó al asfalto para la elaboración del diseño Marshall de una mezcla densa en caliente MDC-2. La gravedad específica y el porcentaje de absorción que se obtuvo fue menor que para el agregado fino utilizado. El color de la muestra para contenido de materia orgánica fue estándar y el No de Gardner fue de 11. En la tabla 22 se presentan los valores obtenidos.

**Tabla 22 Caracterización de la ceniza volante.**

ENSAYO	NORMA	ESPECIFICACION I.NV ART 400	VALOR
	I.N.V	MEZCLA DENSA EN CALIENTE	
Granulometría	E-213	-	-
Gravedad específica ceniza	E-222	-	2,103
% absorción del ceniza	E-222	-	0,77
Contenido de materia orgánica	E-312	-	amarillo claro

## 5.3 CARACTERIZACION DEL ASFALTO.

El material asfáltico suministrado por la empresa ASFALTAR, se caracterizó realizando los ensayos de Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato anillo y bola) (INV. E- 712-07), penetración de los materiales bituminosos (INV.E-706-07), punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (INV. E-709-07). En el ANEXO 19 se encuentra la ficha técnica de calidad del asfalto. Comparando los valores que se obtuvieron en el laboratorio para este estudio, los rango estuvieron cercanos, es decir al realizar la mezcla con ceniza volante en proporciones de 5%, 10% y 15 % se encuentran valores semejantes por lo tanto sirve la mezcla para la elaboración del diseño Marshall para MDC-2.

#### 5.4 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA MARSHALL.

En la Tabla 23 se presentan todos los resultados obtenidos en este estudio. Se encontró que los menores porcentajes de vacíos de la mezcla fueron para un porcentaje de asfalto de 6,5% independientemente de la adición de ceniza. Adicionalmente, que el peso unitario de las muestras con adición de ceniza crece proporcional al aumento en el contenido de asfalto. Los valores de mayor estabilidad los arrojó el porcentaje de asfalto de 5,5 % cuando tiene adición de ceniza volante.

**Tabla 23 Resultados para el Diseño por el método Marshall.**

% CENIZA	%ASFALTO	% VACIOS AGREGADOS	% VACIOS MEZCLA	PESO UNITARIO	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (mm)	Gbulk
-	4,5	14,80	4,18	147,28	3282,8	12	2,36
-	5,5	17,10	4,34	144,81	3288,25	15	2,31
-	6,5	16,74	1,43	147,00	2395,12	26	2,36
5%	4,5	16,32	5,89	144,64	3364,75	12	2,31
5%	5,5	16,25	3,36	146,29	3126,84	15	2,34
5%	6,5	16,55	1,21	147,33	2603,64	21	2,36
10%	4,5	16,52	6,12	144,29	3849,15	12	2,30
10%	5,5	16,63	3,80	145,63	3901,80	16	2,33
10%	6,5	16,87	1,58	146,77	3097,62	21	2,35
15%	4,5	16,23	5,79	144,81	4032,33	12	2,31
15%	5,5	15,71	2,73	147,25	3912,13	16	2,35
15%	6,5	15,77	0,28	148,71	3548,44	17	2,38

En el Anexo 20 se encuentran todos los datos para la elaboración del diseño Marshall, para una mezcla densa en caliente MDC-2 con adición de ceniza de 5%, 10% y 15% y contenido de asfalto de 4,5%, 5,5% y 6,5%.

## 6. CONCLUSIONES.

Con respecto a los agregados naturales:

Para el diseño Marshall se llevaron a cabo varias pruebas de calidad en los agregados. Se realizaron tres tipos de granulometrías con diferentes porcentajes de finos y de grueso tratando de ajustar los agregados a las franjas granulométricas descritas en la norma INVIAS 450. Los valores de mezcla fueron de 65% finos y 35 % gruesos, 70% finos y 30 % gruesos y 72% finos y 28% gruesos. Se encontró que la mejor mezcla fue de 70% finos y 30 % gruesos ya que todos los tamices retuvieron el material en las proporciones indicadas para una mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2. Sin embargo, al observar que existía un cambio en los límites de la mezcla es decir existían cambios bruscos se decidió realizar el diseño utilizando la mitad del porcentaje retenido entre la franja superior e inferior establecida para cada tamiz en la norma; es decir, se trabajó con una curva ideal con la cual se garantizó la no ocurrencia de cambios bruscos, y poder obtener valores de porcentaje devacíos y estabilidad ideales.

Se observó que los materiales utilizados en la región de Santander cumplen con la norma I.N.V 400. Es decir, la cantera localizada en el sector denominado como Pescadero es muy buena fuente para la elaboración de carpetas asfáltica y todo lo relacionado con mezclas asfálticas.

Se debe tener cuidado con la cantidad de finos necesario para el diseño ya que las mezclas antes mencionadas mostraban que aunque cumplían el límite inferior mínimo retenido para cada tamiz se notaba la deficiencia en los tamices retenido en tamiz No 200 y pasa No 200. Ante esta falta de material fino se necesitó tamizar material fino y adicionar material para garantizar la homogeneidad en los agregados finos.

Con respecto a la ceniza volante:

Después de realizar la caracterización de la ceniza volante se decidió usar el material que pasaba el tamiz No 10 y retenido en tamiz No 80. Este material se utilizó como adición para el cemento asfáltico, el cual se adicionaba antes de mezclarse con los agregados. Se observó que aunque se utilizara el material retenido en los tamices antes descritos, el material de ceniza volante es una buena fuente para obtener el material más fino para las mezclas asfálticas, es decir es una buena fuente para encontrar material pasa tamiz No 200.

La gravedad específica y el porcentaje de absorción de la ceniza fueron menores que el encontrado en los material finos, es decir la densidad de la ceniza volante es un 22% menor que la del agregado fino.

Con respecto a la mezcla asfáltica.

Las briquetas que se realizaron para el siguiente estudio fueron preparadas con el mismo material proveniente de la misma fuente. El porcentaje de asfalto óptimo para cumplir con los requisitos en la norma I.N.V-450 fue para un porcentaje de 5,5 % con adicción de ceniza volante del 15%. Este porcentaje cumple con los parámetros para MDC-2 y para un tipo de transito NT3.

El porcentaje de vacíos para una mezcla asfáltica con adición de ceniza decrecía a medida que se agregaban mayores contenidos de asfalto aproximándose finalmente a un mínimo. Adicionalmente, el peso unitario de las briquetas preparadas con adición de ceniza volante mostró una tendencia a crecer a medida que se presentaron mayores contenidos de asfaltos aproximándose a un máximo de 148,71 lb/ in<sup>3</sup> para un porcentaje de asfalto de 6,5% con adición de 15% de ceniza volante.

El flujo aumenta a medida que el contenido de asfalto aumenta, sin embargo al adicionar ceniza se encontró que a mayores contenidos de ceniza los flujos se volvían más homogéneos con una tendencia decreciente en su valor. El mayor flujo se obtuvo en la mezcla dosificada con 6,5% de asfalto sin adición de ceniza.

Agregar ceniza volante a mezclas densas en caliente ayudan a evitar la contaminación a causa de la falta de disposición final de todos estos derivados del petróleo, de tal forma que seguir investigando sobre nuevas formas de disposición se hace necesaria para contribuir con el cuidado del planeta.

La mayor estabilidad la presentó la muestra que tenía un 4.5% de contenido de asfalto con adición de ceniza de 15% cuyo valor fue de 4032,33 libras. Sin embargo, el peso unitario de esta muestra fue de 144,81 lb/ in<sup>3</sup> valor que está por debajo del máximo a causa de estar compuesta por un porcentaje de asfalto bajo.

## 7. RECOMENDACIONES

En el desarrollo de este proyecto se lograron observar algunas deficiencias las cuales se pueden mejorar si se implementan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones.

- Adquirir equipos que permitan simular el envejecimiento de las mezclas, también equipos que ayuden a obtener mezclas asfálticas más homogéneas. Estos equipos se necesitan para complementar los ensayos que se realizaron, de esta forma se pueden obtener mejores parámetros para la evaluación de las mezclas densas en caliente.
- Se recomienda continuar con los estudios de mezclas asfálticas con adición de ceniza volante con diferentes proporciones y tamaño de la ceniza, es decir trabajar con el material que se retiene en tamiz No 200 y pasa tamiz No 200.
- Se recomienda realizar más investigaciones para las mezclas densas en caliente tipo 1 y tipo 3.

## BIBLIOGRAFIA

ARENAS R, E. Y SERRANO C, A. J., Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y STONE MATRIX ASPHALT, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, 2006.

Carta de calidad, Cemento Asfáltico., Visita Planta Asfaltart (Ing. VARGAS Pedro Javier) marzo 2011.

FIALLO M, A Y REMOLINA M, J., Análisis de la segregación de una mezcla de pavimento, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, 2009.

HERRERA GALVIS, Laura Paola., Utilización de las cenizas volantes en el concreto, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.

<http://portal.ecopetrol.com.co/categoria.aspx?catID=29>, consultado en el portal de Ecopetrol.

INVIAS, Especificación Técnica, Artículo 450 - 07

I.N.V E-748, Instituto Nacional de Vías, Resistencia de Mezclas Bituminosas empleando el método Marshall.

Kraemer et al, artículo de investigación las carreteras y sus firmes, ciudad de México, México, 2004.

MONTEJO FONSECA, Alonso., Ingeniería de Pavimentos para carreteras, 2 ed, Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1998. P745

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carretera : Clasificación de los pavimentos. Primera. Bogotá : Panamericana, 1997.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista, UPC México, 2004.

REYES, L., HERNANDEZ, B., FIGUEROA, L., análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente, vol 27, numero 003, 2007.

RONDON, Q. H., REYES, F. A., FIGUEROA, E., RODRIGUEZ, C. REAL, T. Montealegre, Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia, Infraestructura Vial, No. 19, Febrero 2008.

SÁENZ T, V. Y VILLAMIZAR S, P., Análisis del comportamiento de cenizas volantes de la producción del concreto, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.

SHARMA, G., GOYAL, H., Effects of Fiber Type and Content on the Rutting Performance of Stone Matrix Asphalt, 2006.

VIVAS MEJIA, Víctor Alfonso., Aprovechamiento de limadura metálica para el diseño de mezclas asfálticas, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.



## ANEXOS

### ANEXO 1. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS

I.N.V.E – 223 – 07

Tabla 1. Cantidades mínimas para el ensayo

Tamaño Máximo (mm)	Separar una muestra	
	Cantidad mínima, kg	Cantidad recomendada, kg
75.0	40	64
37.5	20	32
19.0	10	16
9.5	5	8
4.75	2	4

**ANEXO 2. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE  
TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS  
ANGELES**

**I.N.V.E – 218 – 07**

**Tabla 1. Carga abrasiva**

Granulometría de ensayo	Número de esferas	Masa Total g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

**ANEXO 3. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE  
TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS  
ANGELES**

**I.N.V.E – 218 – 07**

**Tabla 2. Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo**

Pasa tamiz		Retenido en tamiz		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
mm	(alt.)	mm	(alt.)	A	B	C	D
37.5	(1½")	25.0	(1")	1250 ± 25	...	...	...
25.0	(1")	19.0	(¾")	1250 ± 25	...	...	...
19.0	(¾")	12.5	(½")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5	(½")	9.5	(3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5	(3/8")	6.3	(¼")	...	...	2500 ± 10	...
6.3	(¼")	4.75	(No.4)	...	...	2500 ± 10	...
4.75	(No.4)	2.36	(No.8)	...	...	...	5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

## ANEXO 4. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS

I.N.V.E – 227 – 07

La muestra de ensayo debe ser al menos del tamaño indicado en la siguiente tabla:

<b>Tamaño Máximo Nominal Abertura, mm (pulgadas)</b>	<b>Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)</b>
9.50 (3/8)	200 (0.5)
12.5 (1/2)	500 (1.0)
19.0 (3/4)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)
37.5 (1 1/2)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15000 (33.0)
63.0 (2 1/2)	30000 (66.0)
75.0 (3)	60000 (132.0)
90.0 (3 1/2)	90000 (198.0)

**ANEXO 5. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS  
AGREGADOS PARA CARRETERAS**

**I.N.V.E – 230 – 07**

**Tabla 2. Masa mínima de muestra de ensayo  
(Acorde con la requerida para granulometría)**

Máximo Tamaño Nominal con aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo
mm	(Pulg)	kg
9.5	(3/8)	1
12.5	(1/2)	2
19.0	(3/4)	5
25.0	(1)	10
37.5	(1½)	15
50.0	(2)	20
63.0	(2½)	35

**ANEXO 6. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS**

**I.N.V.E – 230 – 07**

**Tabla 3. Dimensiones de los calibradores para espesor y longitud**

TAMICES				Dimensiones del calibrador, (mm)	
D <sub>i</sub> , tamiz que pasa		d <sub>i</sub> , tamiz que retiene		Aplanamiento (Abertura de la ranura) <sup>(1)</sup>	Alargamiento (Separación de las barras) <sup>(2)</sup>
mm	(pulg)	mm	(pulg)		
63	(2½")	50	(2")	33.9	--
50	(2")	37.5	(1½")	26.3	78.8
37.5	(1½")	25	(1")	18.8	56.3
25	(1")	19	(¾")	13.2	39.6
19	(¾")	12.5	(½")	9.5	28.4
12.5	(½")	9.5	(⅜")	6.6	19.8
9.5	(⅜")	6.3	(¼")	4.7	14.2

- Esta dimensión es igual a 0.6 veces el promedio de las aberturas de los tamices que definen la fracción.
- Esta dimensión es igual a 1.8 veces el promedio de las aberturas de los tamices que definen la fracción.

<b>ALCANCE</b>					
<b>MATRIZ EXPERIMENTAL</b>					
<b>CEMENTO ASFALTICO CON CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS AL 5% DE ADICION</b>					
% DE ASFALTO (%)	PESO BRIQUE TA (gr)	CONT. ASF y CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS (gr)	CONT. CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS (gr)	CON T.AS F (gr)	
4,5	1200		54	2,7	51.3
5,5	1200		66	3,3	62.7
6,5	1200		78	3,9	74.1
<b>CEMENTO ASFALTICO CON CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS AL 10% DE ADICION</b>					
% DE ASFALTO (%)	PESO BRIQUE TA (gr)	CONT. ASF y CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS (gr)	CONT. CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS (gr)	CON T.AS F (gr)	
4,5	1200		54	5.4	48.6
5,5	1200		66	6.6	59.4
6,5	1200		78	7.8	70.2
<b>CEMENTO ASFALTICO CON CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS AL 15% DE ADICION</b>					
% DE ASFALTO (%)	PESO BRIQUE TA (gr)	CONT. ASF y CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS(gr)	CONT. CENIZA VOLANTE DE LOCACIONES PETROLERAS (gr)	CON T.AS F (gr)	
4,5	1200		54	8.1	45.9
5,5	1200		66	9.9	56.1
6,5	1200		78	11.7	66.3

## **ANEXO 7. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL APLICADOS A LAS 72 MUESTRAS**

Con esta matriz experimental se pretende comparar, si al introducir material de tamaño pasa tamiz No 10 y retenido en tamiz N 80 ceniza volante, las propiedades de las briquetas de asfalto se mantienen, disminuyen o mejoran con respecto a una biqueta sin dicha dosificación.



## ANEXO 8. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS

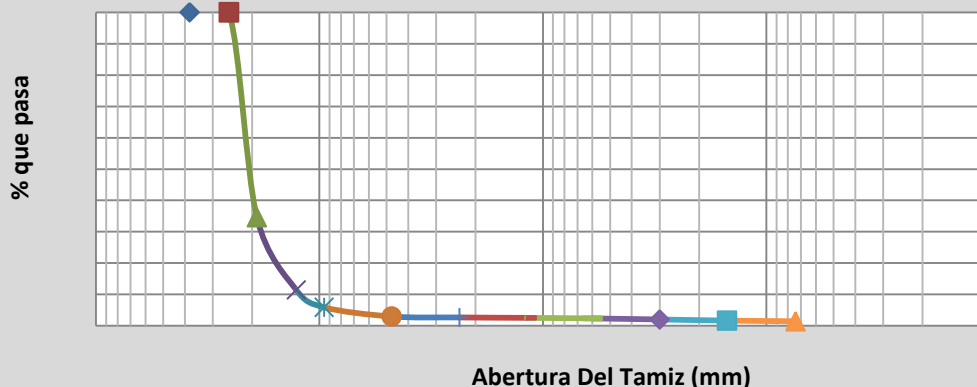
I.N.V.E – 213 – 07

### 1. Granulometría de los agregados gruesos

ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS			
NORMA:	I.N.V.E - 213 - 07	ENSAYO No:	01	

Peso de la Muestra		10000	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200		9936,2	gr	Perdidas:	140,4 gr
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO			Pasa (%)
		Retenido			
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	REAL
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100
1"	25,4	0	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	6535,1	65,35	65,35	34,65
1/2"	12,7	2315,7	23,16	88,51	11,49
3/8"	9,52	557,8	5,58	94,09	5,91
Nº 4	4,75	293,1	2,93	97,02	2,98
Nº 8	2,36	30,5	0,31	97,32	2,68
Nº 16	1,18	12,6	0,13	97,45	2,55
Nº 30	0,6	18,8	0,19	97,64	2,36
Nº 50	0,3	32,60	0,33	97,96	2,04
Nº 100	0,15	35,90	0,36	98,32	1,68
Nº 200	0,074	22	0,22	98,54	1,46
Fondo	-	5,5	0,06	98,60	1,40

### CURVA GRANULOMETRICA DE AGREGADO GRUESO ASFALTAR #1

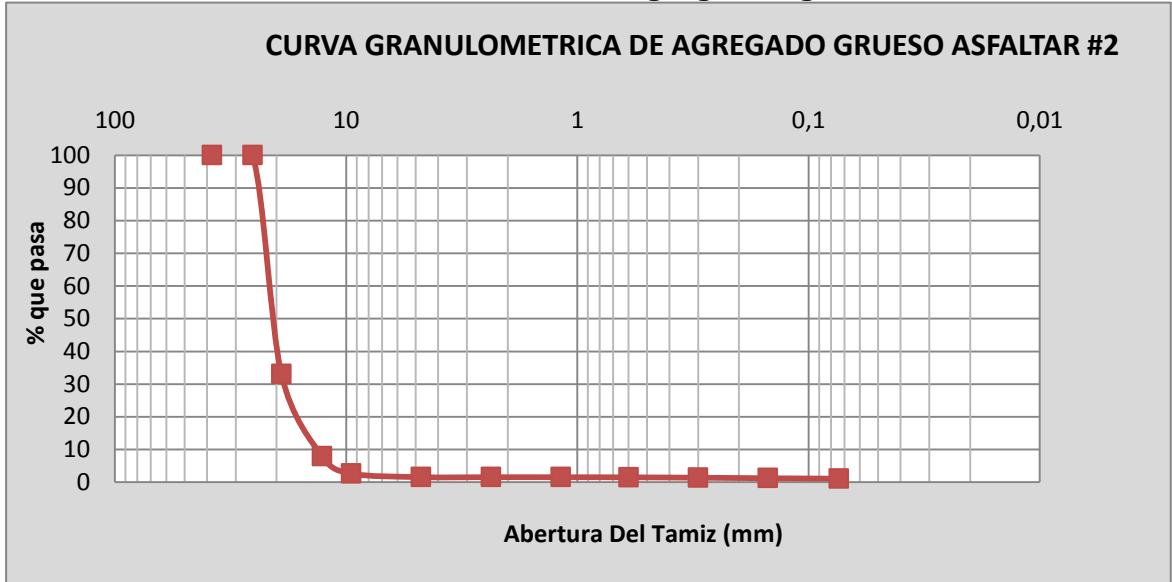


#### ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS

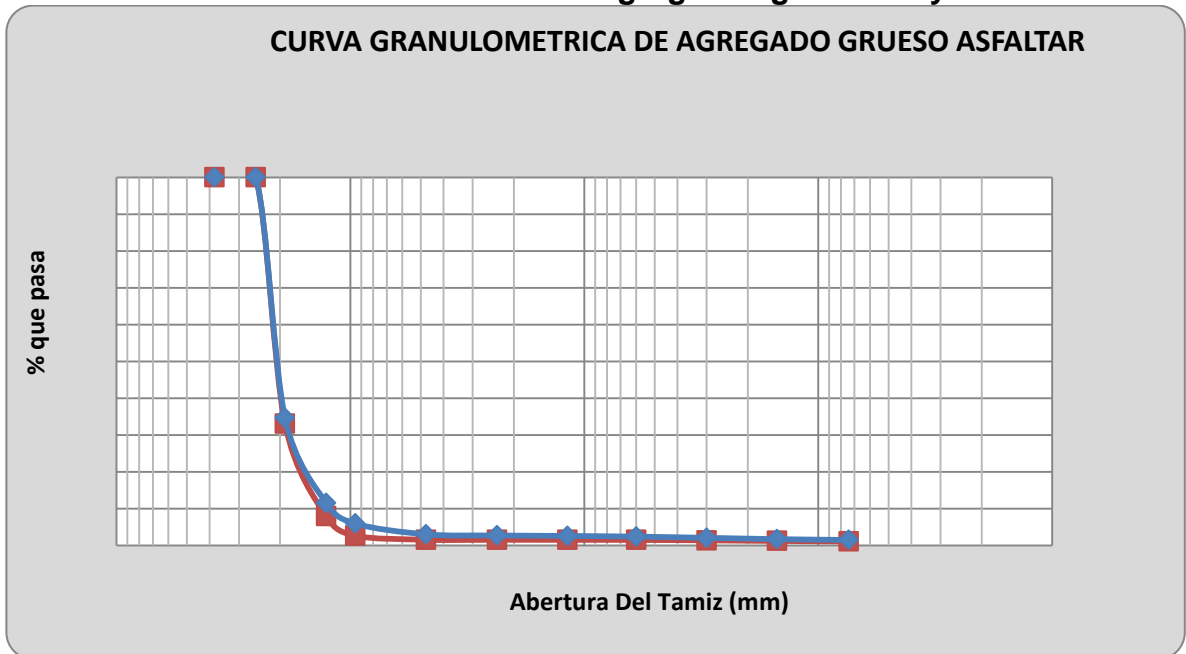
CALCULO:	Juan Pablo Murillo Andres Orozco Muñoz	ID:	85292 118720	
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS			
NORMA:	I.N.V.E - 213 - 07	ENSAYO No:	02	

Peso de la Muestra	6000	gr			
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200	5948,7	gr	Perdidas:	57,1 gr	
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO Retenido			Pasa (%)
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	REAL
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100
1"	25,4	0	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	4018,9	66,98	66,98	33,02
1/2"	12,7	1508,4	25,14	92,12	7,88
3/8"	9,52	314,6	5,24	97,37	2,64
Nº 4	4,75	66,9	1,12	98,48	1,52
Nº 8	2,36	1,1	0,02	98,50	1,50
Nº 16	1,18	0,7	0,01	98,51	1,49
Nº 30	0,6	1,8	0,03	98,54	1,46
Nº 50	0,3	6,70	0,11	98,65	1,35
Nº 100	0,15	9,80	0,16	98,82	1,19
Nº 200	0,074	7,8	0,13	98,95	1,06
Fondo	-	6,2	0,10	99,05	0,95

## 2. Granulometría de los agregados gruesos



## 3. Granulometrías de los agregados gruesos 1 y 2



## ANEXO 9. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LOS AGREGADOS FINOS

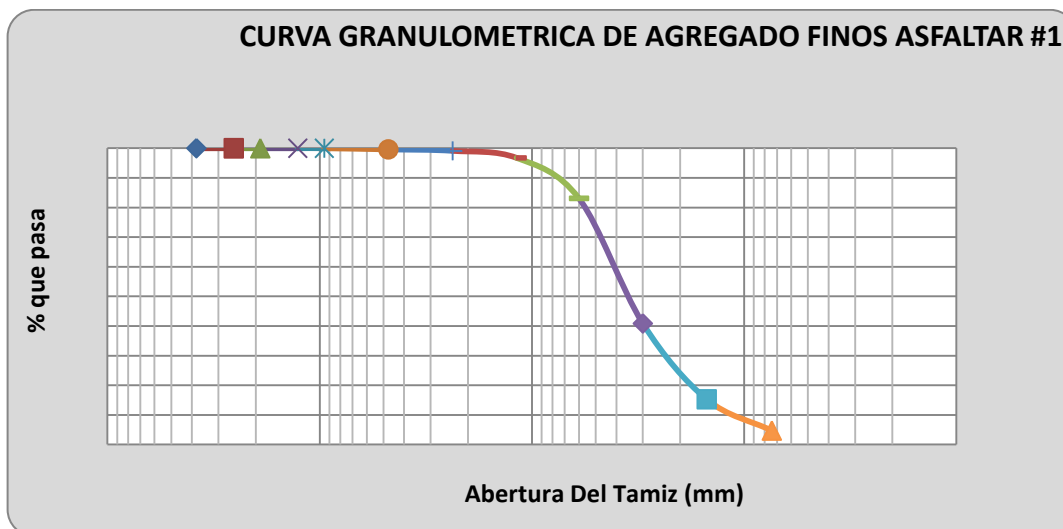
I.N.V.E – 213 – 07

### 1. Granulometría de los agregados finos

ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS			
NORMA:	I.N.V.E - 213 - 07	ENSAYO No:	01	

Peso de la Muestra		1340	gr			
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200		1324,5	gr	Perdidas:	11,7 gr	
	<b>TAMIZ</b>	<b>ABERTURA (mm)</b>	<b>PESO</b>			<b>Pasa (%)</b>
			<b>Retenido</b>			
			<b>Parcial (gr)</b>	<b>Parcial (%)</b>	<b>Acumulado (%)</b>	<b>REAL</b>
	<b>1 1/2"</b>	<b>38,1</b>	0,00	0,00	0,00	100
	<b>1"</b>	<b>25,4</b>	0,00	0,00	0,00	100
	<b>3/4"</b>	<b>19,05</b>	0,00	0,00	0,00	100,00
	<b>1/2"</b>	<b>12,7</b>	0,00	0,00	0,00	100,00
	<b>3/8"</b>	<b>9,52</b>	0,00	0,00	0,00	100,00
	<b>Nº 4</b>	<b>4,75</b>	5,20	0,39	0,39	99,61
	<b>Nº 8</b>	<b>2,36</b>	6,70	0,50	0,89	99,11
	<b>Nº 16</b>	<b>1,18</b>	31,80	2,37	3,26	96,74
	<b>Nº 30</b>	<b>0,6</b>	183,00	13,66	16,92	83,08
	<b>Nº 50</b>	<b>0,3</b>	565,80	42,22	59,14	40,86
	<b>Nº 100</b>	<b>0,15</b>	342,90	25,59	84,73	15,27
	<b>Nº 200</b>	<b>0,074</b>	141,50	10,56	95,29	4,71
	<b>Fondo</b>	<b>-</b>	<b>51,40</b>	3,84	99,13	0,87

### CURVA GRANULOMETRICA DE AGREGADO FINOS ASFALTAR #1

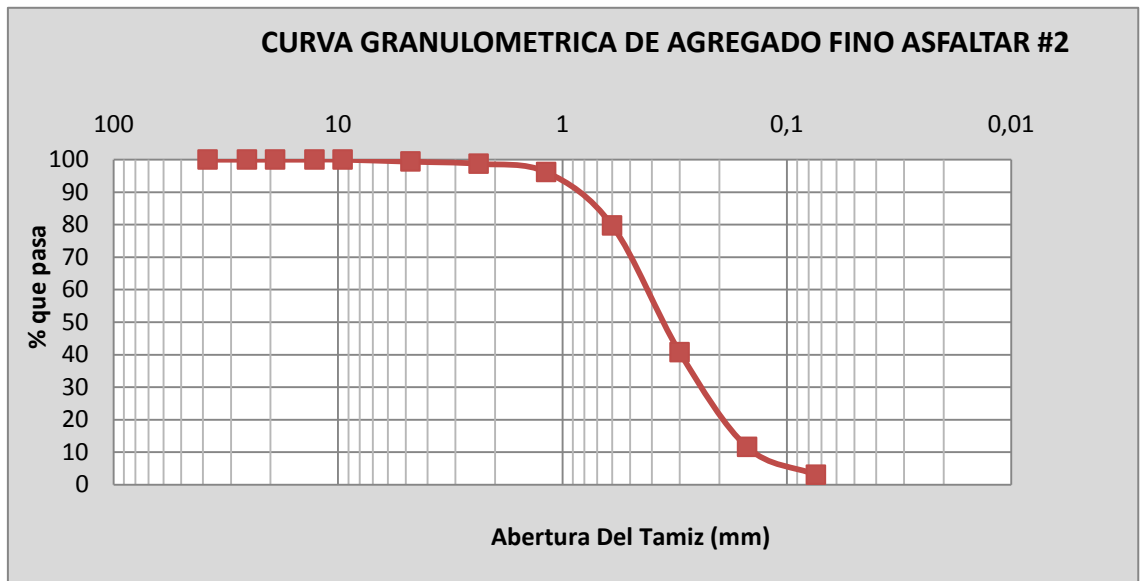


### 2. Granulometrías de los agregados finos

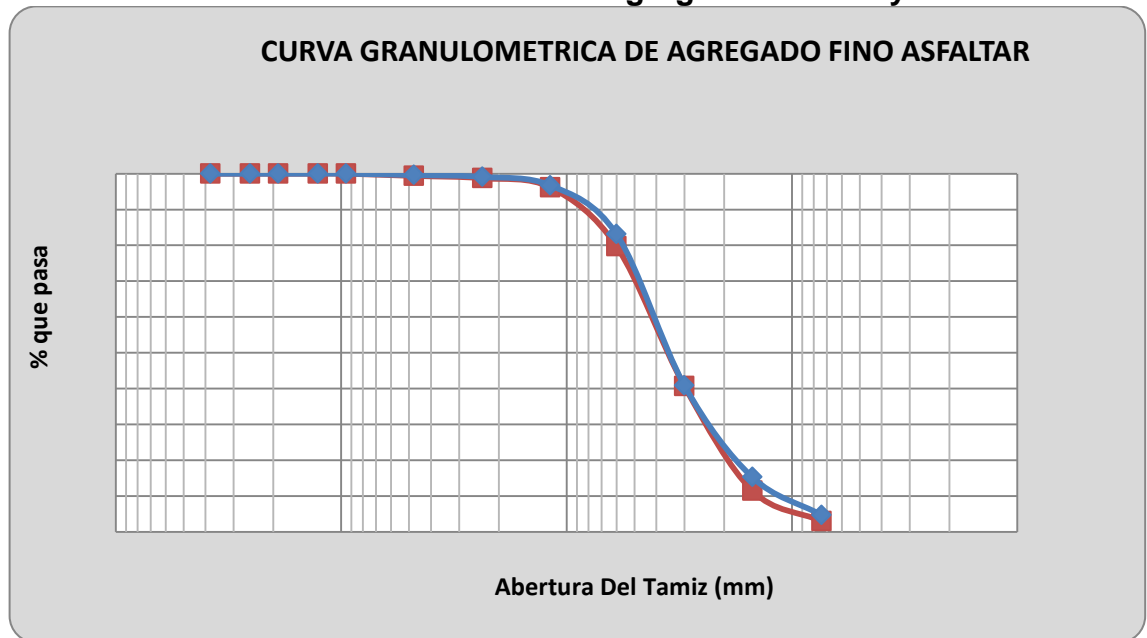
#### ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS

CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292
	Andres Orozco Muñoz		118720
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS FINOS		
NORMA:	I.N.V.E - 213 - 07	ENSAYO No:	02

Peso de la Muestra		2000	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200		1992,4	gr	Perdidas:	13,9 gr
<b>TAMIZ</b>	<b>ABERTURA (mm)</b>	<b>PESO Retenido</b>			<b>Pasa (%) REAL</b>
		<b>Parcial (gr)</b>	<b>Parcial (%)</b>	<b>Acumulado (%)</b>	
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,75	12,40	0,62	0,62	99,38
Nº 8	2,36	12,90	0,65	1,27	98,74
Nº 16	1,18	51,60	2,58	3,85	96,16
Nº 30	0,6	329,10	16,46	20,30	79,70
Nº 50	0,3	780,90	39,05	59,35	40,66
Nº 100	0,15	583,10	29,16	88,50	11,50
Nº 200	0,074	169,70	8,49	96,99	3,02
Fondo	-	46,40	2,32	99,31	0,70



### 3. Granulometrías de los agregados finos 1 y 2



## ANEXO 10. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS

I.N.V.E – 223 – 07

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS			
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292
	Andres Orozco Muñoz		118720
ENSAYO :	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS		
NORMA:	I.N.V.E - 222 - 07	ENSAYO No:	01

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Peso al aire de la muestra desecada (A)	g	495,14
Peso del picnometro aforado lleno de agua (B)	g	618,2
Peso total del picnometro aforado con muestra y agua( C )	g	929,21
Peso de la muestra saturada, con superficie seca ( S )	g	500
PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente 23/23°C = (A/(B+A-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,689
Gravedad especifica BULK S.S.S 23/23* C = (S/(B+S-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,646
Gravedad especifica BULK 23/23°C = (A/(B+S-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,620
Absorcion ((S-A)/A)*100	%	1,0

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS			
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292
	Andres Orozco Muñoz		118720
ENSAYO :	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS		
NORMA:	I.N.V.E - 222 - 07	ENSAYO No:	02

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Peso al aire de la muestra desecada (A)	g	494,3
Peso del picnometro aforado lleno de agua (B)	g	618,2
Peso total del picnometro aforado con muestra y agua( C )	g	920,4
Peso de la muestra saturada, con superficie seca ( S )	g	500
PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente 23/23°C = (A/(B+A-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,573
Gravedad especifica BULK S.S.S 23/23* C = (S/(B+S-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,528
Gravedad especifica BULK 23/23°C = (A/(B+S-C))	g/cm <sup>3</sup>	2,499

Absorcion $((S-A)/A)*100$	%	1,2
---------------------------	---	-----

**ANEXO 11. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS**

**I.N.V.E – 223 – 07**

<b>GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS			
NORMA:	I.N.V.E - 223 - 07	ENSAYO No:	01	

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Masa en el aire de la muestra seca (A)	g	2878,6
Masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca (B)	g	2903,55
Masa sumergida en agua de la muestra saturada ( C )	g	1816
PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente $G_{sa} = 23^*C/23^*c=(A/(A-C))$	$g/cm^3$	2,709
Gravedad especifica BULK $G_{sb} = 23^*C/238c=(B/(B-C))$	$g/cm^3$	2,670
Gravedad especifica BULK $G_{sb} = 23^*C/23^*c=(A/(B-C))$	$g/cm^3$	2,647
Porcentaje de absorcion $((B-A)/A)$	%	0,9



GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GUERSOS			
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292
	Andres Orozco Muñoz		118720
ENSAYO :	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS		
NORMA:	I.N.V.E - 223 - 07	ENSAYO No:	02

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Masa en el aire de la muestra seca (A)	g	4129,6
Masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca (B)	g	4173,2
Masa sumergida en agua de la muestra saturada ( C )	g	2497
PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente $G_{sa} 23^{\circ}C/23^{\circ}c=(A/(A-C))$	$g/cm^3$	2,529
Gravedad especifica BULK $G_{sb} 23^{\circ}C/23^{\circ}c=(B/(B-C))$	$g/cm^3$	2,490
Gravedad especifica BULK $G_{sb} 23^{\circ}C/23^{\circ}c=(A/(B-C))$	$g/cm^3$	2,464
Porcentaje de absorcion $((B-A)/A)$	%	1,1

**ANEXO 12. RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES**

**I.N.V.E – 218 – 07**

<b>ABRASION DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES</b>			
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292
	Andres Orozco Muñoz		118720
ENSAYO :	ABRASION DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES		
NORMA:	I.N.V.E - 219 - 07	ENSAYO No:	01

<b>TAMAÑOS</b>	<b>GRADACION TIPO Y PESO DE CADA FRACCION (g)</b>							
<b>PASA</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	2 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	N3			2500				
N3	N4			2500				
N4	N8				5000			

<b>No. DE ESFERAS</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
-----------------------	-----------	-----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------

<b>PRUEBA N</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>GRADACION EMPLEADA</b>	B						
<b>CARGA ABRASIVA</b>	11						
<b>REVOLUCIONES</b>	500						
<b>P1(g)</b>	5000,1						
<b>P2(g)</b>	3756,34						
<b>PERDIDA DE PESO(g)</b>	1243,76						
<b>% DE DESGASTE</b>	25						

ABRASION DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	ABRASION DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES			
NORMA:	I.N.V.E - 219 - 07	ENSAYO No:	02	

TAMAÑOS	GRADACION TIPO Y PESO DE CADA FRACCION (g)							
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	2 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	N3			2500				
N3	N4			2500				
N4	N8				5000			

<b>No. DE ESFERAS</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
-----------------------	-----------	-----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------

PRUEBA N	1	2	3	4	5	6	7
<b>GRADACION EMPLEADA</b>	B						
<b>CARGA ABRASIVA</b>	11						
<b>REVOLUCIONES</b>	500						
<b>P1(g)</b>	5000,1						
<b>P2(g)</b>	3856,07						
<b>PERDIDA DE PESO(g)</b>	1144,03						
<b>% DE DESGASTE</b>	23						

**ANEXO 13. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS  
I.N.V.E – 227 – 07**

PORCENTAJE CARAS FRACTURADAS					
CALCULO:		Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
		Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :		PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS			
NORMA:		I.N.V.E - 227	ENSAYO No:	01	
TAMIZ		PESO MUESTRA (gr)	PESO MATERIAL (gr)	PESO MATERIAL (gr)	CARAS FRACTURADAS
		Real	Caras Fract	Caras No Frac	%
<b>Pasa</b>	<b>Retenido</b>	<b>Q</b>	<b>F</b>	<b>N</b>	<b>P</b>
1 1/2"	1"	0	0	0	0
1"	3/4"	1610	1556	54	73,32
3/4"	1/2"	984	963	21	73,93
1/2"	3/8"	558	527	31	72,22
(P) % de Partículas con el numero especificado de caras fracturadas					
(F) Masa o numero de partículas fracturadas con al menos el numero de caras fracturadas con el número no especificado					
(Q) Masa o numero de partículas en la categoría cuestionable o frontera					
(N) Masa o numero de partículas en la categoría de no fracturadas o que no cumplen con le criterio de partículas fracturadas					

PORCENTAJE CARAS FRACTURADAS					
CALCULO:		Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
		Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :		PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS			
NORMA:		I.N.V.E - 227	ENSAYO No:	02	
TAMIZ		PESO MUESTRA (gr)	PESO MATERIAL (gr)	PESO MATERIAL (gr)	CARAS FRACTURADAS
		Real	Caras Fract	Caras No Frac	%
<b>Pasa</b>	<b>Retenido</b>	<b>Q</b>	<b>F</b>	<b>N</b>	<b>P</b>
1 1/2"	1"	0	0	0	0
1"	3/4"	1898	1988	10	75,4
3/4"	1/2"	634	628	6	74,5
1/2"	3/8"	370,8	366	3,2	74,5
(P) % de Partículas con el numero especificado de caras fracturadas					
(F) Masa o numero de partículas fracturadas con al menos el numero de caras fracturadas con el número no especificado					
(Q) Masa o numero de partículas en la categoría cuestionable o frontera					
(N) Masa o numero de partículas en la categoría de no fracturadas o que no cumplen con le criterio de partículas fracturadas					
<b>% total de caras fracturadas</b>					<b>75</b>

**ANEXO 14. EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS  
I.N.V.E – 133 – 07**

<b>GRANULOMETRIA DE LA CENIZA</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRANULOMETRIA DE CENIZA			
NORMA:	I.N.V.E-133-07	FECHA:		

Lectura de arcilla	3,25	≈	87
Lectura de arena	2,8		
<b>Equivalente de arena (EA)</b>	86,15		

<b>GRANULOMETRIA DE LA CENIZA</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRANULOMETRIA DE CENIZA			
NORMA:	I.N.V.E-133-07	ENSAYO No:	01	

Lectura de arcilla	3,35	≈	83
Lectura de arena	2,75		
<b>Equivalente de arena (EA)</b>	82,09		

<b>GRANULOMETRIA DE LA CENIZA</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRANULOMETRIA DE CENIZA			
NORMA:	I.N.V.E-133-07	ENSAYO No:	02	

Lectura de arcilla	4,6	≈	85
Lectura de arena	3,9		
<b>Equivalente de arena (EA)</b>	84,78		
<b>PROMEDIO EA =</b>	<b>85</b>		

**ANEXO 15. INDICE DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS  
I.N.V.E – 230 – 07**

INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo		ID:	85292
	Andrés Orozco Muñoz		ID:	118720
ENSAYO :	INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO DE AGREGADOS			
NORMA:	I.N.V.E - 230 - 07		ENSAYO No:	01

TAMIZ	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO Ri	PESO FRACCION Wi	APLANAM W pasa Wapi	ALARGAM W RetenidoWal <sub>i</sub>	INDICE		INDICE*RI	
						APLANAM	ALARGAM	APLANAM	ALARGAM
3/4"	952,01	6,35	952,01	160,6	27	16,87	2,84	107,07	18,00
1/2"	4990,56	33,27	4990,56	1094,3	545,09	21,93	10,92	729,53	363,39
3/8"	3894	25,96	3894	950	500,14	24,40	12,84	633,33	333,43
No. 4	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0
		65,58				63,19	26,60	1469,93	714,82

PESO 1 :	15000	gr
----------	-------	----

INDICE DE APLANAMIENTO:	$\frac{\sum(lap \times Ri)}{\sum Ri}$	22,42
INDICE DE ALARGAMIENTO:	$\frac{\sum(laL \times Ri)}{\sum Ri}$	10,90

INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO										
CALCULO		Juan Pablo Murillo				ID:	85292			
:		Andres Orozco Muñoz				ID:	118720			
ENSAYO :		INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO DE AGREGADOS								
NORMA:		I.N.V.E - 230 - 07				ENSAYO No:	02			
TAMIZ	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO RI	PESO FRACCION Wi	APLANA M W pasa Wapi	ALARGAMIENTO W Retenido Wi	INDICE		INDICE*RI		
						APLANA M	ALARGA M	APLANA M	ALARGA M	
3/4"	1039,6	6,93	1039,6	121	30	11,64	2,89	80,67	20,00	
1/2"	5200	34,67	5200	1063,47	521,51	20,45	10,03	708,98	347,67	
3/8"	4045,1	26,97	4045,1	830,2	493,56	20,52	12,20	553,47	329,04	
No. 4	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	
		68,56				52,61	25,12	1343,11	696,71	

PESO 1 :	16000	gr
----------	-------	----

INDICE DE APLANAMIENTO:	$\sum(lap \times Ri) / \sum Ri$	19,59
INDICE DE ALARGAMIENTO:	$\sum(laL \times Ri) / \sum Ri$	10,16

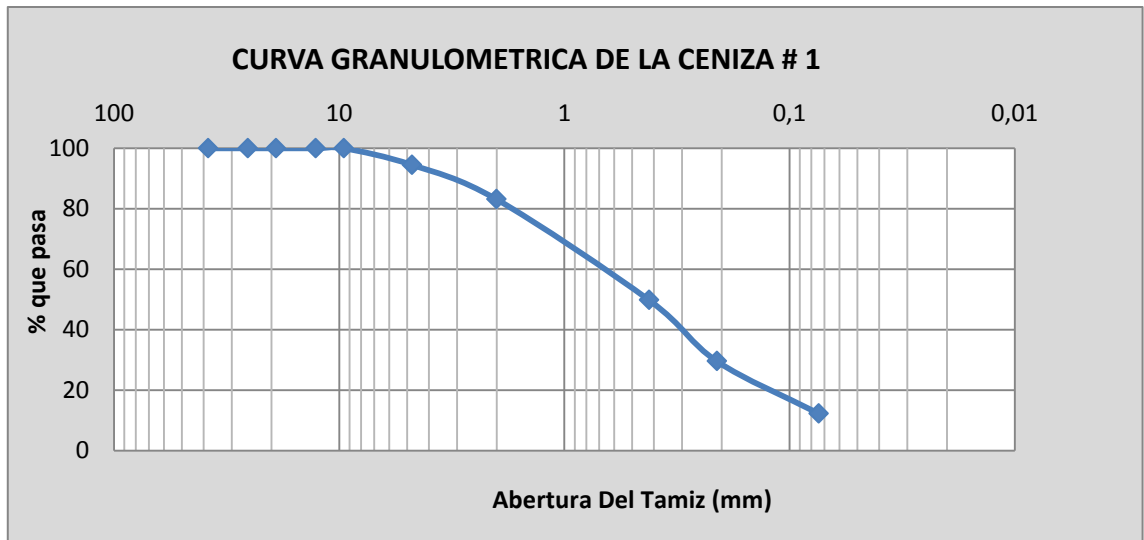
## ANEXO 16. ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LA CENIZA

### 1. Granulometría de la ceniza

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA			
NORMA:		ENAYO No:	01	

Peso de la Muestra		5050	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200		4986,78	gr	Perdidas :	49,87 gr
<b>TAMIZ</b>	<b>ABERTURA (mm)</b>	<b>PESO</b>			<b>Pasa (%)</b>
		<b>Retenido</b>			
		<b>Parcial (gr)</b>	<b>Parcial (%)</b>	<b>Acumulado (%)</b>	<b>REAL</b>
<b>1 1/2"</b>	<b>38,1</b>	0	0,00	0,00	100
<b>1"</b>	<b>25,4</b>	0	0,00	0,00	100,00
<b>3/4"</b>	<b>19,05</b>	0	0,00	0,00	100,00
<b>1/2"</b>	<b>12,7</b>	0	0,00	0,00	100,00
<b>3/8"</b>	<b>9,52</b>	0	0,00	0,00	100,00
<b>Nº 4</b>	<b>4,75</b>	277,25	5,49	5,49	94,51
<b>Nº 10</b>	<b>2</b>	575,78	11,40	16,89	83,11
<b>Nº 40</b>	<b>0,42</b>	1.685,00	33,37	50,26	49,74
<b>Nº 80</b>	<b>0,21</b>	1020,68	20,21	70,47	29,53
<b>Nº 200</b>	<b>0,074</b>	874,52	17,32	87,79	12,21
<b>Fondo</b>	<b>-</b>	<b>566,9</b>	11,23	99,01	0,99



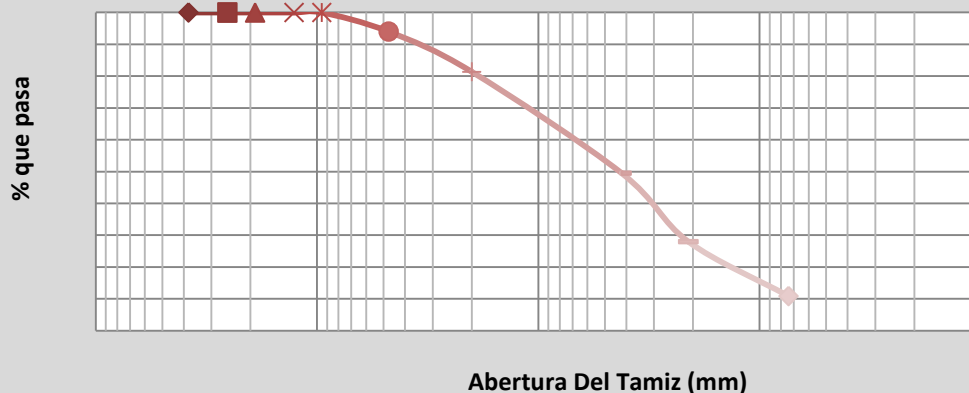


**2. Granulometría de la ceniza**

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA			
CALCULO:	Juan Pablo Murillo Andres Orozco Muñoz	ID:	85292 118720
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA		
NORMA:		ENAYO No:	2

		Peso de la Muestra	1293,21	gr		
		Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200	1288,77	gr	Perdidas:	17,02 gr
TAMIZ	ABERTUR A (mm)	PESO			Pasa (%)	
		Retenido			REAL	
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulad o (%)		
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100	
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00	
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00	
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00	
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00	
Nº 4	4,75	77,73	6,01	6,01	93,99	
Nº 10	2	163,12	12,61	18,62	81,38	
Nº 40	0,42	412,20	31,87	50,50	49,50	
Nº 80	0,21	278,15	21,51	72,01	27,99	
Nº 200	0,074	221,39	17,12	89,13	10,87	
Fondo	-	123,6	9,56	98,68	1,32	

### CURVA GRANULOMETRICA DE LA CENIZA # 2

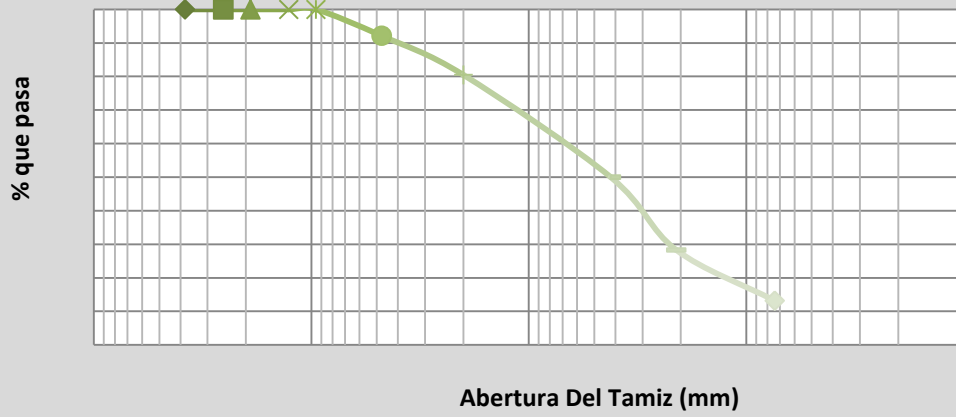


### 3. Granulometría de la ceniza

ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	ANALISIS GRANULOMETRICO DE LA CENIZA			
NORMA:		ENAYO No:	3	

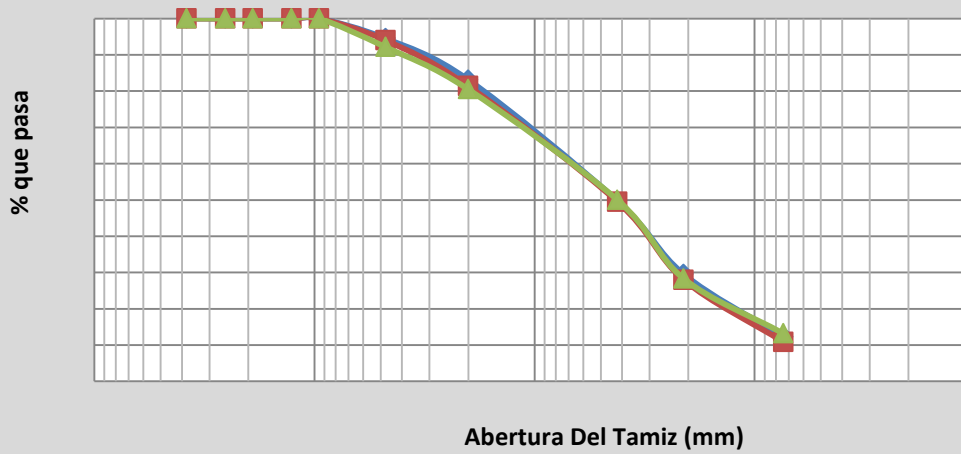
Peso de la Muestra		3020	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200		2998,45	gr	Perdidas:	19,9 gr
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO Retenido			Pasa (%)
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	REAL
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100
1"	25,4	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,75	237,85	7,88	7,88	92,12
Nº 10	2	351,87	11,65	19,53	80,47
Nº 40	0,42	920,41	30,48	50,00	50,00
Nº 80	0,21	654,91	21,69	71,69	28,31
Nº 200	0,074	456,86	15,13	86,82	13,18
Fondo	-	378,2	12,52	99,34	0,66

**CURVA GRANULOMETRICA DE LA CENIZA # 3**



**4. Granulometría de la ceniza 1 , 2 y 3.**

**CURVA GRANULOMETRICA DE LA CENIZA**



**ANEXO 17. CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGANICA EN  
ARENAS USADAS  
I.N.V.E – 212 – 07**

<b>CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA			
NORMA:	I.N.V.E - 312	ENSAYO	01	
		No:		

<b>MUESTRA</b>	<b>No. GADNER</b>	<b>DESCRIPCION</b>
1	1	AMARILLO CLARO

<b>CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA			
NORMA:	I.N.V.E - 212	ENSAYO	02	
		No:		

<b>MUESTRA</b>	<b>No. GADNER</b>	<b>DESCRIPCION</b>
1	1	AMARILLO CLARO

## ANEXO 18. GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE LA CENIZA

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE CENIZA				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE LA CENIZA			
NORMA:		ENSAYO No:	01	

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Peso al aire de la muestra desecada (A)	g	496,2
Peso del picnometro aforado lleno de agua (B)	g	618,2
Peso total del picnometro aforado con muestra y agua ( C )	g	878,4
Peso de la muestra saturada, con superficie seca ( S )	g	500
PESO ESPECIFICO		
Gravedad especifica aparente $23/23^*C = (A/(B+A-C))$	$g/cm^3$	2,103
Gravedad especifica BULK S.S.S $23/23^* C = (S/(B+S-C))$	$g/cm^3$	2,085
Gravedad especifica BULK $23/23^*C = (A/(B+S-C))$	$g/cm^3$	2,069
Absorcion $((S-A)/A)*100$	%	0,8

## ANEXO 19. FICHA TECNICA DE CALIDAD ASFALTAR

<b>CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO</b>	
PENETRACION 25°C, 5s, 100g(mm/10)	70
INDICE DE PENETRACION (IP)	-0,72
VISCOSIDAD ABSOLUTA @ 60°C (P)	1965
PUNTO DE ABLANDAMIENTO °C	48,6
DUCTILIDAD (25°C, 5 cm/min)	>130
CONTENIDO DE AGUA (%)	0,12
PUNTO DE IGNICIÓN (°c)	280
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	99.35%
TEMPERATURA DE MEZCLADO	143 - 146 °C
TEMPERATURA DE COMPACTACION	132 - 137 °C

## ANEXO 20. DISEÑOS MEZCLAS ASFALTICAS METODO MARSHALL PUNTO DE INFLEXION

### Diseño mezcla asfáltica método Marshall punto de inflexión sin contenido de ceniza

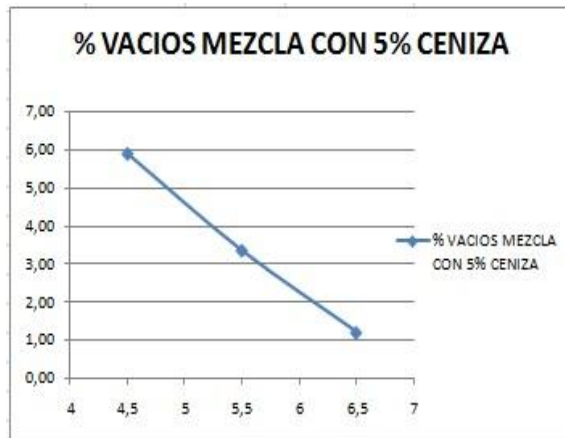
MEZCLA No	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %		PESO UNITARIO Lb/in^3	ESTABILIDAD		flujo 0.01 "	
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADOS	Mezcla total		LLENOS	MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100 - b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i + m}$	62.4*g	Libras	Libras	
4.5-V	4,5	2,44	1194,730	690,000	504,73	2,367									3040,000	3161,600	10
	4,5	2,48	1212,700	696,000	516,70	2,347									3240,000	3240,000	10
	4,5	2,45	1198,140	690,000	508,14	2,358									2192,000	2279,680	15
	4,5	2,53	1178,500	679,000	499,50	2,359									3307,000	3307,000	12
	4,5	2,47	1158,800	670,000	488,80	2,371									3140,000	3422,600	13
	4,5	2,57	1189,000	685,000	504,00	2,359									4600,000	4784,000	13
<b>Promedio</b>			1188,645	685,000	503,65	2,360	2,463	10,621	85,20	4,18	14,80	4,18	0,72	147,28		3282,800	12
5.5-V	5,5	2,51	1196,200	687,000	509,20	2,349									3450,000	3450,000	14
	5,5	2,50	1186,200	678,000	508,20	2,334									4070,000	4232,800	16
	5,5	2,49	1151,700	641,000	510,70	2,255									2200,000	2200,000	14
	5,5	2,43	1185,700	681,000	504,70	2,349									3350,000	3484,000	16
	5,5	2,39	1133,400	650,000	483,40	2,345									2425,000	2643,250	15
	5,5	2,40	1153,400	650,000	503,40	2,291									2530,000	2631,200	15
<b>Promedio</b>			1167,767	664,500	503,27	2,321	2,426	4,825	82,90	12,28	17,10	4,34	0,53	144,81		3288,250	15
6.5-V	6,5	2,41	1170,410	671,000	499,41	2,344									2250,000	2340,000	26
	6,5	2,45	1192,250	675,000	517,25	2,305									2170,000	2256,800	27
	6,5	2,45	1185,740	693,000	492,74	2,406									2178,000	2265,120	27
	6,5	2,50	1197,270	699,000	498,27	2,403									2272,000	2362,880	24
	6,5	2,52	1198,290	688,000	510,29	2,348									2543,000	2644,720	24
	6,5	2,49	1207,750	689,000	518,75	2,328									2405,000	2501,200	27
<b>Promedio</b>			1191,952	685,833	506,12	2,356	2,390	5,788	83,26	10,95	16,74	1,43	0,80	147,00		2395,120	26





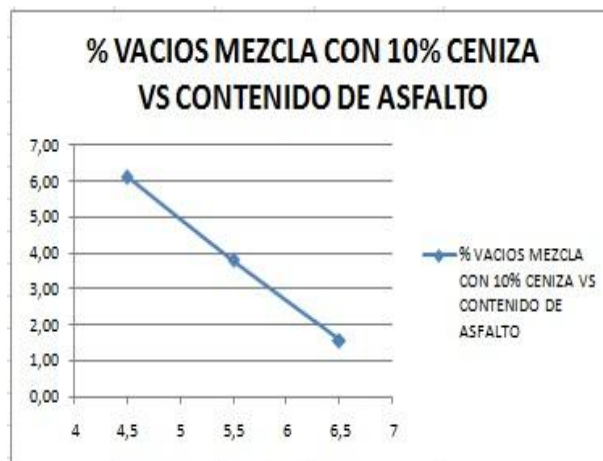
### Diseño mezcla asfáltica método Marshall punto de inflexión con 5 % contenido de ceniza

MEZCLA No	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %		PESO UNITARIO Lb/in <sup>3</sup>	ESTABILIDAD		flujo 0.01"	
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADOS	Mezcla total		LLENOS	MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100 - b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i + m}$	62.4*g	Libras	Libras	
4.5-A	4,5	2,57	1194,800	681,000	513,80	2,325									3130,000	3130,000	10
	4,5	2,49	1177,200	667,000	510,20	2,307									4100,000	4100,000	10
	4,5	2,61	1186,300	672,000	514,30	2,307									3600,000	3600,000	15
	4,5	2,49	1194,700	681,000	513,70	2,326									3315,000	3315,000	12
	4,5	2,55	1201,300	681,000	520,30	2,309									3414,000	3414,000	13
	4,5	2,51	1186,200	678,000	508,20	2,334									4011,000	4171,440	13
<b>Promedio</b>			1190,083	676,667	513,42	2,318	2,463	10,431	83,68	5,89	16,32	5,89	0,64	144,64		3364,750	12
5.5-A	5,5	2,48	1184,330	678,000	506,33	2,339									3157,000	3283,280	14
	5,5	2,39	1158,500	666,000	492,50	2,352									2337,000	2781,030	16
	5,5	2,49	1186,800	675,000	511,80	2,319									2919,000	2919,000	14
	5,5	2,49	1189,300	683,000	506,30	2,349									2687,000	2794,480	16
	5,5	2,49	1204,100	692,000	512,10	2,351									2613,000	2613,000	15
	5,5	2,48	1181,400	680,000	501,40	2,356									3056,000	3178,240	15
<b>Promedio</b>			1184,072	679,000	505,07	2,344	2,426	4,874	83,75	11,38	16,25	3,36	0,59	146,29		3126,840	15
6.5-A	6,5	2,51	1184,330	683,000	501,33	2,362									2387,000	2482,480	22
	6,5	2,49	1196,070	689,000	507,07	2,359									2394,000	2489,760	22
	6,5	2,50	1187,100	685,000	502,10	2,364									2511,000	2611,440	22
	6,5	2,45	1181,760	684,000	497,76	2,374									2718,000	2826,720	21
	6,5	2,47	1186,920	685,000	501,92	2,365									2709,000	2817,360	20
	6,5	2,53	1179,710	676,000	503,71	2,342									2302,000	2394,080	18
<b>Promedio</b>			1185,982	683,667	502,32	2,361	2,390	5,801	83,45	10,75	16,55	1,21	0,83	147,33		2603,640	21



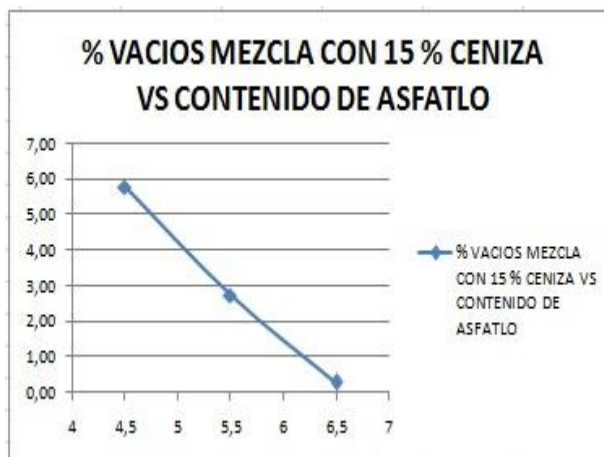
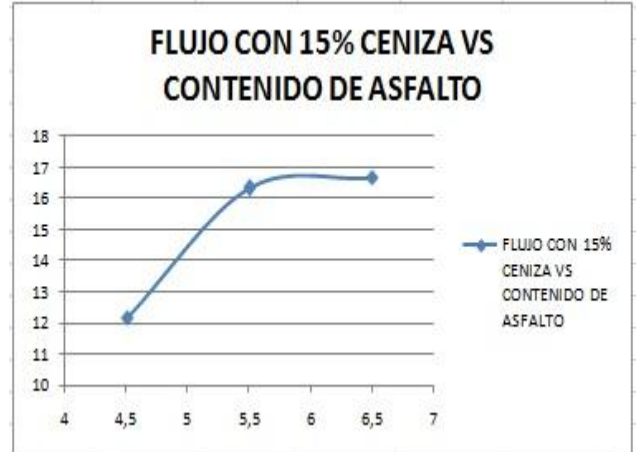
## Diseño mezcla asfáltica método Marshall punto de inflexión con 10 % contenido de ceniza

MEZCLA No	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %		PESO UNITARIO Lb/m <sup>3</sup>	ESTABILIDAD		flujo 0.01"	
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADOS	Mezcla total		LLENOS	MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	$\frac{b + g}{P_s A_s f}$	$\frac{(100 - j)g}{P_s A_s g}$	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f				100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4g	Libras	Libras	
4,5-B	4,5	2,51	1188,400	673,000	515,40	2,306									3034,000	3034,000	11
	4,5	2,50	1195,500	680,000	515,50	2,319									3215,000	3215,000	12
	4,5	2,52	1185,100	671,000	514,10	2,305									4620,000	4620,000	14
	4,5	2,47	1158,500	654,000	504,50	2,296									3215,000	3343,600	12
	4,5	2,54	1194,000	678,000	516,00	2,314									4218,000	4218,000	12
	4,5	2,59	1205,500	689,000	516,50	2,334									2455,000	2455,000	11
Promedio			1187,833	674,167	513,67	2,312	2,463	10,406	83,48	6,12	16,52	6,12	0,63	144,29		3849,150	12
5,5-B	5,5	2,44	1186,100	683,000	503,10	2,358									4170,000	4336,800	16
	5,5	2,60	1222,300	691,000	531,30	2,301									4890,000	4694,400	20
	5,5	2,60	1195,700	680,000	515,70	2,319									3060,000	3060,000	15
	5,5	2,48	1191,900	680,000	511,90	2,328									3516,000	3516,000	14
	5,5	2,48	1198,000	692,000	506,00	2,368									2717,000	2825,680	24
	5,5	2,54	1193,000	681,000	512,00	2,330									3055,000	3055,000	19
Promedio			1197,833	684,500	513,33	2,334	2,426	4,852	83,37	11,78	16,63	3,80	0,56	145,63		3901,800	16
6,5-B	6,5	2,48	1175,540	675,000	500,54	2,349									3313,000	3445,520	22
	6,5	2,46	1177,320	671,000	506,32	2,325									2985,000	3104,400	22
	6,5	2,48	1196,710	687,000	509,71	2,348									2719,000	2719,000	22
	6,5	2,47	1185,370	686,000	499,37	2,374									2157,000	2243,280	21
	6,5	2,49	1195,240	687,000	508,24	2,352									2670,000	2776,800	20
	6,5	2,48	1200,500	693,000	507,50	2,366									3310,000	3442,400	18
Promedio			1188,447	683,167	505,28	2,352	2,390	5,779	83,13	11,09	16,87	1,58	0,79	146,77		3097,624	21



### Diseño mezcla asfáltica método Marshall punto de inflexión con 15 % contenido de ceniza

MEZCLA No	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in^3	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADOS	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	$\frac{b \cdot f \cdot g}{P_s A_s f}$	$\frac{(100-j)g}{P_s A_g}$	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f				100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
<b>4.5-C</b>	4,5	2,52	1205,100	685,000	520,10	2,317									3741,000	3741,000	11
	4,5	2,56	1192,200	674,000	518,20	2,301									4129,000	4129,000	12
	4,5	2,49	1193,900	682,000	511,90	2,332									4079,000	4079,000	11
	4,5	2,50	1208,000	689,000	519,00	2,328									4217,000	4217,000	13
	4,5	2,49	1200,200	683,000	517,20	2,321									4314,000	4314,000	13
	4,5	2,56	1201,800	685,000	516,80	2,325									3714,000	3714,000	13
<b>Promedio</b>			1200,200	683,000	517,20	2,321	2,463	10,443	83,77	5,79	16,23	5,79	0,64	144,81		4032,333	12
<b>5.5-C</b>	5,5	2,44	1190,700	685,000	505,70	2,355									4093,000	4256,720	20
	5,5	2,36	1182,500	680,000	502,50	2,353									3217,000	3345,680	16
	5,5	2,36	1197,000	690,000	507,00	2,361									3723,000	3871,920	15
	5,5	2,36	1191,810	685,000	506,81	2,352									3435,000	3572,400	18
	5,5	2,48	1187,350	686,000	501,35	2,368									3246,000	3375,840	16
	5,5	2,44	1193,630	690,000	503,63	2,370									3469,000	3607,760	14
<b>Promedio</b>			1190,498	686,000	504,50	2,360	2,426	4,906	84,29	10,80	15,71	2,73	0,64	147,25		3912,133	16
<b>6.5-C</b>	6,5	2,49	1183,180	688,000	495,18	2,389									2617,000	2852,530	18
	6,5	2,51	1195,340	689,000	506,34	2,361									3337,000	3470,480	15
	6,5	2,45	1189,000	689,000	500,00	2,378									4039,000	4200,560	13
	6,5	2,52	1194,350	698,000	496,35	2,406									3870,000	4024,800	12
	6,5	2,49	1190,350	691,000	499,35	2,384									3927,000	4084,080	12
	6,5	2,53	1189,660	690,000	499,66	2,381									2556,000	2658,240	17
<b>Promedio</b>			1190,313	690,833	499,48	2,383	2,390	5,856	84,23	9,91	15,77	0,28	0,95	148,71		3548,448	17



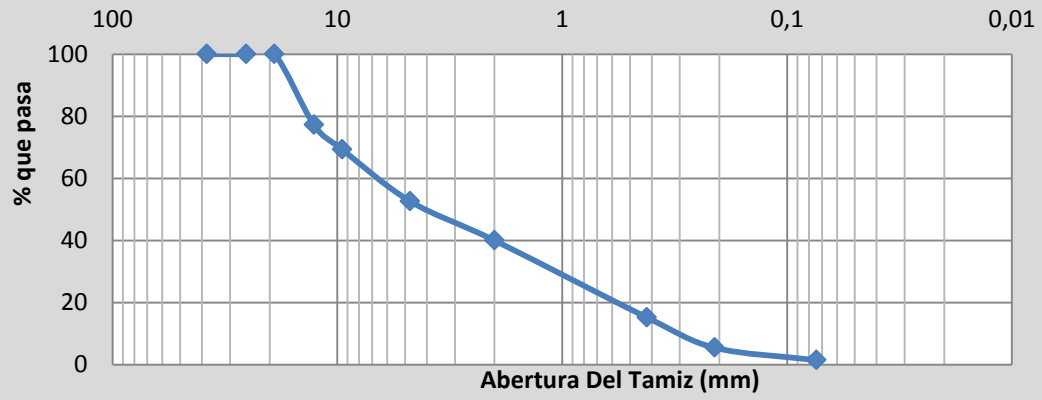
**ANEXO 21. ANALISIS GRANULOMETRICO EN PROPORCIONES  
DIFERENTES PARA ENCONTRAR LA FORMULA DE TRABAJO**

<b>GRANULOMETRIA DE MEZCLA AGREGADO FINO 72 % Y GRUESO 28%</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRANULOMETRIA MEZCLA FINO 72 % Y GURESO 28%			
NORMA:		ENSAYO No:	01	

Peso de la Muestra	5000	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200	4997,8	gr	Perdidas:	3,9 gr

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO			Pasa (%)
		Retenido			REAL
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	1140,50	22,81	22,81	77,19
3/8"	9,52	393,40	7,87	30,68	69,32
Nº 4	4,75	835,00	16,70	47,38	52,62
Nº 10	2	631,30	12,63	60,00	40,00
Nº 40	0,42	1240,70	24,81	84,82	15,18
Nº 80	0,21	486,80	9,74	94,55	5,45
Nº 200	0,074	201,00	4,02	98,57	1,43
Fondo	0,42	67,40	1,35	99,92	0,08

**CURVA GRANULOMETRICA MEZCLA FINO 72% Y GRUESO 28%  
ASFALTAR**



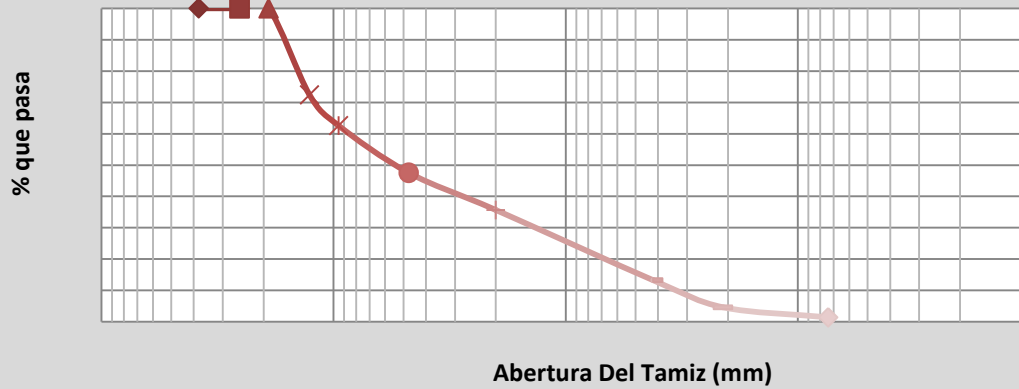


<b>GRANULOMETRIA DE MEZCLA AGREGADO FINO 65 % Y GRUESO 35%</b>					
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292		
	Andres Orozco Muñoz		118720		
ENSAYO :	GRANULOMETRIA MEZCLA FINO 65 % Y GURESO 35%				
NORMA:		ENSAYO No:	02		

Peso de la Muestra	5000	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200	4995,2	gr	Perdidas:	8,70 gr

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO Retenido			Pasa (%)
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	REAL
		1 1/2"	38,1	0,00	0,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	1378,60	27,57	27,57	72,43
3/8"	9,52	490,60	9,81	37,38	62,62
Nº 4	4,75	752,40	15,05	52,43	47,57
Nº 10	2	594,20	11,88	64,32	35,68
Nº 40	0,42	1119,80	22,40	86,71	13,29
Nº 80	0,21	432,00	8,64	95,35	4,65
Nº 200	0,074	160,30	3,21	98,56	1,44
Fondo	-	63,4	1,268	99,83	0,17

**CURVA GRANULOMETRICA MEZCLA FINO 65% Y GRUESO 35%  
ASFALTAR**

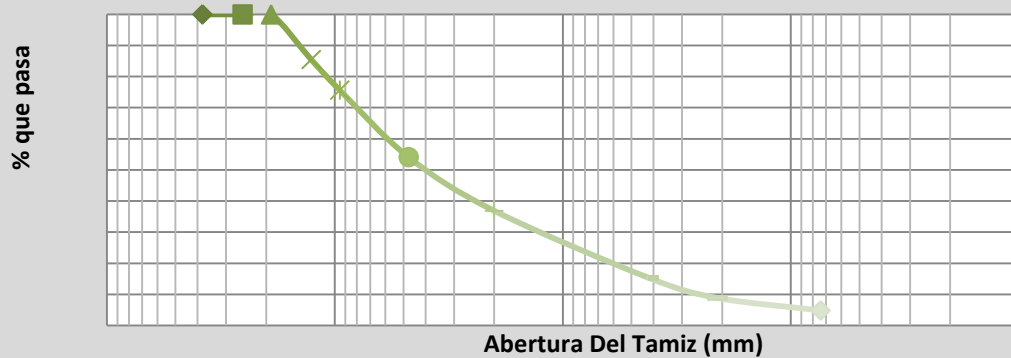


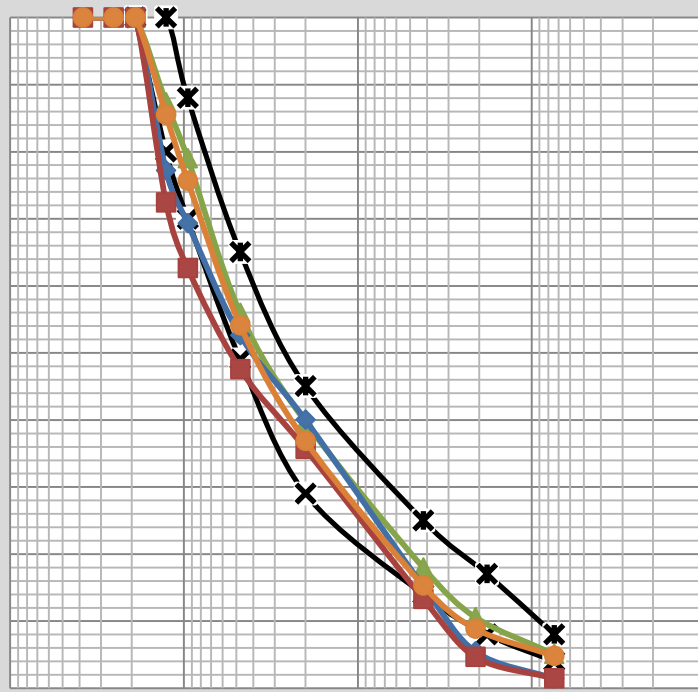
<b>GRANULOMETRIA DE MEZCLA AGREGADO FINO 70% Y GRUESO 30%</b>				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andres Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	GRANULOMETRIA MEZCLA FINO 70 % Y GURESO 30%			
NORMA:		ENSAYO No:	03	

Peso de la Muestra	10000	gr		
Peso de la Muestra Lavada por Tamiz No 200	9980,6	gr	Perdidas:	72,50 gr

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO			Pasa (%)
		Retenido			REAL
		Parcial (gr)	Parcial (%)	Acumulado (%)	
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	1452,80	14,53	14,53	85,47
3/8"	9,52	981,20	9,81	24,34	75,66
Nº 4	4,75	2156,70	21,57	45,91	54,09
Nº 10	2	1724,50	17,25	63,15	36,85
Nº 40	0,42	2154,60	21,55	84,70	15,30
Nº 80	0,21	646,70	6,47	91,17	8,84
Nº 200	0,074	402,50	4,03	95,19	4,81
Fondo	-	408,50	4,09	99,28	0,73

**CURVA GRANULOMETRICA MEZCLA FINO 70% Y GRUESO 30%  
ASFALTAR**





- x- MDC2
- x- MDC2
- ▲ Fino 70% Grueso 30%
- ◆ Fino 72% Grueso 28%
- Fino 65% Grueso 35%
- Fino 70% Grueso 30%

Abertura en mm

**ANEXO 22. ENSAYOS DE LOS ASFALTOS INCLUYENDO LOS CONTENIDOS DE CENIZA**

**PUNTOS DE IGNICION Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA DE CLEVELAND  
I.N.V.E – 709 – 07**

**Puntos de ignición y de llama del asfalto sin contenido de ceniza:**

Punto ignición o inflamación: 240°  
Punto de llama: 290°

**Puntos de ignición y de llama del asfalto con 5% de contenido de ceniza:**

Punto ignición o inflamación: 155°  
Punto de llama: 260°

**Puntos de ignición y de llama del asfalto con 10% de contenido de ceniza:**

Punto ignición o inflamación: 160°  
Punto de llama: 280°

**Puntos de ignición y de llama del asfalto con 15% de contenido de ceniza:**

Punto ignición o inflamación: 180°  
Punto de llama: 290°

Se considera que la muestra tiene ignición cuando una larga flama aparece instantáneamente y se propaga sobre toda la superficie del espécimen.

Se considera que la muestra tiene llama cuando la flama aparece y perdura en la muestra por más de 5 segundos.

**PENETRACION DE LOS MATERIALES ASFATICOS**  
**I.N.V.E – 706 – 07**

**Penetración del asfalto sin contenido de ceniza:**

Penetración 1: 85 mm

Penetración 1: 87 mm

Penetración 1: 85 mm

**Penetración Promedio: 85.66 mm**

**Penetración del asfalto con 5% de contenido de ceniza:**

Penetración 1: 76 mm

Penetración 1: 82 mm

Penetración 1: 89 mm

**Penetración Promedio: 82.33 mm**

**Penetración del asfalto con 10% de contenido de ceniza:**

Penetración 1: 81 mm

Penetración 1: 74 mm

Penetración 1: 79 mm

**Penetración Promedio: 78 mm**

**Penetración de el asfalto con 15% de contenido de ceniza:**

Penetración 1: 77 mm

Penetración 1: 86 mm

Penetración 1: 81 mm

**Penetración Promedio: 81.33 mm**

Las penetraciones estuvieron entre las cantidades de 50 a 149 con una diferencia máxima entre valores extremos de 4.

## **PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS**

**I.N.V.E – 712 – 07**

**Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola para el asfalto sin contenido de ceniza: 49°**

**Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola para el asfalto con 5% de contenido de ceniza: 50°**

**Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola para el asfalto con 10% de contenido de ceniza: 49°**

**Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola para el asfalto con 15% de contenido de ceniza: 50°**

Para cada espécimen con su respectivo contenido de ceniza el punto de ablandamiento fue determinado en un baño con agua.

### ANEXO 23.CONTENIDO DE ASFALTO

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE BITUMEN				
CALCULO:	Juan Pablo Murillo	ID:	85292	
	Andrés Orozco Muñoz		118720	
ENSAYO :	DETERMINACION DEL CONTENIDO DE BITUMEN			
NORMA:	I.N.V.E - 703 - 07	ENAYO No:	1	

PORCENTAJE DE ASFALTO					
MUESTRA	PESO INICIAL	PESO FINAL	FILTRO		% ASFALTO
Contenido de asfalto %	gr	gr	PESO INICIAL	PESO FINAL	
4,5	1174,5	1121,56	19,2	19,42	4,49
5,5	1132,05	1070,37	19,42	19,52	5,44
6,5	1164,72	1088,2	19,53	20,85	6,46



## ANEXO 24. REGISTRO FOTOGRAFICO



Se procede a hacer el cuarteo manual según establece la norma INV – E 202 al agregado previamente mezclado.



Se lavan y se secan las muestras antes de hacer un análisis granulométrico.



Una vez obtenida la humedad óptima el agregado fino mediante el cono, es importante evacuar los aires atrapados en la boquilla del picnómetro para obtener la gravedad específica y absorción del agregado.



El equivalente de arena en la caracterización del material, fue usado un agitador mecánico con el fin de obtener al final un buen resultado.



Se presenta el Momento en el que la mezcla muestra señales de ignición hasta llegar a su punto de llama.



Antes de enrazar los anillos y momento en el que llega a su punto de ablandamiento por el método de anillo y bola.



Se hace una gradación para el material a ensayar, posteriormente se toma la cantidad de agregados necesarios para la elaboración de las briquetas.



El material antes de pasar por el proceso de compactación se debe calentar y tomar temperaturas para el agregado de  $130^{\circ}\text{C}$  y para el asfalto de  $140^{\circ}\text{C}$ . posteriormente se vierte en el platony se realiza la mezcla para luego llevarse al molde de compactación.



Los 3 asfaltos modificados con 5 % 10 % y 15 % de lo que pasa por el tamiz No10 y retiene el No 80 de la ceniza.



Despues de 30 minutos de baño maria una por una las 72 briquetas son ensayadas midiendo de esta forma su estabilidad y flujo correspondiente.



Se muestra el ensayo de contenido de asfalto y como se debe recuperar el material retenido en el filtro.