

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA
Densa EN CALIENTE TIPO 2 UTILIZANDO CENIZA COMO UNA PROPORCIÓN
DEL AGREGADO FINO Y COMO LLENANTE.**

**LUIS ALEJANDRO AGUILAR PEDROZO
EDWARD ANDRES AYALA ROBAYO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA
Densa EN CALIENTE TIPO 2 UTILIZANDO CENIZA COMO UNA PROPORCIÓN
DEL AGREGADO FINO Y COMO LLENANTE.**

**LUIS ALEJANDRO AGUILAR PEDROZO
EDWARD ANDRES AYALA ROBAYO**

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

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

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Enero 2013

DEDICATORIAS

Este proyecto va dedicado en especial a Dios quien me regalo esta oportunidad de culminar mis estudios y trabajo de grado, guiándome hacia un mejor futuro, de igual manera agradezco a Laura Esther Pedrozo y Luis Carlos Aguilar, mis padres los cuales desean lo mejor para mí y se han esforzado de tal manera que lo obtenga por parte de ellos, apoyándome en todo los momentos como mis mayores tutores, los de la vida.

Luis Alejandro Aguilar Pedrozo

Este proyecto de grado va dedicado especialmente a dios, por darme la oportunidad de estudiar y guiarme durante estos cinco años. De igual forma le doy las gracias de todo corazón a mis padres por el esfuerzo realizado durante este tiempo y toda la educación que he recibido por parte de ellos, que hoy me sirven para ser un profesional

Edward Andrés Ayala

AGRADECIMIENTOS

Al señor todo poderoso, dador de nuestras vidas y oportunidades con las contamos, además de velar por nuestro bienestar en el desarrollo del proyecto nos bendijo con su sabiduría para dar nuestro mejor esfuerzo.

A nuestra alma mater, la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, quien nos brindó una excelencia humana, conocimiento profesional y ética, para servirle a la sociedad con nuestras futuras obras.

Al director del proyecto, DRA María Fernanda Serrano Guzmán por su gran apoyo y entrega al progreso del trabajo de grado, su tiempo valioso para nosotros y la formación humana que nos ha enseñado junto con su humildad, es un peldaño más para formarnos como personas.

A nuestros padres por exigir lo mejor nosotros y promover nuestros sueños a realidades cumplidas, gracias por tener fe en nosotros y luchas por éxitos para nosotros.

Al personal de laboratorio, la ING. Luz Marina Torrado, Heli Rueda y Vicente Paez, por la constante compañía y guía en los ensayos realizados en los laboratorios.

A todos los docentes, por su excelente trabajo al orientarnos en lo primordial de un profesional, el bien común.

A nuestros amigos y compañeros, por los grandes lazos de amistades que nacieron con el transcurso de nuestra formación académica.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCION | 14 |
| 1.1 JUSTIFICACIÓN | 14 |
| 1.2 ALCANCE | 15 |
| 1.3 OBJETIVOS | 16 |
| 1.3.1 Objetivo General | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 16 |
| 1.4 RELEVANCIA DEL ESTUDIO | 16 |
| 1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS | 16 |
| | |
| 2. MARCO TEORICO | 18 |
| 2.1 ASFALTO | 18 |
| 2.1.1 Clasificación y especificaciones | 18 |
| 2.1.2 Mezcla asfáltica | 19 |
| 2.1.2.1 Clasificación: | 20 |
| 2.2 MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE | 22 |
| 2.2.1 Evolución de diseños de mezclas asfálticas en caliente | 22 |
| 2.2.2 Mezcla densa en caliente | 23 |
| 2.2.3 Tipos de pavimentos | 23 |
| 2.2.3.1 Pavimento Flexible | 24 |
| 2.2.3.2 Pavimento rígido | 24 |
| 2.2.3.3 Pavimento semi-rigido | 24 |
| 2.2.3.4 Pavimento articulado | 25 |
| 2.3 CENIZAS VOLANTES | 25 |
| 2.3.1 Características generales de las cenizas volantes | 25 |
| 2.3.2 Clasificación de las cenizas volantes | 26 |
| 2.3.3 Composición química | 26 |
| 2.3.4 Composición física | 27 |
| | |
| 3. METODOLOGIA | 31 |
| 3.1 CARACTERIZACION MATERIALES EMPLEADOS | 32 |
| 3.1.1 Materiales Granulares | 32 |
| 3.1.1.1 Descripción de los procesos de caracterización de materiales granulares | 32 |
| 3.1.2 Material Bituminoso | 36 |
| 3.1.2.1 Descripción de los procesos de caracterización del asfalto. | 36 |
| 3.1.3 Ceniza volante | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.2 FABRICACION DE BRIQUETAS | 39 |
| 3.2.1 Porcentaje de los agregados para elaboración de la mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2 | 39 |
| 3.2.2 Compactación de las briquetas | 41 |
| 3.3 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA | 41 |
| 3.3.1 Densidad bulk INV. E-734 | 41 |
| 3.3.2 Estabilidad y flujo INV. E-748 | 42 |
| | |
| 4. RESULTADOS | 43 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAL GRANULAR | 43 |
| 4.1.1 Granulometría agregados gruesos y finos (INV. E-213) | 43 |
| 4.2 CARACTERIZACION ASFALTO | 49 |
| 4.3 CARACTERIZACION CENIZA | 50 |
| 4.4 RESULTADOS PRUEBA MARSHALL | 50 |
| | |
| 5. ANALISIS DE RESULTADOS | 54 |
| 5.1 CARACTERIZACION MATERIALES GRANULARES | 54 |
| 5.2 CARACTERIZACION CENIZA VOLANTE | 55 |
| 5.3 CARACTERIZACION ASFALTO | 55 |
| 5.4 ANALISIS RESULTADOS ENSAYO PRUEBA MARSHALL | 56 |
| 5.5 EVALUACION ECONOMICA DE LA MDC-2 CON ADICION DE CENIZA COMO PROPOCION DE AGREGADO FINO Y LLENANTE MINERAL. | 58 |
| | |
| CONCLUSIONES | 61 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA | 63 |
| | |
| ANEXOS | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | | PAG. |
|-----------|---|------|
| FIGURA 1 | Diagrama de flujo de la metodología. | 31 |
| FIGURA 2 | Rango granulométrico MDC-2 INVIAS 2007. | 43 |
| FIGURA 3 | Granulometría obtenida en agregados gruesos. | 44 |
| FIGURA 4 | Granulometría obtenida en la arena. | 44 |
| FIGURA 5 | Granulometría obtenida en la ceniza. | 45 |
| FIGURA 6 | Primer ensayo granulométrico identificando límites exigidos por la norma INVIAS 2007. | 46 |
| FIGURA 7 | Granulometría definitiva empleada para la MDC-2. | 47 |
| FIGURA 8 | Resultado Ensayo Marshall densidad Vs %asfalto. | 52 |
| FIGURA 9 | Resultado Ensayo Marshall estabilidad Vs %asfalto. | 52 |
| FIGURA 10 | Resultado Ensayo Marshall Flujo Vs %asfalto. | 53 |
| FIGURA 11 | Porcentaje de vacíos en una MDC-2 | 58 |

LISTA DE TABLAS

| | PAG. |
|--|------|
| TABLA 1 Matriz para la fabricación de briquetas empleando el método Marshall | 15 |
| TABLA 2 Especificaciones técnicas para el asfalto derivado del petróleo en estado puro | 19 |
| TABLA 3 Composición química cenizas volantes | 27 |
| TABLA 4 Composición física cenizas volantes | 28 |
| TABLA 5 Escala de vidrio de colores para el ensayo de materia orgánica. | 38 |
| TABLA 6 Franjas granulométrica para mezclas asfálticas en caliente | 39 |
| TABLA 7 Método Marshall briquetas convencionales. | 40 |
| TABLA 8 Método Marshall modificado con ceniza. | 40 |
| TABLA 9 Gradación óptima de los agregados a emplear para una MDC-2 por el método Marshall. | 40 |
| TABLA 10 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos | 48 |
| TABLA 11 Gravedad específica y absorción de la arena | 48 |
| TABLA 12 Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles | 48 |
| TABLA 13 Peso específico y absorción de la ceniza | 50 |
| TABLA 14 Densidad bulk | 51 |
| TABLA 15 Estabilidad | 51 |
| TABLA 16 Flujo | 51 |
| TABLA 17 Caracterización agregados pétreos | 54 |
| TABLA 18 Caracterización ceniza volante | 55 |
| TABLA 19 Caracterización asfalto | 55 |
| TABLA 20 Análisis resultados ensayo prueba Marshall | 56 |
| TABLA 21 Porcentaje de vacíos en una MDC-2 modificada con ceniza volante. | 57 |
| TABLA 22 Evaluación económica de la MDC-2 con adición de ceniza como proporción de fino y llenante mineral | 59 |

LISTA DE ANEXOS

| | PAG. |
|--|------|
| ANEXO 1 GRANULOMETRÍA PARA AGREGADOS GRUESOS | 65 |
| ANEXO 2 GRANULOMETRIA PARA AGREGADOS FINOS | 66 |
| ANEXO 3 GRANULOMETRIA CENIZA | 67 |
| ANEXO 4 GRANULOMETRIA PRUBEBA 1 | 68 |
| ANEXO 5 GRANULOMETRIA MDC-2 PRUEBA 2 | 69 |
| ANEXO 6 GRANULOMETRIA MDC-2 PRUEBA 3 | 70 |
| ANEXO 7 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS GRUESOS | 71 |
| ANEXO 8 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS | 72 |
| ANEXO 9 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 11/2"POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES | 73 |
| ANEXO 10 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS | 74 |
| ANEXO 11 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO | 75 |
| ANEXO 12 EQUIVALENTE DE ARENA | 76 |
| ANEXO 13 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS | 77 |
| ANEXO 14 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS | 78 |
| ANEXO 15 PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND | 79 |
| ANEXO 16 PESO ESPECÍFICO EN ASFALTO | 80 |
| ANEXO 17 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LA CENIZA | 81 |
| ANEXO 18 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD MDC-2 CONVENCIONAL | 82 |
| ANEXO 19 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON 30% ADICION DE CENIZA | 83 |
| ANEXO 20 ANEXO 20 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON ADICION 50% ADICION CENIZA | 84 |
| ANEXO 21 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON 70% DE ADICION DE CENIZA | 85 |
| ANEXO 22 RESISTENCIA DE MDC-2 CONVENCIONAL EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | 86 |
| ANEXO 23 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 30% ADICION DE CENIZA, EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | 87 |
| ANEXO 24 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 50% ADICION DE CENIZA EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | 88 |
| ANEXO 25 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 70% ADICION CENINZA EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | 89 |

| | | |
|----------|---|----|
| ANEXO 26 | TABLA ESPECIFICACIONES TECNICAS I.N.V 450 -07, Criterios de diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente empleando el método Marshall. | 90 |
| ANEXO 27 | REGISTRO FOTOGRAFICO | 91 |

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO 2 UTILIZANDO CENIZA COMO UNA PROPORCIÓN DEL AGREGADO FINO Y COMO LLENANTE.

AUTORES: LUIS ALEJANDRO AGUILAR PEDROZO.
EDWARD ANDRES AYALA ROBAYO.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR (A): PhD. MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN.

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada e implementada a través de los años para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando presentan niveles elevados de tránsito y problemas de temperatura. Por lo general lo que se busca cuando se utiliza este tipo de tecnología, es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y mezclas asfálticas convencionales, por ello importancia de este proyecto y su razón de ser.

Se fabricaron 72 briquetas, 6 de ellas testigos, variando los porcentajes de asfaltos en 4.5%, 5.5% y 6.5%, además de una adición de ceniza volante como proporción de agregado fino y como llenante mineral de 30%, 50% y 70%. Los mejores resultados de las propiedades mecánicas se localizan en la adición del 30% ceniza, a pesar de la necesidad de sustraer el 20% de la fracción de arena retenida en el tamiz $\frac{1}{2}$ " y que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ ", que representa un desperdicio entre el 2% y 5% del material necesario para elaborar una mezcla densa en caliente, muestra un ahorro cercano a \$7.000 para la producción de un metro cubico en comparación con una MDC-2 elaborada de manera convencional en la región de Santander. Se obtuvo un aumento en la estabilidad del 47.70% y el flujo se mantuvo estable de una MDC-2 con adición de ceniza del 30% con respecto a los requisitos mínimos expuestos por el Instituto Nacional de Vías para un nivel de trafico de 2, los resultados de estabilidad superan inclusive los requisitos para mezclas de alto modulo, aunque excede los límites de flujo en un 42.93%, por ello es vulnerable y de mayor probabilidad tener una deformación permanente mayor a una MDC-2 convencional, mientras su porcentaje vacíos asegura rigidez para la mezcla.

Palabras Claves:

Asfalto, estabilidad, mezcla, flujo, ceniza, agregado fino, llenante mineral.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A DENSE HOT MIX TYPE 2 USING FLY ASH AS A PROPORTION OF FINE AGGREGATE AND AS FILLER.

AUTHOR(S): LUIS ALEJANDRO AGUILAR PEDROZO
EDWARD ANDRES AYALA ROBAYO

FACULTY: Civil Engineering Faculty

DIRECTOR: Ph.D. MARÍA FERNANADA SERRANO GUZMÁN

In the world, the technology of modified asphalts has been a technique used and implemented through the years to improve the features that shown conventional asphalt mixtures designed for high levels of traffic and changes in temperature. Usually the goal is to increase the mechanical and rheological properties of the asphalt and conventional asphalt mixtures, Hence the importance of this project and its rationale. 72 briquettes were made including 6 witnesses briquettes varying percentages of 4.5%, 5.5% and 6.5% in asphalt, and addition of fly ash as a proportion of fine aggregate and as filler of 30%, 50% and 70%.

The best results of mechanical properties are located in the addition of 30% of fly ash, despite the need to subtract 20% of the sand fraction retained by the sieve $\frac{1}{2}$ " and passing through the sieve $\frac{3}{4}$ ", which represents a waste between 2% and 5% of the material required to produce a hot dense mixture, showing a savings of about USD\$ 4 for producing one cubic meter compared with MDC-2 prepared in conventional manner in the region of Santander. We obtained an increase in the stability of 47.70% and remained stable flow of an MDC-2 with the addition of fly ash from 30% over the minimum requirements set by the national highway traffic for a level of 2, the stability results even exceed the requirements for high modulus mixes, although flow exceeds the limits in a 42.93%, so it is vulnerable and more likely to will have a permanent deformation greater than a conventional MDC-2, while its percentage gaps ensures rigidity to the mixture.

KEYWORDS:

Asphalt, stability, mixing, flow, fly ash, fine aggregate, filler.

1. INTRODUCCION

El constante desarrollo de un país depende en manera especial del comercio e intercambio de productos que existe a nivel local, regional, nacional e internacional. Para realizar satisfactoriamente lo dicho anteriormente, es necesario unir las regiones por medio de Vías o Canales por donde se transporten los diferentes productos. Estas vías se construyen con especificaciones y diseños que garanticen seguridad, comodidad y sobre todo durabilidad y resistencia dependiendo del tipo de pavimento que lo constituya, para Colombia, el pavimento flexible el más usado gracias a su accesible precio y confortables propiedades mecánicas.

A diario y en diferentes vías del país se evidencia que a pesar de los diferentes estudios y diseños que se hacen para la construcción de una vía, se presentan fallas a lo largo de la misma, fallas que en muchos casos se deben a la baja resistencia de la carpeta asfáltica; es por ello que se han realizado investigaciones en muchas universidades del país, profesionales se han dedicado a estudiar el comportamiento del asfalto en condiciones variables en pro de un avance en este campo.

Resultados de investigaciones han llevado a formar los pavimentos modificados, ellos cuentan con aditivos que mejoran las características del mismo, optimizan algunas de sus propiedades como la estabilidad y aumentan la resistencia. Sin embargo, en la modificación de los asfaltos, generalmente el material utilizado son los polímeros, que por sus características brindan al asfalto un mejor comportamiento y por ende una mejor calidad del pavimento. Debido al alto costo que significa la implementación de polímeros, a lo largo de los años se han venido estudiando la implementación de nuevos materiales que puedan brindarle un mejor comportamiento al asfalto. De esta manera nace la idea de implementar la ceniza volante proveniente de locaciones petroleras, como llenante de una mezcla densa en caliente, y establecer según los resultados, las propiedades que la ceniza puede mejorar en el asfalto, convirtiéndose así en una alternativa económica y segura para la elaboración de carpetas asfálticas.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La infraestructura vial es uno de los factores más importantes que conllevan al desarrollo económico y social de un país. En Colombia a lo largo de los años el parque automotor ha venido creciendo de una manera sorprendente, y con ello la necesidad de responder a este crecimiento mediante la construcción de vías pavimentadas que permitan el buen desplazamiento de vehículos por todo el país.

Al aumentar el parque automotor, incrementa las magnitudes de cargas generadas por ejes equivalentes, el cual trasmite y somete esfuerzos a los pavimentos, generando así, desgastes en las carpetas asfálticas. Es por tal motivo que se emplea la iniciativa de mejorar las características de los pavimentos, utilizando nuevos materiales, con la finalidad de mejorar sus características mecánicas, es decir su resistencia a las deformaciones por factores tales como el del tránsito.

De esta manera nace la idea de implementar un nuevo material como lo es la ceniza proveniente de locaciones petroleras en las mezclas asfálticas, comprobando el cumplimiento de su estabilidad, resistencia y durabilidad, para posteriormente ser estudiadas y ser implementadas de una manera segura.

La utilización de esta ceniza como material en una mezcla asfáltica tiene como finalidad, generar un asfalto estable, durable y económico que se pueda implementar en cualquier tipo de proyecto. Además de dársele un uso apropiado a un material que actualmente en Ecopetrol no tiene ningún tipo de manejo.

1.2 ALCANCE

En este trabajo se evalúa el comportamiento de una mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2, mediante la utilización de ceniza proveniente de locaciones petroleras como una proporción de agregado fino y como llenante; posteriormente a esto se comparó los cambios en las propiedades mecánicas de la muestra. Es por ello que se dosifico 6 briquetas con un diseño de mezcla convencional tipo 2, con porcentajes de asfalto del 4.5%, 5.5% y 6.5% además de preparar mezclas con las composiciones mencionadas en la tabla 1.

TABLA 1 Matriz para la fabricación de briquetas empleando el método Marshall.

| No. Briquetas | Contenido de asfalto | Agregado Fino | | Llenante |
|---------------|----------------------|---------------|-----------|---------------------------|
| | | % ceniza | % A. Fino | |
| 6 | 4.5% | 0% | 100% | Convencional |
| 6 | 5.5% | 0% | 100% | Convencional |
| 6 | 6.5% | 0% | 100% | Convencional |
| 6 | 4.5% | 30% | 70% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 5.5% | 30% | 70% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 6.5% | 30% | 70% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 4.5% | 50% | 50% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |

| | | | | |
|----------|------|-----|-----|---------------------------|
| 6 | 5.5% | 50% | 50% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 6.5% | 50% | 50% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 4.5% | 70% | 30% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 5.5% | 70% | 30% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |
| 6 | 6.5% | 70% | 30% | Ceniza pasa Tamiz No. 200 |

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 tradicional y mezclas densas en caliente preparadas con ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el material granular, ceniza y el asfalto.
- Diseñar una mezcla asfáltica MDC- 2 convencional y una mezcla asfáltica MDC- 2 modificada con cenizas volantes provenientes de locaciones petroleras.
- Evaluar y comparar los resultados del ensayo Marshall de una mezcla asfáltica MDC-2 convencional, con la mezcla asfáltica MDC-2 modificada.

1.4 RELEVANCIA DEL ESTUDIO

Este estudio se cofinanció con fondos del convenio de colaboración Ecopetrol-ICP-UPB, liderado por el grupo DeCoR, en donde se presentan alternativas de utilización de la ceniza proveniente de locaciones petroleras. De esta manera, se establecen vínculos entre la Universidad y la Empresa.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Para la presentación del siguiente trabajo de grado se ha organizado la información de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, alcance, justificación, objetivos y relevancia del estudio. En el capítulo 2 se encuentra

el marco teórico soporte científico del trabajo realizado. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada para la realización del estudio. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos en el estudio seguida del capítulo 5 en el cual se presenta el análisis de resultados del proyecto, haciendo una comparación con la norma INVIAS, Instituto nacional de vías, en el artículo 450 del año 2007. Posteriormente se realizan todas las conclusiones obtenidas a partir del estudio. Se finaliza con las referencias bibliográficas y la lista de anexos.

2. MARCO TEORICO

Debido al crecimiento que ha tenido la movilidad a nivel mundial en los últimos años, se hace obligatorio que se implementen nuevas tecnologías en las mezclas asfálticas para mejorar la durabilidad de las vías y ofrecer alternativas de calidad para las mismas. Para contextualizar el tema, es necesario presentar los conceptos básicos relacionados con esta temática de las mezclas asfálticas.

2.1 ASFALTO

Sustancia bituminosa de color oscuro la cual es obtenida de yacimientos naturales y de residuos de petróleo crudo por el uso de métodos de extracción o destilación, su estado puede ser sólido, semisólido y líquido, posee gran variedad de uso gracias a sus propiedades aglutinantes y su fácil manejabilidad en altas temperaturas. La gran mayoría de asfalto usados para la pavimentación provienen de tratamientos de extracción al petróleo crudo. (Reyes, 2003)

El asfalto es reconocido como un material cementante, de color oscuro, el cual tiene una relación inversamente proporcional entre temperatura y rigidez, lo cual permite el vertimiento en altas temperaturas (135°C) y el total recubrimiento al enfriarse, este es el procedimiento de pavimentación, donde al asfalto se le es denominado cemento asfáltico, por sus propiedades adherentes y aglutinantes con los agregados pétreos. (Maryland, 1972)

El cemento asfáltico también es usado como impermeabilizante resistente a la variación de ph del ambiente y la presencia de sales en el entorno, por lo tanto, el adecuado uso del proceso constructivo y de aplicación del pavimento incrementa a la resistencia de muchos daños de tipo químicos. (ASTM capítulo D, 2006)

2.1.1 Clasificación y especificaciones

a) **Asfalto natural**

Son aquellos asfaltos producidos por procesos naturales y almacenados en depósitos varios, mezclados con varios minerales y sustancias, por lo general encuentran en rocas porosas por lo que son llamados asfaltos de rocas, también se suelen localizar en cuerpos de aguas como exudaciones, manantiales, por lo cual se les identifican como asfalto de lago y en su estado más puro se le denomina asfaltita. (Reyes, 2003)

b) Asfalto manufacturado

Es un derivado del petróleo que se obtiene en la destilación de este, también le es llamado, asfalto residual, el más común usado para la pavimentación, a partir de este se manifiesta diversas formas de uso según sus propiedades físico químicas. (Reyes, 2003)

El Instituto Nacional de Vías de Colombia, es la entidad responsable de la construcción, mejoramiento y mantenimiento de la infraestructura vial no concesionada del país, al tener mayores obligaciones el instituto creo un manual de diseño geométrico de carreteras y otros documentos técnicos, para una supervisión de los proyectos más efectiva, donde se muestran especificaciones técnicas de los materiales. En el INVIAS para el uso del asfalto es necesario con anticipación que este supere unos requisitos como se indica en la tabla 2.

TABLA 2 Especificaciones técnicas para el asfalto derivado del petróleo en estado puro

| Características | Unidades | Norma de ensayo | 60-70 | | 80-100 | |
|---|----------|-----------------|-------|-----|--------|-----|
| | | | Min | Max | Min | Max |
| Penetración | 0,1 mm | INV E-706 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| Viscosidad dinámica a 60°C | P | INV E-716 | 150 | - | 1000 | |
| Índice de penetración | | INV E-724 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| Perdida por calentamiento de película delgada (163°C, 5h) | % | INV E-721 | - | 1 | - | 1 |
| Ductilidad (25°C, 5 cm/min) | cm | INV E-702 | 100 | - | 100 | - |
| Penetración del residuo luego de la pérdida delgada, % de la penetración original | % | INV E-721 | 52 | - | 48 | - |
| Solubilidad en tricloroetileno | % | INV E-713 | 99 | - | 99 | - |
| Contenido de agua | % | INV E-704 | - | 0.2 | - | 0.2 |

Tomado del art. 400 de las especificaciones técnicas del INVIAS 2007.

2.1.2 Mezcla asfáltica

Consiste en la combinación entre materiales granulares, relleno mineral y asfalto, donde se forma una película continua del ligante hidrocarbonado. Su fabricación es de manera mecánica por centrales fijas o móviles, donde se extienden y compactan

en obra. Para la fabricación de mezclas asfálticas es necesario determinar las cantidades de material árido, tanto como el porcentaje óptimo de asfalto, el método Marshall es un método estándar, regido por normas de índole americanas, inglesas e inclusive por INVIAS en Colombia, para asegurar los índices mínimos de calidad. (Kraemer et al, 2004)

2.1.2.1 Clasificación:

La diversidad de maneras de fabricación sea por el estado, cantidades de material o el uso para el que se diseña forman una gran variedad de mezclas asfálticas:

a) Por fracciones de agregado pétreo empleado

- **Masilla Asfáltica:** Polvo mineral más el ligante asfáltico.
- **Mortero Asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto Asfáltico:** Agregado grueso más mortero.
- **Macadam Asfáltico:** Agregado grueso más ligante asfáltico.

(Padilla, 2004)

b) Por Temperatura en Obra:

Se clasifican en frías y calientes, la principal características que las diferencias consiste en que las mezclas frías son principalmente emulsiones asfálticas y a temperaturas ambiente, mientras la mezclas en caliente se definen por una cantidad de material granular con un ligante de bitumen, la cual se extiende a mas de 150° C de temperatura, luego se procede a una compactación que permite la existencia de vacíos en la mezcla, un gran problema, por la incertidumbre de cual es su porcentaje relativo con relación a su densidad, provocando reducción en su resistencia y mayores tendencias de deformación a menores cargas de aplicación.

Por tamaño máximo agregados pétreos pueden ser gruesas cuando su materiales granulométricos contienen partículas de un espesor superior a los 10 mm, y mezclas finas consideradas en la combinación de bitumen con cemento, también denominadas mortero asfáltico, es decir, sus partículas tiene tamaño máximo nominal equivalente al tamiz N°4. (Kraemer et al, 2004)

c) Por proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

La proporción de vacíos que se presente la mezcla es de vital importancia en la vida útil de la estructura, ya que influye de manera determinante en las características mecánicas, reológicas e impermeables, por lo que se hace necesario conocer las distintas tipologías de mezclas existentes al igual que los usos recomendados.

- *Mezclas cerradas o densas*
La impermeabilidad en este tipo de mezclas es realmente alta, ya que la proporción de vacíos no supera el 6%, por lo que protegen de manera muy eficaz del agua a las capas subyacentes del pavimento. Normalmente no suelen usarse puesto que requieren una gran cantidad de betún, dada la gran superficie específica que tienen por su alto contenido de llenante mineral.
- *Mezclas semi-cerradas o semi-densas*
Este tipo de mezcla es la más usada en capas de rodadura de carreteras y pavimentación urbana, la proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%, se admite una menor dosificación del ligante como consecuencia del poco contenido de finos que poseen.
- *Mezclas abiertas*
El porcentaje de vacíos supera el 12%, este tipo de mezclas tienen una mayor resistencia por el razonamiento interno de las partículas que por cohesión, lo cual hace que estas mezclas posean una baja impermeabilidad. Normalmente se emplean en capas de base granular tratadas.
- *Mezclas porosas o drenantes*
Con una proporción de vacíos que supera el 20%, esta mezcla ha ido adquiriendo gran importancia en la pavimentación, puesto que ofrece una serie de propiedades muy ventajosa desde el punto de vista de la evacuación de aguas, lo cual permite una mayor adherencia y seguridad.

(Bañón Blázquez, 2003)

d) Por tamaño máximo agregados pétreos

Mezclas Gruesas

En esta mezcla el tamaño máximo del agregado pétreo es mayor a 10 mm.

Mezclas Finas:

Llamadas micro aglomerados o morteros asfálticos; son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se extiende la mezcla (del doble al triple del tamaño máximo). (Kraemer et al, 2004)

e) Por granulometría

Se definen por la anatomía curvilínea de la gráfica granulométrica, identificadas como continuas y discontinuas, de acuerdo a la uniformidad de esta grafica en una escala logarítmica. (Kraemer et al, 2004)

f) Por la estructura del agregado pétreo

Mezclas con esqueleto mineral

Tienen un esqueleto mineral muy resistente, su mecanismo de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es considerable. Un ejemplo claro son las mezclas abiertas y los concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia, se debe a la masilla.

Mezclas sin esqueleto mineral

No cuentan con un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida únicamente a la cohesión de la masilla. Un claro ejemplo son los diferentes tipos de masillas asfálticas.

(Padilla, 2004)

2.2 MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

Las hay clasificadas como densas (MDC), semidensas (MSC) y gruesas (MGC), diferencias por la granulometría deseada, mientras la mezcla en caliente de alto modulo (MAM) se identifica por tener un módulo resiliente igual o superior a los diez mil megas pascales (10.000 MPa). (INVIAS, 2007)

2.2.1 Evolución de diseños de mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas se han trabajado por más de 90 años y han llevado un proceso muy complejo de investigación a través del tiempo, gracias a la importancia que tienen y han tenido en el desarrollo en la humanidad. (Padilla, 2004)

a) The Hubbard- Field (1920's). Este método de diseño de mezclas, fue uno de los primeros métodos en evaluar el porcentaje de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Empleaba una estabilidad como prueba para medir la deformación, funciono exitosamente para calcular granulometrías finas, pero no funciono para las mezclas con granulometrías gruesas.

b) Método Marshall (1930's). Este método se desarrolló durante la segunda guerra mundial y posteriormente fue utilizado para usarlo en carreteras. Como pruebas fundamentales este diseño de mezcla utiliza una estabilidad y porcentajes de vacíos, el método no ha sufrido modificaciones desde los años 40's.

c) Método Hveem (1930's). Método de diseño desarrollado en los mismos años que el método Marshall cuyo principal parámetro de evaluación es una estabilidad pseudotriaxial.

d) Método de la Western Association of State Highway on transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño es recomendado realizar cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la Resistencia a las roderas.

e) Método de Asphalt aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de realizar cambios en el diseño de mezcla fue admitida, para realizar dicho cambio tardaron 2 años para implementar un nuevo proyecto de diseño de

mezclas, el cual contenía un nuevo método de compactación y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de ensayos para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

f) Método SUPERPAVE (1993). El método AAMAS sirvió como inicio del método SUPERPAVE, el cual contiene un nuevo diseño volumétrico de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo de laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura.

2.2.2 Mezcla densa en caliente

En Colombia hay tres tipos de mezclas densas en caliente, dependen principalmente de las especificaciones técnicas del INVIAS 07.

a) Mezcla densa en caliente tipo 1 MDC-1

Este tipo de mezcla se puede utilizar como base asfáltica con un espesor compactado mayor a 50 mm y como capa de rodadura con un espesor compactado mayor a 60 mm.

(Orozco y Murillo, 2011)

b) Mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2

Es una mezcla en un ligante asfáltico y agregados minerales de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " , la cual es puesta en obra a una temperatura mayor de 150°C, el asfalto usado puede ser 60-70 o 80-100 dependiendo de las especificaciones técnicas requeridas por el diseño de pavimento, al igual los materiales pétreos deben estar regidos por el control de calidad exigido por la norma INVIAS 2007. (Asfaltart Ficha técnica MDC-2)

c) Mezcla densa en caliente tipo 3 MDC-3

Esta mezcla puede utilizarse en capas de rodaduras con espesores compactados entre 30 mm y 40 mm de espesor.

(Orozco y Murillo, 2011)

2.2.3 Tipos de pavimentos

En Colombia las clases de pavimentos usados son: los flexibles, rígidos, semirrígidos y articulados; de acuerdo a los materiales usados y el tipo de tránsito al que se le desea ofrecer el servicio. (Montejo, 2002)

2.2.3.1 Pavimento Flexible

Es un sistema tricapa, que se compone principalmente por una carpeta asfáltica, compuesta por una base y una sub-base. A este tipo de pavimento se le denomina flexible porque al ser sometido a una carga sufre una deformación y recuperación deseada, al cesar la carga, completamente elástica.

Las terminologías más importantes para la construcción de una estructura en pavimento flexibles son las siguientes:

- *Capa de rodadura*
Es la capa superior del pavimento sobre la cual circulan los vehículos durante la vida útil de está. Debe ser resistente a la abrasión generada por el tráfico y a la agresión del medio ambiente.
- *Base granular*
Es la capa que se construye sobre la sub-base, y en su construcción se utilizan materiales de mejor calidad y con mejor especificaciones de construcción, la importancia de la base granular radica principalmente en su capacidad estructural y de protección del resto del pavimento.
- *Sub-base granular*
Es la primera capa de la estructura del pavimento que se dispone sobre la subrasante, con la finalidad de facilitar un buen drenaje en el pavimento y permitir la construcción del resto de la estructura.

(Brañón Blázquez, 2003)

2.2.3.2 Pavimento rígido

Se trata de aquellos pavimentos constituidos por una losa de concreto hidráulico apoyado sobre una subrasante o subbase, dependiendo del material que está formado. El uso del concreto se basa en su alta rigidez y su gran coeficiente de elasticidad, por tanto, el área de distribución de esfuerzo es más amplio, principalmente se usa en subrasantes pobres de resistencia, porque para diseñar el espesor de la losa de concreto es irrelevante la capacidad de apoyo de la subrasante para soportar los esfuerzos producidos por el tráfico, sin embargo, la función de la subbase consiste en impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. (Montejo, 2002)

2.2.3.3 Pavimento semi-rigido

Un pavimento rígido o compuesto es aquel en el que se combinan dos tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos flexibles y pavimentos rígidos, habitualmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible está por encima.

(Brañón Blázquez, 2003)

2.2.3.4 Pavimento articulado

Se fundamenta en una capa de rodadura conformada por la unión entre adoquines (bloques de concreto prefabricados), la capa de rodadura puede estar soportada por una capa de arena ligeramente delgada que le permita uniformidad en la instalación o directamente sobre una base o subrasante dependiendo de la magnitud de influencia del tráfico en la zona. (Montejo, 2002)

2.3 CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes (CV) son residuos sólidos provenientes de la combustión de materiales como el carbón, madera, de la incineración de residuos sólidos urbanos y de procesos de fundición. De acuerdo a la norma europea EN 450 las cenizas volantes se definen como granos de polvo fino, compuesto por partículas vítreas esféricas. Poseen una alta resistencia mecánica, un punto de fusión superior a los 10.000°C, baja conductividad térmica y son químicamente inertes. (Moreno, 2002) y (Herrera Galvis, 1999)

El hecho de ser muy ligeras y de pequeño tamaño las hace susceptibles al arrastre por el flujo de los gases de la combustión generando la necesidad de eliminar las cenizas volantes de la corriente gaseosa por medio de procesos de separación como ciclones, filtros o precipitadores electrostáticos. (Vassilev & Vassileva, 2007)

2.3.1 Características generales de las cenizas volantes

Habitualmente las cenizas volantes están conformadas por un aglomerado de micro esferas (ceno esferas y pleuro esferas) y adquieren un tamaño aproximado entre (10-100µm). Dichas micro esferas se constituyen esencialmente por silicio y aluminio con cantidades menores de hierro, sodio, potasio, calcio, fósforo, titanio y magnesio. Los principales compuestos minerales son: aluminio silicato amorfo (vidrios). De igual forma se encuentran minerales como la millita, Cuarzo, hematita, magnetita, cal, anhidrita, y feldespatos (Umaña, 2002).

Las cenizas Volantes toman un color bronceado a gris oscuro, dependiendo de los químicos o minerales que posean, del mismo modo los colores claros y bronceados se asocian según el alto contenido de cal. Un color cafésoso se relaciona según el contenido de hierro mientras que un color gris oscuro a negro es atribuido a un contenido elevado de carbón no quemado.(ACAA, 2003)

2.3.2 Clasificación de las cenizas volantes

La clasificación de las cenizas volantes, se determina con base a la composición química que está adquiriendo dependiendo del tipo de carbón quemado para producirse. (Murillo y Orozco, 2011)

Dentro de los tipos de carbones más utilizados están: carbón bituminoso, carbón de antracita y carbón subbituminoso lignito. De la quema de estos dos últimos, se producen la mayoría de las cenizas, ya que el carbón bituminoso contiene una cantidad muy alta de carbón no combustible.

LAS CENIZAS VOLANTES SE CLASIFICAN EN: CLASE N, CLASE F Y CLASE C

CLASE N

Puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumple con los requisitos indicados en la norma NTC 3493, de origen geotérmico, ígneo-volcánico como las puzolanas clásicas italianas, portuguesas y españolas. (Murillo y Orozco, 2011)

CLASE F

Cenizas volantes normalmente producidas por la quema del carbón antracítico o bituminoso, esta clase de cenizas volantes consta de propiedades puzolánicas y cumple con las especificaciones de la NTC 3493. (NTC 3493)

CLASE C

Esta clase de ceniza es producida a partir de carbón lignítico o sub bituminoso, y además de poseer propiedades puzolánicas, cuenta con algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas volantes de la clase C pueden tener contenidos de cal, mayores al 10%.

2.3.3 Composición química

Las cenizas volantes y las puzolanas naturales deberán cumplir con los requerimientos de composición química indicados en la tabla 3.

TABLA 3 Composición química cenizas volantes

| Requisitos | Clase de aditivo mineral | | |
|---|--------------------------|------------------|------|
| | N | F | C |
| - Dióxido de sílice (SiO_2) + óxido de aluminio (Al_2O_3) + óxido de hierro (Fe_2O_3), (% mín.) | 70.00 | 70.0 | 50.0 |
| - Trióxido de azufre (SO_3). (% máx.) | 4.0 | 5.0 | 5.0 |
| - Contenido de humedad, (% máx.) | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| - Pérdida al fuego, (% máx.) | 10.0 | 6.0 ^A | 6.0 |

Tomado textualmente de NTC 3493,1993

2.3.4 Composición física

Las cenizas volantes y las puzolanas naturales deberán cumplir con los requerimientos de composición físicas indicados en la tabla 4.

TABLA 4 Composición física cenizas volantes

| Requisitos | Clase de aditivo mineral | | |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------|
| | N | F | C |
| Finura: - Cantidad retenida cuando se realiza un tamizado húmedo con un tamiz de 45 µm (No 325), (% máx.) ^A | 34 | 34 | 34 |
| Índice de actividad de resistencia. ^A - Con cemento Pórtland a los siete días mínimo, porcentaje de control. | 75 ^D | 75 ^D | 75 ^D |
| - Con cemento Pórtland a los 28 d, mínimo, porcentaje de control. | 75 ^D | 75 ^D | 75 ^D |
| - Con cal. a los siete días. mínimo (kPa). | 5 500 | 5 500 | - |
| - Agua requerida máx. porcentaje de control. | 115 | 105 | 105 |
| Estabilidad: ^C - Contracción o expansión en el autoclave. % máx. | 0.8 | 0.8 | 0,8 |
| Requisitos de uniformidad : La gravedad específica y finura de las muestras individuales no deberá diferir del promedio establecido por los diez ensayos anteriores o de todos los ensayos anteriores, si su número es menor que 10, en más de: | | | |

Tomado textualmente de NTC 3493, 1993.

2.4 ESTUDIOS REALIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Las nuevas tecnologías implementadas en la elaboración de mezclas asfálticas en Colombia, que requieren soportar grandes cantidades de tráfico y gradientes extremos de temperatura, están enfocadas a:

- reducir el envejecimiento
- aumentar la resistencia
- establecer límites de deformación
- soportar grandes cambios de temperaturas
- disminuir la fatiga
- obtener beneficios con el medio ambiente

Por ello en el país se han desarrollado diversas investigaciones con dichos objetivos encontrándose además una disminución del costo de la mezcla asfáltica convencional en comparación con una mezcla asfáltica modificada. Lo anterior motiva al constructor en el uso de nuevos materiales en el asfalto. Como evidencia de estudios relacionados con esta temática se citan:

- La aplicación de Policliling B-200 en la mezcla asfáltica, reduce el porcentaje óptimo de asfalto, disminuye en un 27% el flujo de la mezcla y presenta mayor estabilidad que una convencional. Asimismo se han realizado estudios de mezclas asfálticas modificadas con asfaltitas, látex natural, poliéster, caucho y plásticos, presentan cambios en el porcentaje óptimo de asfalto, la estabilidad y varianza en el flujo de la mezcla. (Rondon y otros, 2007)
- El uso de fibras de propiepileno por vía seca para evaluar las propiedades mecánicas y dinámicas de un mezcla con asfalto de característica 60/70, se obtiene el aumento del 45% del módulo dinámico en relación con aumento de las fibras de 0.60%, junto con la disminución del 27% de deformación permanente, por ello se aumenta la resistencia a la disgregación por el paso de vehículos y retarda el comienzo y propagación del agrietamiento. (Reyes y Reyes, 2005)
- El utilizar polímeros (desechos no biodegradados) como poli estirenos expandidos para modificar una mezcla asfáltica se incrementa notablemente el módulo dinámico y reduce la deformación, por ello es más susceptible a una mayor fatiga en menor tiempo, como consecuencia se sugiere la adición de polvo de llanta como agente con propiedades de deformación. (Reyes y Figueroa, 2008)
- Para aumentar la resistencia de los pavimentos flexibles Serrano y Vivas realizaron el estudio de una mezcla densa en caliente modificada con limadura metálica, con un 30% de arena, 60% de triturado y 10% de limadura metálica, con un 5.5% de asfalto, presento un aumento del 10.45% de la estabilidad en comparación con la muestra testigo, es recomendado mayor estudio con la adición de este material. (Serrano y Vivas, 2011)
- Adicionalmente, Diaz y Riveros (2011) trabajaron sobre la modificación de una mezcla densa en caliente con aceite de palma. Del estudio se obtuvo un aumento del 2% de estabilidad para un 5.5% de asfalto óptimo, mientras que para un 4.5% y 6.5% de asfalto disminuye en 2% la estabilidad, ante un mezcla convencional. (Díaz y Riveros, 2011).

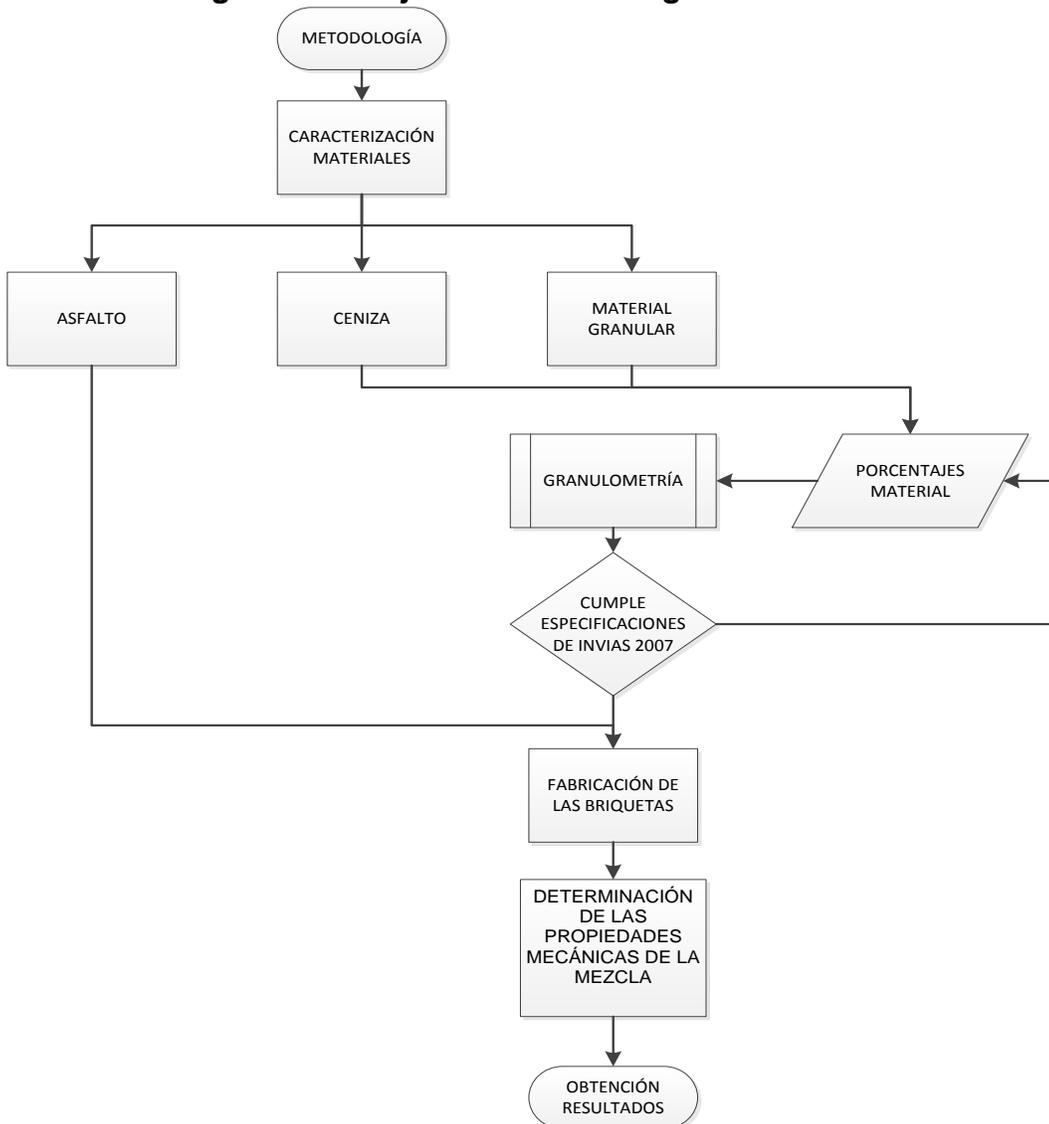
- Reemplazando el llenante mineral por ceniza volante, para una mezcla densa en caliente, elaborada con asfalto 60/70, se presenta un aumento del 19% de la resistencia para un remplazo del 20% del llenante mineral. La deformación permanente se mitigó en 10% y 38% para la sustitución del 20% y 45% de llenante mineral por ceniza volante. (Reyes y otros, 2006)
- Una mezcla densa en caliente tipo 2 para un nivel de tráfico de 3, preparada con 70% finos y 30%, una adición del 15% de ceniza y 4.675% de asfalto, presenta mayores estabilidad y resistencia que las mezclas convencionales. (Orozco y Murillo, 2011)

Cabe destacar que hay muchos estudios enfocados en esta temática que aún no han sido publicados.

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo eficiente del proyecto en la fabricación de una mezcla en caliente, se utilizaron materiales pétreos y bituminosos de acuerdo a las especificaciones exigidas por la norma INVIAS 2007. Adicionalmente, se utilizó ceniza proveniente de locaciones petroleras, material que fue suministrado por el Instituto Colombiano del Petróleo ICP. En la Figura 1 se resume la metodología seguida en el estudio.

FIGURA 1 Diagrama de flujo de la metodología.



3.1 CARACTERIZACION MATERIALES EMPLEADOS

A continuación se describen los ensayos realizados para la caracterización mecánica de los distintos materiales así como también para la verificación de la mezcla asfáltica finalmente preparada.

3.1.1 Materiales Granulares

Procedencia

La fuente del material se ubica a las orillas del río Chicamocha al oriente de Colombia, localizado en el departamento de Santander, sector Pescadero. Los recursos para la obtención de los distintos materiales fueron suministrados por el proyecto de investigación del grupo DeCoR de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, proyecto radicado en la Dirección General de Investigaciones de esta institución.

Ensayos exigidos por INVIAS a materiales granulares

Los ensayos necesarios para caracterizar los agregados pétreos mencionados por el INVIAS son:

- Granulometría de 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 fino (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)
- Índice de aplanamiento y alargamiento (INV. E-230)
- Equivalente de arena (INV. E-133)

3.1.1.1 Descripción de los procesos de caracterización de materiales granulares

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

Consiste en clasificar cuantitativamente por el peso los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos, al filtrarlos en laboratorios por tamices con fondo de mallas metálicas, formando una serie según indique la norma INVIAS, dependiendo de la cantidades distribuidas en los tamices se definen las

especificaciones a la que son aplicadas, sin ignorar la mezcla que se desea fabricar. Además de tener en cuenta que hay una frontera para diferencias los agregados gruesos y finos cuando se habla de mezclas asfálticas se trata del tamiz N°4 con abertura en su malla de 4.75mm, mientras que para el relleno mineral se identifica con las partículas que pasan por el tamiz N°200 de abertura 75µm, lo que comúnmente es llamado fino cuando se trata de suelos.

Para escoger los procesos para llegar a los resultados lo primero realizar un muestreo según la norma INV. E-201, continuamente guiarse por la norma INV. E-214 cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (no.200) en los agregados, indicando por poner el material al horno a una temperatura media de 110°C, por no menos de 18 horas anotando el peso seco, luego realizar un lavado por el tamiz N°200 y volver a colocar al horno pasadas las horas tomar el peso seco, por ultimo proceder a tamizar usando la serie de filtros indicada y tomando los pesos respectivos a cada fracción.

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

El objeto es determinar la gravedad específica bulk, bulk saturada, saturada con superficie seca y aparente, usado para agregados con partículas de tamaños mayores al tamiz N°4, sumergiéndolos en agua durante más de 15 horas.

Gravedad específica: Relación entre la masa (o peso en el aire) de un volumen de sólidos y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

Gravedad específica bulk aparente: Es la relación entre el peso en el aire del volumen de la porción impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

Gravedad específica bulk: Es la relación entre el peso en el aire del volumen de agregado (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas) a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca (sss):

Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca, incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego inmersión durante 15 horas (pero sin incluir los vacíos entre partículas) y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

Absorción: Es la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado, después de secado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. (INVIAS 2007, INV. E-213)

El ensayo se realiza en toma peso seco, peso sss (saturado y superficialmente seco) y peso sumergido. Este método solo es útil para partículas que no sean ligeras.

c) Gravedad específica y absorción de los agregados fino (INV. E-222)

En este ensayo se sumerge el material al menos 15 horas, luego extender el material en una superficie plana absorbente y dejarla expuesta al sol, luego de un tiempo con un cono hueco y martillo, darle veinticinco (25) golpes en tres capas, retirar el cono lentamente, si la muestra se desmorona inicia al siguiente paso de lo contrario repetir el proceso, en este momento la muestra se encuentra en estado saturado y superficialmente seco, el siguiente paso consiste en rellenar el picnómetro con unos 500gr de la muestra en este estado, y luego llenarlo con agua hasta la marca extrayéndole los vacíos de aire, e inmediatamente pesarlo, seguido de sacar el material del picnómetro y llevarlo a una bandeja al horno con una temperatura de 110°C, al día siguiente tomar el peso de la muestra seca y calibrar el picnómetro llenándolo de agua a una temperatura ambiente de 25°C hasta la marca y pesándolo, por consiguiente con las medidas tomadas realizar los cálculos respectivos para hallar la gravedad específica y absorción de los agregados.

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

El ensayo de resistencia al desgaste se basa en aplicarle una carga abrasiva simulada a una cantidad determinada de material pétreo natural o triturado, el principal uso es para estimar la calidad de composición mineral con la referencia a un parámetro establecido por las especificaciones técnicas mencionadas en INVIAS 2007, especialmente el art. 450 que trata de las mezclas asfálticas en caliente y comunica que una mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2 requiere un desgaste máximo de un 35%.

La metodología del ensayo se debe realizar después de haber ensayado la granulometría del material, para definir la cantidad de material a la que se le aplicara la carga abrasiva a partir de una clasificación granulométrica e igualmente establecer cuantas esferas de acero simularan la carga, se introducen ambos elementos al equipo de la máquina de los ángeles y se espera que se cumplan las 500 revoluciones, al finalizar retirar el material y realizar un lavado usando el tamiz N°12 y proceder a secar al horno a temperatura de 110°C y al final pesar la muestra ensayada, la diferencia de pesos es el porcentaje desgastado simulando una carga abrasiva con los parámetros de diseños de carreteras en Colombia.

e) Caras fracturadas (INV. E-227)

El significado del ensayo es determinar la cantidad de material pétreo triturado que este fracturado (cuando más de un ¼ de la cara de una partícula esta fracturada), si una partícula esta fracturada aumenta su capacidad de adhesión de ella con un ligante y otra partícula. El proceso a llevar a cabo es tener distribuido el material a partir del tamaño de las partículas sometidos a un ensayo anterior a de granulometría, y tomar continuas medidas de peso al material granular clasificado como fracturado, no fracturado y dudosos.

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

Es la formulación de datos estadísticos referentes a una muestra que defina el porcentaje de material pétreo con características alargadas y/o aplanadas, las cuales no son favorables para el desarrollo de una mezcla asfáltica, para ello es necesario tener distribuidas las cantidades de masa del material por medio del ensayo granulométrico y luego aplicarles el mismo procedimiento de filtro a estas cantidades pero con plantillas estándares para partículas aplanadas y alargadas.

g) Equivalente de arena (INV. E-133)

El ensayo de equivalente de arena se tiene que realizar con materiales gradados que pasen por el tamiz de 4.75 mm (No.4).

(Secado al aire)

Cuartear material suficiente que pasa por el tamiz 4.75mm (No4) para llenar el recipiente metálico de 85 ml (3 oz), de manera que quede levemente por encima del borde. En el transcurso del llenado del recipiente, se golpea el filo del fondo del recipiente en el lugar de trabajo, con la finalidad de producir la consolidación del material y permitir la colocación de la máxima cantidad del recipiente. El contenido del recipiente se nivela mediante la utilización de una regla o espátula.

(Método del agitador mecánico)

Luego de obtenida la muestra, ésta es secada hasta masa constante a $100 \pm 15^{\circ}\text{C}$, y es enfriada a temperatura ambiente. Después de tener el material se vierte solución de trabajo de cloruro de calcio hasta una altura aproximada de 101.6 ± 2.54 mm (4 ± 0.1 "), utilizando un embudo, la muestra del ensayo es vertida dentro del cilindro graduado. Posteriormente éste es golpeado varias veces en el fondo, para liberar burbujas de aire y remojar la muestra totalmente. Se deja en reposo durante 10 minutos. Pasados los 10 minutos el cilindro es tapado, y se afloja el material del fondo invirtiendo parcialmente el cilindro y agitándolo simultáneamente. A continuación se procede a colocar el cilindro en el agitador mecánico en un tiempo de funcionamiento de 45 ± 1 seg.

(Procedimiento de irrigación)

En este procedimiento se debe mantener el cilindro en posición vertical y la base en contacto con la superficie de trabajo. El tubo irrigador es colocado dentro del cilindro, la pinza de la manguera es aflojada y el material de las paredes del cilindro es lavado a medida que se baja el irrigador hasta llegar al fondo del mismo, suavemente se aplica presión y se realizan giros mientras que la solución de trabajo fluye por la boca del irrigador. Esta acción provoca que el material fino que este en el fondo se impulse hacia arriba, colocándolo en suspensión sobre las partículas gruesas de arena.

Se continúa con el lavado de los finos hasta que el cilindro este totalmente lleno, es decir, la marca sea 381 mm (15"); posteriormente se retira suavemente el tubo irrigador sin dejar de fluir la solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga cerca de dicha altura, mientras el tubo irrigador es extraído. El cilindro

es dejado en reposo durante 20 minutos, el tiempo comienza una vez el tubo irrigador es retirado.

(Determinación de la lectura de arcilla)

Finalizado los 20 minutos del periodo de sedimentación, se lee y se toma nota del nivel de la parte superior de la suspensión arcillosa, a este valor se le llama “lectura de arcilla”.

(Determinación de la lectura de arena)

Una vez finalizada la lectura de arcilla se procede a introducir dentro del cilindro el conjunto del disco, barra y sobrepeso, éste se baja suavemente hasta que llegue sobre la arena. Cuando el pie descansa sobre la arena, se inclina el dispositivo hacia las graduaciones del cilindro, hasta que el indicador toque la pared del cilindro. Se restan 254 mm (10”) al nivel marcado por el borde superior del indicador y se anota este valor como la “lectura de arena”

3.1.2 Material Bituminoso

Procedencia

El asfalto usado para la fabricación de las 72 briquetas definidas procede de la planta de la empresa de Tecnopavimentos S.A. Bucaramanga ubicada en el kilómetro 5 vía Girón – Zapatoca, productora de mezclas asfálticas, bases y subbases además de mantenimiento de infraestructura vial, nos suministró el material asfáltico con características bituminosas de 60-70 en penetración.

ENSAYOS EXIGIDOS POR INVIAS AL ASFALTO

Los ensayos realizados al asfalto de Tecnopavimentos S.A son:

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

3.1.2.1 Descripción de los procesos de caracterización del asfalto.

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

El objeto del ensayo es definir la temperatura en que el material bituminoso entra a un estado viscoso y manejable, normalmente es de 30°C a 150°C, para ello se usa de un equipo de montaje conformado por dos anillos y dos bolas, al igual que un

soporte que es sumergido en vaso de precipitado con agua destilada con una temperatura inicial de 4°C y a medida que vaya aumentando la temperatura se espera que ambas esferas cubiertas de asfaltos toquen el soporte a una caída de 25 mm (1”) y se anota la temperatura, a menos que se difiera de un 1°C entre el toque de las dos (2) esferas, se repite el procedimiento.

Este ensayo es fundamental para definir la temperatura mínima en que el asfalto es manejable y es posible transportarlo de un recipiente a otro sin necesidad de reducir sus características físicas y químicas, al someterlos a una alta temperatura.

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

Se basa en la determinación de la consistencia del material bituminoso, a una temperatura ambiente en estado sólido o semisólido. La consistencia se mide como la distancia (expresada en decimas de milímetros) de la caída vertical de una aguja de acero inoxidable con una carga móvil cien (100) gramos y fija de cincuenta (50) gramos, tomada por un lapso de tiempo de cinco (5) segundos.

Este ensayo también sirve para clasificar el asfalto como 60-70 o 80-100 de acuerdo al promedio de al menos tres (3) toma de lecturas, sin descartar las restricciones de las variables mencionadas con anterioridad.

El procedimiento consiste colocar el equipo con la aguja lo más cerca posible sin tocar el asfalto en estado sólido en un recipiente y activar el equipo por un tiempo de cinco (5) segundos y tomar la medida, luego repetir los pasos por lo menos dos veces, ubicando la penetración a más de un (1) centímetro de las anteriores.

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

El significado de esta norma es de tipología de seguridad y resistencia al calor para los asfaltos, es decir, por este método se puede identificar las temperaturas aproximadas al que el asfalto puede sucumbir en llamas a tal punto de provocar un accidente y reducir completamente su resistencia y su capacidad de deformación.

La técnica usada para el método es someter al asfalto a un alto incremento de temperatura, exponiendo a una llama por intermedio de 1 segundo, considerando dos momentos exactos en que se produce la primera llama y cuando se prende completamente el bitumen, a ello se le capturan las temperaturas respectivamente.

d) Densidad del asfalto

Consiste en determinar el peso específico del asfalto empleando el principio de Arquímedes, el agua desplazada por el cuerpo equivalente al volumen de este, y hallando el peso de las esferas creadas de asfalto se obtiene la densidad.

3.1.3 Ceniza volante

Procedencia

Las cenizas son provenientes de las locaciones petroleras, exactamente de la refinería de Ecopetrol, fue suministrada a la universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga a través de la directora de investigaciones, para realizar los correspondientes estudios e identificar posibles usos para estos residuos, disminuyendo el impacto ambiental del entorno y económico para la fabricación de las mezclas asfálticas.

Ensayos realizados a la ceniza

Para la ceniza se emplearon aquellas pasantes por el tamiz No. 4 como porción de agregado fino y el material pasa tamiz No. 200 se empleará como llenante de la mezcla densa en caliente MDC-2.

- 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 realizados para la clasificación de la ceniza son los mismos que se emplean para la caracterización del material fino, es decir, granulometría de los agregados finos (INV. E-213) y el ensayo de peso específico y absorción de los agregados finos (INV.E-212) además del contenido de materia orgánica, el único ensayo que no se utilizó en la caracterización de los agregados y sí para la clasificación de la ceniza.

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 proveniente de locaciones petroleras. En la tabla 5 se presenta la escala de vidrios de color normalizado usada para este ensayo.

TABLA 5 Escala de vidrio de colores para el ensayo de materia orgánica.

| COLOR ESTÁNDAR Gardner No | Placa orgánica No |
|----------------------------------|--------------------------|
| 5 | 1 |
| 8 | 2 |
| 11 | 3 (estándar) |
| 14 | 4 |
| 16 | 5 |

3.2 FABRICACION DE BRIQUETAS

3.2.1 Porcentaje de los agregados para elaboración de la mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2

Para determinar la cantidad de agregado grueso, agregado fino y ceniza, que se debe usar para producción de una MDC-2 es necesario remitirse a las especificaciones técnicas del INVIAS ART. 450 la tabla 450.2 define los límites de la curva granulométrica resumidos en la tabla 6.

TABLA 6 Franjas granulométrica para mezclas asfálticas en caliente

| TIPO DE MEZCLA | | TAMIZ(mm/U.S Standard) | | | | | | | | | |
|----------------|-------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| | | 37.5 | 25 | 19 | 12.5 | 9.5 | 4.75 | 2 | 0.425 | 0.18 | 0.075 |
| | | 1 1/2" | 1" | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No. 4 | No. 10 | No.40 | No.80 | No.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 - 80 | 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 |

Tomado textualmente de la norma INVIAS 2007, art. 450 tabla 1.

Se formuló tres ensayos granulométricos por aparte, además de montar una tabla estadística para simular el comportamiento de la curva granulométrica, considerando la variable de los porcentajes de agregado grueso, fino y el porcentaje de ceniza como porción de agregado fino, a partir de ello se obtuvieron tres granulometrías que soportan lo anterior y se identificaron los porcentajes óptimos de las variables mencionas previamente, para que se cumpla con los lineamientos exigidos por la norma INVIAS 2007.

Este estudio se realizó con la finalidad de determinar el comportamiento de una mezcla densa en caliente, es por ello que se dosifico 6 briquetas con un diseño de mezcla convencional tipo 2, con porcentajes de asfalto del 4.5%, 5.5% y 6.5%, en la tabla 7 se resumen la composición. Adicionalmente, se prepararán mezclas con las composiciones citadas en las tabla 8.

TABLA 7 Método Marshall briquetas convencionales.

| NUMERO DE BRIQUETAS | % DE ASFALTO | % AGREGADO FINO | LLENANTE |
|---------------------|--------------|-----------------|--------------|
| 6 | 4.5 | 100 | Convencional |
| 6 | 5.5 | 100 | Convencional |
| 6 | 6.5 | 100 | Convencional |

TABLA 8 Método Marshall modificado con ceniza.

| NUMERO DE BRIQUETAS | % DE ASFALTO | % AGREGADO FINO | LLENANTE |
|---------------------|--------------|-------------------|-----------------------|
| 6 | 4.5 | 30 Ceniza - 70 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 4.5 | 50 Ceniza - 50 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 4.5 | 70 Ceniza - 30 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 5.5 | 30 Ceniza - 70 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 5.5 | 50 Ceniza - 50 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 5.5 | 70 Ceniza - 30 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 6.5 | 30 Ceniza - 70 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 6.5 | 50 Ceniza - 50 AF | Pasa 200 de la ceniza |
| 6 | 6.5 | 70 Ceniza - 30 AF | Pasa 200 de la ceniza |

Con el fin de mostrar la distribución de material definidos por las fracciones de tamices se muestra la siguiente tabla, haciendo referencia a las 6 briquetas de 4.5% de porcentaje en asfalto y 0% de ceniza, considerando los parámetros de la norma y simulando un caso óptimo de gradación como se muestra en la tabla 9.

TABLA 9 Gradación óptima de los agregados a emplear para una MDC-2 por el método Marshall.

| TAMIZ | % PASA | | | %RETENIDO | MASA (g) | MASA (g) |
|--------------|----------|----------|--------|-----------|----------|---------------|
| | INFERIOR | SUPERIOR | OPTIMO | | | |
| 3/4" | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | GRUESO |
| 1/2" | 80 | 95 | 87.5 | 12.5 | 143.25 | |
| 3/8" | 70 | 88 | 79 | 8.5 | 97.41 | |
| N°4 | 49 | 65 | 57 | 22 | 252.12 | |
| N°10 | 29 | 45 | 37 | 20 | 229.2 | FINO |
| N°40 | 14 | 25 | 19.5 | 17.5 | 200.55 | |
| N°80 | 8 | 17 | 12.5 | 7 | 80.22 | |
| N°200 | 4 | 8 | 6 | 6.5 | 74.49 | |
| FONDO | 0 | 0 | 0 | 6 | 68.76 | |

Se observa que la cantidad de finos es mayor que la de grueso, pero dependiendo de la gradación del material es posible definir la relación Grueso/Fino necesaria para la fabricación de las briquetas.

3.2.2 Compactación de las briquetas

El fin es realizar probetas con una mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2, de forma cilíndrica de 4" de diámetro y 2 ½" de altura, con peso de 1200 gramos, para iniciar se necesita tener las densidades y pesos específicos de los materiales que interactúan en la mezcla.

El mecanismo de compactación de las probetas, ya determinadas las cantidades de materiales necesarias, es calentar los agregados pétreos y asfálticos, de acuerdo a las temperaturas mínimas de mezclar y de los agregados, la temperatura debe ser capaz de llegar a una viscosidad de 170 ± 20 centiStokes (1centiStokes = 1mm/s) y para realizar compactación alcanzar una viscosidad de 280 ± 30 centiStokes,

Para realizar la compactación es necesario identificar el nivel del tráfico al cual el pavimento le va a prestar el servicio y de acuerdo a ello se define la cantidad de golpes por lado que se usaran para la compactación, para este caso el tráfico es de nivel 2, por ende, el número de golpes equivale a 75 lado, usando el pistón de caída libre de 18".

3.3 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEZCLA

De acuerdo al manual de diseño de carreteras suministrados por INVIAS 2007 los ensayos necesarios para el cálculo del valor óptimo del contenido de asfalto, usando el método de Marshall son:

3.3.1 Densidad bulk INV. E-734

Los datos previos a este ensayo que se deben tomar son tres medidas de altura y el peso seco de cada biqueta. La prueba consiste en sumergir las probetas por lo menos 5 minutos en agua a una temperatura ambiente 25°C, tomarle el peso sumergido y proceder a limpiarle la superficie del agua sobresaliente para obtener el peso saturado y superficialmente seco, luego de obtener dichos datos se calcula la

densidad bulk respectiva y aplicarles un factor corrector de temperatura del agua de 25°C correspondiente a 0.997 según la tabla 1 INV. E-734

En caso imprescindible de obtener la relación densidad/vacíos, es forzoso emplear la norma INV E.736 porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas, en ella se menciona el requisito del peso específico máximo de la mezcla, la cual resulta de una relación entre el peso específico de cada material con el porcentaje aplicado por cada mezcla.

3.3.2 Estabilidad y flujo INV. E-748

El proceso del ensayo consiste en someter a las probetas a un baño de agua María por treinta (30) minutos a una temperatura de 60°C, realizar el montaje indicado en la norma INV. E-748, usando la mordaza y el equipo de ensayo Marshall, no debe pasar mucho tiempo entre el retiro de la probeta del baño y la activación de la máquina Marshall, antes de iniciar el equipo es indispensable verificar que tanto la medición de la carga como la deformación inician en cero, luego después de accionado se mira constantemente la medida de la carga en libras y al observar que se llega al punto máximo y procedente disminuye instantáneamente, se analiza el dato de la deformación en pulgadas, estos datos son respectivamente de la estabilidad (capacidad de un pavimento para resistir los esfuerzos inducidos por él tránsito que producen las deformaciones) y el flujo.

4. RESULTADOS

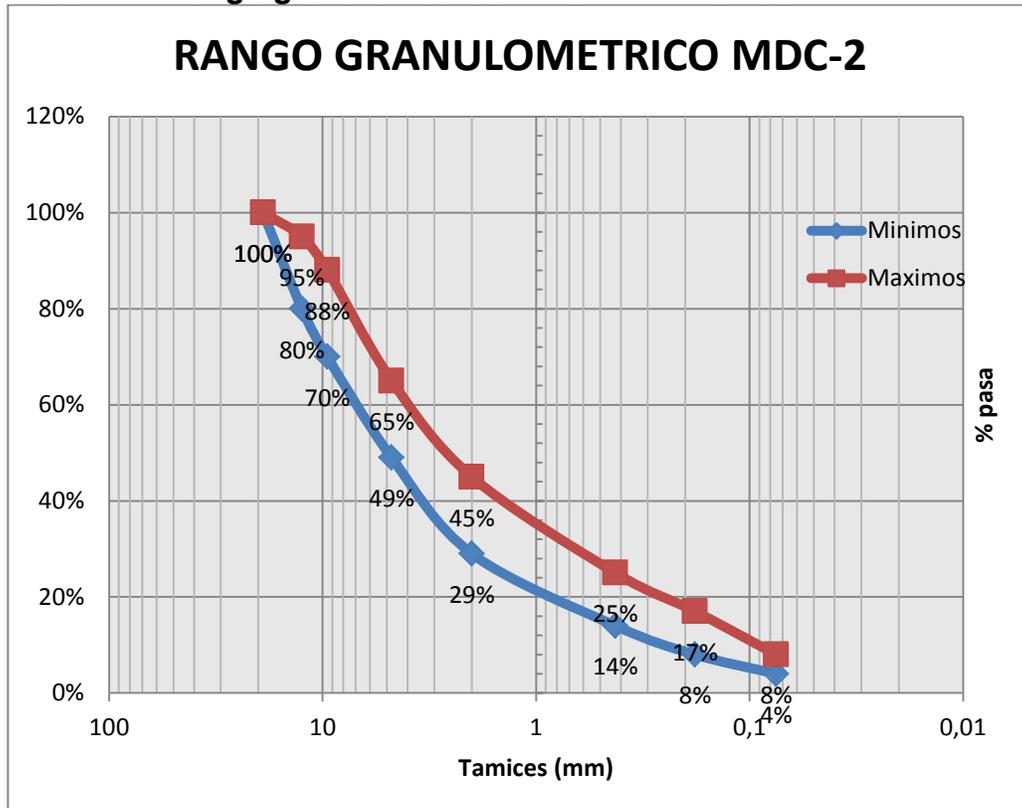
4.1 CARACTERIZACIÓN MATERIAL GRANULAR

Siguiendo la metodología es indispensable caracterizar los materiales gruesos y finos usados para la mezcla densa en caliente tipo 2.

4.1.1 Granulometría agregados gruesos y finos (INV. E-213)

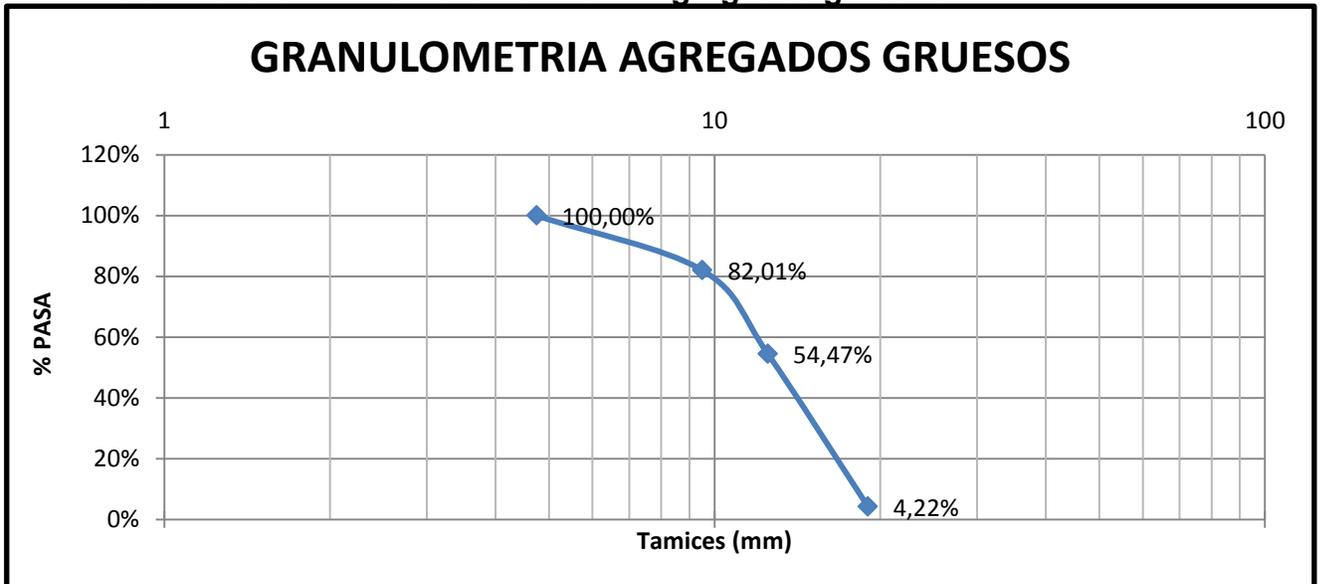
Con el fin de cumplir los requisitos del INVIAS para las normas de diseño de carreteras, se especifica los límites granulométricos, es decir, el porcentaje retenidos de masa por fracción clasificados por las aberturas de los tamices, en la figura 2 se delimita las franjas permitidas por la norma.

FIGURA 2 Rango granulométrico MDC-2 INVIAS 2007



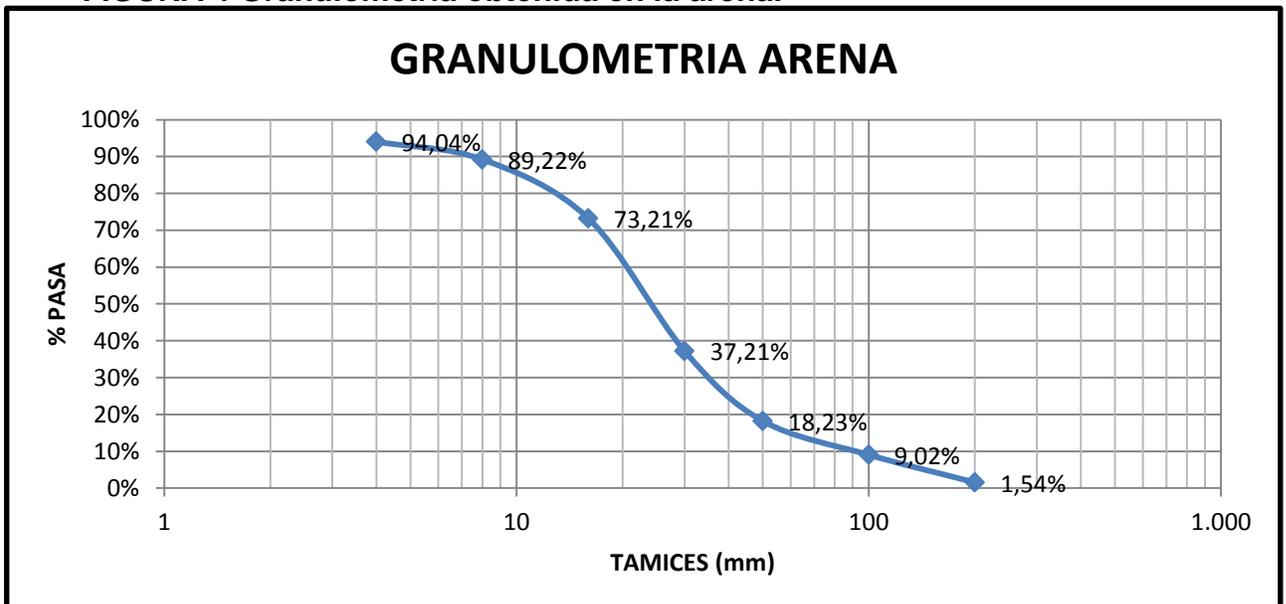
La granulometría deseada debe encontrarse dentro del área formada por las dos líneas, para ello se realizaron granulometrías a los agregados gruesos, se muestra en la figura 3, y finos, se muestra en la figura 4 la granulometría de la arena y la figura 5 la granulometría de la ceniza, ambas materiales conforman los finos.

FIGURA 3 Granulometría obtenida en agregados gruesos.



Datos en Anexo 1 Granulometría agregados gruesos.

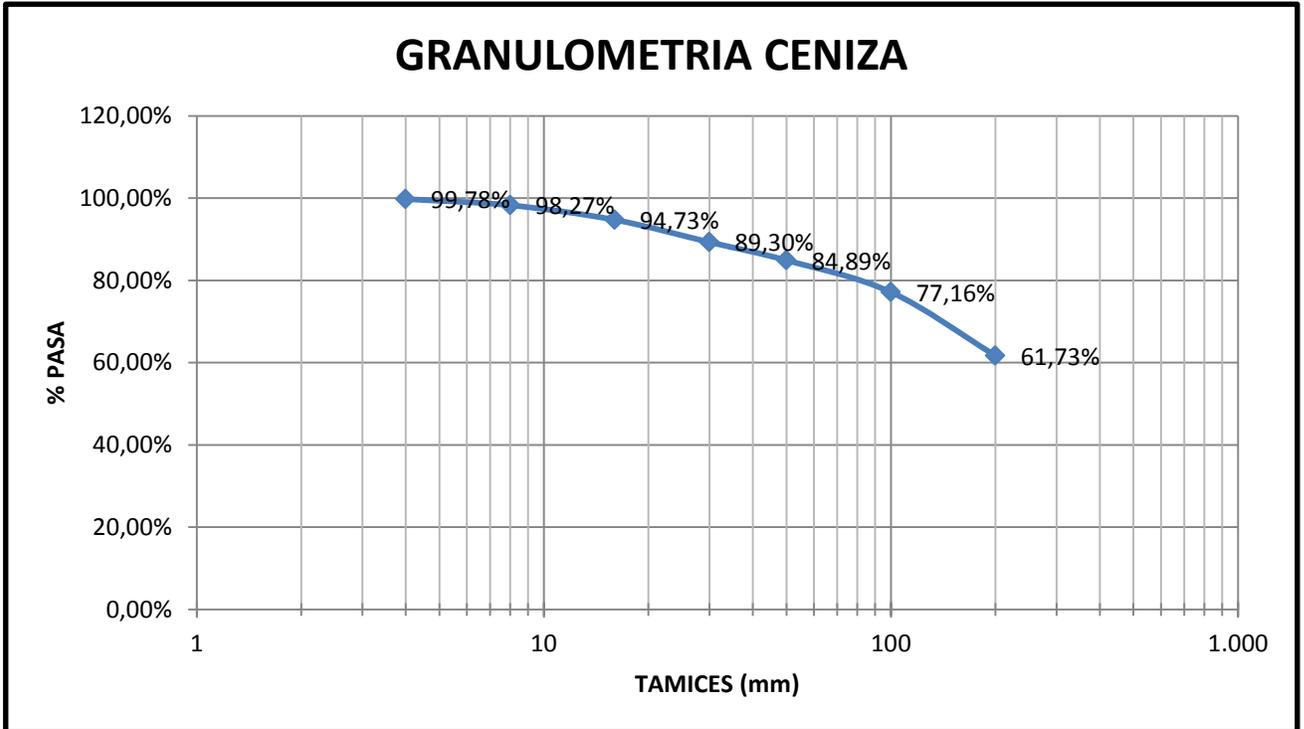
FIGURA 4 Granulometría obtenida en la arena.



Datos Anexo 2 Granulometría Arena

Para el estudio se indica que la ceniza será usada como proporción del agregado fino y como llenante, por tanto, es indispensable realizarle el ensayo de granulometría, arrojando los siguientes resultados.

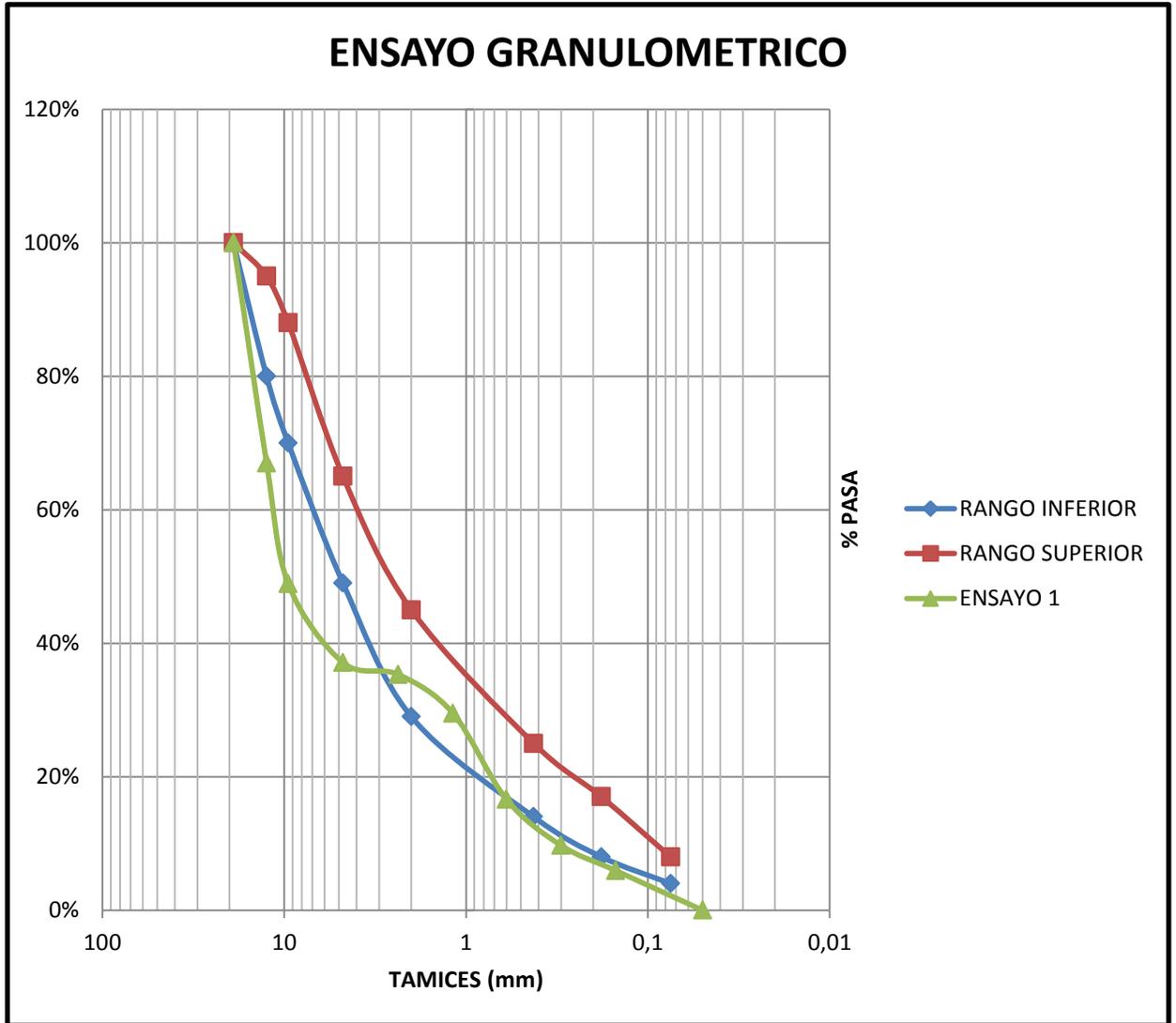
FIGURA 5 Granulometría obtenida en la ceniza.



Datos Anexo 3 Granulometría Ceniza.

A partir de los resultados anteriores, se obtuvo que con porcentaje 37.1%-62.9% de Fino- Grueso, además de un porcentaje 20.7 % -79.3 % Ceniza – Arena como porción de fino, se puede evaluar la curva granulométrica obtenida con los rangos exigidos por la norma, como se presenta en la figura 6. Datos en Anexo 4 prueba granulométrica 1, y Anexo 5 prueba granulométrica 2.

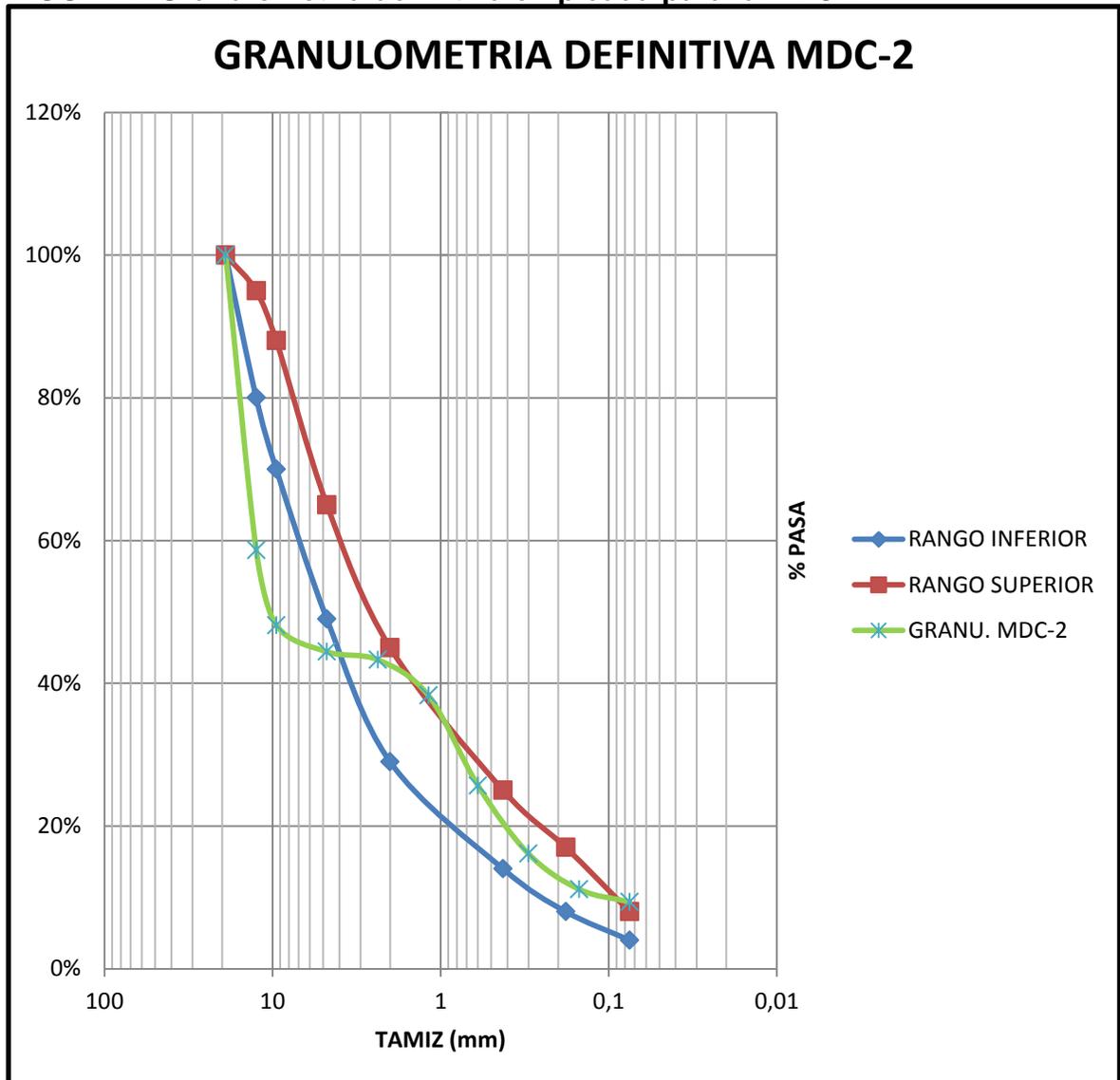
FIGURA 6 Primer ensayo granulométrico identificando limites exigidos por la norma INVIAS 2007



Porcentaje 37.1%-62.9% de Fino- Grueso, además de un porcentaje 20.7 % -79.3 % Ceniza – Arena como porción de fino.

Para cumplir con la norma fue necesario usar los porcentajes 44%-56% de Fino-Grueso, además de remover un 20% de la fracción retenida entre el tamiz $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", lo que equivale a un desperdicio del 2% y 5% del material necesario para una MDC-2, arrojando la siguiente grafica dentro de los lineamientos del INVIAS, en la figura 7 se muestra la curva granulométrica trabajada.

FIGURA 7 Granulometría definitiva empleada para la MDC-2.



Datos Anexo 6 Prueba granulométrica 3.

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

Los resultados de Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos están indicados en la tabla 10. Datos obtenidos Anexo 7 Gravedad específica agregados gruesos.

TABLA 10 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos

| DESCRIPCION | VALOR | UNIDAD |
|--|--------------|-------------------------|
| Gravedad esp. Bulk | 2.62 | g/cm³ |
| Gravedad esp. Bulk saturada y sup. Seca | 2.63 | g/cm³ |
| Gravedad esp. aparente | 2.66 | g/cm³ |
| Absorción | 0.62 | % |

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

Los resultados de Gravedad específica y absorción de la arena están indicados en la tabla 11. Datos obtenidos en Anexo 8 Gravedad específica Arena.

TABLA 11 Gravedad específica y absorción de la arena

| DESCRIPCION | VALOR | UNIDAD |
|--|--------------|-------------------------|
| Gravedad esp. Bulk | 2.62 | g/cm³ |
| Gravedad esp. Bulk saturada y sup. Seca | 2.64 | g/cm³ |
| Gravedad esp. aparente | 2.69 | g/cm³ |
| Absorción | 1.09 | % |

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

Para el desarrollo del ensayo se usó la granulometría tipo B, con el uso de 11 esferas de acero, resultados en la tabla 12. Datos obtenidos en Anexo 9 Resistencia al desgaste.

TABLA 12 Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles

| Ensayo resistencia al desgaste | |
|---------------------------------------|----------------|
| Granulometría | B |
| Masa inicial (g) | 5000.62 |
| Masa final (g) | 3774.75 |
| Desgaste % | 24.51 |

Caras fracturadas (INV. E-227)

Se obtuvo un porcentaje de 95.63% de partículas fracturadas en más de $\frac{1}{4}$ de una cara por partícula, desarrollado en una muestra retenida por encima del tamiz N°4, garantizando la unión eficiente de los agregados dentro de la mezcla asfáltica. Los datos obtenidos están en anexo 10 porcentaje caras fracturadas.

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

Se halló un índice de 14% aplanadas, junto con 29% alargadas para el agregado grueso, cumpliendo con el INVIAS y asegurando que el ligante cumpla su función correctamente. Resultados obtenidos en Anexo 11 índice de alargamiento y aplanamiento.

Equivalente de arena (INV. E-133)

Se obtuvo un equivalente de arena del 92% para el agregado fino pétreo, sin considerar la presencia de ceniza en la mezcla. Datos en anexo 12 equivalente de arena.

4.2 CARACTERIZACION ASFALTO

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

La temperatura necesaria para que el asfalto llegue a una viscosidad que permita el fácil manejo y transporte de este entre recipientes, se evalúa a partir de este ensayo arrojando una temperatura de 47°C. Datos en anexo 13 punto de ablandamiento asfalto.

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

A parte de definir la consistencia, también es posible clasificar el asfalto según las penetraciones en las cuales, se realizaron 5 pruebas descartando dos, usando las tres más cercanas en valores, por lo tanto, se obtuvo una penetración promedio de 62.3 mm, es decir, que se clasifica como asfalto 60-70. Datos en anexo 14 penetración asfalto.

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

Los resultados recibidos en punto de llama y de ignición, de 162°C y 240°C respectivamente. Datos en anexo 15 punto de ignición y llama asfalto.

Densidad Asfalto

Se obtuvo un peso específico de 1,04 g/cm³ aplicando el principio de Arquímedes y tomando los pesos secos con anterioridad. Datos en anexo 16 densidad del asfalto.

4.3 CARACTERIZACION CENIZA

Peso específico y absorción de los agregados finos (INV. E-222)

Los resultados de peso específico de la ceniza se muestran en la tabla 13. Los datos están en anexo 17 gravedad específica ceniza.

TABLA 13 Peso específico y absorción de la ceniza

| Descripción | valor | unidad |
|--|--------------|-------------------|
| Gravedad esp. Bulk | 2.01 | g/cm ³ |
| Gravedad esp. Bulk saturada y sup. Seca | 2.22 | g/cm ³ |
| Gravedad esp. aparente | 2.55 | g/cm ³ |
| Absorción | 10.52 | % |

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

Para el contenido de materia orgánica se empleó soda caustica obteniendo un resultado de 4, en la escala de Gardner, color oscuro.

4.4 RESULTADOS PRUEBA MARSHALL

Densidad bulk INV. E-734

Se obtuvo la densidad bulk de la mezcla asfáltica sumergiendo las probetas a una temperatura ambiente de 24 °C y aplicando el factor de corrección correspondiente,

los resultados se muestran en la tabla 14. Los datos obtenidos en Anexos 18, 19, 20 y 21 densidad para MDC-2 convencional y con adición de ceniza.

TABLA 14 Densidad bulk

| Densidad (g/cm³) | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| %ceniza / %asfalto | 4.5% | 5.5% | 6.5% |
| 0% | 2.150 | 2.194 | 2.233 |
| 30% | 2.364 | 2.388 | 2.376 |
| 50% | 2.413 | 2.415 | 2.392 |
| 70% | 2.383 | 2.402 | 2.386 |

Estabilidad y flujo INV. E-748

Los resultados estabilidad están en la tabla 15 y flujo en la tabla 16, en unidades del sistema internacional. Los datos obtenidos en Anexos 22, 23, 24 y 25 resistencia de MDC-2 convencional y con adición de ceniza, empleando el método Marshall.

TABLA 15 Estabilidad

| Estabilidad (Kg) | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| %ceniza/%asfalto | 4.5% | 5.5% | 6.5% |
| 0% | 529.266 | 660.694 | 747.139 |
| 30% | 1572.235 | 1346.291 | 1185.721 |
| 50% | 1835.033 | 1348.425 | 1034.641 |
| 70% | 1926.966 | 1117.425 | 806.473 |

TABLA 16 Flujo

| Flujo (mm) | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| %ceniza/%asfalto | 4.5% | 5.5% | 6.5% |
| 0% | 4.176 | 5.639 | 5.300 |
| 30% | 4.288 | 6.761 | 7.760 |
| 50% | 11.925 | 12.696 | 13.026 |
| 70% | 6.223 | 8.285 | 12.374 |

Para mayor visualización se presenta en la figura 8, 9 y 10 los resultados de las briquetas ensayadas, en relación de variación de porcentaje de asfalto y adición de ceniza.

FIGURA 8 Resultado Ensayo Marshall densidad Vs %asfalto

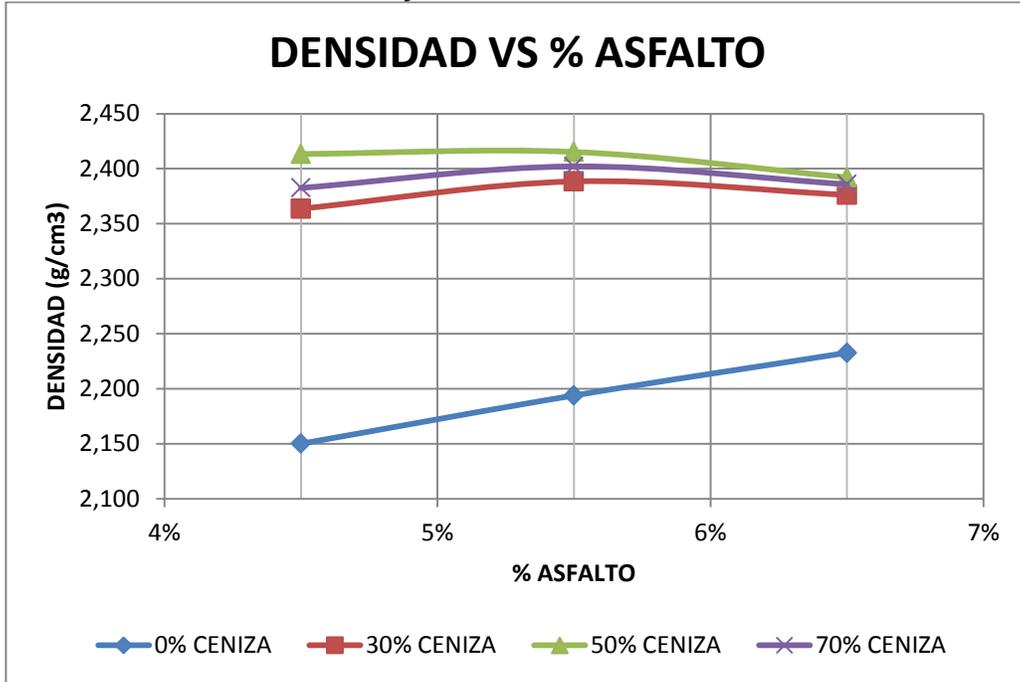


FIGURA 9 Resultado Ensayo Marshall estabilidad Vs %asfalto.

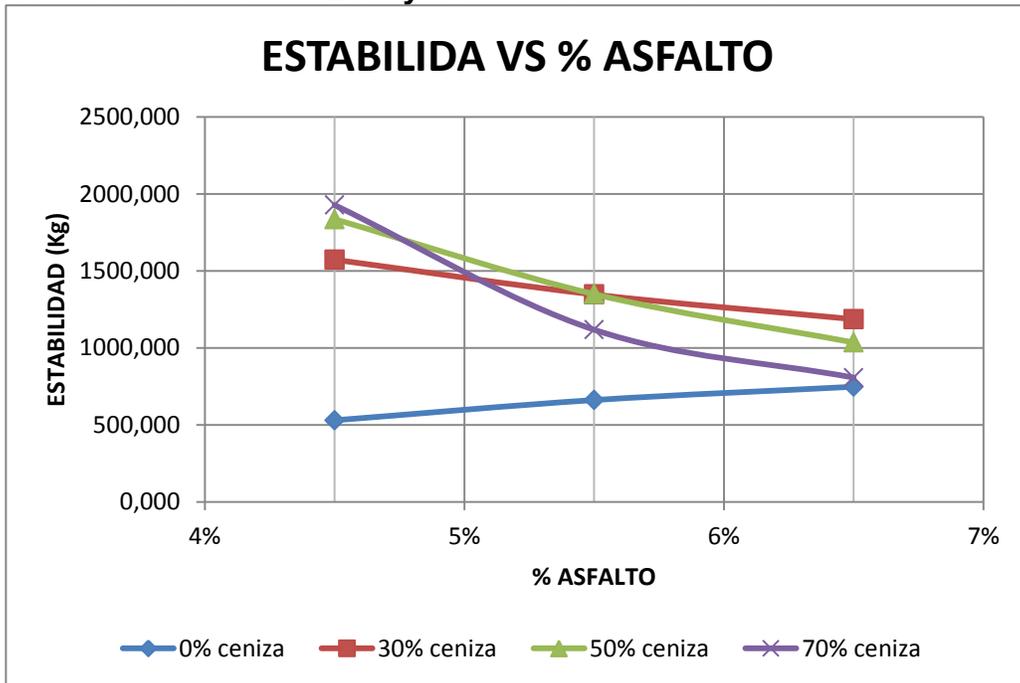
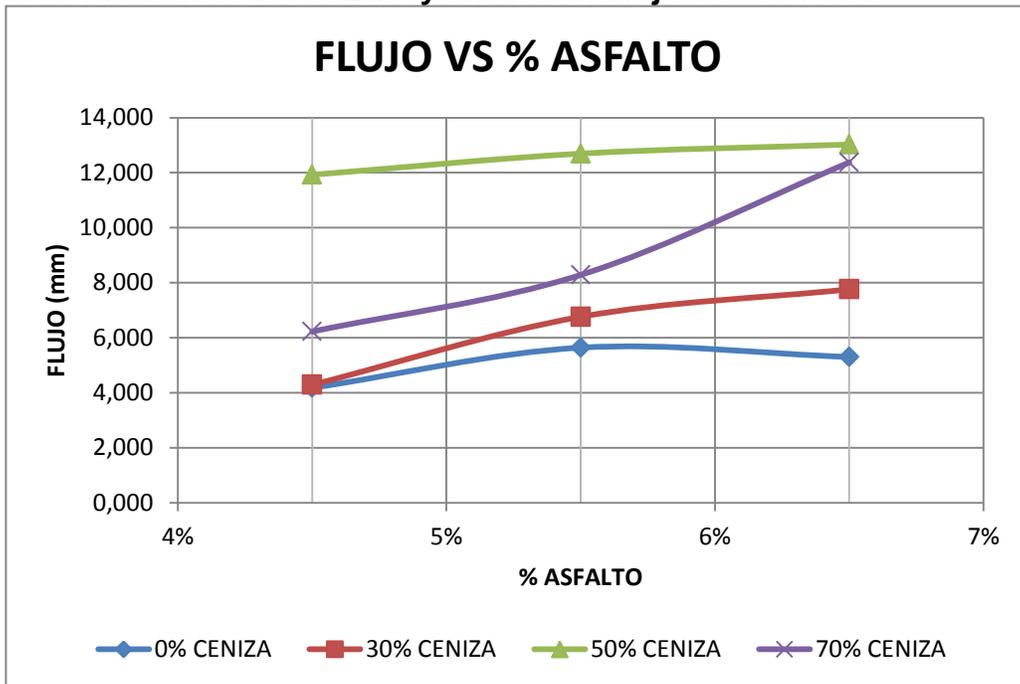


FIGURA 10 Resultado Ensayo Marshall Flujo Vs %asfalto.



5. ANALISIS DE RESULTADOS

En la elaboración de una mezcla en caliente tipo 2 MDC-2, en este caso se modifica una porción de agregado fino y el llenante mineral con ceniza proveniente de locaciones petroleras, suministradas por ECOPETROL, con el fin de desarrollar nuevas tecnologías de materiales para fortalecer el desarrollo sostenible en las infraestructuras viales.

5.1 CARACTERIZACION MATERIALES GRANULARES

Cumpliendo con la norma INVIAS-07 art. 400, especificaciones técnicas de los agregados para una mezcla densa en caliente, a poyados en el cumplimiento de la granulometría expuesta en la FIGURA 7, se observa el cumplimiento de los demás requisitos obligatorios en la tabla 17.

TABLA 17 Caracterización agregados pétreos

| ENSAYO | NORMA | REQUISITOS | | RESULTADO OBTENIDO | |
|---|-------|------------|------------|--------------------|-------------------|
| | | Rodadura | Intermedia | | |
| Granulometría de agregados gruesos y finos | E-213 | No tiene | | - | |
| Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos | E-223 | No tiene | | 2.62 | g/cm ³ |
| Gravedad específica y absorción de los agregados fino | E-222 | No tiene | | 2.62 | g/cm ³ |
| Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles | E-218 | 25% max | 35% max | 24.51 | % |
| Caras fracturadas | E-227 | > 75% | > 60% | 95.63 | % |
| Índice de aplanamiento | E-230 | 30% max | | 29 | % |
| Índice de alargamiento | E-230 | 30% max | | 14 | % |
| Equivalente de arena | E-133 | 50% min | | - | |

5.2 CARACTERIZACION CENIZA VOLANTE

El material usado para la caracterización de la ceniza volante fue filtrado por el tamiz N° 4 y se le realizaron los mismos ensayos que al agregado fino, adicionando el contenido de materia orgánica, cumpliendo con la norma INV. ART. 400, como se presenta en la tabla 18.

TABLA 18 Caracterización ceniza volante

| ENSAYO | NOR MA | REQUISITOS | | RESULTADO OBTENIDO |
|---|-----------|--------------|----------------|------------------------|
| | | Rodad ura | Interm edia | |
| Granulometría de agregados gruesos y finos | E-213 | - | - | - |
| Gravedad específica y absorción de los agregados fino | E-222 | - | - | 2.01 g/cm ³ |
| Contenido de materia orgánica | E-212 | 3 | - | 4 |

5.3 CARACTERIZACION ASFALTO

Se cumple las especificaciones del INVIAS, con el asfalto adquirido de la empresa Tecnopavimentos S.A, en la tabla 19 se comparan las especificaciones exigidas por INVIAS con los resultados obtenidos.

TABLA 19 Caracterización asfalto

| ENSAYO | NOR MA | REQUI SITOS | RESULTADO OBTENIDO |
|---|-----------|----------------|------------------------|
| | | 60-70 | |
| Punto de ablandamiento de materiales bituminosos | E-712 | - | 47°C |
| Penetración de los materiales bituminosos | E-706 | 60 a 70 | 62.3 mm |
| Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland | E-709 | min 230°C | 240°C °C |
| densidad | - | - | 1.04 g/cm ³ |

5.4 ANALISIS RESULTADOS ENSAYO PRUEBA MARSHALL

El análisis de la tabla 20 de la prueba Marshall arroja que la mayor estabilidad se presenta para el contenido de asfalto de 4.5% dentro de la mezcla y a medida que se aumenta la cantidad de ceniza remplazante de porción de fino y llenante, incrementa la estabilidad con una relación directamente proporcional, por ende, se recibe la mayor estabilidad en la adición de ceniza con el valor del 30%, pero sin tener en cuenta el flujo de la mezcla, este se presenta su mayor en mayor dominio en la proporción 50% ceniza – 50% arena, creciendo a medida que se agrega asfalto.

TABLA 20 Análisis resultados ensayo prueba Marshall

| % ceniza | % asfalto | Estabilidad (kg) | Flujo (mm) | Densidad (g/cm3) |
|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| 0% | 4.5% | 529.27 | 4.176 | 2.150 |
| 0% | 5.5% | 660.69 | 5.639 | 2.194 |
| 0% | 6.5% | 747.14 | 5.300 | 2.233 |
| 30% | 4.5% | 1572.23 | 4.288 | 2.364 |
| 30% | 5.5% | 1346.29 | 6.761 | 2.388 |
| 30% | 6.5% | 1185.72 | 7.760 | 2.376 |
| 50% | 4.5% | 1835.03 | 11.925 | 2.413 |
| 50% | 5.5% | 1348.43 | 12.696 | 2.415 |
| 50% | 6.5% | 1034.64 | 13.026 | 2.392 |
| 70% | 4.5% | 1926.97 | 5.223 | 2.383 |
| 70% | 5.5% | 1117.43 | 8.285 | 2.402 |
| 70% | 6.5% | 806.47 | 12.374 | 2.386 |

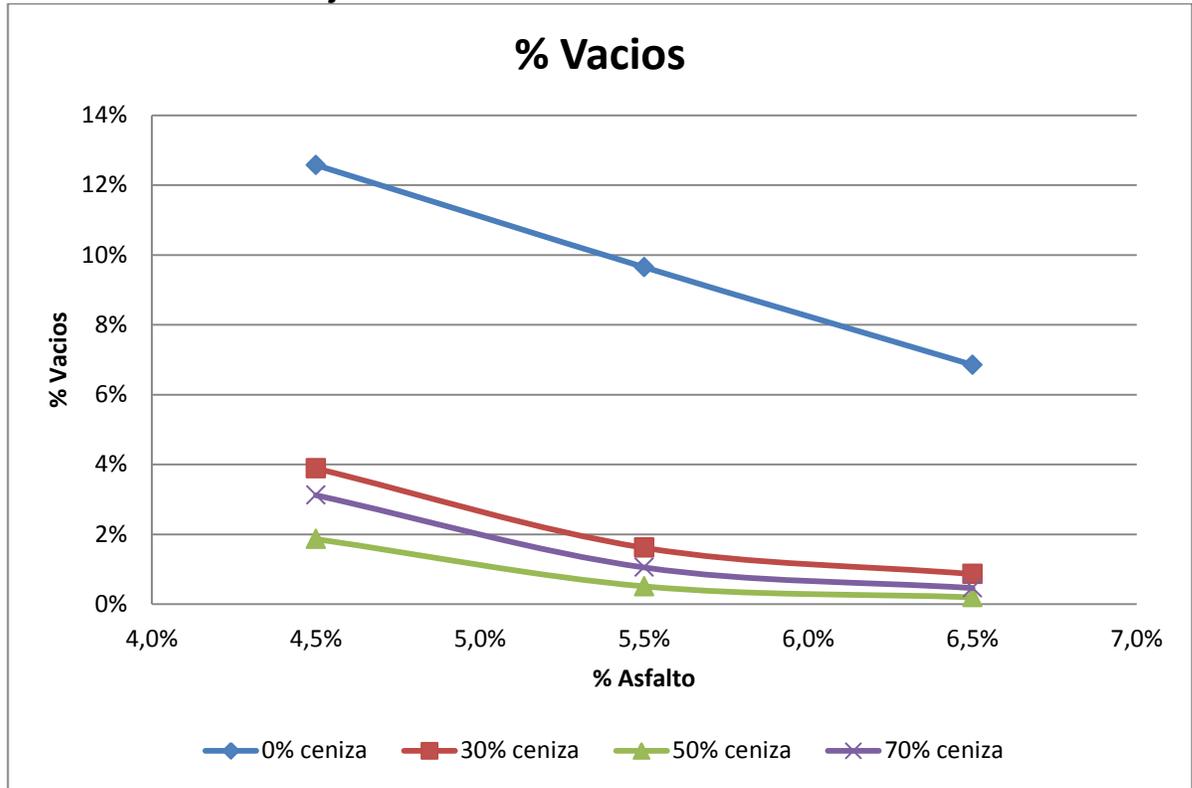
Se halló el porcentaje de vacíos en la mezcla, al obtener el peso específico de los agregados de 2.62 g/cm³, 2.54 g/cm³, 2.49 g/cm³ y 2.43 g/cm³ para la adición de ceniza de 0%, 30%, 50% y 70% respectivamente. Con el objeto de comparar los resultados con la norma INVIAS y establecer que tan rígida puede ser la mezcla, en la tabla 21 se indican los resultados.

TABLA 21 Porcentaje de vacíos en una MDC-2 modificada con ceniza volante.

| PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO (g/cm ³) | ADICION CENIZA | PORCENTAJE DE ASFALTO | | |
|---|-------------------|-----------------------|--------|--------|
| | | 4.50% | 5.50% | 6.50% |
| | 0% | 2.552 | 2.536 | 2.521 |
| | 30% | 2.475 | 2.460 | 2.446 |
| | 50% | 2.423 | 2.410 | 2.396 |
| | 70% | 2.372 | 2.359 | 2.346 |
| DENSIDAD MEZCLA (g/cm ³) | 0% | 2.156 | 2.200 | 2.239 |
| | 30% | 2.371 | 2.396 | 2.383 |
| | 50% | 2.421 | 2.423 | 2.399 |
| | 70% | 2.390 | 2.409 | 2.393 |
| % VOLUMEN ASFALTO | 0% | 8.82% | 11.00% | 13.23% |
| | 30% | 9.70% | 11.98% | 14.08% |
| | 50% | 9.90% | 12.11% | 14.18% |
| | 70% | 9.78% | 12.05% | 14.14% |
| % VOLUMEN AGREGADOS | 0% | 78.60% | 79.35% | 79.92% |
| | 30% | 86.42% | 86.41% | 85.05% |
| | 50% | 88.23% | 87.38% | 85.62% |
| | 70% | 87.10% | 86.90% | 85.40% |
| % VOLUMEN VACIOS | 0% | 12.57% | 9.65% | 6.85% |
| | 30% | 3.89% | 1.61% | 0.86% |
| | 50% | 1.86% | 0.51% | 0.20% |
| | 70% | 3.12% | 1.05% | 0.46% |
| % VACIOS AGREGADOS | 0% | 21.40% | 20.65% | 20.08% |
| | 30% | 13.58% | 13.59% | 14.95% |
| | 50% | 11.77% | 12.62% | 14.38% |
| | 70% | 12.90% | 13.10% | 14.60% |
| % VACIOS LLENOS DE ASFALTO | 0% | 41.23% | 53.27% | 65.88% |
| | 30% | 71.40% | 88.12% | 94.23% |
| | 50% | 84.17% | 95.96% | 98.63% |
| | 70% | 75.81% | 91.97% | 96.84% |

Para mayor entendimiento en la Figura 11 se muestra los porcentaje de vacíos, donde se ve que el 4.5% de asfalto y la adición de ceniza del 30% y 70%, cumple con las especificaciones del INVIAS de 3% a 5% de porcentaje de vacíos para la rodadura con un Nivel de trafico 2.

FIGURA 11 Porcentaje de vacíos en una MDC-2



5.5 EVALUACION ECONOMICA DE LA MDC-2 CON ADICION DE CENIZA COMO PROPOCION DE AGREGADO FINO Y LLENANTE MINERAL.

La fabricación de la MDC-2 con adición de ceniza, empleando los agregados naturales mencionados con anterioridad, presenta inconvenientes como la pérdida del 20% de fracción retenida entre el tamiz $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ", lo que equivale a un desperdicio del 8% y 12% del material necesario para la elaboración de la mezcla.

Para definir la viabilidad se utilizaron los precio del agregado fino de \$ 45.000 y de ceniza del \$ 25.000 por metro cubico (m3) de material, conociendo que el precio de producción de MDC-2 convencional oscila entre unos \$ 220.000, además del costo del galón de asfalto por \$ 6.500. En la tabla 22 se expone la evaluación económica de la mezcla estableciendo importancia por el desperdicio producido para obtener una gradación que satisficiese los requisitos del INVIAS.

TABLA 22 Evaluación económica de la MDC-2 con adición de ceniza como proporción de fino y llenante mineral

| Precio Elaboración MDC-2 con un porcentaje de asfalto del 4.5% | | | | | | | |
|---|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Adición ceniza | Arena | % Material requerido | % Material perdido | Total | Masa (Kg) | Volumen (m3) | Valor parcial |
| 0% | | 45.59% | 4.97% | 50.56% | 1137.63 | 0.434 | \$ 19,539.39 |
| 30% | | 29.41% | 3.21% | 32.62% | 736.438 | 0.281 | \$ 12,648.75 |
| 50% | | 22.00% | 2.40% | 24.40% | 562.231 | 0.215 | \$ 9,656.64 |
| 70% | | 13.20% | 1.44% | 14.64% | 333.145 | 0.127 | \$ 5,721.95 |
| Adición ceniza | Ceniza | % Material requerido | | Masa (Kg) | Volumen (m3) | Valor parcial | |
| 0% | | 0% | | 0 | 0 | \$ - | |
| 30% | | 12.61% | | 298.006 | 0.148 | \$ 3,706.54 | |
| 50% | | 21.01% | | 506.971 | 0.252 | \$ 6,305.61 | |
| 70% | | 29.41% | | 700.936 | 0.349 | \$ 8,718.10 | |
| Adición ceniza | Grava | % Material requerido | | Masa (Kg) | Volumen (m3) | Valor parcial | |
| 0% | | 53.48% | | 1203.30 | 0.459 | \$ 20,667.37 | |
| 30% | | 53.48% | | 1203.30 | 0.459 | \$ 20,667.37 | |
| 50% | | 53.48% | | 1203.30 | 0.459 | \$ 20,667.37 | |
| 70% | | 53.48% | | 1203.30 | 0.459 | \$ 20,667.37 | |
| Adición ceniza | Asfalto | % Material requerido | | Masa (Kg) | Volumen (gl) | Valor parcial | |
| 0% | | 4.5% | | 109.856 | 27.905 | \$ 181,381.51 | |
| 30% | | 4.5% | | 106.380 | 27.022 | \$ 175,641.94 | |
| 50% | | 4.5% | | 108.585 | 27.582 | \$ 179,282.57 | |
| 70% | | 4.5% | | 107.235 | 27.239 | \$ 177,053.61 | |
| 0% | Precio agregados pétreos y cenizas | | | | | | \$ 40,206.76 |
| 30% | | | | | | | \$ 37,022.66 |
| 50% | | | | | | | \$ 36,629.62 |
| 70% | | | | | | | \$ 35,107.42 |
| 0% | Precio MDC-2 | | | | | | \$ 221,588.27 |
| 30% | | | | | | | \$ 212,664.60 |
| 50% | | | | | | | \$ 215,912.19 |
| 70% | | | | | | | \$ 212,161.04 |

En la anterior tabla se muestra la viabilidad económica de usar adición de ceniza como se observa el precio de una MDC-2 con 30% adición de ceniza como proporción del agregado fino y como llenante mineral, y 4.5% de contenido de asfalto, se obtiene una utilidad cercana a los \$ 7.000 por m³ de mezcla en comparación con una MDC-2 fabricada convencionalmente.

CONCLUSIONES

Agregados pétreos:

Se fabricaron setenta y dos (72) briquetas por el método Marshall, variando el contenido de asfalto y la adición de ceniza como proporción de agregado fino y llenante mineral. Para ello fue necesario la implementación de tres ensayos granulométricos con el fin de realizar mezclas asfálticas cumpliendo los índices de calidad, usando los porcentajes mencionados 21% finos 79% grueso, 50% fino 50% grueso y 44% fino 56% grueso, se determinó que la última relación indicada junto con una reducción de un 20% de la fracción que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y es retenida por encima del tamiz $\frac{1}{2}$ " , satisfacía la franja granulométrica exigida por la norma INVIAS 2007 para una MDC-2.

El objetivo de reducir un 20% de la fracción citada es disminuir los cambios bruscos posibles en la curva granulométrica, ya que en las especificaciones es aceptable máximo un cambio rudo respecto a su gradación.

Los materiales empleados obtenidos del departamento de Santander para la elaboración de las briquetas, cumplen con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, para lograr resultados de estabilidad y flujo convincentes y respaldados.

Ceniza Volante:

El uso de las cenizas se basa en la adición de este material como proporción de agregado fino para las partículas que pasan a través del tamiz N° 4 y es considerado llenante mineral al pasar por el tamiz N° 200. Al obtener los resultados de granulometría se observa que más del 60% del material pasa por el tamiz N° 200, considerado llenante mineral, por ende, al adicionar mayor cantidad de ceniza como proporción de fino y llenante mineral aseguramos mayor adhesión entre las partículas interactuantes, además de garantizar la reducción de vacíos de aire en la mezcla en comparación con una MDC-2 realizada de manera convencional.

Mezcla Asfáltica:

El ensayo de estabilidad y flujo, empleando el método de Marshall, realizado a las briquetas, indica que el porcentaje óptimo de asfalto del 4.5%, junto con adición de

ceniza volante del 30%, superando los requisitos mínimos de la norma I.N.V –450, cumple con los criterios para un nivel de tránsito 2 y 3.

El flujo de la mezcla tiene tendencia a incrementar a medida que se aumentaba el porcentaje de asfalto al otorgar mayor capacidad de deformación a la mezcla, obteniendo una relación directamente proporcional, por el contrario la relación que presenta el flujo con la adición de ceniza se asemeja a una función exponencial con límites máximos cercanos al 50% de adición de ceniza.

La mayor concentración de estabilidad de la mezcla se ubica con relevancia en los porcentajes de asfaltos del 4.5%, mientras que los porcentajes de aditivos de cenizas no tuvieron mucha trascendencia en los resultados de estabilidad, sin negar la mejora de las briquetas modificadas ante las briquetas fabricadas de manera convencional.

La densidad de las probetas de mezclas asfálticas tuvo varianza del 11%, identificando que la densidad es directamente proporcional al aumento de porcentaje de asfalto como a la adición de ceniza, debido a disminución de vacíos en la mezcla con la ceniza como llenante mineral y el asfalto al colmar los espacios libres que las partículas de mayor tamaño no pueden alcanzar.

El porcentaje de vacíos satisface la norma INVIAS para el 30% y 70% de adición de ceniza, con un porcentaje del 4.5% de asfalto, estando en los límites del 3% y 5% de porcentaje de vacíos en la mezcla, por lo tanto, es una mezcla que no es totalmente rígida, pero tampoco es frágil.

La viabilidad económica arrojó disminución de costos en la producción de un metro cúbico de un MDC-2, cercana a los \$ 7.000, para una mezcla con adición del 30% de ceniza y 4.5% de asfalto, comparándolo con la elaboración de MDC-2 convencional en el mercado colombiano, esto hace del uso de la ceniza una tecnología innovadora y llamativa, al ofrecer para futuros proyectos, obras sostenibles por ser amigables con el medio ambiente.

Se recomienda realizar estudios en mezclas asfálticas densas en caliente modificadas con ceniza, enfocados a ensayos reológicos para determinar de la deformación permanente, envejecimiento de la carpeta asfáltica y fatiga en la rodadura.

BIBLIOGRAFIA

ASPHALT INSTITUTE, College Park (Maryland). Manual del asfalto... Traducido por Manuel Velázquez... Con la colaboración de Productos Asfálticos, S.A. (Proas). Bilbao : Urmo. 1972. 477 páginas.

ASTM capitulo D, American Section of the International Association for Testing Materials, definiciones. 2006.

DIAZ C, L. Y RIVERA S, J., Comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza de palma de aceite, tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.

I.N.V. E-748, Instituto Nacional de Vías, Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Método Marshall. 2007.

INVIAS, Especificación Técnica, Artículo 450 – 07.

KRAEMER, Carlos, et al. Ingeniería de Carreteras. Volumen II. España: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A, 2004. 568 paginas.

MINAYA GONZÁLES, Silene y HORDÓÑEZ HUAMÁN, Abel. Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Edición 2. Lima, Perú : Instituto de la Construcción y Gerencia. 2006. 487 paginas. Disponible en <<http://www.construccion.org.pe>>.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Edición 2. Bogotá, D.C : Universidad Católica de Colombia. 2002. 733 páginas.

NTC 3493, Norma Técnica Colombiana, cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland. 1993.

OROZCO M, G. y MURILLO C, J. Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras, tesis

de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.

REYES LIZCANO, Fredy. Diseño Racional de Pavimentos. Bogotá, D.C : Escuela Col. De Ingeniería. 2003. 584 páginas.

REYES, Fredy y Figueroa, Ana. Uso de los desechos plásticos en las mezclas asfálticas. Bogotá, D.C : Pontificia Universidad Javeriana. 2008. 103 páginas.

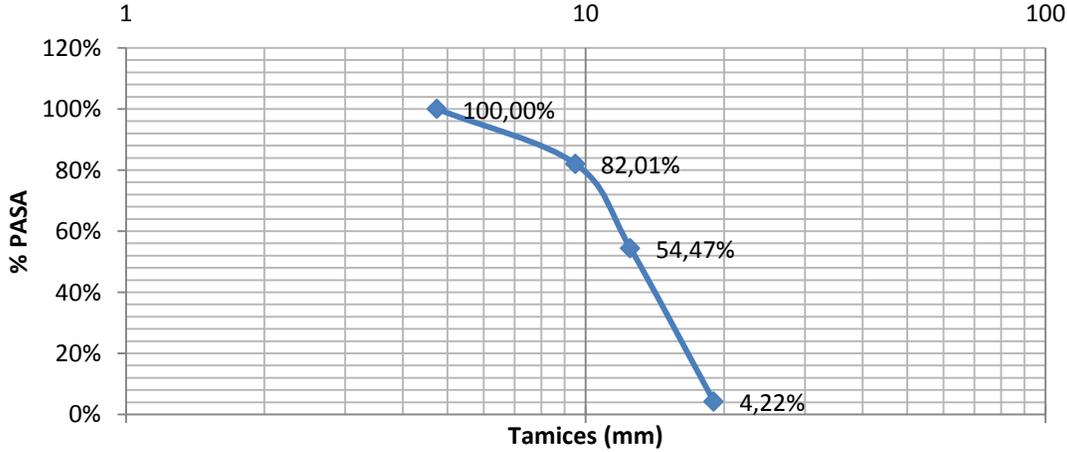
REYES, O. J., REYES, F. A., Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de ceniza, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, No. 15, Noviembre, 2005.

REYES, O. J., TRONCOSO, R. J., CAMACHO, T. J., Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de ceniza volante, Ingeniería y Universidad, Vol. 10, No. 1, Enero, 2006.

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.

SERRANO GUZMÁN, María F. Y VIVAS MEJÍA, Víctor. Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con limadura metálica. [en línea] 2011; 5 páginas. [consultado 12 Enero, 2013]. Disponible en <<http://www.redisa.uji.es/artSim2011/TratamientoYValorizacionDeResiduos/Comportamiento%20mec%C3%A1nico%20de%20mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20limadura%20met%C3%A1lica.pdf>>.

ANEXOS

| ANEXO 1 GRANULOMETRÍA PARA AGREGADOS GRUESOS | | | | |
|---|----------|------------|---|-----------------|
|  <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">Universidad Pontificia Bolivariana</p> <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">SECCIONAL BUCARAMANGA</p> </div> | | | ANEXO 1 | |
| | | | FECHA DEL ENSAYO Octubre 2012 | |
| | | | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO María F. Serrano | |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | | | ID 126075 127557 | |
| NOMBRE DEL ENSAYO Granulometría para agregados Gruesos | | | NORMA: INV. E-213 | |
| TOMA DE DATOS | | | | |
| RETENCION | | | | % PASA TOTAL |
| TAMIZ (pulg) | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | |
| 3/4" | 289.03 | 4.22% | 4.22% | 95.78% |
| 1/2" | 3440 | 50.24% | 54.47% | 45.53% |
| 3/8" | 1885.77 | 27.54% | 82.01% | 17.99% |
| N°4 | 1231.72 | 17.99% | 100.00% | 0.00% |
| TOTAL | 6846.52 | 100.00% | - | - |
| GRAFICA GRANULOMETRICA | | | | |
| <div style="border: 2px solid black; padding: 10px;"> <h3 style="text-align: center; margin: 0;">GRANULOMETRIA</h3>  <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">Tamices (mm)</p> </div> | | | | |
| OBSERVACIONES | | | | |
| Como el material granular Grueso (arena) Solo es lo retenido por encima del tamiz N° 4 | | | | |

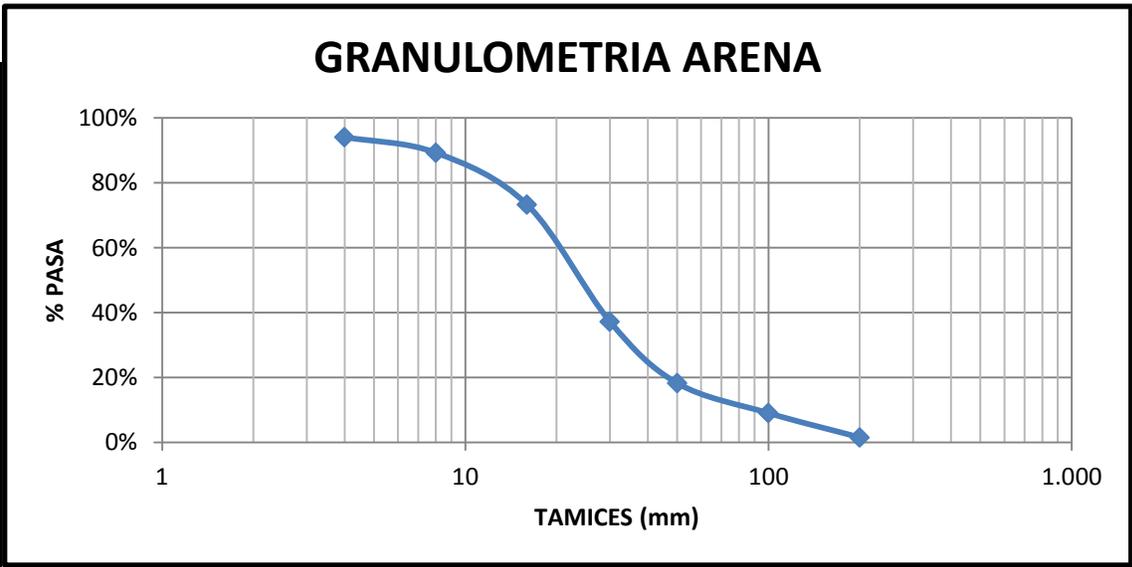
| | |
|---|---|
| ANEXO 2 GRANULOMETRIA PARA AGREGADOS FINOS | |
|  <p style="font-size: 24pt; font-weight: bold; margin: 0;">Universidad Pontificia Bolivariana</p> <p style="font-weight: bold; margin: 0;">SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO 2 |
| | FECHA DEL ENSAYO <p style="text-align: right; margin: 0;">9 Octubre 2012</p> |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO <p style="text-align: right; margin: 0;">María Fernanda Serrano Guzmán</p> |

| | |
|---|------------------------|
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
|---|------------------------|

| | |
|--|----------------------|
| NOMBRE DEL ENSAYO <p style="text-align: right; margin: 0;">Granulometría para agregados finos</p> | NORMA: INV. E-213 |
|--|----------------------|

| TOMA DE DATOS | | | | | |
|---------------|----------|------------|---------|--------------|---------------------------------|
| RETENCION | | | | % PASA TOTAL | MF= 2.79 % finos = 6.96% |
| TAMIZ N° | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | | |
| 4 | 215.25 | 5.96% | 5.96% | 94.04% | |
| 8 | 173.8 | 4.81% | 10.78% | 89.22% | |
| 16 | 578.18 | 16.02% | 26.79% | 73.21% | |
| 30 | 1299.44 | 36.00% | 62.79% | 37.21% | |
| 50 | 685.33 | 18.98% | 81.77% | 18.23% | |
| 100 | 332.38 | 9.21% | 90.98% | 9.02% | |
| 200 | 270.11 | 7.48% | 98.46% | 1.54% | |
| FONDO | 47.33 | 1.31% | 99.77% | 0.23% | |
| TOTAL | 3610 | 100.00% | - | - | |

GRAFICA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES

Como el material granular fino (arena) no formará parte del llenante mineral todo lo que pase por el tamiz N° 100 será rechazado, por ello se omiten los resultados del fondo en los cálculos

ANEXO 3 GRANULOMETRIA CENIZA



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**
SECCIONAL BUCARAMANGA

ANEXO 3

FECHA DEL ENSAYO
2 Octubre 2012

DIRECTOR (A) DEL PROYECTO
María Fernanda Serrano Guzmán

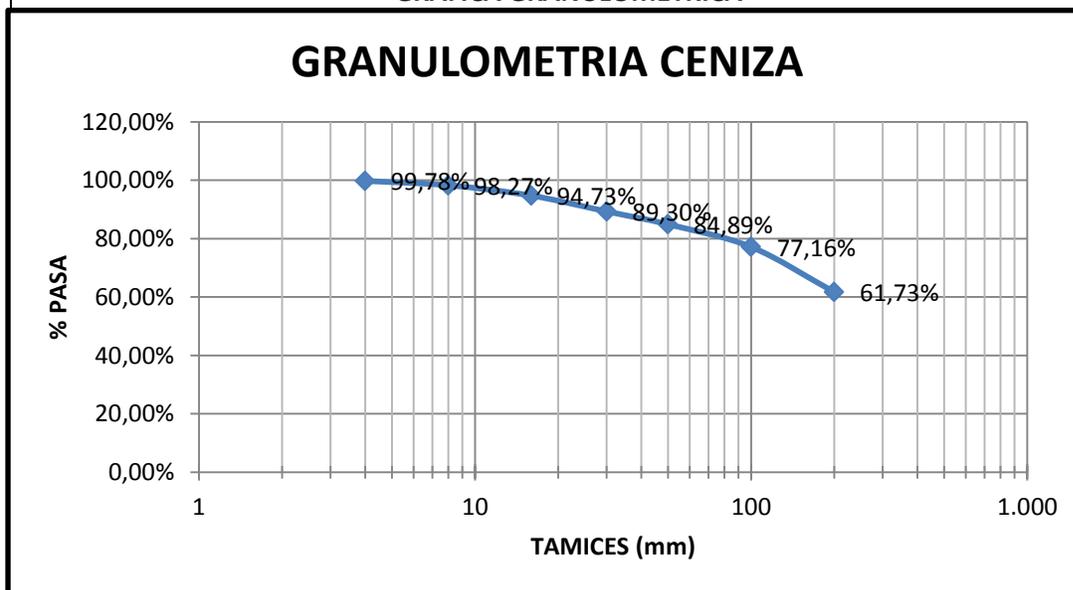
ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo ID 126075
Edward Andres Ayala Robayo 127575

NOMBRE DEL ENSAYO Granulometría para cenizas **NORMA:** INV.E-213

TOMA DE DATOS

| RETENCION | | | | % PASA TOTAL | MF= 0.56 |
|-----------|----------|------------|---------|-----------------|----------|
| TAMIZ N° | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | | |
| 4 | 1.78 | 0.22% | 0.22% | 99.78% | |
| 8 | 12.11 | 1.51% | 1.73% | 98.27% | |
| 16 | 28.4 | 3.54% | 5.27% | 94.73% | |
| 30 | 43.53 | 5.43% | 10.70% | 89.30% | |
| 50 | 35.43 | 4.42% | 15.11% | 84.89% | |
| 100 | 62.01 | 7.73% | 22.84% | 77.16% | |
| 200 | 123.802 | 15.43% | 38.27% | 61.73% | |
| FONDO | 495.208 | 61.73% | 100.00% | 0.00% | |
| TOTAL | 802.27 | 100.00% | - | - | |

GRAFICA GRANULOMETRICA



OBSERVACIONES

En el actual ensayo se omitió tanto lo retenido por tamiz de 3/8" (no será considerado agregado fino según la especificación INV. Del art. 450) y lo que pasa por el tamiz N°100 (este será usado como llenante mineral).

| ANEXO 4 GRANULOMETRIA MDC-2 PRUBEBA 1 | | | | | | |
|--|----------|------------|---------------------------|--------------|--|----------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | | | ANEXO | | 4 | |
| | | | FECHA DEL ENSAYO | | 10 Octubre | 2012 |
| | | | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán | |
| | | | ESTUDIANTES: | | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | | NORMA: | | | |
| Granulometría para MDC-2 Prueba 1 | | | INV. E-213 | | | |
| TOMA DE DATOS | | | | | | |
| RETENCION | | | | % PASA TOTAL | Mo lavada (Kg)= | 10427.11 |
| TAMIZ (pulg) | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | | | |
| 3/4" | 0 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | MF = | 4.66 |
| 1/2" | 3440 | 32.99% | 32.99% | 67.01% | | |
| 3/8" | 1885.77 | 18.09% | 51.08% | 48.92% | | |
| N°4 | 1231.72 | 11.81% | 62.89% | 37.11% | | |
| N°8 | 185.91 | 1.78% | 64.67% | 35.33% | | |
| N°16 | 606.58 | 5.82% | 70.49% | 29.51% | | |
| N°30 | 1342.97 | 12.88% | 83.37% | 16.63% | | |
| N°50 | 720.76 | 6.91% | 90.28% | 9.72% | | |
| N°100 | 394.39 | 3.78% | 94.06% | 5.94% | | |
| N°200 | 619.01 | 5.94% | 100.00% | 0.00% | | |
| TOTAL | 10427.11 | 100.00% | - | - | | |
| OBSERVACIONES | | | | | | |
| <p>Se omitió el peso retenido en el tamiz 3/4" de acuerdo a las especificaciones técnicas del INVIAS del Art. 450, se usó una proporción de 37% de finos y 63% de gruesos, en la cantidad de finos un 30%-70% ceniza-arena respectivamente, a parte en la porción del tamiz fondo ya está agregado la cantidad de llenante perdido en el lavado.</p> | | | | | | |

| ANEXO 5 GRANULOMETRIA MDC-2 PRUEBA 2 | | | | | | | |
|--|----------|------------|---------|-----------------------------------|---|--|------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | | | | ANEXO | | 5 | |
| | | | | FECHA DEL ENSAYO | | 17 Octubre 2012 | |
| | | | | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán | |
| | | | | ESTUDIANTES: | | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | | | Granulometría para MDC-2 prueba 2 | | NORMA: | INV. E-213 |
| TOMA DE DATOS | | | | | | | |
| RETENCION | | | | % PASA TOTAL | Mo sin lavar (Kg)= | 3894.69 | |
| TAMIZ (pulg) | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | | | | |
| 3/4" | 0 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | Mo lavada (Kg)= | 3599.8 | |
| 1/2" | 1494.44 | 38.71% | 38.71% | 61.29% | | | |
| 3/8" | 341.86 | 8.86% | 47.57% | 52.43% | | | |
| N°4 | 120.47 | 3.12% | 50.69% | 49.31% | | | |
| N°8 | 48.07 | 1.25% | 51.94% | 48.06% | | | |
| N°16 | 214.06 | 5.55% | 57.48% | 42.52% | se presentó una pérdida de material del = | 0.89% | |
| N°30 | 538.63 | 13.95% | 71.43% | 28.57% | | | |
| N°50 | 408.10 | 10.57% | 82.01% | 17.99% | | | |
| N°100 | 212.31 | 5.50% | 87.51% | 12.49% | | | |
| N°200 | 75.91 | 1.97% | 89.47% | 10.53% | MF = | 4.87 | |
| Fondo | 406.37 | 10.53% | 100.00% | 0.00% | | | |
| TOTAL | 3860.21 | 100.00% | - | - | | | |
| OBSERVACIONES | | | | | | | |
| <p>Se omitió el peso retenido en el tamiz 3/4" de acuerdo a las especificaciones técnicas del INVIAS del Art. 450, se usó una proporción de 50% de finos y 50% de gruesos, en la cantidad de finos un 30%-70% ceniza-arena respectivamente, a parte en la fracción del tamiz fondo ya está agregado la cantidad de llenante perdido en el lavado</p> | | | | | | | |

| ANEXO 6 GRANULOMETRIA MDC-2 PRUEBA 3 | | | | | | | |
|---|----------|------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | | | | ANEXO | | 6 | |
| | | | | FECHA DEL ENSAYO | | 19 Octubre | 2012 |
| | | | | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán | |
| ESTUDIANTES: | | | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | | ID | 126075 | |
| | | | Edward Andres Ayala Robayo | | | 127575 | |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | | | NORMA: | | | |
| Granulometría para MDC-2 prueba 3 | | | | INV. E-213 | | | |
| TOMA DE DATOS | | | | | | | |
| RETENCION | | | | % PASA TOTAL | Mo sin lavar(g)= | | |
| TAMIZ (pulg) | PESO (g) | PORCENTAJE | % TOTAL | | | | |
| 3/4" | 0 | 0.00% | 0.00% | 100.00% | | 4012.31 | |
| 1/2" | 1740.29 | 43.89% | 43.89% | 56.11% | | | |
| 3/8" | 398.1 | 10.04% | 53.93% | 46.07% | Mo | | |
| N°4 | 140.28 | 3.54% | 57.46% | 42.54% | lavado(g)= | 3674.19 | |
| N°8 | 42.63 | 1.08% | 58.54% | 41.46% | | | |
| N°16 | 189.85 | 4.79% | 63.33% | 36.67% | | | |
| N°30 | 477.69 | 12.05% | 75.37% | 24.63% | % perdido | 1.17% | |
| N°50 | 361.93 | 9.13% | 84.50% | 15.50% | | | |
| N°100 | 188.29 | 4.75% | 89.25% | 10.75% | | | |
| N°200 | 67.33 | 1.70% | 90.95% | 9.05% | MF = | 5.26 | |
| Fondo | 358.95 | 9.05% | 100.00% | 0.00% | | | |
| TOTAL | 3965.34 | 100.00% | - | - | | | |
| OBSERVACIONES | | | | | | | |
| <p>Se omitió el peso retenido en el tamiz 3/4" de acuerdo a las especificaciones técnicas del INVIAS del Art. 450, se usó una proporción de 44% de finos y 56% de gruesos, en la cantidad de finos un 30%-70% ceniza-arena respectivamente, a parte en la fracción del tamiz fondo ya está agregado la cantidad de llenante perdido en el lavado, retirando el 20% de la fracción del tamiz de 1/2"</p> | | | | | | | |

ANEXO 8 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS

| | | |
|--|--|-------------------------------|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO | 8 |
| | FECHA DEL ENSAYO | 12 Octubre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | Gravedad específica y absorción de los agregados finos | NORMA: INV.E-223 |

TOMA DE DATOS

| Peso | (g) | Nomenclatura |
|------------------|--------|--------------|
| arena SSS | 500 | S |
| Pic+ arena +agua | 928.9 | C |
| Picnómetro +agua | 617.97 | B |
| arena seca | 494.59 | A |

CALCULOS

| | | |
|------------------------------------|-------------------------------|---|
| $Gsb = A/(B+S-C) =$ | 2.62 g/cm ³ | Gravedad esp. Bulk |
| $Gsb_{SSS} = S/(B+S-C) =$ | 2.64 g/cm ³ | Gravedad esp. Bulk saturada y sup. Seca |
| $Gsa = A/(B+A-C) =$ | 2.69 g/cm ³ | Gravedad esp. aparente |
| $\% \text{ Absorción} = (S-A)/A =$ | 1.09 % | Absorción |

ANEXO 9 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 1 1/2" POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

| | |
|--|---|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO 9 |
| | FECHA DEL ENSAYO 19 Octubre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 1 1/2" por medio de la máquina de los ángeles | NORMA: INV.E-218 |

TOMA DE DATOS

Tipo de Granulometría: B

| Tamiz | | Masa (g) |
|-------|----------|----------|
| Pasa | Retenido | |
| 3/4" | 1/2" | 2500.02 |
| 1/2" | 3/8" | 2500.6 |

masa después del lavado tamiz N° 12
3774.75 g

% desgaste 24.51%

| ANEXO 10 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS | | | |
|--|--|--|-------------------------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | N° DE ENSAYOS | | 1 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 8 Octubre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | | NORMA: |
| Porcentaje de Caras Fracturadas | | | INV.E-227 |

| TOMA DE DATOS | | | | |
|---------------|-------------|--------------|---------|--|
| Retenido | Peso (g) | | | Porcentaje Caras = 95.63% Fracturadas |
| TAMIZ (pulg) | Fracturadas | No fractura. | Dudosas | |
| 3/4" | 250.6 | 0 | 37.9 | |
| 1/2" | 3201.9 | 149.9 | 94.1 | |
| 3/8" | 1812.9 | 40.3 | 34.4 | |
| N° 4 | 1200.2 | 19.1 | 14.6 | |
| TOTAL | 6465.6 | 209.3 | 181 | |

| ANEXO 11 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO | | | |
|--|--------------------------------|----|----------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO | | 11 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 9 Octubre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | ID | 126075 |
| | Edward Andres Ayala Robayo | | 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | | NORMA: |
| Índice de alargamiento y aplanamiento | | | INV.E-230 |

| TOMA DE DATOS | | | | | | |
|------------------------|-----------|--------------|-----------|------------|------------|------------|
| INDICE DE APLANAMIENTO | | | | | | |
| Retenido | Peso (g) | | | Índice | | |
| TAMIZ (pulg) | aplanadas | No aplanada. | Fracciona | Σ Fracción | Fracción | Σ Fracción |
| 3/4" | 75.8 | 212.7 | 288.5 | 288.5 | 26% | - |
| 1/2" | 250.18 | 3194.2 | 3444.38 | 3732.88 | 7% | - |
| 3/8" | 196 | 1690.92 | 1886.92 | 5619.8 | 10% | - |
| N° 4 | 468.31 | 763.91 | 1232.22 | 6852.02 | 38% | - |
| TOTAL | 990.29 | 5861.73 | 6852.02 | - | - | 14% |
| Aplanadas | | | | | | |

| INDICE DE ALARGAMIENTO | | | | | | |
|------------------------|-----------|--------------|----------|------------|------------|------------|
| Retenido | Peso (g) | | | Índice | | |
| TAMIZ (pulg) | Alargadas | No alargadas | fracción | Σ Fracción | Fracción | Σ Fracción |
| 3/4" | 0 | 288.36 | 288.36 | 288.36 | 0% | - |
| 1/2" | 664.55 | 2779.75 | 3444.3 | 3732.66 | 19% | - |
| 3/8" | 653.07 | 1231.89 | 1884.96 | 5617.62 | 35% | - |
| N° 4 | 656.93 | 575.68 | 1232.61 | 6850.23 | 53% | - |
| TOTAL | 1974.55 | 4875.68 | 6850.23 | - | - | 29% |
| Alargadas | | | | | | |

ANEXO 12 EQUIVALENTE DE ARENA

| | | |
|--|--|--------------------------------|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO | 12 |
| | FECHA DEL ENSAYO | 11 Diciembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | Equivalente de arena | NORMA: INV. E-133-07 |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|---------|---|------|-------|-----|-----|----------|-----|-----|--|------------------------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>PUNTO DE</th> <th>MUESTRA 1</th> <th>MUESTRA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ARCILLA</td> <td align="center">4</td> <td align="center">4.02</td> </tr> <tr> <td>ARENA</td> <td align="center">3.8</td> <td align="center">3.6</td> </tr> <tr> <td>E. ARENA</td> <td align="center">95%</td> <td align="center">90%</td> </tr> </tbody> </table> | PUNTO DE | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | ARCILLA | 4 | 4.02 | ARENA | 3.8 | 3.6 | E. ARENA | 95% | 90% | | EQUIVALENTE DE ARENA = | 92.3% |
| PUNTO DE | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | | | | | | | | | | | | | |
| ARCILLA | 4 | 4.02 | | | | | | | | | | | | | |
| ARENA | 3.8 | 3.6 | | | | | | | | | | | | | |
| E. ARENA | 95% | 90% | | | | | | | | | | | | | |

ANEXO 13 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS

| | | |
|--|---|--|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO 13 | |
| | FECHA DEL ENSAYO 28 Septiembre 2012 | |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO Maria Fernanda Serrano Guzmán | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato anillo y bola) | | NORMA: INV. E- 712-07 |

TOMA DE LECTURA

| | |
|--|-------|
| Temperatura en que toca la bola | |
| Primera | 47 °C |
| Segunda | 47 °C |

OBSERVACIONES

Se inició el ensayo con una temperatura inicial de 12°C porque faltó material helado, y en la norma se especifica iniciar a los 4°C

| ANEXO 14 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS | | | |
|--|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO | | 14 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 28 Septiembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | ID | 126075 |
| | Edward Andres Ayala Robayo | | 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | NORMA: | |
| Penetración de los materiales bituminosos | | INV.E-706-07 | |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------------|---|----|---|----|---|----|--|
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>PENETRACIÓN N°</th> <th>MEDIDA (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>63</td> </tr> </tbody> </table> | PENETRACIÓN N° | MEDIDA (mm) | 1 | 61 | 2 | 63 | 3 | 63 | |
| PENETRACIÓN N° | MEDIDA (mm) | | | | | | | | |
| 1 | 61 | | | | | | | | |
| 2 | 63 | | | | | | | | |
| 3 | 63 | | | | | | | | |
| RESULTADO | | | | | | | | | |
| PROMEDIO | 62.3 mm | | | | | | | | |

| OBSERVACIONES |
|---|
| <p>La punta de la aguja está un poco doblada</p> <p>Al iniciar la penetración la maquina se desestabiliza por la fuerte vibración</p> <p>Entre más lejos del borde del recipiente la penetración es menor</p> |

| ANEXO 15 PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND | | | |
|--|--|---------------|--------------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO | | 15 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 28 Septiembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID | 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | NORMA: | |
| Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland | | INV. E-709-07 | |

| TOMA DE DATOS | |
|---------------|-------------|
| PUNTO DE | TEMPERATURA |
| LLAMA | 162 °C |
| IGNICIÓN | 240 °C |

| ANEXO 16 PESO ESPECÍFICO EN ASFALTO | | | |
|--|--|---------------|-------------------------------|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO | | 16 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 28 Septiembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID | 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | NORMA: | |
| Peso específico en asfalto | | - | |

| TOMA DE DATOS | | | |
|---------------|----------|--------------|-------------------------------|
| MUESTRA | PESO (g) | VOLUMEN (ml) | DENSIDAD (g/cm ³) |
| 1 | 3.09 | 3 | 1.03 |
| 2 | 3.91 | 4 | 0.98 |
| 3 | 9 | 8 | 1.13 |
| 4 | 14.11 | 14 | 1.01 |
| Promedio | - | - | 1.04 |

ANEXO 17 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LA CENIZA

| | | |
|---|--|-------------------------------|
|  | N° DE ENSAYOS | 17 |
| | FECHA DEL ENSAYO | 12 Octubre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | Gravedad específica y absorción de la ceniza | NORMA: INV.E-222 |

TOMA DE DATOS

| Peso | (g) | Nomenclatura |
|-------------------|--------|--------------|
| arena SSS | 443.48 | S |
| Pic+ ceniza+ agua | 861.92 | C |
| Picnómetro +agua | 617.97 | B |
| arena seca | 401.28 | A |

CALCULOS

| | | |
|---------------------------|-------------------------------|---|
| $Gsb = A/(B+S-C) =$ | 2.01 g/cm ³ | Gravedad esp. Bulk |
| $Gsb_{SSS} = S/(B+S-C) =$ | 2.22 g/cm ³ | Gravedad esp. Bulk saturada y sup. Seca |
| $Gsa = A/(B+A-C) =$ | 2.55 g/cm ³ | Gravedad esp. aparente |
| % Absorción= $(S-A)/A =$ | 10.52 % | Absorción |

| ANEXO 18 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD MDC-2 CONVENCIONAL | | | |
|--|---------------------------|------------------|------------------|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO | | 18 |
| | FECHA DEL ENSAYO | | 3 Diciembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | | ID | 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Gravedad especifica Bulk y densidad en mezclas asfálticas en caliente | | NORMA: E -733 | |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------------|----------------|--------------|-------|------------------|--------------------|------------|
| % asfalto | Probeta | masa seca (g) | masa sumergida | masa sss (g) | GEB | densidad (g/cm3) | dens. Pro. (g/cm3) | % agua abs |
| 4.5% | 1 | 1167.1 | 646.6 | 1180 | 2.188 | 2.181 | 2.150 | 2.42% |
| | 2 | - | - | - | - | - | | - |
| | 3 | 1186.3 | 653.7 | 1206.8 | 2.145 | 2.138 | | 3.71% |
| | 4 | 1141.8 | 620.2 | 1156.4 | 2.129 | 2.123 | | 2.72% |
| | 5 | 1160.9 | 637.9 | 1175.5 | 2.159 | 2.153 | | 2.72% |
| | 6 | 1169.5 | 640.5 | 1181.8 | 2.161 | 2.154 | | 2.27% |
| 5.5% | 7 | 1170.2 | 661.2 | 1174.3 | 2.281 | 2.274 | 2.194 | 0.80% |
| | 8 | 1183 | 648.2 | 1195.3 | 2.162 | 2.156 | | 2.25% |
| | 9 | 1166.5 | 644.7 | 1180.3 | 2.178 | 2.171 | | 2.58% |
| | 10 | 1174.1 | 649.5 | 1185.5 | 2.190 | 2.184 | | 2.13% |
| | 11 | 1184.6 | 657.5 | 1194 | 2.208 | 2.201 | | 1.75% |
| | 12 | 1086.8 | 599.2 | 1097 | 2.183 | 2.177 | | 2.05% |
| 6.5% | 13 | 1234.9 | 670.1 | 1246.4 | 2.143 | 2.136 | 2.233 | 2.00% |
| | 14 | 1176.1 | 649 | 1185.1 | 2.194 | 2.187 | | 1.68% |
| | 15 | 1192.8 | 662.5 | 1205 | 2.199 | 2.192 | | 2.25% |
| | 16 | 1167.1 | 651.7 | 1170.4 | 2.250 | 2.243 | | 0.64% |
| | 17 | 1177.5 | 663.2 | 1181.1 | 2.274 | 2.267 | | 0.70% |
| | 18 | 1158.6 | 675.2 | 1162.6 | 2.377 | 2.370 | | 0.82% |

| OBSERVACIONES |
|---|
| Para el desarrollo del ensayo se usó el método convencional, es decir, no se le aplico adición de ceniza. |

| ANEXO 19 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON 30% ADICION DE CENIZA | |
|--|--|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO 19 |
| | FECHA DEL ENSAYO 3 Diciembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Gravedad especifica Bulk y densidad en mezclas asfálticas en caliente | NORMA: E -733 |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------------|----------------|--------------|-------|------------------|--------------------|------------|
| % asfalto | Probeta | masa seca (g) | masa sumergida | masa sss (g) | GEB | densidad (g/cm3) | dens. Pro. (g/cm3) | % agua abs |
| 4.5% | 19 | 1144.4 | 642.7 | 1148.2 | 2.264 | 2.257 | 2.364 | 0.75% |
| | 20 | 1200.2 | 701 | 1203.7 | 2.388 | 2.380 | | 0.70% |
| | 21 | 1192 | 698.2 | 1195.9 | 2.395 | 2.388 | | 0.78% |
| | 22 | 1181.3 | 696.5 | 1184.9 | 2.419 | 2.411 | | 0.74% |
| | 23 | 1187.7 | 695.4 | 1192.1 | 2.391 | 2.384 | | 0.89% |
| | 24 | 1196 | 697.3 | 1202.3 | 2.368 | 2.361 | | 1.25% |
| 5.5% | 25 | 1139.1 | 672.1 | 1140.5 | 2.432 | 2.425 | 2.388 | 0.30% |
| | 26 | 1188.7 | 695.3 | 1191.4 | 2.396 | 2.389 | | 0.54% |
| | 27 | 1199.2 | 703.4 | 1201.4 | 2.408 | 2.401 | | 0.44% |
| | 28 | 1189.7 | 693.8 | 1191.9 | 2.388 | 2.381 | | 0.44% |
| | 29 | 1198.9 | 698.5 | 1203.2 | 2.375 | 2.368 | | 0.85% |
| | 30 | 1181.7 | 686.9 | 1184.7 | 2.374 | 2.367 | | 0.60% |
| 6.5% | 31 | 1172.4 | 679.3 | 1173.5 | 2.372 | 2.365 | 2.376 | 0.22% |
| | 32 | 1167.9 | 678.7 | 1168.9 | 2.382 | 2.375 | | 0.20% |
| | 33 | 1194.7 | 695.2 | 1196.6 | 2.383 | 2.376 | | 0.38% |
| | 34 | 1176.2 | 683.9 | 1178 | 2.380 | 2.373 | | 0.36% |
| | 35 | 1146.6 | 670.7 | 1147.4 | 2.405 | 2.398 | | 0.17% |
| | 36 | 1201 | 697.9 | 1203.2 | 2.377 | 2.370 | | 0.44% |

| OBSERVACIONES |
|--|
| Para el desarrollo del ensayo se implementó la adición de ceniza en un 30% como proporción de fino y llenante mineral. |

| ANEXO 20 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON ADICION 50% ADICION CENIZA | |
|--|--|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO 20 |
| | FECHA DEL ENSAYO 3 Diciembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Gravedad especifica Bulk y densidad en mezclas asfálticas en caliente | NORMA: E -733 |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------------|----------------|--------------|-------|-------------------------------|---------------------------------|------------|
| % asfalto | Probeta | masa seca (g) | masa sumergida | masa sss (g) | GEB | densidad (g/cm ³) | dens. Pro. (g/cm ³) | % agua abs |
| 4.5% | 37 | 1210 | 712.5 | 1212.1 | 2.422 | 2.415 | 2.413 | 0.42% |
| | 38 | 1172.5 | 689.1 | 1177 | 2.403 | 2.396 | | 0.92% |
| | 39 | 1198.6 | 709.4 | 1201.5 | 2.436 | 2.428 | | 0.59% |
| | 40 | 1214.2 | 719.6 | 1215.8 | 2.447 | 2.440 | | 0.32% |
| | 41 | 1183.1 | 696.1 | 1187.3 | 2.409 | 2.401 | | 0.86% |
| | 42 | 1201.2 | 703.8 | 1202.7 | 2.408 | 2.400 | | 0.30% |
| 5.5% | 43 | 1142.2 | 672.8 | 1143.3 | 2.428 | 2.420 | 2.415 | 0.23% |
| | 44 | 1173.5 | 687.4 | 1175.7 | 2.403 | 2.396 | | 0.45% |
| | 45 | 1181.4 | 695.9 | 1182.9 | 2.426 | 2.419 | | 0.31% |
| | 46 | 1168.5 | 687.2 | 1170.5 | 2.418 | 2.410 | | 0.41% |
| | 47 | 1225.6 | 724.2 | 1226.8 | 2.439 | 2.431 | | 0.24% |
| | 48 | 1195.1 | 703 | 1196.4 | 2.422 | 2.415 | | 0.26% |
| 6.5% | 49 | 1149.1 | 671.3 | 1151.1 | 2.395 | 2.388 | 2.390 | 0.42% |
| | 50 | 1182.5 | 689.3 | 1183.7 | 2.392 | 2.385 | | 0.24% |
| | 51 | 1148.1 | 669.6 | 1149.5 | 2.392 | 2.385 | | 0.29% |
| | 52 | 1170.8 | 684.4 | 1172.7 | 2.398 | 2.391 | | 0.39% |
| | 53 | 1173.9 | 686.1 | 1175.2 | 2.400 | 2.393 | | 0.27% |
| | 54 | 1162.2 | 680.7 | 1163.6 | 2.407 | 2.399 | | 0.29% |

| OBSERVACIONES |
|--|
| Para el desarrollo del ensayo se implementó la adición de ceniza en un 50% como proporción de fino y llenante mineral. |

| ANEXO 21 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Y DENSIDAD EN MDC-2 CON 70% DE ADICION DE CENIZA | |
|--|--|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO 20 21 |
| | FECHA DEL ENSAYO 4 Diciembre 2012 |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO María Fernanda Serrano Guzmán |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO Gravedad especifica Bulk y densidad en mezclas asfálticas en caliente | NORMA: E -733 |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------------|----------------|--------------|-------|-------------------------------|---------------------------------|------------|
| % asfalto | Probeta | masa seca (g) | masa sumergida | masa sss (g) | GEB | densidad (g/cm ³) | dens. Pro. (g/cm ³) | % agua abs |
| 4.5% | 55 | 1246.4 | 732.5 | 1248.9 | 2.414 | 2.406 | 2.383 | 0.48% |
| | 56 | 1200.1 | 702.7 | 1205.9 | 2.385 | 2.378 | | 1.15% |
| | 57 | 1175.8 | 690.5 | 1180.2 | 2.401 | 2.394 | | 0.90% |
| | 58 | 1181.1 | 688 | 1190.8 | 2.349 | 2.342 | | 1.93% |
| | 59 | 1181.1 | 694.5 | 1188.5 | 2.391 | 2.384 | | 1.50% |
| | 60 | 1215.1 | 713.3 | 1219.9 | 2.399 | 2.391 | | 0.95% |
| 5.5% | 61 | 1177.3 | 689.1 | 1180 | 2.398 | 2.391 | 2.402 | 0.55% |
| | 62 | 1183.8 | 697.9 | 1190.2 | 2.405 | 2.397 | | 1.30% |
| | 63 | 1189.1 | 698.2 | 1191.3 | 2.411 | 2.404 | | 0.45% |
| | 64 | 1185 | 694.6 | 1185.4 | 2.414 | 2.407 | | 0.08% |
| | 65 | 1189.5 | 698.2 | 1191.5 | 2.411 | 2.404 | | 0.41% |
| | 66 | 1181.9 | 694.7 | 1183.9 | 2.416 | 2.409 | | 0.41% |
| 6.5% | 67 | 1136.7 | 662.6 | 1137.9 | 2.392 | 2.384 | 2.386 | 0.25% |
| | 68 | 1180.7 | 688.6 | 1181.7 | 2.394 | 2.387 | | 0.20% |
| | 69 | 1175.8 | 686.4 | 1176.9 | 2.397 | 2.390 | | 0.22% |
| | 70 | 1185.4 | 690.8 | 1186.5 | 2.391 | 2.384 | | 0.22% |
| | 71 | 1182.4 | 687.9 | 1183.3 | 2.387 | 2.380 | | 0.18% |
| | 72 | 1179.4 | 688.5 | 1180.6 | 2.397 | 2.389 | | 0.24% |

| OBSERVACIONES |
|--|
| Para el desarrollo del ensayo se implementó la adición de ceniza en un 70% como proporción de fino y llenante mineral. |

| ANEXO 22 RESISTENCIA DE MDC-2 CONVENCIONAL EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | | | |
|---|--------------------------------|-------------------------------|--|
|  | ANEXO 22 | | OBSERVACIÓN |
| | FECHA DEL ENSAYO | | El ensayo se realizó para las briquetas fabricadas convencionalmente |
| | 4 Diciembre 2012 | | |
| DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | María Fernanda Serrano Guzmán | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | ID | 126075 |
| | Edward Andres Ayala Robayo | | 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | NORMA: | |
| Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall | | E -748 | |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|-----------|------|-------|--------------|---------------|------------------|----------------------------|--------------|------------|
| % asfalto | Probeta | Altura cm | | | Altura prom. | F. corrección | Estabilidad (lb) | Estabilidad corregida (kg) | Flujo (pulg) | Flujo (mm) |
| 4.5% | 1 | 6.545 | 6.7 | 6.57 | 66.1 | 0.941 | 1222 | 521.58 | 0.166 | 4.2164 |
| | 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 3 | 6.72 | 6.8 | 6.725 | 67.5 | 0.91 | 1283 | 529.58 | 0.135 | 3.429 |
| | 4 | 6.41 | 6.51 | 6.39 | 64.4 | 0.978 | 1115 | 494.63 | 0.21 | 5.334 |
| | 5 | 6.63 | 6.64 | 6.7 | 66.6 | 0.932 | 1005 | 424.86 | 0.147 | 3.7338 |
| | 6 | 6.565 | 6.61 | 6.57 | 65.8 | 0.947 | 1573 | 675.68 | 0.164 | 4.1656 |
| 5.5% | 7 | 6.18 | 6.24 | 6.19 | 62.0 | 1.04 | 2544 | 1200.09 | 0.25 | 6.35 |
| | 8 | 6.45 | 6.55 | 6.415 | 64.7 | 0.97 | 847 | 372.67 | 0.194 | 4.9276 |
| | 9 | 6.52 | 6.42 | 6.51 | 64.8 | 0.968 | 1007 | 442.15 | 0.298 | 7.5692 |
| | 10 | 6.57 | 6.41 | 6.515 | 65.0 | 0.963 | 1788 | 781.01 | 0.205 | 5.207 |
| | 11 | 6.56 | 6.57 | 6.53 | 65.5 | 0.953 | 1324 | 572.33 | 0.152 | 3.8608 |
| | 12 | 6.01 | 5.97 | 6.1 | 60.3 | 1.093 | 1202 | 595.92 | 0.233 | 5.9182 |
| 6.5% | 13 | 6.9 | 6.68 | 6.93 | 68.4 | 0.888 | 808 | 325.45 | 0.196 | 4.9784 |
| | 14 | 6.54 | 6.42 | 6.43 | 64.6 | 0.973 | 1191 | 525.64 | 0.195 | 4.953 |
| | 15 | 6.56 | 6.52 | 6.73 | 66.0 | 0.943 | 726 | 310.54 | 0.342 | 8.6868 |
| | 16 | 6.51 | 6.25 | 6.36 | 63.7 | 0.995 | 1998 | 901.74 | 0.201 | 5.1054 |
| | 17 | 6.4 | 6.45 | 6.225 | 63.6 | 0.998 | 2161 | 978.25 | 0.149 | 3.7846 |
| | 18 | 5.87 | 5.9 | 6.075 | 59.5 | 1.118 | 2842 | 1441.22 | 0.169 | 4.2926 |

ANEXO 23 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 30% ADICION DE CENIZA, EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL

| | | | |
|--|--|-------------------------------|------------------|
|  <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> | ANEXO | 23 | OBSERVACIÓN |
| | FECHA DEL ENSAYO | 5 Diciembre 2012 | |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | María Fernanda Serrano Guzmán | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo Edward Andres Ayala Robayo | ID | 126075 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall | NORMA: | E -748 |

TOMA DE DATOS

| % asfalto | Probeta | Altura cm | | | Altura prom. | F. corrección | Estabilidad (lb) | Estabilidad corregida (kg) | Flujo (pulg) | Flujo (mm) |
|-----------|---------|-----------|-------|-------|--------------|---------------|------------------|----------------------------|--------------|------------|
| 4.5% | 19 | 6.13 | 6.09 | 6.21 | 61.4 | 1.059 | 2277 | 1093.76 | 0.216 | 5.4864 |
| | 20 | 6.26 | 6.24 | 6.32 | 62.7 | 1.021 | 3758 | 1740.39 | 0.229 | 5.8166 |
| | 21 | 6.19 | 6.23 | 6.275 | 62.3 | 1.032 | 3820 | 1788.16 | 0.202 | 5.1308 |
| | 22 | 6.1 | 6.03 | 6.21 | 61.1 | 1.068 | 2808 | 1360.29 | 0.182 | 4.6228 |
| | 23 | 6.21 | 6.16 | 6.23 | 62.0 | 1.040 | 4009 | 1891.18 | 0.174 | 4.4196 |
| | 24 | 6.22 | 6.34 | 6.36 | 63.1 | 1.011 | 3401 | 1559.63 | 0.176 | 0.249 |
| 5.5% | 25 | 5.64 | 5.68 | 5.76 | 56.9 | 1.201 | 2597 | 1414.75 | 0.277 | 7.0358 |
| | 26 | 6.2 | 5.97 | 6.345 | 61.7 | 1.049 | 3267 | 1554.49 | 0.269 | 6.8326 |
| | 27 | 6.13 | 6.12 | 6.13 | 61.3 | 1.062 | 3348 | 1612.77 | 0.279 | 7.0866 |
| | 28 | 6.215 | 6.95 | 6.265 | 64.8 | 0.968 | 2648 | 1162.67 | 0.278 | 7.0612 |
| | 29 | 6.245 | 6.075 | 6.2 | 61.7 | 1.049 | 2706 | 1287.56 | 0.249 | 6.3246 |
| | 30 | 6.25 | 6.28 | 6.2 | 62.4 | 1.029 | 2240 | 1045.51 | 0.245 | 6.223 |
| 6.5% | 31 | 6.095 | 6.065 | 6.105 | 60.9 | 1.074 | 2433 | 1185.25 | 0.256 | 6.5024 |
| | 32 | 6.095 | 6.055 | 6.08 | 60.8 | 1.078 | 2622 | 1282.08 | 0.334 | 8.4836 |
| | 33 | 6.22 | 6.11 | 6.16 | 61.6 | 1.053 | 2490 | 1189.30 | 0.225 | 5.715 |
| | 34 | 6.1 | 6.08 | 6.13 | 61.0 | 1.071 | 2004 | 973.53 | 0.355 | 9.017 |
| | 35 | 5.94 | 5.98 | 5.93 | 59.5 | 1.118 | 2509 | 1272.35 | 0.344 | 8.7376 |
| | 36 | 6.24 | 6.28 | 6.27 | 62.6 | 1.024 | 2609 | 1211.82 | 0.319 | 8.1026 |

| ANEXO 24 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 50% ADICION DE CENIZA EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|--|--|--|--|-------------------------|-------------------------------|--|--|--|--|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO 24 | | | | | | OBSERVACIÓN | | | | |
| | FECHA DEL ENSAYO | | | | | | 5 Diciembre 2012 | | | | |
| | DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | | | | | María Fernanda Serrano Guzmán | | | | |
| ESTUDIANTES: Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | | | | | | ID 126075 | | El ensayo se realizó para las briquetas fabricadas con adición de 50% ceniza | | | |
| Edward Andres Ayala Robayo | | | | | | 127575 | | | | | |
| NOMBRE DEL ENSAYO Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall | | | | | | NORMA: E -748 | | | | | |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|-----------|-------|-------|--------------|---------------|------------------|----------------------------|--------------|------------|
| % asfalto | Probeta | Altura cm | | | Altura prom. | F. corrección | Estabilidad (lb) | Estabilidad corregida (kg) | Flujo (pulg) | Flujo (mm) |
| 4.5% | 37 | 6.14 | 6.16 | 6.13 | 61.4 | 1.059 | 3421 | 1643.28 | 0.521 | 13.2334 |
| | 38 | 6.12 | 6.18 | 6.13 | 61.4 | 1.059 | 2667 | 1281.10 | 0.338 | 8.5852 |
| | 39 | 6.215 | 6.07 | 6.03 | 61.1 | 1.068 | 3510 | 1700.36 | 0.387 | 9.8298 |
| | 40 | 6.23 | 6.18 | 6.17 | 61.9 | 1.043 | 4020 | 1901.84 | 0.505 | 12.827 |
| | 41 | 6.27 | 6.24 | 6.18 | 62.3 | 1.032 | 4554 | 2131.75 | 0.359 | 9.1186 |
| | 42 | 6.22 | 6.2 | 6.22 | 62.1 | 1.037 | 5000 | 2351.86 | 0.707 | 17.9578 |
| 5.5% | 43 | 5.76 | 5.96 | 5.64 | 57.9 | 1.168 | 2764 | 1464.35 | 0.775 | 19.685 |
| | 44 | 5.99 | 6.07 | 5.98 | 60.1 | 1.099 | 1981 | 987.52 | 0.483 | 12.2682 |
| | 45 | 6.105 | 6 | 5.955 | 60.2 | 1.096 | 3191 | 1586.36 | 0.538 | 13.6652 |
| | 46 | 6 | 6.05 | 5.955 | 60.0 | 1.103 | 2343 | 1172.23 | 0.412 | 10.4648 |
| | 47 | 6.405 | 6.42 | 6.2 | 63.4 | 1.003 | 3308 | 1504.98 | 0.323 | 8.2042 |
| | 48 | 6.105 | 6.04 | 6 | 60.5 | 1.087 | 2789 | 1375.12 | 0.468 | 11.8872 |
| 6.5% | 49 | 5.945 | 5.885 | 5.81 | 58.8 | 1.14 | 2169 | 1121.57 | 0.444 | 11.2776 |
| | 50 | 6.14 | 6.245 | 6.08 | 61.6 | 1.053 | 1697 | 810.54 | 0.398 | 10.1092 |
| | 51 | 6.085 | 5.925 | 5.93 | 59.8 | 1.109 | 1927 | 969.34 | 0.498 | 12.6492 |
| | 52 | 6.045 | 6.18 | 5.92 | 60.5 | 1.087 | 2300 | 1134.02 | 0.715 | 18.161 |
| | 53 | 6 | 6.07 | 5.88 | 59.8 | 1.109 | 2257 | 1135.34 | 0.582 | 14.7828 |
| | 54 | 6.005 | 5.86 | 6.04 | 59.7 | 1.112 | 2056 | 1037.03 | 0.44 | 11.176 |

| ANEXO 25 RESISTENCIA DE MDC-2 CON 70% ADICION CENIZA EMPLEANDO EL MÉTODO MARSHALL | | | |
|--|--------------------------------|------------|---|
|  Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA | ANEXO 25 | | OBSERVACIÓN |
| | FECHA DEL ENSAYO | | El ensayo se realizó para las briquetas fabricadas con adición de |
| | 6 Diciembre 2012 | | |
| DIRECTOR (A) DEL PROYECTO | | 70% ceniza | |
| Maria Fernanda Serrano Guzmán | | E -748 | |
| ESTUDIANTES: | Luis Alejandro Aguilar Pedrozo | ID | 126075 |
| | Edward Andres Ayala Robayo | | 127575 |
| NOMBRE DEL ENSAYO | | NORMA: | |
| Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el método Marshall | | E -748 | |

| TOMA DE DATOS | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|-----------|-------|-------|--------------|---------------|------------------|----------------------------|--------------|------------|
| % asfalto | Probeta | Altura cm | | | Altura prom. | F. corrección | Estabilidad (lb) | Estabilidad corregida (kg) | Flujo (pulg) | Flujo (mm) |
| 4.5% | 55 | 6.46 | 6.52 | 6.38 | 64.5 | 0.975 | 3134 | 1386.01 | 0.483 | 12.2682 |
| | 56 | 6.34 | 6.25 | 6.495 | 63.6 | 0.998 | 6630 | 3001.29 | 0.193 | 4.9022 |
| | 57 | 6.075 | 6.14 | 6.19 | 61.4 | 1.059 | 5150 | 2473.81 | 0.197 | 5.0038 |
| | 58 | 6.38 | 6.31 | 6.43 | 63.7 | 0.995 | 2458 | 1109.35 | 0.169 | 4.2926 |
| | 59 | 6.295 | 6.395 | 6.045 | 62.5 | 1.027 | 3920 | 1826.08 | 0.209 | 5.3086 |
| | 60 | 6.38 | 6.395 | 6.455 | 64.1 | 0.985 | 3951 | 1765.25 | 0.219 | 5.5626 |
| 5.5% | 61 | 6.03 | 6.025 | 6.235 | 61.0 | 1.071 | 2895 | 1406.38 | 0.41 | 10.414 |
| | 62 | 6.335 | 6.45 | 5.93 | 62.4 | 1.029 | 2891 | 1349.36 | 0.23 | 5.842 |
| | 63 | 6.23 | 6.11 | 6.435 | 62.6 | 1.024 | 1904 | 884.36 | 0.334 | 8.4836 |
| | 64 | 6.08 | 6.05 | 6.11 | 60.8 | 1.078 | 2493 | 1219.00 | 0.369 | 9.3726 |
| | 65 | 6.22 | 5.97 | 6.135 | 61.1 | 1.068 | 2202 | 1066.72 | 0.306 | 7.7724 |
| | 66 | 6.185 | 6.09 | 6.01 | 61.0 | 1.071 | 1603 | 778.73 | 0.308 | 7.8232 |
| 6.5% | 67 | 6.01 | 5.86 | 5.735 | 58.7 | 1.143 | 1400 | 725.83 | 0.293 | 7.4422 |
| | 68 | 6.105 | 6.055 | 5.935 | 60.3 | 1.093 | 1808 | 896.36 | 0.687 | 17.4498 |
| | 69 | 6 | 5.895 | 5.81 | 59.0 | 1.134 | 1753 | 901.69 | 0.66 | 16.764 |
| | 70 | 6.2 | 6.13 | 6.02 | 61.2 | 1.065 | 1524 | 736.20 | 0.293 | 7.4422 |
| | 71 | 6 | 6.15 | 5.815 | 59.9 | 1.106 | 1676 | 840.80 | 0.473 | 12.0142 |
| | 72 | 6 | 5.96 | 5.98 | 59.8 | 1.109 | 1467 | 737.95 | 0.517 | 13.1318 |

ANEXO 26 TABLA ESPECIFICACIONES TECNICAS I.N.V 450 -07, Criterios de diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente empleando el método Marshall.

| CARACTERÍSTICA | | NORMA DE ENSAYO INV | MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS | | | MEZCLA DE ALTO MÓDULO |
|--|------------|---------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------|
| | | | CATEGORÍA DE TRÁNSITO | | | |
| | | | NT1 | NT2 | NT3 | |
| Compactación (golpes/cara) | | E-748 | 50 | 75 | 75 | 75 |
| Estabilidad mínima (kg) | | E-748 | 500 | 750 | 900 | 1500 |
| Flujo (mm) | | E-748 | 2 – 4 | 2 – 4 | 2 – 3.5 | 2 – 3 |
| Vacíos con aire(V_a)*, % | Rodadura | E-736 o E-799 | 3 – 5 | 3 – 5 | 4 – 6 | – |
| | Intermedia | | 4 – 8 | 4 – 8 | 4 – 7 | 4 – 6 |
| | Base | | – | 5 – 9 | 5 – 8 | – |
| Vacíos en los agregados minerales (VAM), % | Mezclas 0 | E-799 | ≥ 13 | ≥ 13 | ≥ 13 | – |
| | Mezclas 1 | | ≥ 14 | ≥ 14 | ≥ 14 | ≥ 14 |
| | Mezclas 2 | | ≥ 15 | ≥ 15 | ≥ 15 | – |
| | Mezclas 3 | | ≥ 16 | ≥ 16 | ≥ 16 | – |
| % de vacíos llenos de asfalto (VFA) (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados minerales) x 100 Capas de rodadura e intermedia | | E-799 | 65 – 80 | 65 – 78 | 65 – 75 | 63 – 75 |
| Relación Llenante/ Asfalto efectivo, en peso | | E-799 | 0.8 – 1.2 | | | 1.2 – 1.4 |
| Concentración de llenante, valor máximo | | E – 745 | Valor crítico | | | |

ANEXO 27 REGISTRO FOTOGRAFICO



Muestra de gravilla, ceniza y arena.



Serie de tamices a utilizar.



Agitar manualmente los tamices.



Peso fracción tamiz



Muestra humedad de agregados gruesos para ensayo de gravedad específica.



Secado superficial a la grava para obtener peso sss.



Muestra humedad de arena y ceniza para ensayo de gravedad específica.



Prueba de cono para obtener peso sss.



Picnómetro lleno de agua y arena.



Agregados separadas por fracciones.



Ensayo índice de aplanamiento



Ensayo índice de alargamiento



Contenido de materia orgánica ceniza y arena.



Máquina de los ángeles.



Muestra preparada para ensayo de resistencia al desgaste.



Calentar el asfalto hasta llegar a una temperatura superior al punto de ablandamiento.



Calentamiento de agregados hasta llegar a una temperatura superior a 150°C.



Mezcla en caliente de los agregados de la MDC-2.



Compactación de 75 golpes para fabricación de briquetas.



Compactación briquetas.



Briquetas fabricadas.



Sumergimiento de briqueta para ensayo de densidad bulk.



Toma de lectura de peso en estado sumergido.



Toma de medidas de altura de probetas.



Briquetas en baño de María de 30 a 40 minutos.



Armar la armadura para ensayo de briquetas.



Montaje ensayo de resistencia mecánica por el método Marshall.



Briqueta ensayada.