

**EVALUACION DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON
LA ADICION DE CENIZAS VOLANTES Y CAUCHO**

**JULIETH DELGADO GARNICA
JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA**

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

2014

**EVALUACION DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON
LA ADICION DE CENIZAS VOLANTES Y CAUCHO**

**JULIETH DELGADO GARNICA
JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA**

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

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

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

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Enero de 2014

DEDICATORIA

Primeramente agradecemos a Dios por las capacidades intelectuales y económicas para llevar a cabo todo el proceso a lo largo de nuestra carrera, a nuestras familias, amigos y compañeros que nos brindaron apoyo incondicional en el desarrollo del ciclo para cumplir todos nuestros propósitos.

JULIETH DELGADO GARNICA Y JOHANY ARIZA MAHECHA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarnos una educación integral e intelectual, para así convertirnos en profesionales competentes con la formación óptima y adecuada para el desarrollo en el campo laboral.

A la Directora del Proyecto, Dra María Fernanda Serrano Guzmán por su tiempo, apoyo y dedicación durante el desarrollo del proyecto, así como su gran aporte cognitivo y humano.

A nuestros padres por los años de educación y amor, por su constante apoyo durante todo el proceso de nuestras vidas. Por todas las oportunidades brindadas y toda la fe en nosotros.

Al personal del laboratorio Vicente Páez y Heli Rueda por el acompañamiento y orientación en la elaboración de las muestras y ensayos.

TABLA DE CONTENIDO

	PAG
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACION	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo General	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 RELEVANCIA DEL TEMA	21
2. MARCO DE REFERENCIA	22
2.1 TIPOS DE PAVIMENTO	22
2.1.1 Pavimentos flexibles	22
2.1.2 Pavimentos Rígidos	22
2.1.3 Pavimentos Semi-Rígidos	23
2.2 AGREGADOS PÉTREOS	23
2.3 ASFALTO	23
2.3.1 Mezcla Asfáltica	24
2.3.2 Características de la Mezcla Asfáltica	25
2.3.3 Clasificación de las mezclas asfálticas	25
2.4 MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE	28
2.4.1 Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente	29
2.4.2 Mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3	30
2.5 CENIZA	31
2.5.1 Clasificación de las cenizas volantes	32
2.6 CAUCHO	33

2.7 MEZCLADO DE ASFALTO CON CAUCHO	34
2.7.1 Porcentaje de Caucho	36
2.7.2 Ventajas y desventajas del uso de caucho en mezclas asfálticas	36
2.8 ESTUDIOS PREVIOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS	37
3. METODOLOGIA	40
3.1 MATERIALES EMPLEADOS	41
3.1.1 Material granular	41
3.1.2 Ensayos a los materiales granulares	41
3.1.3 Asfalto	47
3.1.4 Ensayos realizados al material bituminoso	49
3.1.5 Ceniza	51
3.1.6 Ensayos a la ceniza volante (material que pasa tamiz No 200)	51
3.1.7 Caucho	53
3.1.8 Ensayos realizados al caucho	54
3.1.9 Briquetas realizadas según diseño Marshall	54
3.1.10 Dosificación de los agregados	55
3.1.11 Resistencia de bitúmenes por medio del aparato Marshall	56
3.1.12 Procedimiento para el diseño de briquetas (compactación)	58
3.1.13 Pruebas mecánicas para la verificación, comportamiento de mezclas asfálticas modificadas	58
4. RESULTADOS	62
4.1 CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS	62
4.1.1 Granulometría de agregado grueso y fino	62
4.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados	63
4.1.3 Caras fracturadas	64
4.1.4 Índice de aplanamiento y alargamiento	65
4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE	65
4.2.1 Contenido de materia orgánica	66

4.2.2 Gravedad específica y absorción de los agregados finos	66
4.3 CARACTERIZACION DEL ASFALTO	66
4.4 RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL	68
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR	69
5.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE	70
5.3 CARACTERIZACION DEL CAUCHO	71
5.4 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO 60/70 MODIFICADO	72
5.4.1 Peso específico del material bituminoso	72
5.4.2 Penetración de los materiales bituminosos	73
5.4.3 Punto de ignición y de llama mediante la capa abierta de Cleveland	74
5.4.4 Punto de ablandamiento del material bituminoso	75
5.5 PRUEBA MARSHALL	76
5.6 IDENTIFICACION MEJOR MEZCLASMODIFICADAS	83
5.7 CURVA DE DISEÑO MARSHALL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	85
5.8 EVALUACION ECONOMICA DE MDC-2 CONVENCIONAL Y MEZCLAS MODIFICADAS CON CENIZA VOLANTE Y CAUCHO RECICLADO	86
6. CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	92
ANEXOS	94
REGISTRO FOTOGRAFICO	113

LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Metodología	40
Figura 2. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio, gerencia de refinería de Barrancabermeja coordinación inspección de calidad	47
Figura 3. Curva granulométrica de los agregados gruesos	62
Figura 4. Curva granulométrica de los agregados finos	63
Figura 5. Granulometría del caucho (finos)	71
Figura 6. Peso específico del material bituminoso	72
Figura 7. Penetración de las mezclas asfálticas modificadas	73
Figura 8. Punto de inflamación de las mezclas asfálticas modificadas	74
Figura 9. Punto de llama de las mezclas asfálticas modificadas	75
Figura 10. Punto de ablandamiento de las combinaciones de asfalto	76
Figura 11. Flujo vs Combinaciones de asfalto	78
Figura 12. Estabilidad vs Combinaciones de asfalto	79
Figura 13. G_{bulk} vs combinaciones de asfalto	80
Figura 14. Peso unitario vs Combinaciones de asfalto	80
Figura 15. Vacíos agregado mineral vs Combinaciones de asfalto	81
Figura 16. Porcentaje de vacíos llenos vs Combinaciones de asfalto	81
Figura 17. Porcentaje de vacíos mezcla total vs Combinaciones de asfalto	82
Figura 18. Estabilidad/flujo vs Combinaciones de asfalto	83

LISTA DE TABLAS

	PAG
Tabla1. Estudios previos sobre mezclas asfálticas modificadas	38
Tabla 2.Ficha técnica de calidad de ensayos de laboratorio de asfalto 60/70 realizado por ECOPETROL S.A	48
Tabla 3. Escala de vidrios de color normalizado	52
Tabla4.Proporciones de Mezclas modificadas con Ceniza y caucho	55
Tabla 5 Cantidad en gramos de material granular por briqueta	55
Tabla 6. Combinaciones para la elaboración de briquetas	56
Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente	57
Tabla 8. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos	64
Tabla 9 Gravedad específica y absorción de los agregados finos	64
Tabla 10. Porcentaje de caras fracturadas	65
Tabla11. Índice de aplanamiento y alargamiento	65
Tabla 13. Contenido de materia orgánica	66
Tabla 14. Gravedad específica y absorción de los agregados finos	66
Tabla 15.Resumen caracterización del Asfalto	67
Tabla 16. Resumen de Prueba Marshall	68
Tabla 17. Caracterización de los agregados pétreos	70
Tabla 18. Caracterización de la ceniza volante	71
Tabla 19. Resumen de estudio de los 90 especímenes, mediante el análisis de la prueba Marshall	77
Tabla 20.Comportamiento óptimo de mezcla asfáltica modificadas	84
Tabla 21.Tres mejores combinaciones de mezcla modificada	84
Tabla 22. Curvas de diseño Marshall	85
Tabla. 23 Evaluación económica MDC-2 Convencional	86
Tabla 24. Evaluación económica MDC-2 modificada con	

10% Ceniza y 15% Caucho	87
Tabla 25. Evaluación económica MDC-2 modificada con 15% Ceniza y 15% Caucho	87
Tabla 26. Evaluación económica MDC-2 modificada con 5% Ceniza y 15% Caucho	88

LISTA DE ANEXOS

	PAG.
ANEXO 1. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS	94
ANEXO 2. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS FINOS	95
ANEXO 3. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS GRUESOS	96
ANEXO 4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS	97
ANEXO 5. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS	98
ANEXO 6. INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS	99
ANEXO 7. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA	100
ANEXO 8. FICHA TECNICA ASFALTO 60/70 ECOPETROL S.A	101
ANEXO 9. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL METODO MARSHALL	102
ANEXO 10. GRANULOMETRIA CAUCHO	107
ANEXO 11. CURVAS DE DISEÑO MARSHALL	108

GLOSARIO

AGREGADOS PÉTREOS: Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible.

MEZCLA ASFÁLTICA: Se forman al combinar agregados pétreos y un ligante, de tal manera que al cubrirse los agregados con una película continua de ligante se realiza una mezcla.

CENIZAS VOLANTES: Las cenizas volantes se consideran un material fino-articulado que consta en su mayoría de partículas esféricas y vidriosas algunas partículas también pueden ser angulares o irregulares dependiendo de la fuente extraída.

MORTERO ASFÁLTICO: Agregado fino más masilla.

CONCRETO ASFÁLTICO: Agregado grueso más mortero.

MACADAM ASFÁLTICO: Agregado grueso más ligante asfáltico.

MÉTODO MARSHALL: Fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales.

CAUCHO: utilización de caucho para modificar y mejorar las propiedades de mezclas asfálticas en caliente.

RESUMEN

TITULO: EVALUACION DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON LA ADICION DE CENIZAS VOLANTES Y CAUCHO

AUTORES: Julieth Delgado Garnica-Johany Ariza Mahecha

DIRECTOR (A): Maria Fernanda Serrano Guzmán.

El pavimento flexible es la principal infraestructura de construcción de vías primarias y secundarias en el caso colombiano, permitiendo la movilización en las carreteras y facilitando el desarrollo económico de una región. Pero, este desarrollo trae consigo un aumento en el nivel de las cargas producidas por el tránsito generadas por los ejes equivalentes de los vehículos que resultan en esfuerzos que son transmitidos a la carpeta asfáltica. En la actualidad, son altos los costos de los asfaltos y se busca mejorarlos implementando nuevos materiales que reduzcan los costos de su producción. La idea es utilizar la ceniza volante como material llenante que proporcionen resistencia, brindando durabilidad y equilibrio en la mezcla y el caucho como materia en el ligante asfáltico.

En los casos en los que se usan mezclas asfálticas se busca un diseño que garantice un óptimo comportamiento y menor efecto sobre el medio ambiente; y teniendo en cuenta que se va a diseñar un asfalto modificado con caucho y ceniza. Este trabajo de grado se centra en el estudio de las características importantes para la producción de las mezclas asfálticas que presenten una fácil aplicación y una mejor adhesión con el material pétreo sin dejar de un lado las propiedades mecánicas que requiere una mezcla óptima.

Para llevar a cabo esta experimentación fue necesaria la caracterización del asfalto a usar, del caucho, la ceniza y la elaboración de 90 briquetas con nueve dosificaciones distintas de caucho y ceniza. De lo anterior se obtuvo que la dosificación más óptima y con mejor comportamiento frente al ensayo Marshall al que fueron sometidas cada una de las 90 briquetas fue la mezcla modificada con 10% Ceniza y 15% Caucho con adición de asfalto al 5,2%.

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

ABSTRACT

TITLE: Evaluation of a modified hot mix dense with addition of fly ash and rubber.

AUTHOR: Julieth Delgado Garnica-Johany Ariza Mahecha

DIRECTOR: María Fernanda Serrano Guzmán

The flexible pavement is a major infrastructure construction of primary and secondary roads in the Colombian case, allowing mobilization on the roads and facilitating the economic development of a region, but this development brings with it an increase in the level of charges produced by the traffic generated by the vehicle equivalent axes that result in forces which are transmitted to the asphalt, now are higher asphalt costs and improve search implementing new materials to reduce production costs, the idea of using fly ash as a complementary material provide strength and durability to get balance in the mixture and rubber as a material in the asphalt binder.

In cases in which asphalt mixtures are used to be of a design that ensures optimum performance and less impact on the environment, and considering that it will design a rubber modified asphalt and ash .This research focuses on study of the important characteristics for the production of asphalt emulsions presenting easy application and better adhesion to the stone material from one side while the mechanical properties requires an optimal mix.

To carry out this experiment was necessary the characterization using asphalt, rubber, ash and 90 briquettes making nine different dosages of rubber and ash.

From the above, was found the optimal and best performing against the Marshall test dose that were subjected each of the 90 briquettes was modified briquettes mixed with 10% ash and 15% Rubber with 5.2% of asphalt.

KEYWORDS: asphalt, paving, asphalt, fly ash

INTRODUCCIÓN

El pavimento flexible es la principal infraestructura de construcción de vías primarias y secundarias en el caso colombiano, permitiendo la movilización en las carreteras y facilitando el desarrollo económico de una región. Pero este desarrollo trae consigo un aumento en el nivel de las cargas producidas por el tránsito, generadas por los ejes equivalentes de los vehículos que resultan en esfuerzos que son transmitidos a la carpeta asfáltica. En la actualidad son altos los costos de los asfaltos y se busca mejorarlos implementando nuevos materiales que reduzcan los costos de su producción. En este trabajo de grado se emplearon los residuos industriales de locaciones de ECOPETROL S.A que en forma de ceniza reemplazaron un porcentaje de asfalto y de la misma forma, residuos de caucho reciclado de las llantas.

La ceniza utilizada en este estudio es un contaminante no reciclable de las locaciones. La industria de la construcción las adapta como aditivos o sustitutivos de otros materiales convirtiéndose en una alternativa para la disminución de los costos y mejora del comportamiento de la mezcla.

Entre tanto, el caucho es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica. El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas. El caucho sintético se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros.

GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia, y el avance de la sociedad, se ha generado una contaminación importante, consecuencia del comportamiento humano, la falta de una política ambiental eficiente, el rápido crecimiento del parque automotor, por nombrar algunas. Los neumáticos son un residuo que causa un alto impacto en el medio ambiente: son de gran tamaño, y generan las condiciones propicias para el desarrollo de plagas, adicionalmente son un factor importante en la generación de incendios teniendo en cuenta la contaminación del suelo y del aire que esto produce. Por tratarse de un material que no es biodegradable, dicha situación y almacenamiento sin control constituye una seria amenaza para el futuro del ambiente.

De la misma manera, en las locaciones petroleras y durante el proceso de refinación del crudo lo que se busca es separar todos los componentes, este proceso se hace a través de diferentes temperaturas, cada una de las cuales genera un derivado diferente, los residuos lodosos son arrojados a una ciénaga que cuenta con una planta de tratamiento, mientras que los gases contaminantes son quemados todo el tiempo, de ahí provienen las cenizas las cuales no son sometidas a ningún proceso que mitigue su tratamiento, dejándolas al aire libre y exponiendo a las personas, ya sea los desechos que descansan en cuerpos de agua o cultivos, o se vayan con el aire provocando lluvia ácida que resulta muy perjudicial.

Cuando se implementan mezclas asfálticas se busca un diseño que permita una fácil aplicación del asfalto, un óptimo comportamiento y menor efecto sobre el medio ambiente; teniendo en cuenta que se va a diseñar un asfalto modificado

con caucho, además de lograr una mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo que sirve de sustrato para el asfalto. Es en esta línea de investigación, donde se enmarca este trabajo: el estudio de las características importantes para la producción de las emulsiones asfálticas que presenten una fácil aplicación y una mejor adhesión con el material pétreo. Las cuales presentan ventajas importantes sobre el uso de asfalto puro usado en fundido (en caliente), siendo la principal la baja temperatura de aplicación, ya que se aplican a temperatura ambiente no requiriendo de calor para fundir el asfalto antes de aplicarlo.

1.2 JUSTIFICACION

La implementación de nuevos materiales en el desarrollo de mezclas asfálticas favorece en la disminución de los costos de producción del asfalto, mejorando las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales y su uso en la pavimentación.

La problemática actual brinda nuevos materiales no renovables pero transformables; el caucho proveniente de las llantas de los vehículos es reutilizado para formar parte de la materia prima y la ceniza como llenante en la mezcla de pavimento flexible.

La reutilización de materiales para el diseño de asfaltos modificados pretende generar mezclas que garanticen mejorar las propiedades mecánicas en cuanto al esfuerzo y deformación de la carpeta asfáltica haciendo que este asfalto tenga una mejora en sus características tales como la estabilidad, resistencia y durabilidad, soportando las cargas del tránsito solicitado y a futuro.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las características mecánicas de la mezcla asfáltica tipo MDC2 modificada, con ceniza volante de locaciones petroleras como adición del ligante y caucho de llantas en desuso.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar los ensayos de punto de ablandamiento, punto de llama y penetración del cemento asfáltico, para muestras de 1200 gr con adiciones de ceniza y caucho y muestras sin adición de ceniza y caucho.
- Comparar los resultados de las MDC2 modificada con ceniza y caucho con la MDC2 convencional, evaluados mediante el ensayo Marshall.
- Describir el material granular, el caucho y la ceniza volante para MDC2 modificada.

1.4 RELEVANCIA DEL TEMA

La estructura de un pavimento está concebida especialmente para la circulación del tráfico automotor, por lo que es una solución económica y eficaz. El constante desarrollo del país refleja un alto crecimiento en las vías y por ende un impacto sobre el medio ambiente, por lo cual es necesario que el mejoramiento y construcción de nuevas carreteras vaya de la mano con la sostenibilidad; usando materiales reciclados en la elaboración de mezclas asfálticas se contribuye de manera significativa en la retribución a la naturaleza de lo que se toma para el diario vivir. Por tal razón, en conjunto este proyecto ha sido cofinanciado por Acta de Cooperación AC-02 dentro del Convenio Marco ICP- 5211508 entre la Universidad Pontificia Bolivariana – UPB y el Instituto Colombiano del Petróleo y como parte de la estrategia de divulgación de conocimiento se ha generado un video que está disponible al público en el siguiente enlace:

<http://decor.uobbaa.edu.co/index.php/ubicacion-decor>

2. MARCO DE REFERENCIA

El mejoramiento de la infraestructura vial hace parte de los planes de ordenamiento en los municipios. Teniendo en cuenta las limitaciones presupuestales, es conveniente la búsqueda de alternativas económicamente viables para suplir esta necesidad de infraestructura. A continuación se presenta una breve descripción teórica de conceptos asociados a la evaluación de las MDC-2 que son las mayormente utilizadas para la habilitación de la malla vial.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTO

2.1.1 Pavimentos flexibles

Se componen principalmente por una carpeta asfáltica la cual llevan una base y una subbase de carácter no rígido. Teniendo en cuenta sus principales componentes:

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

2.1.2 Pavimentos Rígidos

Son los pavimentos los cuales están constituidos por una losa de concreto hidráulico apoyada sobre una subrasante o sobre una capa, de material

seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. El comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del Pavimento⁵.

2.1.3 Pavimentos Semi-Rígidos

Es aquel en el que se combinan tipos de pavimentos diferentes, es decir, pavimentos “flexibles” y pavimentos “rígidos”, normalmente la capa rígida está por debajo y la capa flexible por encima. Es usual que un pavimento semi-rígido comprenda una capa de base de concreto o tratada con cemento Portland junto con una superficie de rodadura de concreto asfáltico ⁷.

2.2 AGREGADOS PÉTREOS

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible. Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

2.3 ASFALTO

El asfalto es una sustancia usada como agente adhesivo, protector y para la impermeabilización en la construcción. Es residuo de un proceso aplicado en

aceites crudos llamado destilación, es un elemento líquido pegajoso de coloración negro y con alta viscosidad.

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo. Posee unas características muy específicas que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y la adhesión con materiales granulares. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente.

El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

2.3.1 Mezcla Asfáltica

Se forma al combinar agregados pétreos y un ligante, de tal manera que al cubrirse los agregados con una película continua de ligante se realiza una mezcla, es un material que puede ser fabricado tanto en centrales móviles como en fijas, para ser transportadas al sitio de obra y así extender el material para la posterior compactación.

Las mezclas asfálticas se constituyen en la mayor parte de un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de llenante mineral y otro 5% del ligante asfáltico, para lograr una mezcla óptima es de vital importancia que todas las dosificaciones se cumplan, el ligante asfáltico y el polvo mineral son elementos que influyen en la calidad de la mezcla.

2.3.2 Características de la Mezcla Asfáltica

Las características más importantes de la mezcla asfáltica son:

- **Estabilidad:** es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta huellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- **Durabilidad:** es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- **Impermeabilidad:** es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- **Flexibilidad:** es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante
- **Resistencia al deslizamiento:** es la capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada .
- **Resistencia a la fatiga:** es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.

2.3.3 Clasificación de las mezclas asfálticas.

a) Por fracciones de agregado pétreo empleado.

Masilla asfáltica: Son mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de tal manera que si llega a existir un agregado grueso, éste se distribuye uniformemente a través de la película que se genera por la mezcla del llenante y las altas cantidades de asfalto que lo recubren. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que pueda tener una

estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral, mejorando el ligante con adiciones de fibras.

- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) Por la temperatura puesta en obra.

Las mezclas asfálticas en caliente se fabrican con asfalto, generalmente a una temperatura aproximada de 150 grados centígrados, dependiendo de la viscosidad del ligante se debe someter a un proceso de calentamiento de los agregados para evitar el enfriamiento del asfalto al entrar en contacto.

c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.

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

- Mezclas Cerradas o Densas: la proporción de vacíos no supera el 6%. Esta mezcla puede ser preparada en frío o en caliente. Las mezclas asfálticas en frío son aquellas fabricadas con emulsiones asfálticas y su principal utilización es la construcción de vías secundarias. Para obtener una mejor mezcla en frío se suele utilizar lechadas de asfálticas para retrasar el envejecimiento.

Estas mezclas se caracterizan por su trabajabilidad, debido a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja, esto se debe en gran parte a las emulsiones de asfalto fluidificado: el

aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios. Por lo tanto el realizar mezclas en frío es viable desde el punto de vista de almacenamiento, pero después de puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas extendidas debido a la evaporación del fluidificante.

- Mezclas Semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.
- Mezclas Abiertas: la proporción de vacíos supera el 12%. Se utiliza principalmente para vías de circulación rápida, para su elaboración se tienen que utilizar asfaltos modificados en proporciones que varían en un rango desde 4,5% hasta el 5% de la masa de los agregados. Se aplican en vías secundarias, urbanas o para mejorar la base en los pavimentos rígidos.

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

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

e) Por la estructura del agregado pétreo

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

f) Por la granulometría

- Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.4 MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE

En la mayoría de los casos, es el tipo de mezcla más empleado para la construcción en recuperación de redes viales. Se define una mezcla asfáltica en caliente a la combinación de materiales finos seleccionados y bien gradados incluyendo polvo de tamaños finos con un ligante hidrocarbonado y en algunos casos adicionándole algún aditivo. Las partículas de agregados después del mezclado deben presentarse muy bien recubiertas por una película homogénea del ligante. Para que una muestra de mezcla densa en caliente funcione y se deje compactar, la temperatura puesta en obra debe ser muy superior a la ambiente

2.4.1 Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente.

Existen distintos procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla en caliente. Los cuales tienen una larga trayectoria de uso a nivel mundial. Entre ellos tenemos:

- Thehubbar- Field (1920's). Fue uno de los primeros métodos de mezclas asfálticas, en el cual evaluaba el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado del material y se compara con una estabilidad ya obtenida para medir la deformación. Este método funcionó adecuadamente para la evaluación de mezclas las cuales contenían agregado de tamaño pequeño o granulometrías finas, pero no se obtuvieron resultados deseados en mezclas asfálticas en caliente con agregados de tamaños máximos nominales altos.
- Método Marshall (1930's). Fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Tiene en cuenta que la estabilidad representa la carga que tolera la mezcla y el flujo la deformación que presenta la misma; todo esto a su vez junto con el porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales para su implementación. El método se desarrolló y ha funcionado bien, salvo algunas modificaciones en algunas de sus especificaciones en los años 40`s.
- Método Hveem (1930's). Es un método contemporáneo con el método Marshall, a diferencia que el principal parámetro de evaluación de este es la estabilidad pseudotriaxial.
- Método de la Western Association Of State highway on Trasportation Officials WASTHO (1984). Este método fue recomendado para realizar cambios que se requerían en los materiales y las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas en caliente para mejorar la resistencia a las roderas.

- Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. (AAMAS) (1987). Después de muchos años de desarrollo y evolución de los métodos de diseño para mezclas asfálticas, se dio la necesidad de encontrar un nuevo método de compactación de las mezclas en el laboratorio y la evaluación de sus propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las 25 deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.
- Método SUPERPAVE (1993) Fue un método el cual vio sus inicios tomando aspectos de diseño del método AAMAS. El método Superpave contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla. El funcionamiento de dicho método predice a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por baja temperatura. Después de un largo proceso de investigación en laboratorio por 7 años, los modelos estuvieron listos en el año 2000. Superpave promete ser un diseño confiable el cual se basa en métodos de ensayos de laboratorios que pueden ser usados para la identificación de la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

2.4.2 Mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3 :

Las mezclas MDC-1, MDC-2 y MDC-3 son mezclas densas en caliente; también son llamadas concretos asfálticos y están definidas como la combinación uniformemente dosificada de agregado y cemento asfáltico, mezclado a una temperatura previamente determinada, que garantiza una mejor adherencia entre ellos.

MDC-1: Las mezclas densas en caliente tipo MDC-1 se pueden utilizar como capa intermedia (base asfáltica) con un espesor compacto mayor a 50 mm y como capa de rodadura con un espesor compacto mayor a 60 mm. (Arenas y Serrano ,2006)

MDC-2: Las mezclas densas en caliente tipo MDC-2 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 40 y 60 mm y mayores a 60mm. (Arenas y Serrano ,2006)

MDC-3: Las mezclas densas en caliente tipo MDC-3 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 30 Y 40 mm. (Arenas y Serrano ,2006)

2.5 CENIZA

La ceniza se considera un material fino-articulado que consta en su mayoría de partículas esféricas y vidriosas algunas partículas también pueden ser angulares o irregulares dependiendo de la fuente extraída, también pueden ser más finas o gruesas que las partículas del cemento portland.

Las cenizas volantes son un producto el cual resulta de la combustión del carbón pulverizado en la producción de plantas térmicas. Las partículas de ceniza son generalmente de un tamaño menor a 200 μM , tiene una alta resistencia mecánica una gama de densidades entre 0,6 y 3 gr/ cm ³, un punto de fusión superior a 10.000 ° C , baja conductividad térmica, y son en la mayoría de los casos químicamente inertes .

La mayoría de las cenizas volantes apropiadas para la construcción provienen del carbón que es utilizado en la combustión en plantas eléctricas.

En este proceso el carbón es primero pulverizado o triturado a un grado específico de finura y luego mezclado con el aire caliente y soplado dentro de una cámara generadora que se enciende inmediatamente para calentar los tubos de la caldera, los componentes orgánicos del carbón son quemados casi inmediatamente, dejando la mayor parte de ceniza inorgánica como subproductos.

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

2.5.1 Clasificación de las cenizas volantes

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

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

La clasificación universal de las cenizas volantes es:

Clase N: puzolanas naturales, calcinadas o crudas.

Clase F: cenizas volantes normalmente producidas en la quema del carbón (antracítico) o bituminosos.

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

- Naturales (N): origen geotérmico, ígneo- volcánico como las puzolanas clásicas italianas, portuguesas y españolas de origen hidrotérmico como el ópalo de

origen orgánico vegetal como las tierras formadas por esqueletos de plantas de origen animal formada por caparazones animales.

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

Rocas no reactivas en estado natural las cuales se pueden activar gracias a un tratamiento térmico entre 600 grados C y 900 grados C.

Subproductos industriales obtenidos entre otros en procesos de fabricación de aluminio y durante la combustión del carbón en las centrales térmicas como las cenizas volantes y humo de sílice.

2.6 CAUCHO

La tecnología de utilización de caucho para modificar y mejorar las propiedades de mezclas asfálticas en caliente ha sido utilizada con éxito en países desarrollados. Se cuenta entonces con la experiencia, estudios y especificaciones internacionales que regulan el proceso de gestión, aprovechamiento y producción de este tipo de residuo para la modificación de mezclas asfálticas.

Según datos estadísticos, en Colombia, se producen cerca de 18.000 toneladas de neumáticos como desecho al año. Lo cual representa un residuo voluminoso en los rellenos sanitarios y en los basureros a cielo abierto, muy comunes en la zona donde se desarrollara este proyecto. En épocas de lluvia, los neumáticos son refugio de insectos que traen consigo enfermedades como malaria, paludismo y dengue. Los neumáticos además de ser contaminantes visuales que degradan la imagen de las comunidades pueden incendiarse accidental o intencionalmente causando serios daños.

La quema de llantas a cielo abierto puede provocar irritaciones de la piel, ojos, sistema respiratorio y membranas mucosas, depresión del sistema nervioso central. También genera lluvia ácida y hace un aporte representativo al calentamiento de la atmósfera y cambio climático y debilitamiento de la capa de ozono.

Su disposición se ve muy comúnmente en apilamiento, entierro, reúso o generación de energía

Sus usos más particulares son:

- Aprovechamiento energético
- Arrecifes artificiales
- Plantación de árboles
- Señalizaciones
- Paredón en polígonos de tiro
- En áreas deportivas
- Muros de contención
- Barrenas en pistas de karts
- Delimitación de casas
- Modificador de asfaltos

2.7 MEZCLADO DE ASFALTO CON CAUCHO

Las migas de caucho resultantes del triturado pueden mezclarse con el asfalto mediante tres tipos de procesos:

- Proceso Húmedo. La norma ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) D 8 – 88 define el proceso húmedo como aquel proceso que permite obtener una mezcla de cemento asfáltico y caucho reciclado de

neumático, o en ciertos añadidos, en los cuales el componente de goma, es por lo menos el 15% del peso del ligante utilizado en la mezcla total, y este ha reaccionado con el cemento asfáltico en caliente lo suficiente para causar la hinchazón de las partículas de goma, su difusión y la reducción de viscosidad. La reducción de viscosidad depende básicamente del tipo de asfalto, del tipo de caucho, de la temperatura de mezclado y de la energía impuesta en el mezclado. Una vez mezcladas las migas de caucho con el asfalto, ésta se calienta a una temperatura entre 190 y 205°C, para producir un bitumen en un mezclador. La mezcla resultante se bombea hacia un distribuidor donde ocurre una reacción físico química en la cual el caucho se hincha y suaviza. Posteriormente la mezcla de asfalto – caucho reaccionando se vierte en el mezclador con los áridos.

- **Proceso Seco:** En el proceso de mezclado seco, las migas de caucho forman parte del agregado fino, en un porcentaje entre el 1 y el 4% respecto al peso total de los agregados. Estas se añaden directamente en el proceso de mezclado de los áridos con el asfalto. En la mezcla no se producen reacciones químicas importantes, debido al corto tiempo de mezclado, el cual no es suficiente para que se produzca una reacción similar a la que se produce en el método de diseño húmedo. No necesita equipos especiales para mezclar ya que el caucho es parte de los áridos. Las temperaturas de mezclado no son más altas que el proceso húmedo, generalmente entre 160 y 190°C.
- **Proceso en refinería:** El proceso de mezclado en refinería es semejante al proceso húmedo, diferenciándose en la digestión del caucho dentro del cemento asfáltico se realiza en la refinería de petróleo, directamente en el pitch que resulta de la destilación del crudo. Este ligante modificado se transporta a obra donde se combina con los áridos y llenantes para producir la mezcla asfáltica.

2.8.1 Porcentaje de Caucho

El porcentaje de caucho recomendado por diversos autores oscila entre un 10 y 25%, aun sin existir un valor óptimo. El uso de porcentajes altos de caucho conduce a viscosidad alta que limita su trabajabilidad.

Estudios realizados por Takkallou y Sainton (1992) muestran que un mayor porcentaje de caucho en asfalto, aumenta el punto de ablandamiento, reduce la penetración a 25°C y aumenta la viscosidad. Mientras que Khedaiwi et al (1993) obtuvieron resultados similares a los primeros, pero determinaron que además existía una tendencia a la reducción de la temperatura de inflamación, especialmente cuando se utilizan partículas finas de caucho (bajo 0.85mm), lo cual es una condición favorable en términos de seguridad.

2.8.2 Ventajas y desventajas del uso de caucho en mezclas asfálticas

Como se ha mencionado anteriormente, la adición de caucho en el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente no es nueva en el medio, es una tecnología estudiada desde la década de los 50's y utilizada ampliamente desde los 70's. Entre las ventajas que se han obtenido en la literatura de referencia, se pueden enunciar las siguientes:

- Mezclas más resistentes a los fenómenos de fatiga y ahuellamiento
- Aumenta la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico
- Disminuye la susceptibilidad térmica del asfalto
- Aumenta la resistencia a la humedad
- Ligante asfáltico más resistente al calor y al sobrecalentamiento debido al proceso de vulcanización de la llanta
- Aumento de la elasticidad del ligante

- Mayor resistencia al desgaste por abrasión
- Disminuye el ruido de rodadura
- Mejora las propiedades reológicas del asfalto
- Menor espesor de capa asfáltica
- Ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo que producen las llantas usadas
- Mezclas más durables y por lo tanto con menor necesidad de mantenimiento

Con el uso del caucho en mezclas asfálticas se han obtenido muy buenos resultados, pero se debe tener en cuenta:

- Incremento de la viscosidad y temperatura de fabricación en planta y extensión en obra
- La captación de aceites del asfalto por parte del caucho afecta las propiedades de adherencia y cohesión.

2.9 ESTUDIOS PREVIOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

El grupo de investigación en detección de contaminantes y remediales DECOR ha realizado otros estudios relacionados con mezclas asfálticas modificadas haciendo uso de residuos industriales

En la tabla 1 Se muestran los estudios previos sobre mezclas asfálticas modificadas utilizando ceniza los cuales han sido realizados como trabajo de grado de estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

Tabla1. Estudios previos sobre mezclas asfálticas modificadas

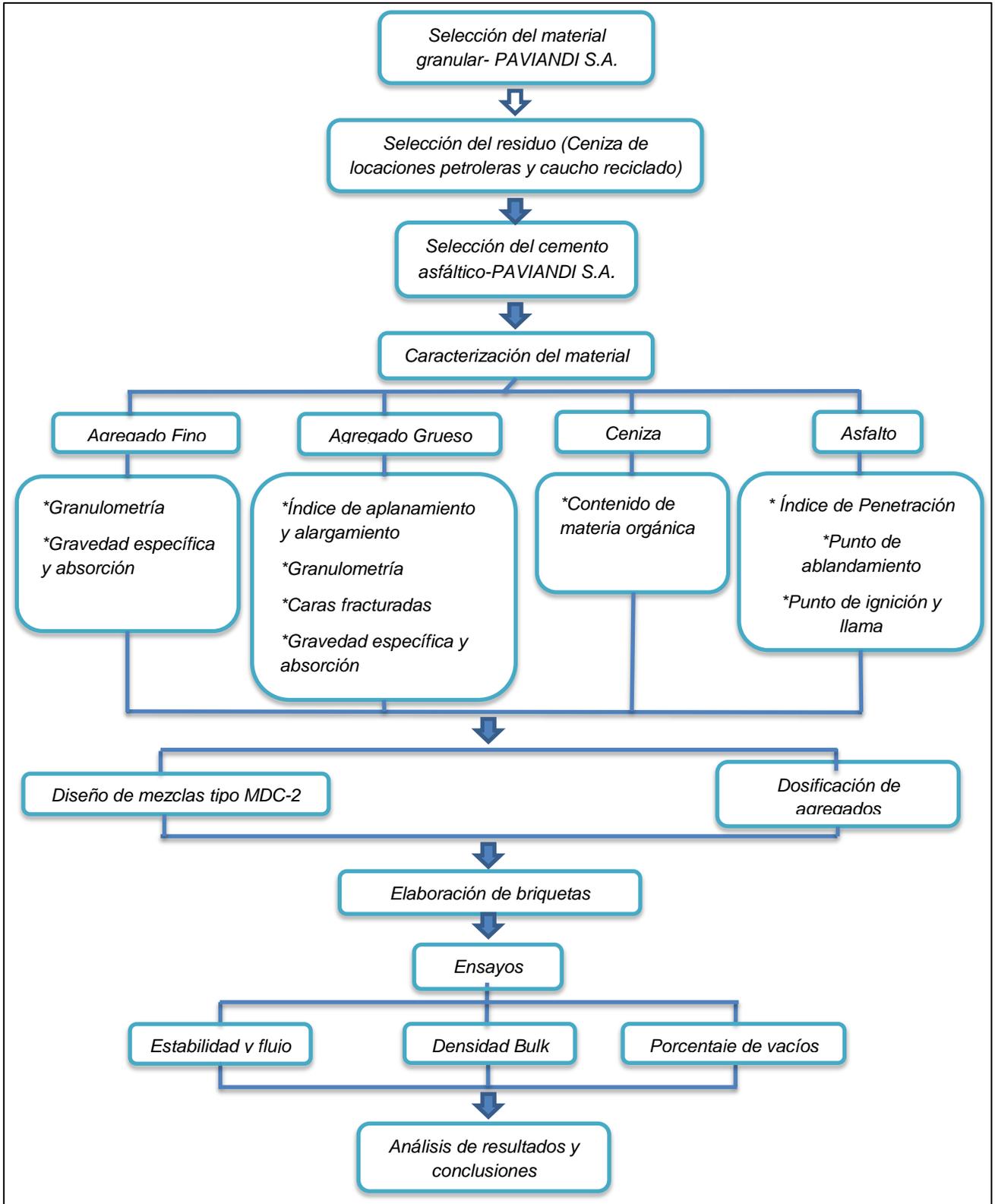
TITULO	CONCLUSIONES	AUTOR	AÑO
<i>Evaluación del Comportamiento de una Mezcla Densa en Caliente Modificada con Ceniza Proveniente de Locaciones Petroleras.</i>	<i>La mayor estabilidad la presentó una muestra que tenía un 4.5% de contenido de asfalto con adición de ceniza de 15%</i>	<i>Orozco Muñoz, Guillermo Andrés - Murillo Chacón, Juan Pablo</i>	<i>2011</i>
<i>Comportamiento de una Mezcla Densa en Caliente Modificada con Ceniza de Palma de Aceite</i>	<i>El porcentaje óptimo de asfalto es de 5.5% según los resultados de los ensayos Marshall realizados a cada una de las briquetas con adición de 10% de ceniza de palma.</i>	<i>Díaz Chacón, Luis Eduardo - Riveros Santos, Juan Sebastián</i>	<i>2011</i>
<i>Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante.</i>	<i>El ensayo de estabilidad y flujo, empleando el método Marshall, realizado a las briquetas, indica que el porcentaje óptimo de asfalto del 4.5%, junto con adición del 30% de ceniza volante, superando los requisitos mínimos de la norma INVIAS.</i>	<i>Aguilar Pedrozo, Luis Alejandro - Ayala Robayo, Edward Andrés</i>	<i>2013</i>

Adicionalmente, otros estudios realizados al interior de la universidad son:

<i>TITULO</i>	<i>CONCLUSIONES</i>	<i>AUTOR</i>	<i>AÑO</i>
<i>Utilización de las cenizas volantes en el concreto</i>	<i>Las mezclas adicionadas con ceniza desarrollan mayores resistencias que las mezclas sin ceniza</i>	<i>Herrera Galvis, Laura Paola</i>	<i>1999</i>

3. METODOLOGIA

Figura 1. Metodología



Para llevar a cabo la evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de ceniza proveniente de locaciones petroleras y caucho molido proveniente del reciclaje de llantas se decidió realizar pruebas de ablandamiento, punto de llama, penetración, peso específico para diferentes porcentajes de ceniza y caucho como adición al ligante, el producto utilizado es un asfalto 60/70 proveniente de la refinería de Barrancabermeja con numero de muestra: 203.590.843, cumpliendo con los requisitos de la Curva Reológica para una Mezcla Densa en caliente tipo 2 (MCD-2).

3.1 MATERIALES EMPLEADOS

3.1.1 Material granular

El material pétreo empleado para el desarrollo esta investigación es proveniente de la fuente de explotación natural ubicada en Pescadero (Santander) , en la cantera que se localiza junto al Rio Chicamocha. La empresa que proporcionó el material fue Paviandi S.A con planta de producción de asfalto en la vía Bucaramanga - Bogotá.

3.1.2 Ensayos a los materiales granulares

Los siguientes ensayos se llevaron a cabo en el material granular para obtener su clasificación:

- Índice de aplanamiento y alargamiento (INV E-230)
- Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV E-213)
- Caras fracturadas (INV E-227)
- Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos(INV E-223)
- Gravedad específica y absorción de los agregaos finos(INV E-222)

3.1.2.1 Descripción de los procedimientos de la caracterización del material granular.

a) Índice de aplanamiento y alargamiento (INV-230)

Se realiza el procedimiento expuesto en la norma INV E-213, se rechazan las partículas en el tamiz de 6,3mm y las que pasen por el tamiz de 6,3mm. El material retenido se pesa en las diferentes fracciones.

INDICE DE APLANAMIENTO: por medio de cuarteo se separan las partículas de cada fracción por el tamiz de barras paralelas. Se procede a dividir las partículas de agregado, a un lado se dejan las que no pasan para luego determinar la masa de las partículas que pasaron por el tamiz de las barras paralelas.

INDICE DE ALARGAMIENTO: Se fracciona el material, se pasa por el calibrador de alargamiento por la separación entre las barras y de dejan a un lado las partículas retenidas y no retenidas, y se pesan.

4. Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV E-213-07)

Para llevar a cabo este procedimiento de la norma INVE -213, se realiza los siguientes pasos:

-Se extiende el material en una superficie uniforme en el cual se pueda realizar el proceso de mezclado para que exista homogeneidad en los agregados.

-Se realiza el cuarteo de forma manual del cuarteo se toman 2/4 partes del material, el cual es sometido a un lavado para limpiar la muestra de los materiales que pueden pasar por el tamiz N 200(abertura 0,074 mm).

- Después el llevado el material al horno a una temperatura constante de 110°C durante un periodo de 24 horas; se procede a la selección en la serie de tamices y se deben pesar según la NTC 32.

Para finalizar se pesa el material retenido y se procede a realizar la curva granulométrica y la clasificación del mismo.

c) Caras fracturadas (INV E 227-07)

Se toma la muestra y se debe pasar por el tamiz de 4,75 mm (No 4) para separar los agregados gruesos de los finos. Se toma una cantidad de material de 1/2" (3000 gr), luego se lava el material para eliminar las partículas finas. Se seca en un horno a una temperatura constante de 110 °C +- 5°C. Después del secado se esparce la muestra en una superficie seca y grande, y se procede a inspeccionar cada partícula para poder clasificar si se tiene una o varias caras fracturadas. Con una espátula o herramienta similar se debe clasificar la muestra en tres categorías; (1) partículas fracturadas, (2) partículas que no cumplen con el criterio especificado, (3) partículas de dudosa o en frontera. Posteriormente se determina el número de partículas de cada grupo el peso de las mismas, se debe utilizar la masa para obtener los cálculos del porcentaje de partículas fracturadas.

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

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

Se siguieron las condiciones de la norma INV. E 223-07, la cual se hace necesaria para la determinación de las gravedades específicas bulk, bulk saturada, superficialmente seca y superficialmente aparente para agregados con tamaño mayor a 4,75 mm (tamiz No 4). La gravedad específica es el cociente entre la masa de un volumen unitario de material a una temperatura específica y la masa del mismo volumen de agua destilada libre de gas a esa temperatura. Para la elaboración de este ensayo se debe someter la mezcla a ensayar a un cuarteo según la norma INV E-202, para posteriormente lavarse y retirar el material inferior a 4.75 mm. Las cantidades mínimas se determinan de acuerdo al tamaño máximo nominal el cual se define como el tamiz que retiene entre el 5% y el 15% de material total.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.1.3 Asfalto

El producto utilizado es un asfalto 60/70 proveniente de la refinería de Barrancabermeja con número de muestra: 203.590.843, cumpliendo con los requisitos de la Curva Reológica para una Mezcla Densa en caliente tipo 2 MCD-2 (ver Figura 2 y Tabla 2).

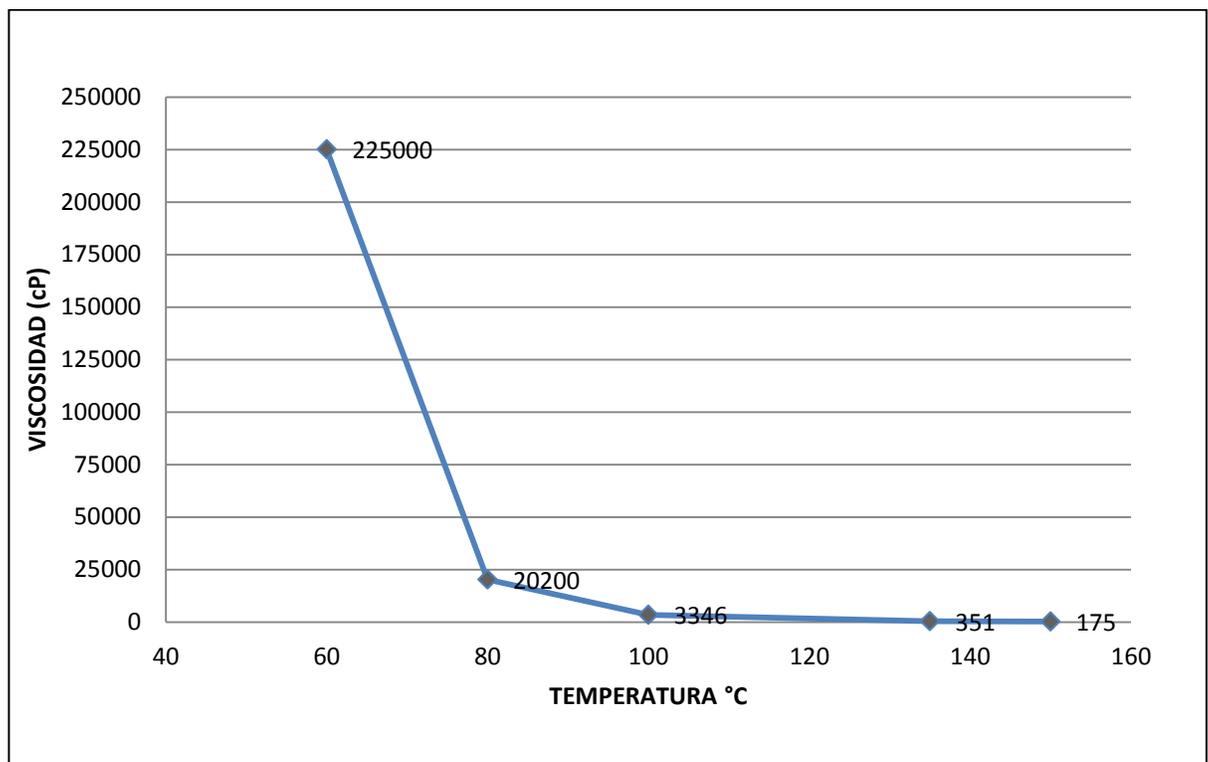


Figura 2. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio, gerencia de refinería de Barrancabermeja coordinación inspección de calidad. (Paviandi S.A)

Tabla 2. Ficha técnica de calidad de ensayos de laboratorio de asfalto 60/70 realizado por ECOPEPETROL S.A; número de muestra: 203.590.543

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	MÉTODO
CURVA REOLÓGICA				
Viscosidad a 60°C	cP	225000	reportar	ASTM D4402
Viscosidad a 80°C	cP	20200	reportar	ASTM D4402
Viscosidad a 100°C	cP	3346	reportar	ASTM D4402
Viscosidad a 135°C	cP	351,3	reportar	ASTM D4402
Viscosidad a 150°C	cP	175	reportar	ASTM D4402
Ductilidad	cm	140	100 mínimo	ASTM D 113D
Gravedad API	Grados API	7,1	reportar	ASTM D 4052
Densidad a 15 °C	Ka/ m ³	1020,3	reportar	ASTM D 4052
ÍNDICE DE PENETRACIÓN CALCULADO				
Penetración a 25°C (77°F)	Mm/10	60	60 mínimo -70 máximo	ASTM D5
Índice de penetración	N/A	1,2	reportar	ASTM D2872
Pérdida de masa (RTFOT)	g/100g	0,35	1 máximo	ASTM D36
Punto de ablandamiento	°C	48,3	45 mínimo – 55 máximo	ASTM D 36
Punto de inflamación	°C	298	232 mínimo	ASTM D 92
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,9	99 mínimo	ASTM D 2042

3.1.4 Ensayos realizados al material bituminoso

a) Punto de ablandamiento del material bituminoso (montaje de los anillos y pesa esférica) INV E 712-07.

Se realiza el montaje del equipo para la elaboración del ensayo; el material se calienta hasta que se encuentre en su estado líquido y se vierte en los anillos para luego dejar reposar por 30 minutos; a partir de este instante no debe tardar más de 240 minutos en terminarse el ensayo. Se procede a ser una baño liquido con agua destilada entre 30°C y 80°C . Se anota para cada bola y anillo la temperatura en el termómetro en el momento en que la bola toque fondo del plato de base.

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

Se toma 500 gramos de material asfáltico, se procede a calentar con una temperatura controlada no exceder los 150°C para evitar el proceso de oxidación del ligante 60/70 y no podrá pasar de 30 minutos. Se procederá a llenar los moldes, los cuales se calientan para evitar el impacto de temperaturas, se llena de material el cual debe ser superior a 10 mm de la penetración esperada. Cuando se tenga material bituminoso en el molde se debe tapar para evitar la entrada de polvo u otros elementos externos que puedan afectar la prueba, se deja enfriar en un ambiente controlado de 20°C y 30°C por un periodo de 1 y 2 horas, sumergiéndose los moldes en un baño de agua a temperatura especifica, se mantiene así durante los primero periodos del ensayo. Una vez cumplido con el tiempo se procede a desarrollar el ensayo con el equipo de penetración; se acerca la aguja en superficie del asfalto, se realizan por lo menos tres penetraciones en cada recipiente sobre puntos diferentes, usándose para cada penetración una aguja diferente. La

pesa de la máquina de penetración es de 100 gr y el volumen del recipiente no puede exceder los 125 ml.

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

Se llena la copa a cualquier temperatura, lo suficiente para ser fluida y vertida , que no exceda de 100°C (180°F) por encima del punto de ablandamiento y hasta la línea de llenado de la copa. Colocar la copa sobre el dispositivo, evitando las corrientes de aire. Como estos pasos se hacen previos al ensayo, el material se encuentra endurecido. Se enciende el equipo para aplicar calor al material de tal manera que el termómetro penetra sobre la copa y quede perpendicular, se enciende la llama de ensayo, ajustando el diámetro entre 3,3 y 4,8 mm.

Aplicando calor de manera que el incremento de temperatura sea de 15°C por minuto, hasta que la temperatura sea aproximada de 56°C por debajo del punto de llama esperado. A partir de este momento se disminuye el calor de manera que le incremento de temperatura sea de 5°C por minuto.

Pasar la llama una vez por cada aumento de 2°C. La llama se mueve en forma horizontal y 2 mm como máximo por encima del borde de la copa, movimiento continuo y suavemente en línea recta o en arco alrededor de 1 seg. La temperatura a la cual aparece una llama sobre la superficie del material se toma como punto de inflamación. Se continúa calentando la muestra a la misma rata de 5°C por minuto y pasando la llama hasta que el material se encienda y permanece quemándose por lo menos durante 5 segundos, se toma como punto de llama.

3.1.5 Ceniza

ECOPETROL S.A mediante sus estudios de perforación utilizan lodos para la extracciones de crudo, estos lodos son dispuesta en piscinas especialmente diseñadas para su manejo ambiental, pero se han vuelto un problema debido a la acumulación de este material. Este residuo industrial se deriva especialmente de la combustión y quema, evaporando el agua contenida para finalmente depositarlo en su lugar de almacenamiento.

Su composición fisicoquímica, con una coloración gris es el resultado de la presencia reducidas de oxígeno, pero el color puede variar dependiendo de la fuente productora puede ser de un gris claro, hasta el negro. La finura puede variar, mientras mayor sea la cantidad de ceniza volante que pase por la malla de 45 micras, mayor será su efecto sobre la resistencia en la mezcla asfáltica.

En términos granulométricos la ceniza tiene una gran variable dependiendo de la fuente, debido a los métodos de precipitación que pueden variar entre 3 y 5 etapas y en cada una se elimina y separa progresivamente fracción más fina de ceniza, esto es causada por una secuencia de la eliminación precipitada se puede corregir ajustando las proporciones que fue eliminada de la corriente de gas.

3.1.6 Ensayos a la ceniza volante (material que pasa el tamiz No 200)

La ceniza volante fue trabajada por el tamiz que pasa el tamiz No 200 no se hizo una previa granulometría, debido a que este fino fue implementado en la aplicación por medio húmedo en el asfalto 60/70.

- Granulometría de los agregados gruesos y finos (INV E-213).
- Contenido de materia orgánica (INV E-212)

a) La granulometría que se le hizo a la ceniza solamente se tuvo en cuenta las partículas de finos que pasan por el tamiz No 200, es decir quedando con resultado una muestra de material con dimensiones inferiores a los 75 μm .

b) contenido de materia orgánica (INV E-212)

El objetivo principal es determinar la presencia de materia orgánica en arenas usadas en este caso ceniza, uno de los procedimientos indica que se emplee una solución de color de referencia y el otro una vidrios de colores de referencia (Tabla 3). La importancia de este método de ensayo está en el hecho de proporcionar una advertencia sobre las impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el material. Cuando una muestra sujeta a este ensayo produce un color más oscuro que el color estándar, es aconsejable ejecutar la prueba para determinar el efecto de las impurezas orgánicas sobre la resistencia del asfalto.

Tabla 3. Escala de vidrios de color normalizado

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

De la muestra tomada en el ensayo, secada únicamente al aire, se toman unos 450 g, por el método de cuarteo manual o mecánico. Se coloca la ceniza en una botella hasta completar un volumen aproximado de 130 gr, se procede

a añadir la solución de hidróxido de sodio, hasta que el volumen total de la ceniza y líquido, después de agitado, sea aproximadamente igual a 200 ml, se tapa el frasco, se agita vigorosamente y se deja reposar por 24 horas; la cantidad de hidróxido de sodio corresponde a 6 gr.

El método escala de vidrio de colores de referencia –para definir con mayor precisión el color del líquido de la muestra de ensayo, se debe utilizar cinco vidrios de color, de acuerdo a la tabla 3; la preparación y la comparación se deben hacer conforme el procedimiento, y el resultado es el número de la placa orgánica cuyo color sea más parecido al color del líquido que sobrenada la muestra.

3.1.7 Caucho

El planeta está presentando una serie de cambios significativos ocasionados por la desmedida explotación de los recursos naturales por parte del hombre y su indiferencia por intentar renovar una mínima parte de dicha explotación, se conocen informes emitidos por entidades de alto prestigio y documentales que mencionan que en menos de 50 años la vida en el planeta se verá seriamente afectada de no tomar medidas respecto al estilo de vida. Una de estas acciones descontroladas es la producción, utilización y supuesto “desecho” de las llantas utilizadas en los vehículos automotores, considerando que los materiales utilizados en la fabricación de este producto son extraídos de la naturaleza. (GRUPO RENOVIA).

El caucho que se empleó fue proporcionado por el GRUPO RENOVIA ubicado en la ciudad de Bogotá D.C. Esta empresa tiene como objetivo la recuperación de materiales renovables y no renovables entre ellos las llantas usadas, que con un

proceso físico mecánico de trituración, se recupera sus componentes con metal, caucho y textil, los cuales son reutilizados en nuevos procesos.

3.1.8 Ensayos realizados al caucho

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

Al ser un material que ha tenido un proceso de trituración los tamaños de las partículas son inferiores al tamiz al tamiz No 10, encontrando una significativa retención del material en el tamiz No 40, terminando hasta el fondo; es decir se pueden encontrar diferentes tamaños del material a lo largo de la escala de tamaños en la granulometría.

3.1.9 Briquetas realizadas según diseño Marshall

Las briquetas se realizaron de acuerdo al método Marshall cumpliendo con los parámetros para una mezcla en caliente tipo 2 (MCD-2).

El asfalto y los agregados se calentaron y mezclaron completamente hasta que todas las partículas de agregados estén totalmente revestidas. Las briquetas son compactadas mediante golpes con el martillo Marshall (35, 50, 75 golpes) en ambas caras. En este caso se aplicaron 75 golpes en cada cara. Para la elaboración de las muestras se realizó la granulometría correspondiente según la norma INVIAS , debido a que solo se trabajó con un solo punto de asfalto modificado con caucho y ceniza , pero en diferentes porcentajes expuestas en la tabla 4

Tabla4. Proporciones de Mezclas modificadas con Ceniza y caucho

	Proporciones (Todas con 5.2% Asfalto)
1	<i>Muestra Patrón</i>
2	<i>5% De Ceniza y 10% De Caucho</i>
3	<i>5% De Ceniza y 15% De Caucho</i>
4	<i>10% De Ceniza y 10% De Caucho</i>
5	<i>10% De Ceniza y 15% De Caucho</i>
6	<i>15% De Ceniza y 10% De Caucho</i>
7	<i>15% De Ceniza y 15% De Caucho</i>
8	<i>5% De Caucho</i>
9	<i>10% De Caucho</i>

3.1.10 Dosificación de los agregados

En la Tabla 5 se observa la cantidad en gramos de material granular por briqueta con 5.2% de contenido de asfalto para mezcla densa en caliente (MDC-2).

Tabla 5 cantidad en gramos de material granular por briqueta con 5.2% de contenido de asfalto

Tamiz	Gradación	%Retenido	Peso en gr
$\frac{1}{2}$	80-95	12,5	142,2
$\frac{3}{8}$	70-88	8,5	96,696
# 4	49-65	22	250,272
# 10	29-45	20	227,52
# 40	14-25	17,5	199,08
# 80	8-17%	7	79,632
# 200	4-8%	6,5	73,944
p-200	6-0%	6	68,256

Una briqueta de 1200 gramos y con 5.2% de asfalto se requerirán 62.4 gramos de asfalto y 1137.6 gramos de agregados.

3.1.11 Resistencia de mezclas bituminosas por medio del aparato Marshall

Este ensayo se llevó a cabo bajo la norma INV 748 del Instituto Nacional de Vías. Se elaboraron 90 briquetas, con diversas proporciones de caucho y ceniza adicionadas al ligante, se trabajó con un contenido de asfalto del 5,2%, se analizaron en ocho (8) diferentes combinaciones incluyendo la mezcla patrón de asfalto puro 60/70 especificadas en la tabla 6.

Tabla 6. Combinaciones para la elaboración de briquetas

Mezcla Asfáltica	<i>asfalto para cada briqueta gr</i>	<i>total de briquetas</i>	<i>peso de asfalto gr</i>	<i>peso de asfalto gr + factor de seguridad para cada tarro(gr)</i>	<i>cantidad de ceniza</i>	<i>cantidad de caucho</i>	<i>cantidad de asfalto</i>	<i>agregado para cada briqueta gr</i>	<i>agregado para 10 briquetas gr</i>
Muestra Patrón	62,4	10	624	900	0	0	900	1137,6	11376
5%Ceniza 10%Caucho	62,4	10	624	900	45	90	765	1137,6	11376
5%Ceniza 15%Caucho	62,4	10	624	900	45	135	720	1137,6	11376
10%Ceniza 10%Caucho	62,4	10	624	900	90	90	720	1137,6	11376
10%Ceniza 15%Caucho	62,4	10	624	900	90	135	675	1137,6	11376
15%Ceniza 10%Caucho	62,4	10	624	900	135	90	675	1137,6	11376
15%Ceniza 15%Caucho	62,4	10	624	900	135	135	630	1137,6	11376
5%Caucho	62,4	10	624	900	0	45	855	1137,6	11376
10%Caucho	62,4	10	624	900	0	90	810	1137,6	11376
		Σ	5616	8100	540	810	6750		102384
		90							

Según lo establecido en la Norma INV 748 estipula para el diseño Marshall el método a seguir, resumido de la siguiente manera:

Para la elaboración de cada una de las 90 briquetas, se necesitaron 1200 gramos, compuesta entre áridos, ligante con adición de caucho y ceniza volante en las diferentes proporciones; como en todo proyecto se deben tener en cuenta los imprevistos en la pérdida de material, así que se incrementó con un factor de 276 gr de asfalto en cada combinación como factor de desperdicio. Para los agregados el análisis granulométrico arrojó una dosificación de 87% en triturado y de un 13 % para materia pasa el tamiz de 1/2", se cumplieron los parámetros estipulados por el INVIAS.(Tabla 7)

Tabla 7 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1½"	1"	¾"	½"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
		% PASA									
Densa	MDC-1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-2			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-3					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semidensa	MSC-1		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-2			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-0	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-1		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto módulo	MAM		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

3.1.12 Procedimiento para el diseño de briquetas (compactación)

Para el diseño de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-2) ;se realizaron probetas cilíndricas con dimensiones aproximadas de 4” de diámetro y 2 ½” de altura, con un peso de 1200 gramos, compuestas por materiales gruesos y finos expresados en la Tabla 7 gradación de los agregados , con factor óptimo para ser empleada en una MDC-2 por el método Marshall.

Se debe calentar el molde, el collarín y los materiales pétreos y asfálticos en un horno o cocina a una temperatura de 110°C a 140°C . Después de haberse definido el peso de los materiales se procede al mezclado del ligante 60/70 y los agregados , que sea homogéneo , con anterioridad de coloca el molde un papel filtro y se introduce el material dentro del mismo y se procede a aplicar los 75 golpes distribuidos en diferentes proporciones por cada cara con un martillo dispuesto para este ensayo a una altura de 18”. Se enumera el espécimen se le toman las medidas tanto de diámetro y altura. Se recomienda tomar como mínimo tres medidas y se procede a dejarla 24 horas para luego ser ensayada. En caso de las mezclas modificadas con caucho y ceniza se dejaron por un periodo de cuatro días.

3.1.13 Pruebas mecánicas para la verificación, comportamiento de mezclas asfálticas

- Análisis de la densidad de vacíos
- Ensayo de estabilidad y flujo
- Peso específico “bulk”

a) Análisis de densidad de vacíos

Se promediaron los datos para tener un valor específico para cada diseño. Se tomaron los pesos específicos “bulk” de las probetas con el mismo porcentaje

de asfalto. Se realizó una conversión para pasar las unidades al sistema inglés.

Análisis y descripción de las formulas empleadas.

- Calculo del peso específico promedio del agregado total.

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

Psagr=peso específico de agregado grueso

Psaf=peso específico de agregado fino

- Calculo del peso específico máximo teórico.

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

PsAgr=peso específico del agregado

PsAsf=peso específico del asfalto

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

b) Ensayo estabilidad y flujo

Es un proceso que consiste en someter las probetas a un baño de agua María por un periodo de treinta (30) minutos a una temperatura constante 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 retirado de la probeta del baño María y en la activación de la maquina Marshall, antes de iniciar el equipo es de vital importancia verificar que tanto la medición de la carga como la deformación inician en cero, se procede a la activación del equipo observando constantemente la medida de la carga en libras y si esta llega el punto máximo se para el ensayo. 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 el transito que producen deformaciones) y el flujo.

c) Peso específico “bulk”

Especificaciones INV. E-734, se toman unos datos previos que son los siguientes, tres medidas de la altura y el peso seco de cada briqueta. La prueba consiste en sumergir las probetas por lo menos 5 minutos en agua con temperatura ambiente 25°C , tomarle el peso sumergido y proceder con una toalla a eliminar el exceso de agua . Para obtener el peso saturado y superficialmente seco, teniendo los datos anteriores se calcula la densidad bulk a cada una. Luego aplicarles un factor de corrección de temperatura del agua de 25°C correspondiente a 0,997 según la tabla 1 de la INV. E-734

$$Gb = \frac{Wa}{(W_{ss} - W_w)}$$

W_a=peso de la muestra seca en el aire

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

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

4. RESULTADOS

Este estudio permitió la caracterización de materiales para la preparación de mezclas asfálticas tipo MDC-2. A continuación se registran los resultados de los ensayos que se llevaron a cabo. Los resultados detallados se encuentran en la sección de anexos, a partir del ANEXO 1.

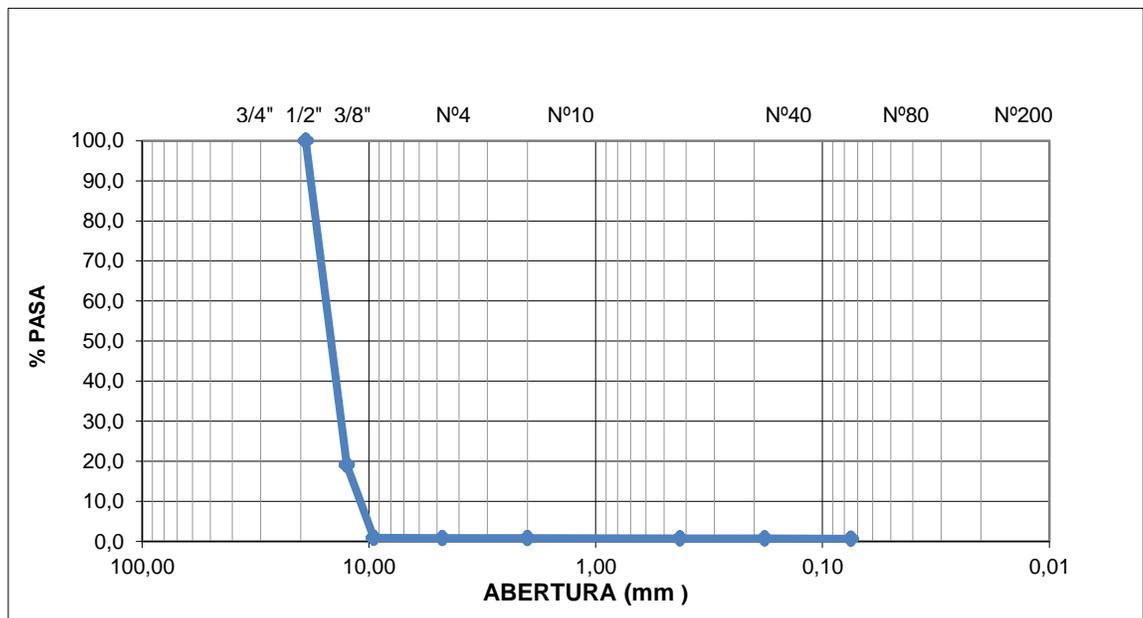
4.1 CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS

Con el fin de garantizar el cumplimiento de los parámetros para los agregados requeridos por la norma INVIAS para la elaboración de mezclas asfálticas se llevaron a cabo los ensayos pertinentes para la caracterización del material a utilizar.

4.1.1 Granulometría de agregado grueso y fino

La caracterización del agregado se realizó según la norma INV E-213-07 utilizando la serie de tamices establecidos para ello.

Figura 3. Curva de los agregados gruesos



Se llevó a cabo el ensayo al agregado y se graficó el resultado para obtener datos dicientes de su uniformidad. En el ANEXO 1 se encuentran los datos registrados en el laboratorio que permitieron obtener dicha curva.

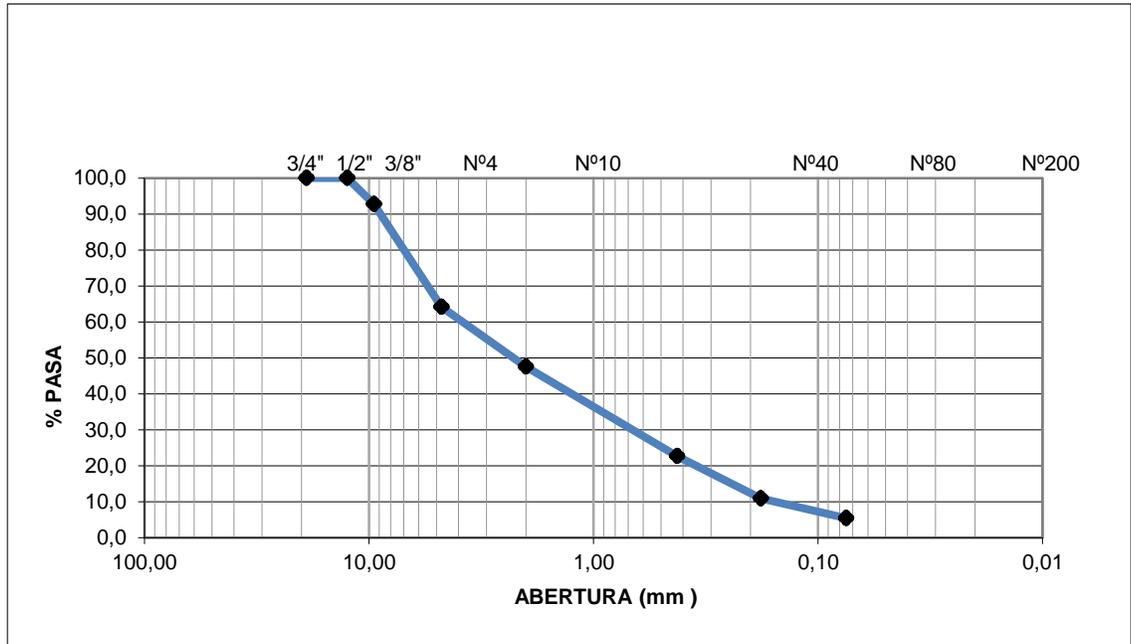


Figura 4. Curva de los agregados finos

Se llevó a cabo el ensayo al agregado y se graficó el resultado para obtener datos dicientes de su uniformidad. En el ANEXO 2 Se encuentran los datos registrados en el laboratorio que permitieron obtener dicha curva.

4.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados

Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos. INV 223-07

Se realizaron dos ensayos. En la tabla 8 se presentan los resultados de los mismos para las muestras de agregados usadas. En el ANEXO 3 se muestran los datos completos del ensayo.

Tabla8. Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos

CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica Bulk Gsb $=A/(B-C)$	2,635	g/cm^3
Gravedad específica Bulk SSS $Gsb=(B/(B-C))$	2,660	g/cm^3
Gravedad específica aparente Gsa $=A/(A-C)$	2,704	g/cm^3
Porcentaje de Absorción $((B-A)/A)$	0,980	%

Gravedad específica y absorción de los agregados finos. INV 222-07

Se realizaron dos ensayos. En la tabla 9 se presentan los resultados de los mismos para las muestras granulares usadas. En el ANEXO 4 se muestran los datos completos del ensayo.

Tabla 9 Gravedad específica y absorción de los agregados finos

CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
Gravedad específica Bulk Gsb $=A/(V-W)$	2,654	g/cm^3
Gravedad específica Bulk SSS $Gsb=(500/(V-W))$	2,679	g/cm^3
Gravedad específica aparente Gs $=A/((V-W)-(500-A))$	2,723	g/cm^3
% de Absorción $((500-A)/A)*100$	0,97	%

4.1.3 Caras fracturadas INV. E-227-07

El ensayo se llevó a cabo bajo la norma INV. E-227 y se obtuvo el porcentaje del material presenta caras fracturadas. (Tabla 10). Este valor indica que es

posible el uso del material para la preparación de mezclas asfálticas, teniendo en cuenta que cumple con la norma INV. E-400 donde se especifican los parámetros que debe cumplir cada ensayo. (ANEXO 5)

Tabla 10. Porcentaje de caras fracturadas

TAMIZ		% DE CARAS FRACTURADAS
PASA	RETENIDO	
1½"	1"	0
1"	¾"	0
¾"	½"	92,01
½"	3/8"	88,28

4.1.4 Índice de aplanamiento y alargamiento INV. E-230-07

La tabla 11 muestra los porcentajes de aplanamiento y alargamiento que se obtuvieron del ensayo realizado y que cumple con la norma INV E 230-07 . Los datos registrados en el laboratorio para la obtención de los resultados se encuentran en el ANEXO 6.

Tabla 11. Índice de aplanamiento y alargamiento

INDICE DE APLANAMIENTO (%)	21.65
INDICE DE ALARGAMIENTO (%)	18.72

4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE

A continuación se muestra la caracterización granular de la ceniza a utilizar para la modificación de la mezcla asfáltica.

4.2.1 Contenido de materia orgánica INV. E-212-07

De la realización de este ensayo se obtuvo el resultado consignado en la Tabla 13. Adicionalmente, los datos completos de este ensayo se encuentran en el ANEXO 7.

Tabla 13. Contenido de materia orgánica

MUESTRA	No. GARDNER	DESCRIPCION
1	11	Estándar

4.2.2 Gravedad específica y absorción de los agregados finos. INV 222-07

De la realización de este ensayo se obtuvo el resultado consignado en la Tabla 14. Adicionalmente, los datos completos de este ensayo se encuentran en el ANEXO 4.

Tabla 14. Gravedad específica y absorción de los agregados finos

CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
gravedad especifica	2,23	g/cm^3
porcentaje de absorción	0,8	%

4.3 CARACTERIZACION DEL ASFALTO

El material asfáltico fue sometido a los ensayos pertinentes para la caracterización del mismo. Se realizó a las nueve mezclas asfálticas modificadas, incluyendo la muestra patrón. Todos se llevaron a cabo bajo los requerimientos de la norma INVIAS.

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

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

Los resultados resumidos se muestran a continuación en la Tabla 15. Y en el ANEXO 8 se encuentran los datos complementarios al resumen expuesto a continuación.

Tabla 15. Resumen caracterización del Asfalto

TIPO DE MUESTRA	PENETRACION PROMEDIO mm	PUNTO DE ABLANDAMIENTO °C	PUNTO DE IGNICIÓN °C	PUNTO DE LLAMA °C	PESO ESPECIFICO(gr/cm ³)
Asfalto sin modificar	6,880	53°	222°	226°	1,073
Asfalto con 5%Ceniza y 10%Caucho	6,0	53°	175°	190°	1,042
Asfalto con 5%Ceniza y 15%Caucho	8,410	50°	180°	194°	1,021
Asfalto con 10%Ceniza y 10%Caucho	6,390	51°	220°	228°	1,059
Asfalto con 10%Ceniza y 15%Caucho	7,330	56°	238°	240°	0,819
Asfalto con 15%Ceniza y 10%Caucho	5,44	60°	188°	196°	1,350
Asfalto con 15%Ceniza y 15%Caucho	8,860	55°	195°	215°	0,835
Asfalto con 5%Caucho	7,850	40°	178°	186°	1,178
Asfalto con 10%Caucho	8,280	51°	216°	226°	0,875

4.4 RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL INV. E-748-07

A continuación, en la Tabla 16 se presenta un resumen de los resultados del ensayo Marshall realizado a las briquetas con mezcla densa en caliente MDC-2 con adición de ceniza volante y caucho. Se tuvieron en cuenta nueve mezclas asfálticas modificadas incluyendo la mezcla patrón; todas con 5.2% de asfalto. Los datos obtenidos se evidencian el ANEXO 9.

Tabla 16. Resumen de Prueba Marshall

TIPO DE MUESTRA	PESO UNITARIO Lb/in ³	%VACIOS AGREGADOS	%VACÍOS MEZCLA	ESTABILIDAD Libras	FLUJO mm
Asfalto sin modificar	149,11	14,32	2,73	2719,7	7,8
Asfalto con 5%Ceniza y 10%Caucho	142,03	18,39	7,03	3192,350	4,0
Asfalto con 5%Ceniza y 15%Caucho	141,26	18,83	7,30	3214,600	3,6
Asfalto con 10%Ceniza y 10%Caucho	141,51	18,69	7,56	3052,400	4,0
Asfalto con 10%Ceniza y 15%Caucho	141,37	18,77	4,39	3527,87	3,6
Asfalto con 15%Ceniza y 10%Caucho	141,15	18,90	10,19	3578	3,9
Asfalto con 15%Ceniza y 15%Caucho	140,98	18,99	4,92	3634,375	3,7
Asfalto con 5%Caucho	141,00	18,98	9,01	2784,5	4,4
Asfalto con 10%Caucho	141,29	18,81	5,35	3243,5	5,8

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La implementación de nuevas tecnologías, genera un crecimiento en el desarrollo investigativo de materiales innovadores, mediante el aprovechamiento de productos ya existentes pero que debido a su uso se han vuelto un problema medio ambiental por su disposición final; encontrar una solución es reutilizar esta materia prima, procesarla y transformarla para así generar elementos constructivos sostenibles, económicos y amigables con su entorno.

Lo que se buscó fue encontrar una mezcla que ayudara un poco con la problemática actual, donde los residuos de llantas proliferan en cantidades y no tienen ningún manejo, de igual forma en las locaciones petroleras el manejo de lodos y el proceso de los mismos está ocasionando un exceso de finos, el cual es llamado ceniza. La iniciativa fue unir estos dos materiales, con características químicas, mecánicas y de comportamiento diferente para generar un ligante modificado.

Mediante la adición por vía húmeda al asfalto 60/70, se generaron mezclas en diferentes porcentajes de caucho reciclada de llanta y de ceniza, a las cuales se les hicieron varios estudios que se encuentran consignados en este proyecto de investigación; en donde se incorporaron a una mezcla densa en caliente tipo 2 MDC-2. La ceniza utilizada fue proporcionada por la compañía ECOPETROL S.A y el GRUPO RENOVA es la encargada del proceso, manejo de llantas y aprovechamiento del caucho.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR

Los materiales empleados fueron de excelente calidad los cuales fueron proporcionados por la empresa Paviandi S.A; cumpliendo con las especificaciones INV. 400. En la elaboración del diseño Marshall se trabajó con una mezcla de

agregado en la siguiente proporción 87 % para agregados finos y un 13% para agregados gruesos cumpliendo con la especiación INV 450 para el diseño de mezclas densas en caliente. La tabla 17 hace un resumen de la verificación del cumplimiento de las normas

Tabla 17. Caracterización de los agregados pétreos

ENSAYO	NORMA	ESPECIFICACION	VALOR	Und
	I.N.V	INV ART 400 MCD		
Granulometría	E-213	-	-	-
Gravedad específica de gruesos	E-223	-	2,654	g/cm ³
Gravedad específica de finos	E-222	-	2,635	g/cm ³
Caras fracturadas	E-227	75% MAXIMO	72,01	%
Índice de aplanamiento	E-213	30% MAXIMO	21,65	%
Índice de alargamiento	E-213	30% MAXIMO	18,72	%
% absorción de agregado grueso	E-223	-	0,97	%
% de absorción de agregado fino	E-222	-	0,98	%

5.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA

La ceniza trabajada presentaba una coloración gris clara, siendo un material que pasa por el tamiz No 4 tomándose como un fino de acuerdo a los ensayos de granulometría efectuados en la misma. Adicionalmente se le halló la gravedad específica para finos (INV.E-222) y el contenido de materia orgánica arrojando una coloración estándar y con un número de Gardher de 11.

Para el desarrollo de la mezclas se tomó la decisión de trabajar con el material retenido en el fondo de la serie de tamices (Pasa 200) , siendo este la adición para la elaboración del diseño Marshall de la mezcla densa en caliente modificada (MDC-2) . En la tabla 18 se presenta los valores para la caracterización de la ceniza volante.

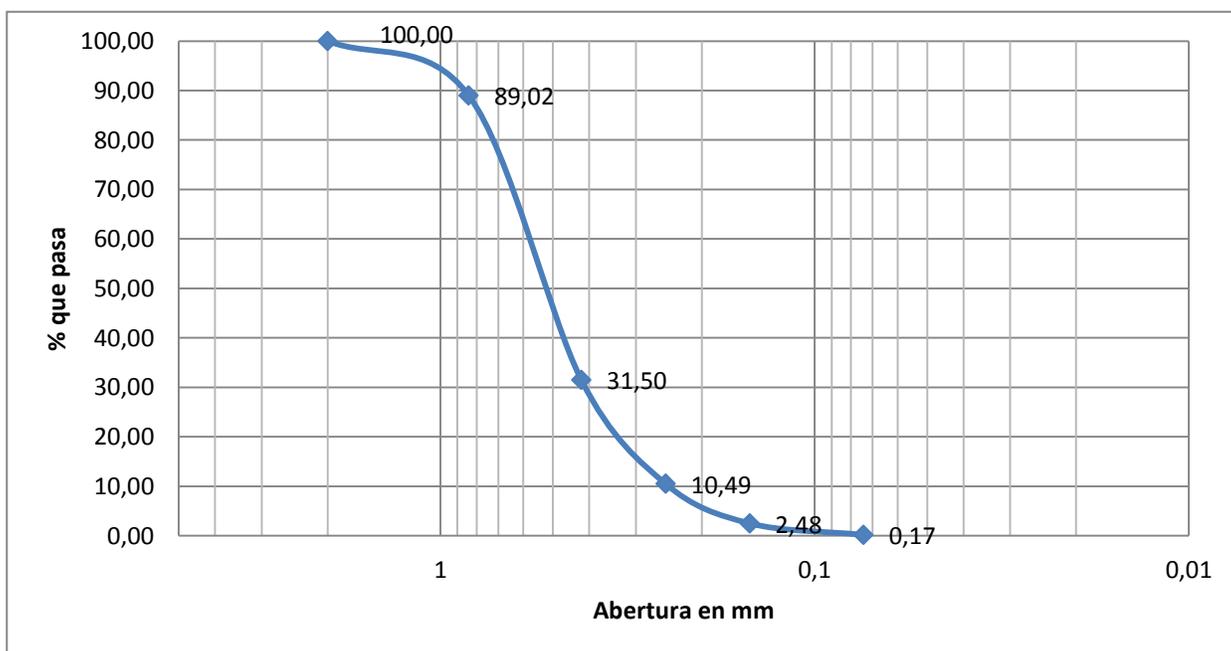
Tabla 18. Caracterización de la ceniza volante

ENSAYO	NORMA	ESPECIFICACION I.N.V ART 400	VALOR
	I.N.V	MCD	
Granulometría	E-213	-	-
Gravedad específica de la ceniza	E-222	-	2,23
Contenido de materia orgánica	E-212	3	Color rojo claro
% absorción de la ceniza	E-222	-	0,8

5.3 CARACTERIZACION DEL CAUCHO

Según la granulometría efectuada a una muestra representativa, las partículas del caucho trabajado como mejora en la mezcla densa en caliente modificada oscilan entre 0,84 mm -0,075 mm, existiendo una muestra de porcentaje retenido en el tamiz # 40(partículas con dimensiones cercanas a los 0,42 mm) sirviendo como llenante mineral y a su vez mejorar los puntos críticos, debido a que el látex ayuda a que el ligante se comporte elásticamente. (Figura 5). Ver ANEXO 10.

Figura 5. Granulometría del caucho (finos)



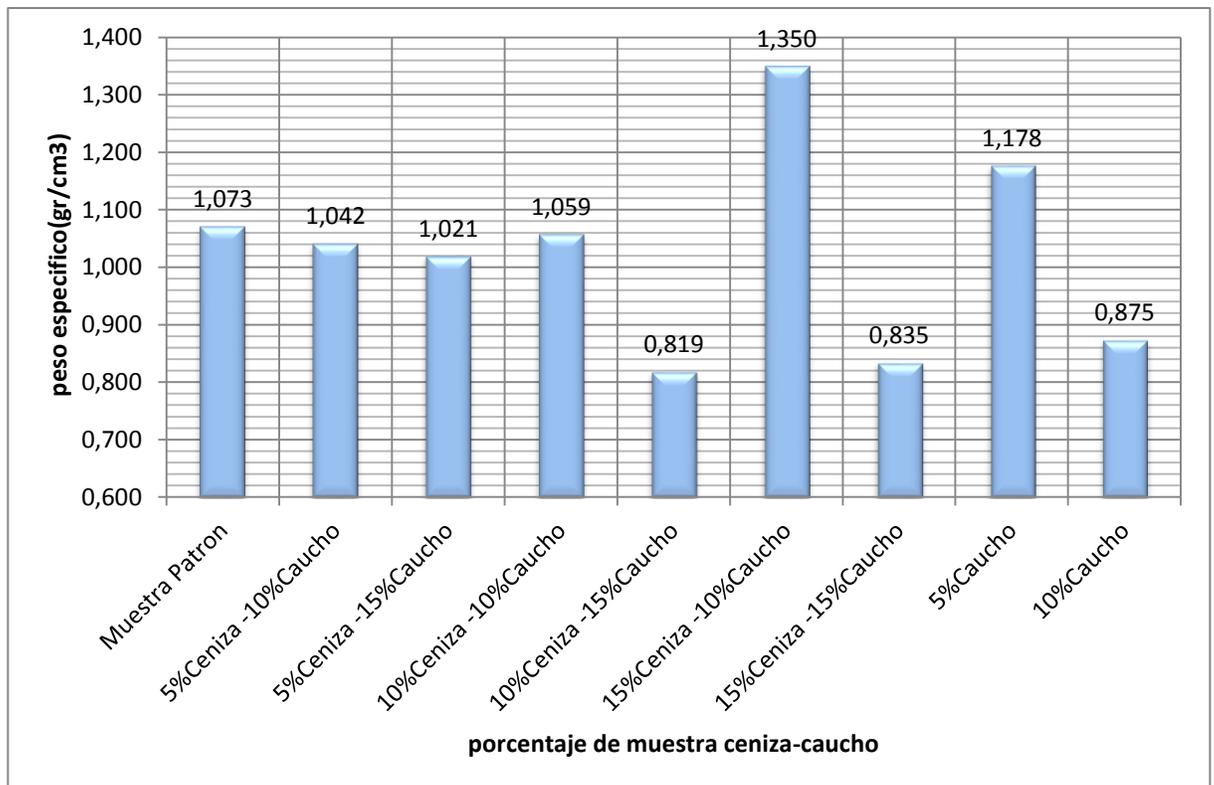
5.4 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO 60/70 MODIFICADO CON ADICION DE CAUCHO Y CENIZA VOLANTE

Para evaluar las características mecánicas de las mezclas asfálticas MCD-2 modificada, con ceniza de las locaciones petroleras y caucho reciclado de llanta se desarrollaron los ensayos de punto de ablandamiento, punto de llama e inflamación, peso específico del material bituminoso y penetración comparándolos con una muestra convencional evaluada mediante el ensayo de resistencia de mezclas empelando el método Marshall.

5.4.1 Peso específico del material bituminoso (INV. E-706)

En la figura 6 se presentan todos los resultados obtenidos en el estudio del peso específico para cada una de las mezclas teniendo como muestra patrón el asfalto 60/70 en su forma pura.

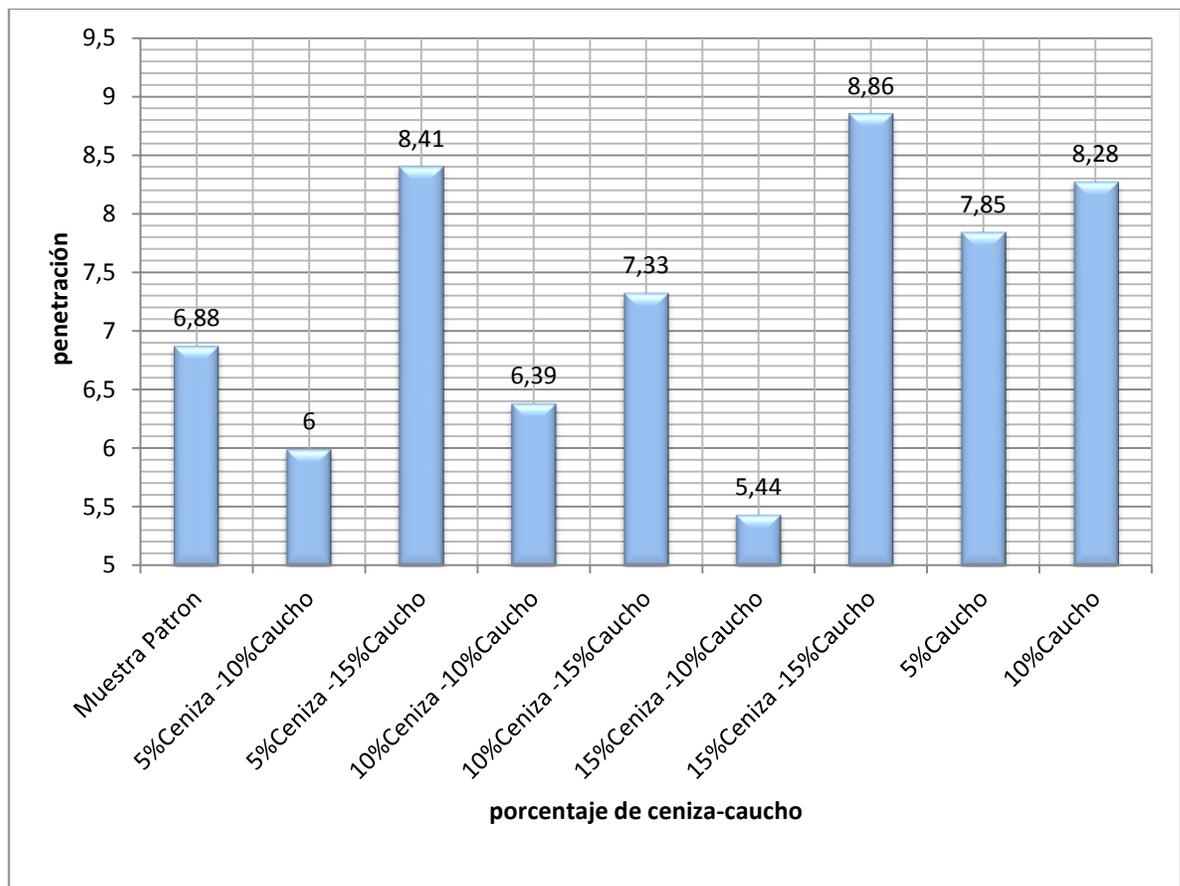
Figura 6. Peso específico del material bituminoso



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

En la figura 7 se presentan los promedios de cada una de las mezclas modificadas, se pueden detectar que las que tienen mayor contenido de caucho poseen mayor profundidad de penetración, a diferencia de aquellas mezclas con mayor cantidad de ceniza.

Figura 7. Penetración de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho.



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

Durante la preparación de las mezclas se puede detectar que el caucho a medida que va aumentando la temperatura presenta una característica que genera olores y emisiones no agradables, pero el caucho llega al punto donde se funde y se combina con el asfalto, proporcionando el látex actuando como un líquido viscoso y elástico después de ser enfriado. En las siguientes figuras 8 y 9 se hace una relación entre el punto de inflamación y de llama.

Figura 8. Punto de inflamación (°C) de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho.

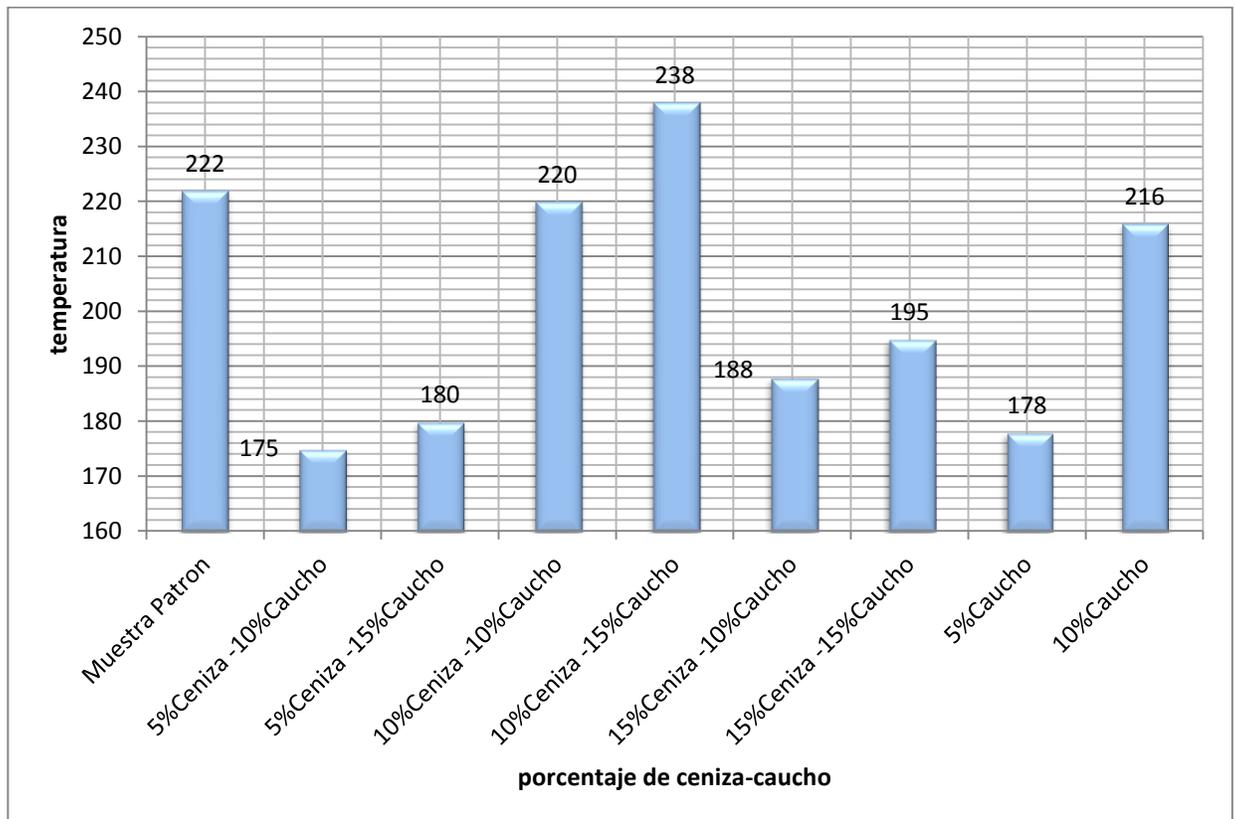
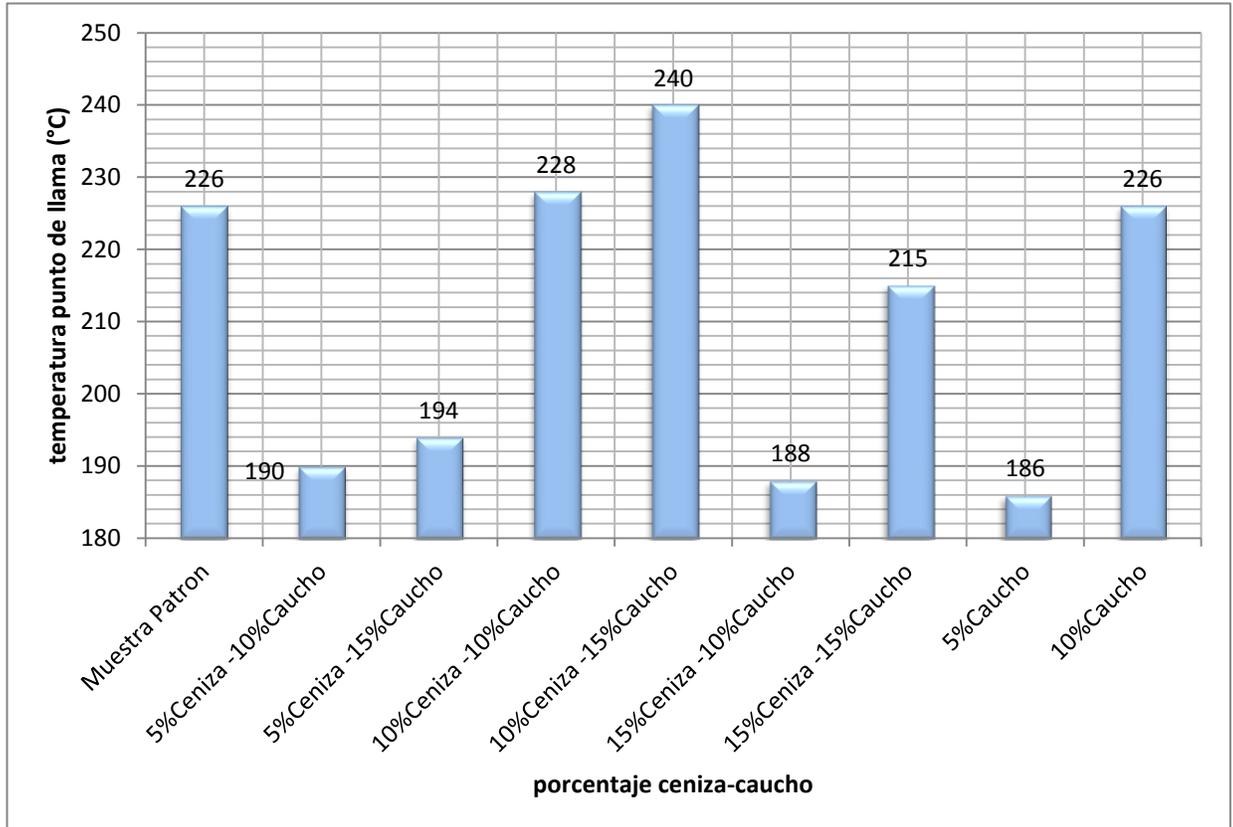


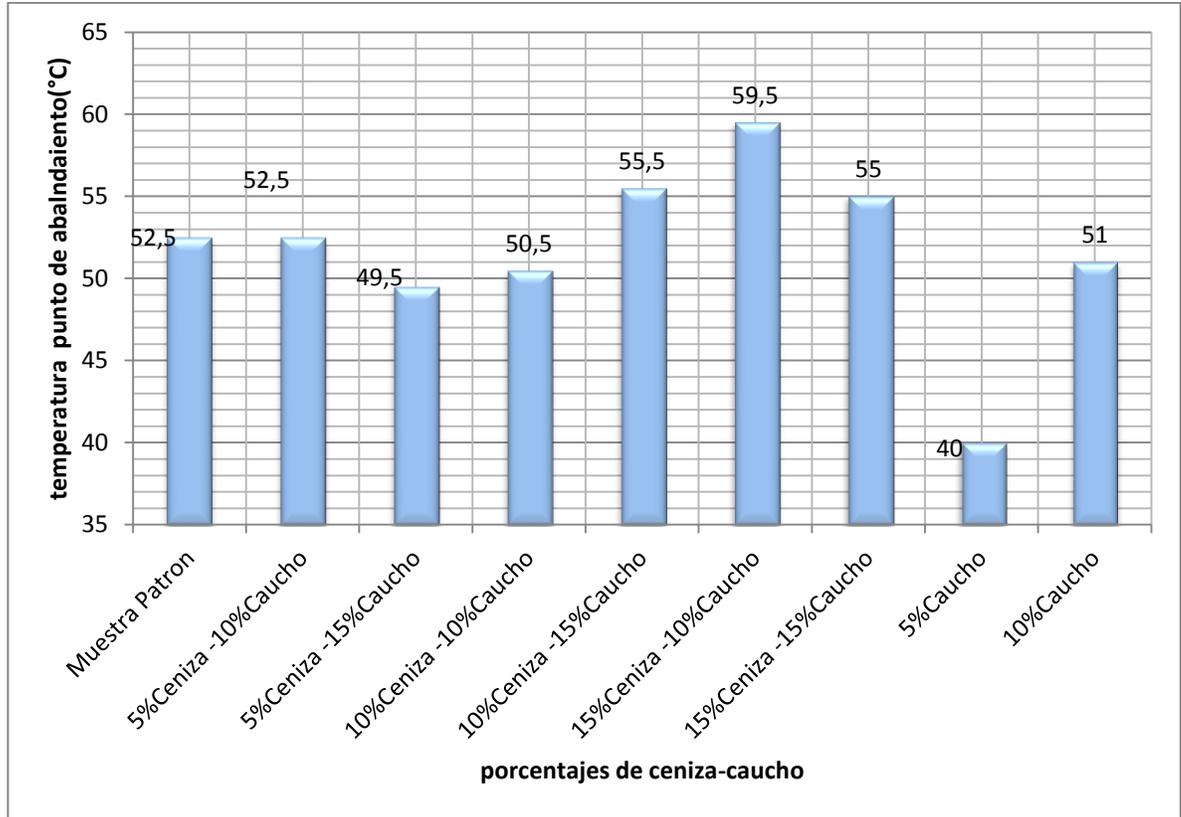
Figura 9. Punto de llama de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho



5.4.4 Punto de ablandamiento del material bituminoso (montaje de los anillos y pesa esférica) INV E -712-07.

Durante la preparación de las muestras se tuvo gran cuidado de ir incrementada la temperatura, debido que un cambio brusco podría afectar la homogeneidad de los ensayos y se creará incertidumbre. La única muestra que se desvió de las muestras estándar fue la que contenía 5 % de caucho con una temperatura inferior de 40 °C. En la figura 10 se muestra el punto de ablandamiento en °C de las nueve muestras.

Figura 10. Punto de ablandamiento (°C) de las combinaciones de asfalto modificado con caucho y ceniza volante.



5.5 PRUEBA MARSHALL

Para la evaluación del comportamiento de la mezcla asfáltica, se llevó a cabo el ensayo de Resistencia de Mezclas asfálticas en caliente usando el aparato Marshall con el fin de obtener un resultado diciente de estabilidad y flujo que permita concluir cual fue la mezcla que tuvo un comportamiento optimo frente a la modificación a la que fueron sometidas.

Ver ANEXO 11 y Tabla 19.

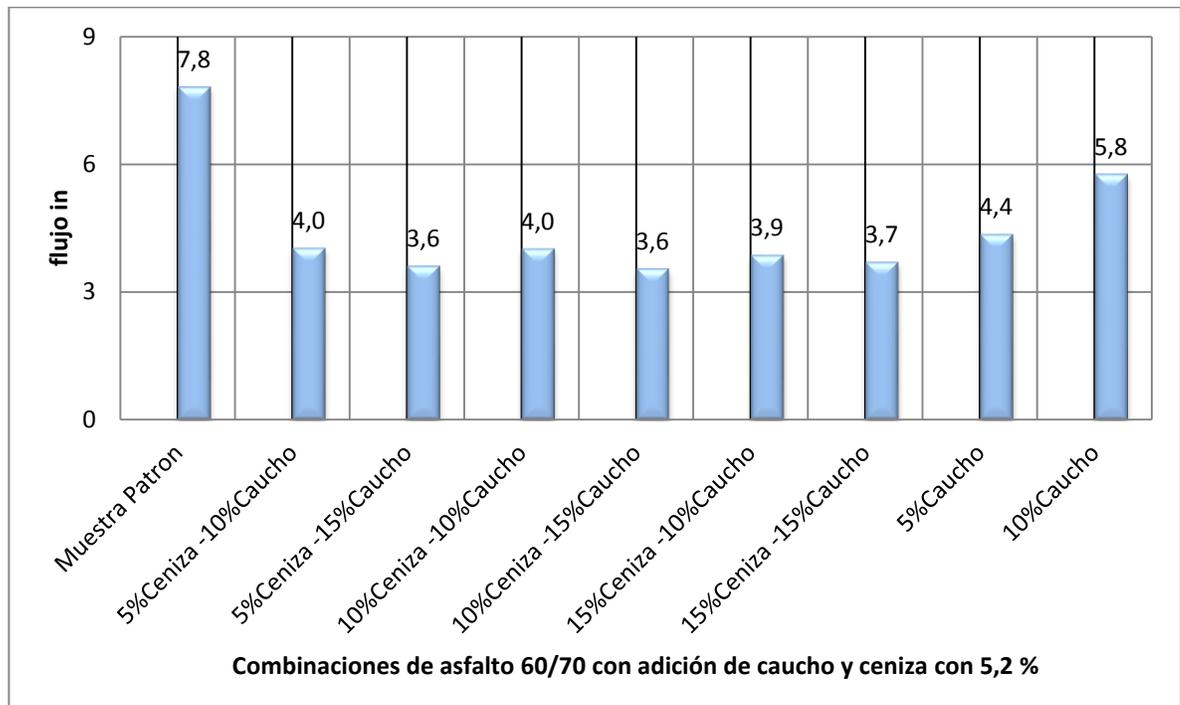
Tabla 19. Resumen de estudio de las 90 especímenes con diferentes proporciones de caucho y ceniza volante, mediante el análisis de la prueba Marshall.

PROPORCION		% DE ASFALTO	FLUJO	ESTABILIDAD	G_{bulk}	PESO UNITARIO Lb/in ³	% vacíos mezcla total	% vacíos agregado mineral	% vacíos llenos	estabilidad/flujo
1	Muestra Patrón	5,2	7,8	2719,7	2,39	149,11	2,733	14,319	0,809	347,98
2	5%Ceniza - 10%Caucho	5,2	4,0	3219,35	2,32	142,03	7,034	18,389	0,617	797,15
3	5%Ceniza - 15%Caucho	5,2	3,6	3214,6	2,33	141,26	7,303	18,835	0,612	888,76
4	10%Ceniza - 10%Caucho	5,2	4,0	3052,4	2,32	141,51	7,557	18,690	0,596	758,67
5	10%Ceniza - 15%Caucho	5,2	3,6	3527,875	2,33	141,37	4,391	18,771	0,766	991,21
6	15%Ceniza - 10%Caucho	5,2	3,9	3578	2,33	141,15	10,188	18,899	0,461	924,47
7	15%Ceniza - 15%Caucho	5,2	3,7	3634,375	2,33	140,98	4,923	18,993	0,741	979,20
8	5%Caucho	5,2	4,4	2784,5	2,33	141,00	9,005	18,984	0,526	639,22
9	10%Caucho	5,2	5,8	3243,5	2,33	141,29	5,352	18,813	0,716	561,92

Se analizó gráficamente el comportamiento de cada una de los datos obtenidos y estos fueron los resultados, como ya se había establecido un porcentaje de asfalto óptimo lo que se buscó fue comparar cual de las mezclas que se llevaron a cabo era la mejor, más económica y rentable. Se tuvo en cuenta las cantidades de

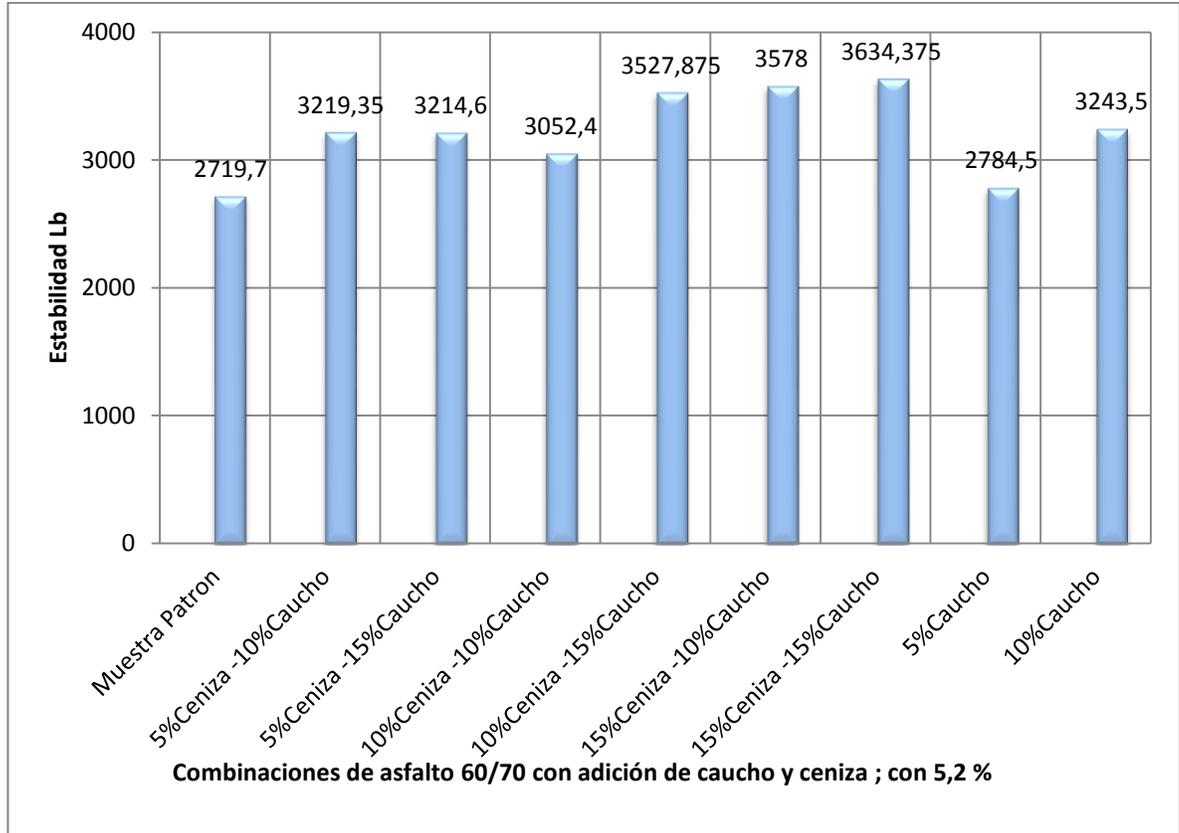
materiales empleados y el beneficio que podía brindar. Cabe mencionar que los valores de ceniza y caucho se hicieron con relación al asfalto, decir que hay menos consumo del mismo, por el alto volumen de los aditivos reduce significativamente el gasto de asfalto. Este mecanismo de mezclado se hizo mediante vía húmeda y a una temperatura constante de 140° C.

Figura 11. Flujo vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%



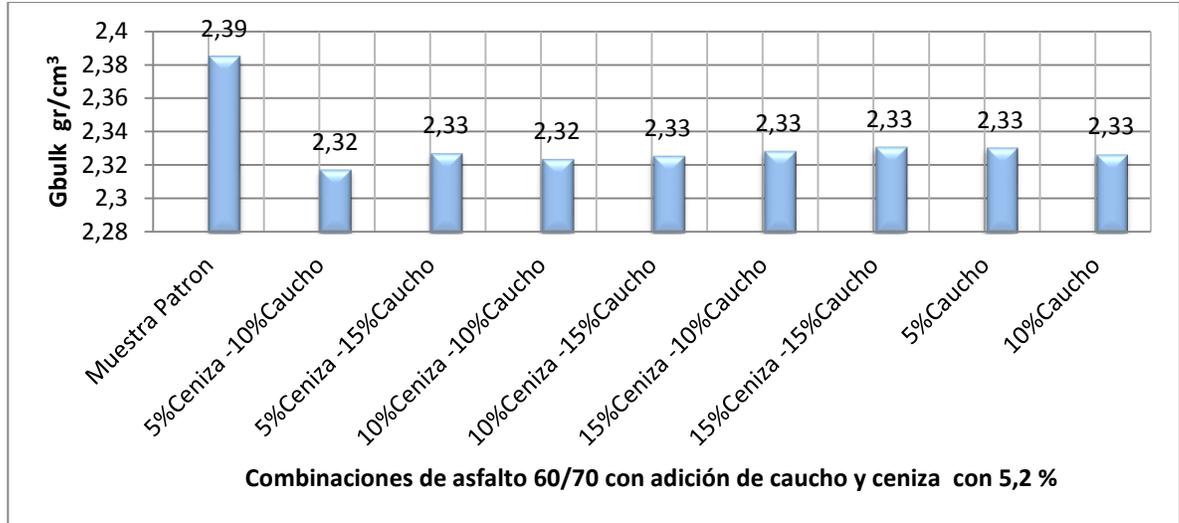
El flujo disminuyó al incrementar los valores tanto de ceniza y caucho; cabe resaltar que el comportamiento en la muestra patrón fue de 7,8 in y el espécimen con 10% de caucho arrojó un 5,8 in en su flujo. Mientras más alto sea el porcentaje de ceniza y caucho la tendencia es que las muestras disminuyan su flujo. En la figura 11 se representan los nuevos flujos y su comportamiento.

Figura 12. Estabilidad vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



Con relación a la muestra patrón, los especímenes modificados tuvieron un incremento en la estabilidad que se observan en la Figura 12, en la muestra de 15% ceniza-15% caucho alcanzó una mayor estabilidad con relación a las demás que contenían el mismo porcentaje de asfalto.

Figura 13. G_{bulk} vs combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



La muestra patrón tuvo mayor densidad a diferencia de las muestras modificadas que su comportamiento G_{bulk} en algunas fue constante, encontrándose dentro del rango de 2,32 y 2,33 g/cm³ respectivamente.

Figura 14. Peso unitario vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%

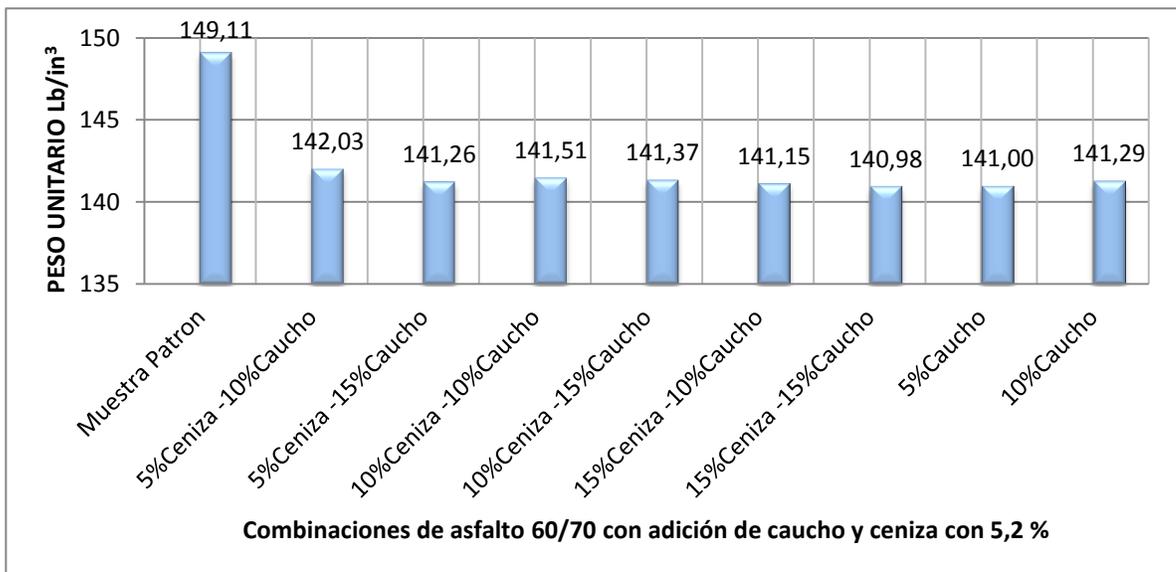
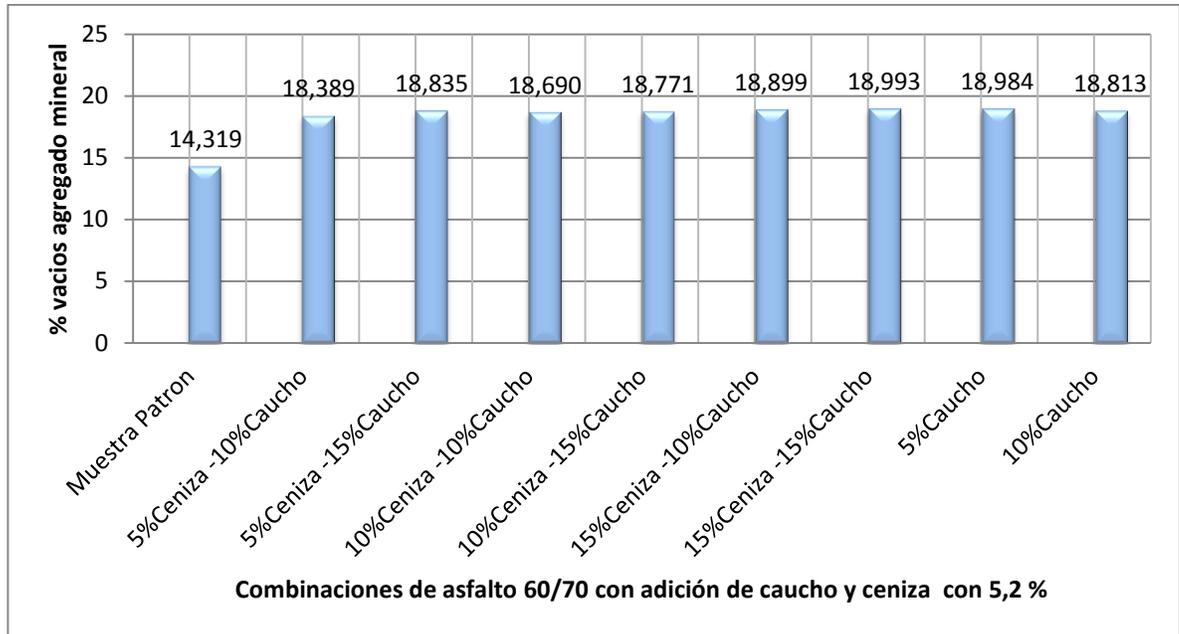


Figura 15. Vacíos agregado mineral vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



El peso específico del asfalto es vital, debido que se tienen en cuenta diferentes factores para encontrar este porcentaje de vacíos agregado mineral, el peso específico de los agregados que fue el mismo para todas las muestras y de igual forma el contenido de asfalto. La muestra patrón tuvo una diferencia en cuanto al porcentaje debido a que su densidad era mayor.

Figura 16. % vacíos llenos vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.

La muestra que menor cantidad de porcentaje de vacíos llenos fue la correspondiente 15% ceniza-10% caucho (0,416%) con relación a la muestra patrón que arrojó una cifra de 0,809% en su porcentaje de vacíos llenos.

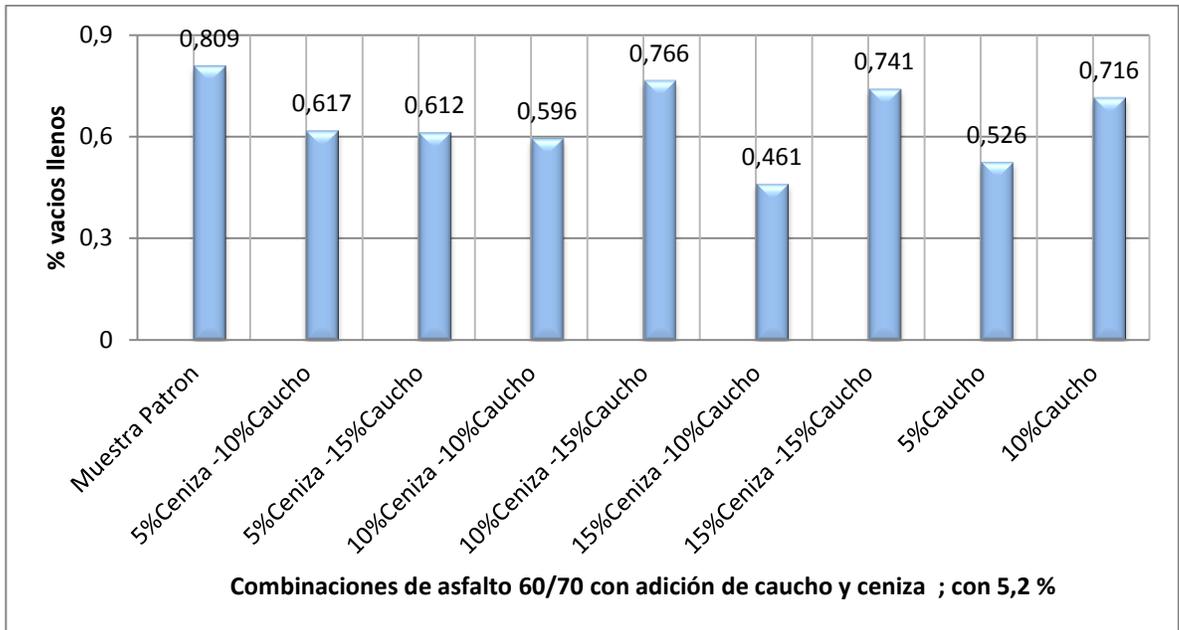
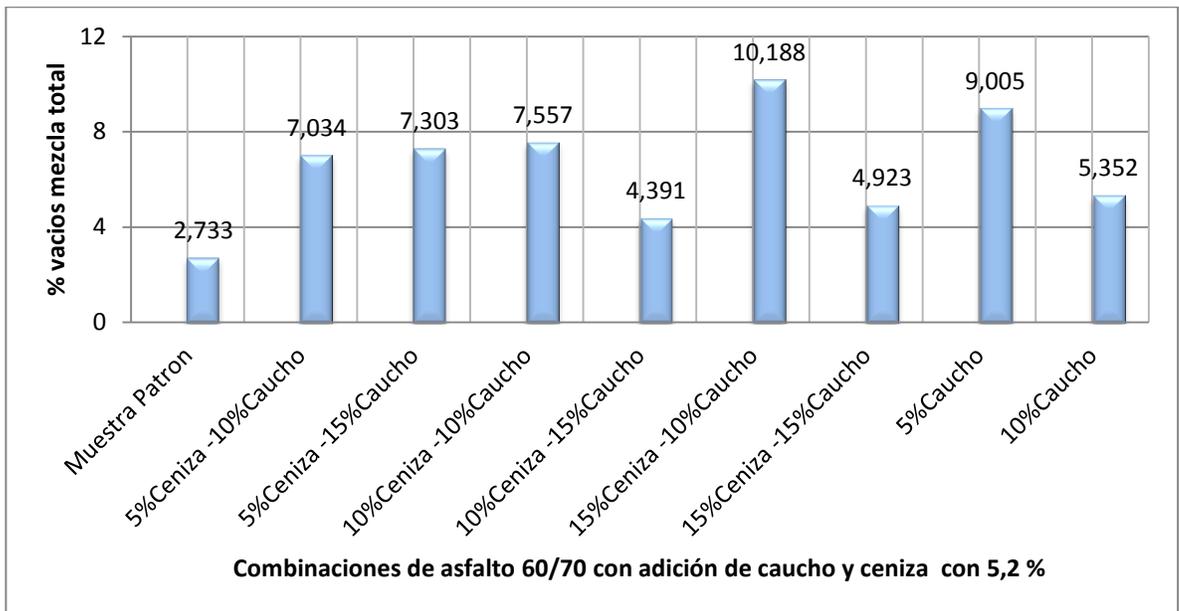


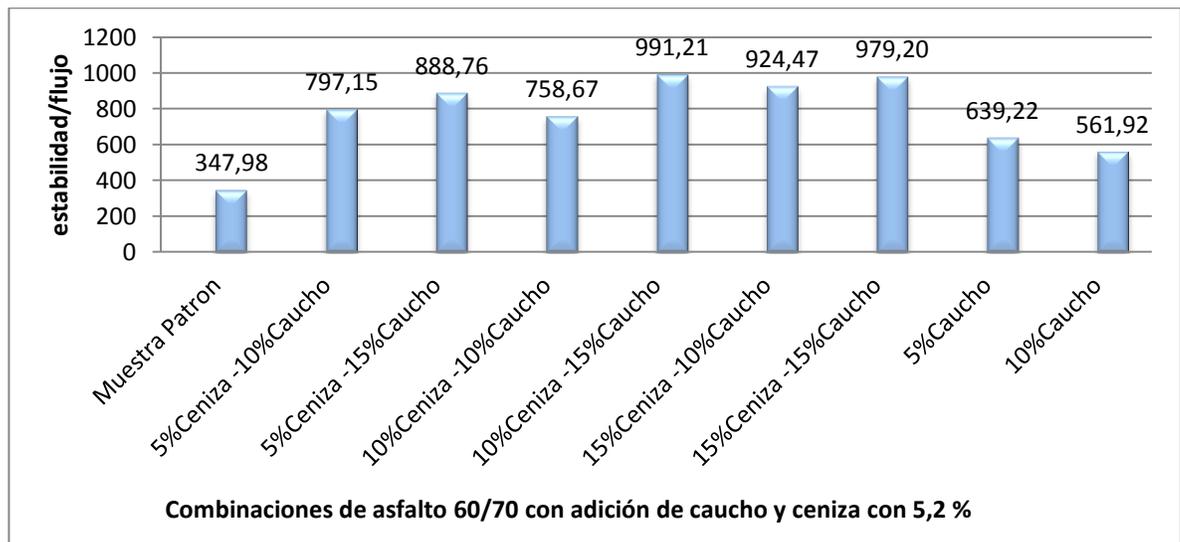
Figura 17. Porcentaje de vacíos mezcla total vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



Las mezclas asfálticas se constituyen de agregados, tanto de llenante mineral y material asfáltico mezclado en caliente. Cabe resaltar que el contenido de material

para una mezcla, así como su comportamiento, es variable debido a que los vacíos presentes con tendencia a reducir sus espacios y la adhesión es mayor, además le proporciona a la mezcla modificada con caucho y ceniza impermeabilidad.

Figura 18. Estabilidad/flujo vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



5.6 IDENTIFICACION MEJOR MEZCLAS MODIFICADAS

Con el fin de obtener datos precisos se hizo una comparación entre los resultados de los ensayos a los que fueron sometidas las briquetas. Se compararon las muestras que permitieron concluir esta investigación está representada en la tabla 21.

Se compara con la muestra patrón original de asfalto 60/70 representada con el número (1), la número (5) tuvo un mejor comportamiento de acuerdo con su penetración, peso específico, punto de ablandamiento, punto de inflamación y llama.

Tabla 20. Comportamiento óptimo de Mezclas asfálticas modificadas

PROPORCION	PENETRACION (mm)		promedio de penetración	PESO ESPECIFICO (gr/cm ³)	PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	PUNTO DE INFLAMACION (°C)	PUNTO DE LLAMA (°C)	
	Grande	Pequeño						
1	Muestra Patrón	6,5	7,26	6,88	1,073	52,5	222	226
5	10% Ceniza - 15% Caucho	7,44	7,22	7,33	0,819	55,5	238	240
7	15% Ceniza - 15% Caucho	8,86	8,86	8,86	0,835	55	195	215
3	5% Ceniza - 15% Caucho	8,54	8,28	8,41	1,021	49,5	180	194

Tabla 21. Tres mejores combinaciones de ceniza de extracciones petroleras y caucho reciclado de llanta.

PROPORCION	% DE ASFALTO	FLUJO	ESTABILIDAD	G _{bulk}	PESO UNITARIO Lb/in ³	% vacíos mezcla total	% vacíos agregado mineral	% vacíos llenos	estabilidad/flujo	
1	Muestra Patrón	5,2	7,8	2719,7	2,39	149,11	2,733	14,319	0,809	347,98
5	10% Ceniza - 15% Caucho	5,2	3,6	3527,875	2,33	141,37	4,391	18,771	0,766	991,21
7	15% Ceniza - 15% Caucho	5,2	3,7	3634,375	2,33	140,98	4,923	18,993	0,741	979,20
3	5% Ceniza - 15% Caucho	5,2	3,6	3214,6	2,33	141,26	7,303	18,835	0,612	888,76

5.7 CURVA DE DISEÑO MARSHALL, CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

La tabla 22 tiene los datos consignados sobre el estudio que la empresa Paviandi S.A desarrolló para el proceso de producción en planta. Por conveniencia y a solicitud de los cofinanciadore, se trabajó con el mismo porcentaje ya que se quería conocer la aplicabilidad de una mezcla modificada, implementándose a nivel de la industria.

En el Anexo 12 se encuentran registrados los datos del contenido óptimo de asfalto.

Tabla 22. Curvas de diseño Marshall

CURVAS DE DISEÑO MARSHALL

DESCRIPCION	OPTIMO	INVIAS	CUMPLE / NO CUMPLE	UND	LECTURAS			
Contenido de asfalto.	5,2%			%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%
Estabilidad Medida	1175	900	Cumple	lb	1105	1178	1212	1170
%vacios agregados minerales	16,74	15	Cumple	%	16,76	16,76	16,93	18,04
Densidad Bulk	2,317		NA	g/cm3	2,299	2,312	2,319	2,300
Flujo	3,306	2-3,5	Cumple	mm	3,220	3,267	3,340	3,423
Vacios con aire	4,90	4-6	Cumple	%	6,569	5,393	4,518	5,054
Vacios Llenos de asfalto	68,09	65-75	Cumple	%	60,8	67,8	73,3	72,0
GMM	2,440		NA	g/cm3	2,461	2,443	2,429	2,423
Filler/ligante	0,92	0,8-1,2	Cumple	%	1,10	1,00	0,91	0,86
Estabilidad / Flujo	364,1	300-600	Cumple	%	343,27	360,46	362,99	341,64

5.8 EVALUACION ECONOMICA DE MDC-2 CONVENCIONAL Y MEZCLAS MODIFICADAS CON CENIZA VOLANTE Y CAUCHO RECICLADO

Tabla. 23 Evaluación económica MDC-2 Convencional

MDC-2 Convencional					
DESCRIPCION	CANTIDAD REQUERIDA		Und	VALOR PARCIAL (Puesto en obra)	Valor M ³ MDC-2
	MASA (Kg)	VOLUMEN			
Convencional Asfalto 60/70	109,856	27,905	Gal	\$ 6.500	\$ 181.383
AGREGADO FINO	1137,627	0,4286	m ³	\$ 39.900	\$ 17.103
AGREGADO GRUESO	1203,300	0,4567	m ³	\$ 36.750	\$ 16.782
Valor Total m ³					\$ 215.268

Para la fabricación de una MDC-2 con adición de ceniza y caucho o una MDC-2 convencional se deben tener en cuenta la calidad de los materiales a emplear. En la tabla 23 se desglosa el valor comercial de una MDC-2 convencional en obra; mientras que en las tablas 24, 25 y 26 se exponen los valores de las mezclas con mejor comportamiento.

Para definir la propuesta económica se tuvo en cuenta que el valor comercial del agregado fino es \$39900, de agregado grueso es de \$36750 por metro cúbico de material (m³). El valor de la ceniza proveniente de la ciudad de Barrancabermeja y suministrada por Ecopetrol S.A. tuvo en cuenta \$350 por costo de transporte, al igual que el caucho proveniente de la ciudad de Bogotá y suministrado por el Grupo Renova , el cual tuvo un costo de \$180 por kilogramo de material.

Adicionalmente y teniendo en cuenta que el precio de producción de MDC-2 convencional oscila entre \$ 220.000, además el costo del galón de asfalto es aproximadamente \$ 6.500.

Tabla 24. Evaluación económica MDC-2 modificada con 10% Ceniza y 15% Caucho

MDC-2 MODIFICADA CON 10% Ceniza -15% Caucho					
DESCRIPCION	CANTIDAD REQUERIDA		Und	VALOR PARCIAL (Puesto en obra)	Valor M ³ MDC-2
	MASA (Kg)	VOLUMEN			
Convencional Asfalto 60/70	82,392	26,61	Gal	\$ 6.500	\$ 172.989
AGREGADO FINO	1137,6	0,4286	m ³	\$ 39.900	\$ 17.103
AGREGADO GRUESO	1203,3	0,4567	m ³	\$ 36.750	\$ 16.782
CENIZA	10,9856	0,004926	m ³	\$ 350	\$ 3.845
CAUCHO	16,4784	-	-	\$ 180	\$ 2.966
Valor Total m ³					\$ 213.686

Tabla 25. Evaluación económica MDC-2 modificada con 15% Ceniza y 15% Caucho

MDC-2 MODIFICADA CON 15% Ceniza -15% Caucho					
DESCRIPCION	CANTIDAD REQUERIDA		Und	VALOR PARCIAL (Puesto en obra)	Valor M ³ MDC-2
	MASA (Kg)	VOLUMEN			
Convencional Asfalto 60/70	76,899	24,36	Gal	\$ 6.500	\$ 158.356
AGREGADO FINO	1137,6	0,4286	m ³	\$ 39.900	\$ 17.103
AGREGADO GRUESO	1203,3	0,4567	m ³	\$ 36.750	\$ 16.782
CENIZA	16,4784	0,007389	m ³	\$ 350	\$ 5.767
CAUCHO	16,4784	-	-	\$ 180	\$ 2.966
Valor Total m ³					\$ 200.975

Tabla 26. Evaluación económica MDC-2 modificada con 5% Ceniza y 15% Caucho

MDC-2 MODIFICADA CON 5% Ceniza -15% Caucho					
DESCRIPCION	CANTIDAD REQUERIDA		Und	VALOR PARCIAL (Puesto en obra)	Valor M³ MDC-2
	MASA (Kg)	VOLUMEN			
Convencional Asfalto 60/70	87,885	22,77	Gal	\$ 6.500	\$ 148.004
AGREGADO FINO	1137,6	0,4286	m ³	\$ 39.900	\$ 17.103
AGREGADO GRUESO	1203,3	0,4567	m ³	\$ 36.750	\$ 16.782
CENIZA	5,4928	0,002463	m ³	\$ 350	\$ 1.922
CAUCHO	16,4784	-	-	\$ 180	\$ 2.966
Valor Total m³					\$ 186.778

6. CONCLUSIONES

Con respecto a los Agregados pétreos.

En los ensayos granulométrico efectuados se determinó trabajar con proporciones de 13% de finos es decir material que pasa el tamiz ½” y con un 87% de gruesos, llegando así a las especificaciones del rango del cual debe estar el material mineral exigida por la norma INVIAS de 2007 para una MDC-2.

El material granular es proveniente de la fuente de explotación natural ubicada en Pescadero(Santander) , en la cantera que se localiza junto al Rio Chicamocha, del cual se desarrollaron los ensayos pertinentes para la clasificación y caracterización , cumpliendo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. En toda mezcla la importancia de finos es crucial y más aun si se va llevar a cabo un diseño de carpeta asfáltica, se observó que el material aunque cumplía con los márgenes y límites inferior mínimo retenido para cada tamiz, se resaltó una deficiencia en el tamiz No 200 y en el pasa 200; estos finos son el llenante mineral y son los encargados de la adhesión entre el agregado.

Con relación a la ceniza volante de las extracciones petroleras y caucho reciclado de llanta

ECOPETROL S.A, fue la encargada de proporcionar la ceniza utilizada siendo esta un residuo industrial que se deriva de la combustión para evaporar el agua contenida de los lodos del las extracciones de perforación. En su composición fisicoquímica presenta una coloración gris clara con un índice de materia orgánica estándar, con relación a la finura, la ceniza puede pasar por la malla de 45 micras para ser llenante mineral a la mezcla asfáltica. La mezcla de la ceniza se llevó a cabo por medio húmedo, se aplicó directamente al ligante homogenizando

vigorosamente y trabajando exclusivamente con material que pasa por el tamiz No 200.

El *Grupo Renova*, proporcionó el material del caucho, el cual se trabajó como un fino y en el proceso de caracterización granulométrica se determinó que la mayor concentración de las partículas se encontraba retenidas en el tamiz que pasa el No 40. Lo que se buscaba era que el ligante incorporara los aditivos que tiene el caucho para mejorar el comportamiento mecánico general y a su vez protegerlo del envejecimiento.

Mezcla asfáltica (MDC-2 modificada con adición de ceniza volante de extracciones petroleras y caucho reciclado de llanta).

Para el desarrollo de esta investigación se fabricaron noventa (90) briquetas por el método Marshall, a las cuales se adicionaron las cantidades de ceniza y residuos de llanta como porcentaje de finos. Se evaluaron las características mecánicas de las mezclas asfálticas MDC-2 modificadas, llevándose a cabo ocho (8) combinaciones respectivamente y teniendo una referencia patrón que era el asfalto puro 60/70. Las mezclas desarrolladas se fabricaron por el medio húmedo, siendo la forma propicia para que los elementos como el caucho y la ceniza tuvieran adhesión con el material bituminoso.

Se determinaron los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, peso específico del material y punto de llama e inflamación para la caracterización del bitumen que claramente va a hacer parte de la mezcla asfáltica y, que por tanto debe presentar un comportamiento adecuado. Teniendo en cuenta que ciertas de las mezclas modificadas presentaron un comportamiento similar a la muestra patrón, se precisa el resultado de la investigación basados en el ensayo de resistencia de la mezcla empleando el aparato Marshall, obteniendo datos de estabilidad y flujo que permitieron determinar cuál de las mezclas modificadas con

ceniza y caucho presentó mejor comportamiento y aun así cumpliendo los estándares establecidos por la normatividad.

La densidad de las probetas con agentes modificadores (caucho y ceniza) disminuyó con relación a un 10%, el porcentaje de vacíos satisface la norma INVIAS, con estados límites para las muestras seleccionadas, se encuentran entre 3% y 5% del porcentaje de vacíos en la mezcla.

Las tres mejores mezclas fueron las siguientes **1.10%Ceniza -15%Caucho; 2. 15%Ceniza -15%Caucho; 3. 5%Ceniza -15%Caucho**, sus resultados fueron representativos con relación a la muestra patrón. Además se observaron cambios al momento que la preparación de la mezcla asfáltica, como fue el recubrimiento del ligante en el agregado y la efectiva preparación, además que en términos económicos se está ahorrando valioso material bituminoso, debido a que la ceniza volante y el caucho reciclado de llanta remplazan una fracción del material bituminoso.

La relación estabilidad-flujo representa el grado de fragilidad o de ductilidad de una mezcla asfáltica, en donde se puede presentar fisuración temprana o ahuellamiento prematuro. Por lo tanto, se observa que el reemplazo de ligante por ceniza volante y caucho en un porcentaje de 10% y 15% respectivamente es favorable, debido a que mejora las propiedades de la relación estabilidad-flujo de la mezcla original y presenta un comportamiento semejante debido al grado de compactación; la estabilidad de la muestra modificada es ciertamente más alta que la de la muestra patrón, mientras que el flujo obtenido de esta muestra es inferior al flujo con respecto al de la muestra patrón, y no excede el flujo máximo de 4mm propuesto en las especificaciones de Invías.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- HERRERA GALVIS, Laura Paola., Utilización de las cenizas volantes en el concreto, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 1999.
- INVIAS, Especificación Técnica, Artículo 450-07
- I.N.V. E-748, Instituto Nacional de Vías, Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Método Marshall. 2007.
- MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carretera: Clasificación de los pavimentos. Primera. Bogotá : Panamericana, 1997,tercera edición tomo 1.
- MOPTT. Mejoramiento de Asfalto en Base a Reciclado de Neumáticos. Castillo, J. y Torrejón, J. (Eds.) Probisa S.A., Bitumix S.A. e Instituto Chileno de Asfalto. 2001
- http://www.proyectoiberquimia.org/pdf/documentacion/III_Estudio_de_oportunidades_2011.pdf
- http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1592/1/images/book_trazoverde_guia_anexos_FINAL.pdf
- 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.

- PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista, UPC México, 2004.
- SÁENZ T, V. Y VILLAMIZAR S, P., Análisis del comportamiento de cenizas volantes de la producción del concreto, Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.

ANEXOS

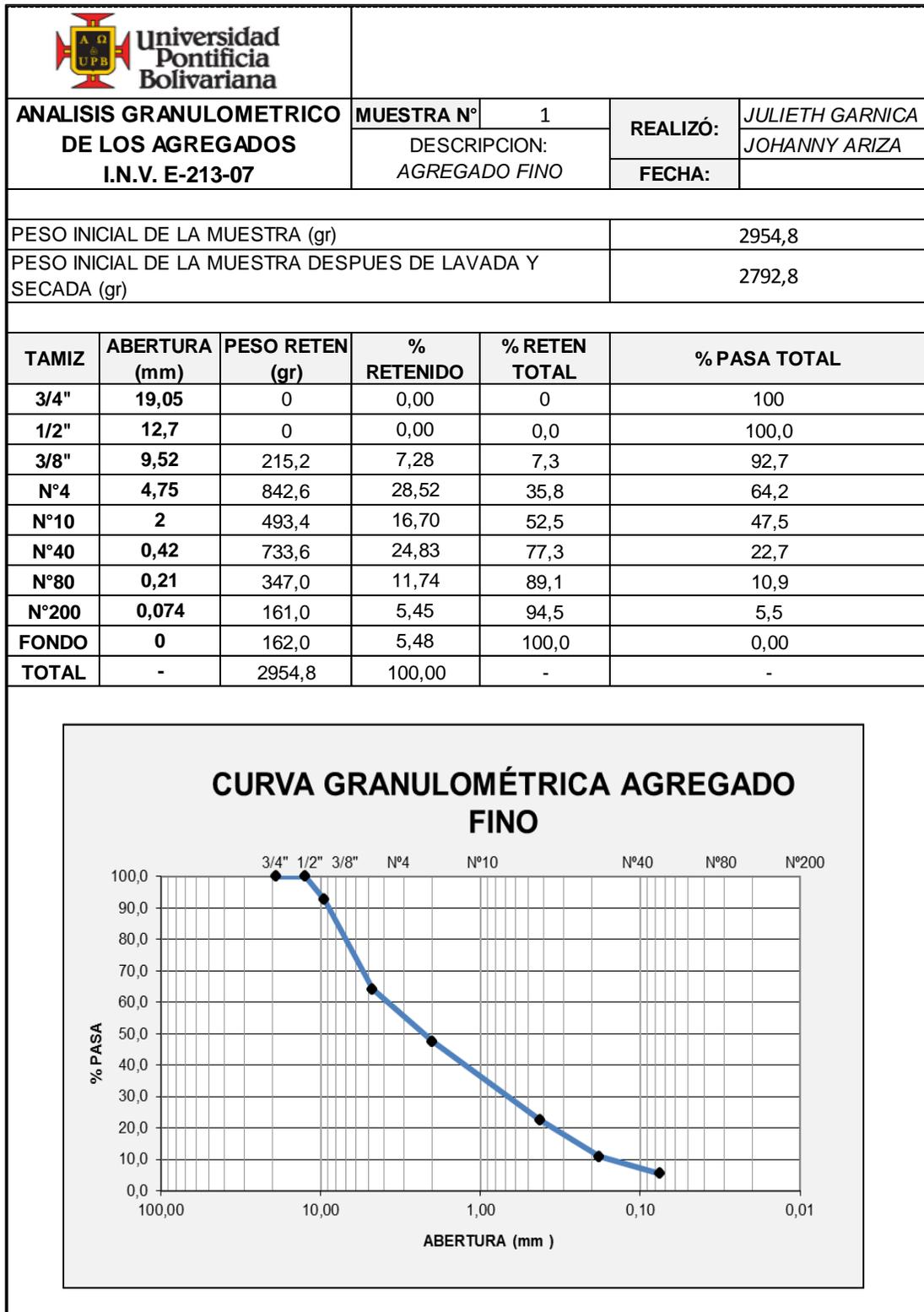
ANEXO 1. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS

 Universidad Pontificia Bolivariana					
ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS I.N.V. E-213-07		MUESTRA N°	1		
		DESCRIPCION:	AGREGADO GRUESO		
		REALIZÓ:	JULIETH GARNICA JOHANNY ARIZA		
		FECHA:			
PESO INICIAL DE LA MUESTRA (gr)		1325,2			
PESO INICIAL DE LA MUESTRA DESPUES DE LAVADA Y SECADA (gr)		1316,4			
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETEN (gr)	% RETENIDO	% RETEN TOTAL	% PASA TOTAL
3/4"	19,05	0	0	0	100
1/2"	12,7	1072	80,9	80,9	19,1
3/8"	9,52	240,6	18,2	99,0	1,0
N°4	4,75	1,4	0,11	99,2	0,8
N°10	2	0	0,00	99,2	0,8
N°40	0,42	0,8	0,06	99,2	0,8
N°80	0,21	0,8	0,06	99,3	0,7
N°200	0,074	0,8	0,06	99,3	0,7
FONDO	0	8,8	0,66	100,0	0,00
TOTAL	-	1325,2	100,00	-	-

CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO GRUESO

Abertura (mm)	% Pasa
19.05 (3/4")	100.0
12.7 (1/2")	19.1
9.52 (3/8")	1.0
4.75 (N°4)	0.8
2.0 (N°10)	0.8
0.42 (N°40)	0.8
0.21 (N°80)	0.7
0.074 (N°200)	0.7

ANEXO 2. ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS FINOS



ANEXO 3. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS

 Universidad Pontificia Bolivariana			
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS I.N.V. E-223-07	FECHA:		REALIZÓ
	DESCRIPCION: TRITURADO PASA 3/4		JULIETH GARNICA JOHANNY ARIZA M.
NOMBRE	UNIDAD	VALOR	
		ENSAYO 1	ENSAYO 2
Peso en el aire de la muestra seca [A]	gr	1012,8	1015,3
Peso en el aire de la muestra saturada, Superficie seca [B]	gr	1024,3	1023,4
Peso en agua de la muestra saturada, Superficie seca [C]	gr	642,2	641,2
[B]-[C]	gr	382,1	382,2
[A]-[C]	gr	370,6	374,1
[B]-[A]	gr	11,50	8,10
Gravedad específica Bulk Gsb = $(A/(B-C))$	g/cm^3	2,651	2,656
Gravedad específica Bulk SSS Gsb= $(B/(B-C))$	g/cm^3	2,681	2,678
Gravedad específica aparente Gsa = $(A/(A-C))$	g/cm^3	2,733	2,714
Porcentaje de Absorción $((B-A)/A)*100$	%	1,135	0,798
CARACTERISTICA		UNIDAD	VALOR PROMEDIO
<i>Gravedad específica Bulk Gsb=$(A/(B-C))$</i>		g/cm ³	2,654
<i>Gravedad específica Bulk SSS Gsb=$(B/(B-C))$</i>		g/cm ³	2,679
<i>Gravedad específica aparente Gsa =$(A/(A-C))$</i>		g/cm ³	2,723
<i>Porcentaje de Absorción $((B-A)/A)*100$</i>		%	0,97

ANEXO 4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS

 Universidad Pontificia Bolivariana			
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS I.N.V. E-222-07	FECHA:		REALIZÓ
	DESCRIPCION: ARENA PASA 1/2		JOHANNY ARIZA M. JULIETH GARNICA
NOMBRE	UNIDAD	VALOR	
		ENSAYO 1	ENSAYO 2
Peso en el aire de la muestra seca [A]	<i>gr</i>	495,2	495,1
Volumen del Picnometro [V]	<i>ml</i>	500,0	500,0
Volumen de agua para requerido para llenar el picnometro con la muestra adentro [W]	<i>cc</i>	312,6	311,5
[V]-[W]	<i>cc</i>	187,4	188,5
[500]-[A]	<i>gr</i>	182,6	183,6
[V-W]-[500-A]	<i>gr</i>	4,80	4,90
Gravedad específica Bulk $Gsb = (A/(V-W))$	<i>g/cm³</i>	2,642	2,627
Gravedad específica Bulk SSS $Gsb = (500/(V-W))$	<i>g/cm³</i>	2,668	2,653
Gravedad específica aparente $Gsa = A/(V-W)-(500-A)$	<i>g/cm³</i>	2,712	2,697
Porcentaje de Absorción $((500-A)/A)*100$	%	0,969	0,990
CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR PROMEDIO	
<i>Gravedad específica Bulk $Gsb = (A/(V-W))$</i>	<i>g/cm³</i>	2,635	
<i>Gravedad específica Bulk SSS $Gsb = (500/(V-W))$</i>	<i>g/cm³</i>	2,660	
<i>Gravedad específica aparente $Gsa = A/(V-W)-(500-A)$</i>	<i>g/cm³</i>	2,704	
<i>Porcentaje de Absorción $((500-A)/A)*100$</i>	%	0,98	
Observaciones			
<u>Peso de la muestra saturada . Superficie seca=500</u>			

ANEXO 5. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS

 Universidad Pontificia Bolivariana					
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS I.N.V. E-227-07		FECHA:		REALIZÓ	
		DESCRIPCION: AGREGADO GRUESO		JOHANNY ARIZA M. JULIETH GARNICA	
TAMIZ		PESO INICIAL (gr)	PESO CARAS FRACTURADAS	PESO CARAS NO FRACTURADAS	% DE CARAS FRACTURADAS
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	0	0	0	0
1"	3/4"	0	0	0	0
3/4"	1/2"	1072,95	987,23	85,72	92,01%
1/2"	3/8"	485,16	428,32	56,84	88,28%

ANEXO 6. INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS

 Universidad Pontificia Bolivariana																					
INDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO I.N.V. E-230-07		FECHA:		REALIZÓ																	
		DESCRIPCION: AGREGADO GRUESO		JOHANNY ARIZA M. JULIETH GARNICA																	
Peso total muestra (gr)						1912,9															
INDICE DE APLANAMIENTO																					
Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Retenido Ri	Peso Fraccion Wi (gr)	Aplanamiento W pasa Wapi (gr)	Aplanamiento W retenido Wapi (gr)	Indice de aplanamiento															
3/4"	0	0	0	0	0	0															
1/2"	1077,9	56,3490	1077,9	100,1	977,8	9,2866															
3/8"	492	25,7201	492	103,4	388,6	21,0163															
N°4	343	17,9309	343	210,6	132,4	61,3994															
Total		100																			
INDICE DE ALARGAMIENTO																					
Tamiz	Peso Retenido (gr)	% Retenido Ri	Peso Fraccion Wi (gr)	Aplanamiento W pasa Wali (gr)	Aplanamiento W retenido Wali (gr)	Indice de alargamiento															
3/4"	0	0	0	0	0	0															
1/2"	1077,9	56,3490	1077,9	788,2	289,7	26,8763															
3/8"	492	25,7201	492	465,4	26,6	5,4065															
N°4	343	17,9309	343	301,2	41,8	12,1866															
Total		100																			
<table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Tamiz</th> <th style="text-align: center;">Indice de aplanamiento</th> <th style="text-align: center;">Indice de alargamiento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">3/4"</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1/2"</td> <td style="text-align: center;">9,2866</td> <td style="text-align: center;">26,8763</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3/8"</td> <td style="text-align: center;">21,0163</td> <td style="text-align: center;">5,4065</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">N°4</td> <td style="text-align: center;">61,3994</td> <td style="text-align: center;">12,1866</td> </tr> </tbody> </table>							Tamiz	Indice de aplanamiento	Indice de alargamiento	3/4"	0	0	1/2"	9,2866	26,8763	3/8"	21,0163	5,4065	N°4	61,3994	12,1866
Tamiz	Indice de aplanamiento	Indice de alargamiento																			
3/4"	0	0																			
1/2"	9,2866	26,8763																			
3/8"	21,0163	5,4065																			
N°4	61,3994	12,1866																			
<table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Promedio Ponderado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Indice de de aplanamiento (%)</td> <td style="text-align: center;">21,648</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Indice de alargamiento (%)</td> <td style="text-align: center;">18,720</td> </tr> </tbody> </table>							Promedio Ponderado		Indice de de aplanamiento (%)	21,648	Indice de alargamiento (%)	18,720									
Promedio Ponderado																					
Indice de de aplanamiento (%)	21,648																				
Indice de alargamiento (%)	18,720																				

ANEXO 7. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

 Universidad Pontificia Bolivariana			
CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA EN ARENAS I.N.V. E-212-07	FECHA:		REALIZO
	DESCRIPCION: CENIZA VOLANTE		JOHANNY ARIZA M. JULIETH GARNICA
ENSAYO 1			
MUESTRA	1		
NUMERO GADNER	11		
DESCRIPCION	Estandar		
ENSAYO 2			
MUESTRA	1		
NUMERO GADNER	11		
DESCRIPCION	Estandar		

ANEXO 8. FICHA TECNICA ASFALTO 60/70 ECOPETROL S.A

Producto : Asfalto 60/70				
Grado	Asfalto Líquido			
Referencia	ASTM D 1437			
Actualización	Marzo 1, 2005			
Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductibilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100	
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	60	70
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55
Punto de inflamación	°C	D 92	232	
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1

ANEXO 9. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL METODO MARSHALL

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL CON ASFALTO SIN MODIFICAR																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO (GRAMOS)		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
1	5,2	2,43	1161,5	670,2	491,30	2,4									2946	2946	7,4
2		2,43	1197,4	699,9	497,50	2,4									3022	3022	9,4
3		2,41	1185,4	690,0	495,40	2,4									2937	2937	9,2
4		2,41	1188,2	688,7	499,50	2,4									2360	2360	7,0
5		2,43	1187,1	688,3	498,80	2,4									2354	2354	6,0
6		2,40	1193,1	697,3	495,80	2,4									2892	2892	8,7
7		2,41	1199,9	692,4	507,50	2,4									2718	2718	8,0
8		2,31	1192,1	695,6	496,50	2,4									2583	2583	7,1
9		2,40	1186,3	692,7	493,60	2,4									2580	2580	7,1
10		2,43	1192,8	695,6	497,20	2,4									2805	2805	8,3
Promedio			1188,4	691,1	497,31	2,39	2,457	11,586	85,68	2,73	14,32	2,73	0,81	149,11		2719,7	7,8

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 5% Ceniza-10% Caucho																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
11	5,2	2,47	1185,2	673,0	512,20	2,3									3450	3450	3,5
12		2,45	1184,9	680,0	504,90	2,3									3480	3480	3,6
13		2,49	1197,1	671,0	526,10	2,3									3235	3235	4,8
14		2,45	1198,0	654,0	544,00	2,2									3142	3142	4,2
15		2,44	1191,8	678,0	513,80	2,3									3721	3721	4,6
16		2,44	1194,0	666,4	527,60	2,3									2553	2553	5,1
17		2,43	1186,5	664,8	521,70	2,3									2660	2660	3,5
18		2,43	1177,5	663,2	514,30	2,3									3299	3299	3,2
19		2,44	1197,3	661,6	535,70	2,2									3465	3465	3,5
20		2,45	1191,5	660,0	531,50	2,2									3189	3189	4,5
Promedio			1190,4	667,2	523,18	2,28	2,448	11,355	81,61	7,03	18,39	7,03	0,62	142,03		3219,4	4,0

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 5% Ceniza-15% Caucho																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
21	5,2	2,48	1207,1	673,0	534,10	2,3									1834	1834	3,5
22		2,45	1199,5	680,0	519,50	2,3									4982	4982	2,8
23		2,44	1186,7	671,0	515,70	2,3									3189	3189	4,6
24		2,47	1194,4	654,0	540,40	2,2									3495	3495	3,8
25		2,45	1192,1	678,0	514,10	2,3									3889	3889	3,5
26		2,49	1193,9	666,4	527,50	2,3									2514	2514	3,1
27		2,47	1189,9	664,8	525,10	2,3									2859	2859	3,6
28		2,51	1194,6	663,2	531,40	2,2									2634	2634	4,0
29		2,49	1197,9	661,6	536,30	2,2									3408	3408	3,1
30		2,50	1197,9	660,0	537,90	2,2									3342	3342	4,2
Promedio			1195,4	667,2	528,20	2,26	2,442	11,532	81,17	7,30	18,83	7,30	0,61	141,26		3214,6	3,6

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 10% <i>Ceniza</i> -10% <i>Caucho</i>																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
31	5,2	2,44	1191,3	673,0	518,30	2,3									3219	3219	3,5
32		2,45	1194,3	680,0	514,30	2,3									2998	2998	3,7
33		2,43	1192,2	671,0	521,20	2,3									3124	3124	4,7
34		2,51	1194,7	654,0	540,70	2,2									2727	2727	4,1
35		2,49	1199,1	678,0	521,10	2,3									3023	3023	3,5
36		2,45	1195,7	666,4	529,30	2,3									3361	3361	4,8
37		2,40	1189,6	664,8	524,80	2,3									2783	2783	3,5
38		2,41	1193,4	663,2	530,20	2,3									3255	3255	4,6
39		2,40	1190,7	661,6	529,10	2,3									3109	3109	3,6
40		2,47	1195,8	660,0	535,80	2,2									2926	2926	4,4
Promedio			1193,7	667,2	526,48	2,27	2,453	11,133	81,31	7,56	18,69	7,56	0,60	141,51		3052,4	4,0

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 10% <i>Ceniza</i> -15% <i>Caucho</i>																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
41	5,2	2,43	1192,9	673,0	519,90	2,3									3585	3585	3,6
42		2,43	1194,1	680,0	514,10	2,3									3357	3357	3,5
43		2,49	1194,5	671,0	523,50	2,3									3578	3578	3,6
44		2,45	1196,0	654,0	542,00	2,2									3549	3549	3,4
45		2,49	1195,4	678,0	517,40	2,3									3614	3614	3,7
46		2,45	1194,8	666,4	528,40	2,3									3370	3370	4,7
47		2,47	1199,3	664,8	534,50	2,2									3843	3843	2,8
48		2,45	1194,4	663,2	531,20	2,2									3327	3327	3,3
49		2,44	1191,5	661,6	529,90	2,2									3517	3517	3,5
50		2,45	1193,5	660,0	533,50	2,2									3539	3539	3,6
Promedio			1194,6	667,2	527,44	2,27	2,370	14,379	81,23	4,39	18,77	4,39	0,77	141,37		3527,9	3,6

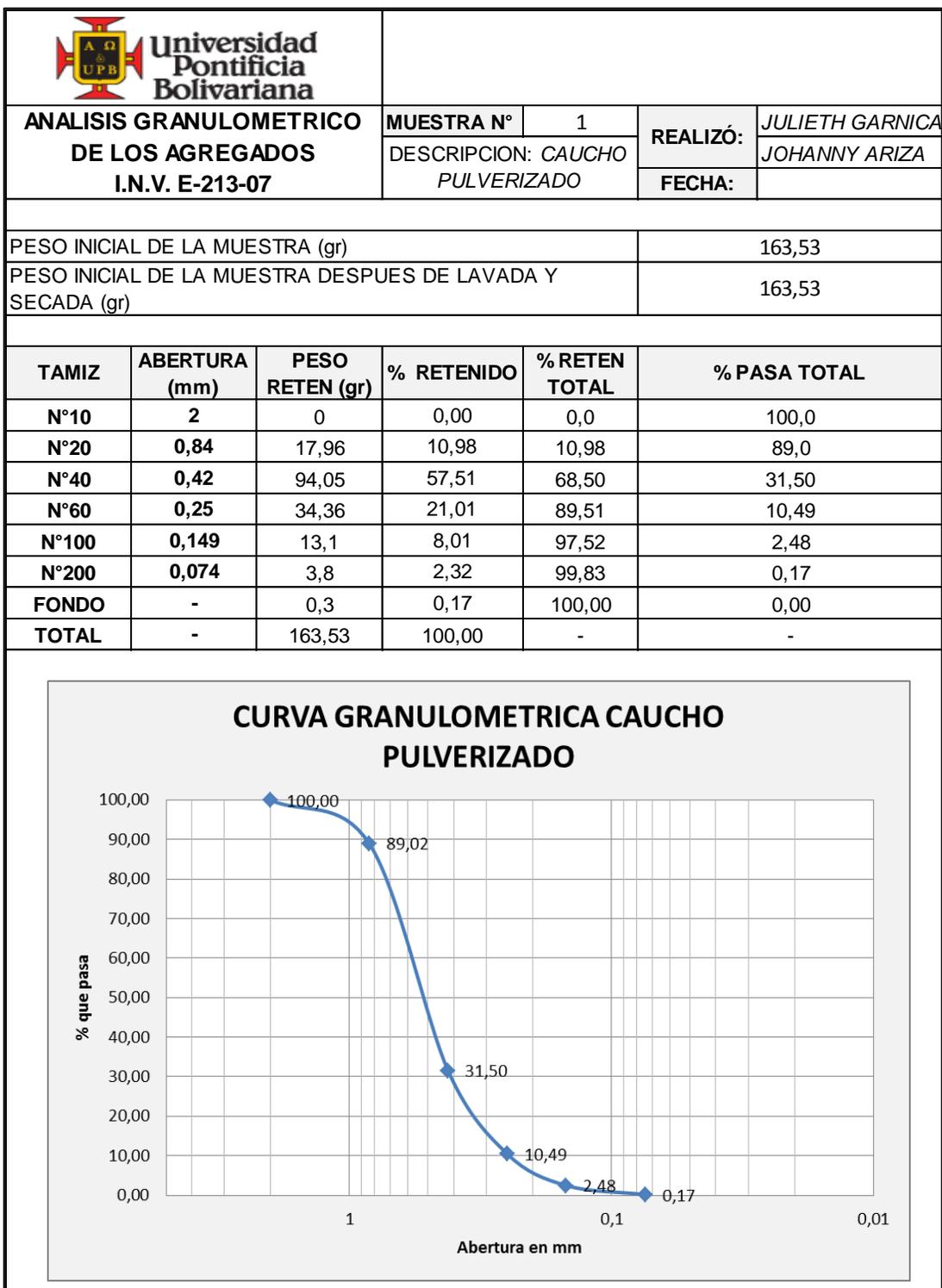
DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 15% <i>Ceniza</i> -10% <i>Caucho</i>																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADC	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4g	Libras	Libras	
51	5,2	2,51	1196,8	673,0	523,80	2,3									3574	3574	3,8
52		2,47	1196,8	680,0	516,80	2,3									4128	4128	3,8
53		2,45	1189,7	671,0	518,70	2,3									3501	3501	4,3
54		2,47	1195,5	654,0	541,50	2,2									3432	3432	3,5
55		2,51	1203,8	678,0	525,80	2,3									3434	3434	3,3
56		2,45	1189,0	666,4	522,60	2,3									3067	3067	4,5
57		2,49	1196,7	664,8	531,90	2,2									3538	3538	4,5
58		2,45	1194,3	663,2	531,10	2,2									3950	3950	3,3
59		2,45	1205,4	661,6	543,80	2,2									3659	3659	3,8
60		2,44	1193,3	660,0	533,30	2,2									3497	3497	3,9
Promedio			1196,1	667,2	528,93	2,26	2,519	8,711	81,10	10,19	18,90	10,19	0,46	141,15		3578,0	3,9

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 15% <i>Ceniza</i> -15% <i>Caucho</i>																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADC	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4g	Libras	Libras	
61	5,2	2,44	1193,0	673,0	520,00	2,3									3912	3912	4,6
62		2,41	1195,2	680,0	515,20	2,3									4018	4018	3,6
63		2,47	1194,7	671,0	523,70	2,3									4613	4613	3,7
64		2,44	1206,2	654,0	552,20	2,2									1704	1704	5,2
65		2,47	1195,8	678,0	517,80	2,3									4318	4318	3,3
66		2,49	1202,9	666,4	536,50	2,2									2028	2028	3,7
67		2,48	1196,5	664,8	531,70	2,3									4748	4748	3,0
68		2,47	1195,0	663,2	531,80	2,2									3734	3734	2,7
69		2,47	1196,8	661,6	535,20	2,2									3562	3562	4,3
70		2,51	1197,3	660,0	537,30	2,2									3707	3707	3,2
Promedio			1197,3	667,2	530,14	2,26	2,376	14,070	81,01	4,92	18,99	4,92	0,74	140,98		3634,4	3,7

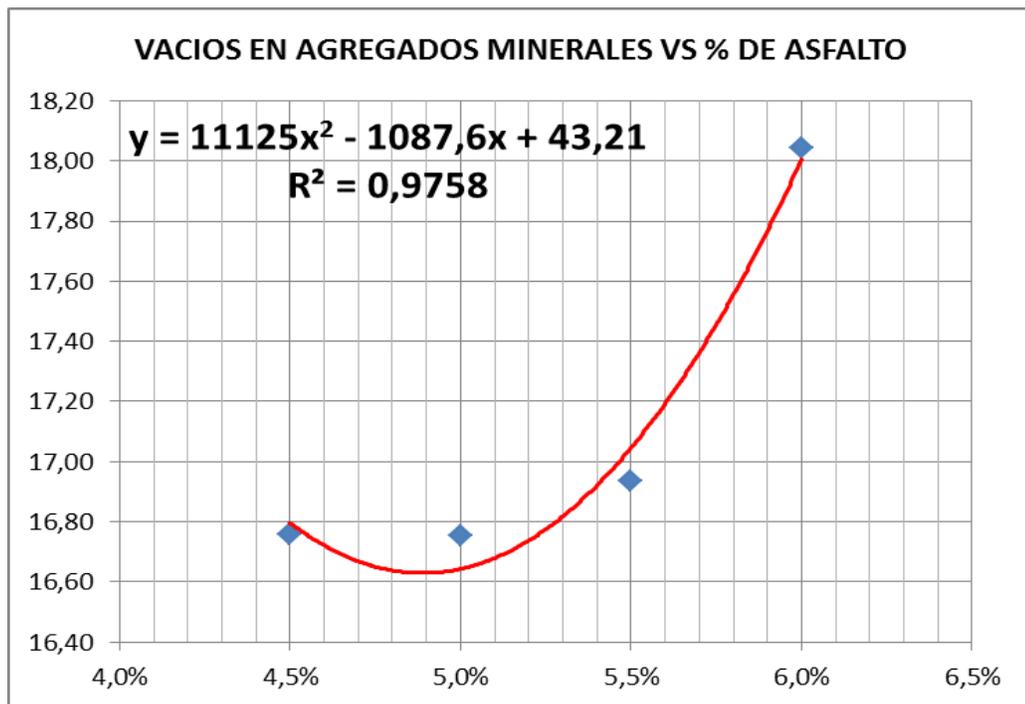
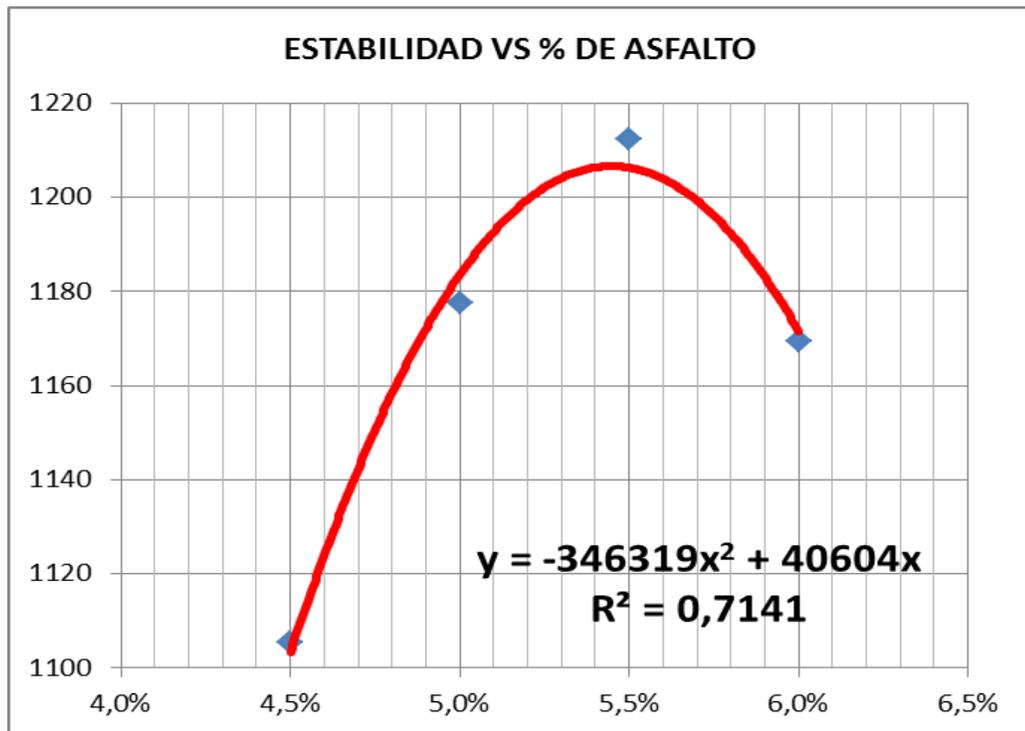
DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 5%Caucho																	
Muestra	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
71	5,2	2,45	1192,1	673,0	519,10	2,3									3548	3548	4,2
72		2,40	1200,0	680,0	520,00	2,3									3026	3026	4,3
73		2,47	1193,1	671,0	522,10	2,3									2639	2639	4,6
74		2,45	1202,0	654,0	548,00	2,2									2923	2923	4,5
75		2,43	1205,6	678,0	527,60	2,3									3395	3395	3,9
76		2,45	1189,4	666,4	523,00	2,3									2297	2297	4,9
77		2,51	1192,6	664,8	527,80	2,3									1341	1341	4,1
78		2,51	1203,7	663,2	540,50	2,2									3107	3107	4,2
79		2,43	1197,7	661,6	536,10	2,2									3034	3034	4,4
80		2,44	1195,3	660,0	535,30	2,2									2535	2535	4,3
Promedio			1197,2	667,2	529,95	2,26	2,483	9,979	81,02	9,01	18,98	9,01	0,53	141,00		2784,5	4,4

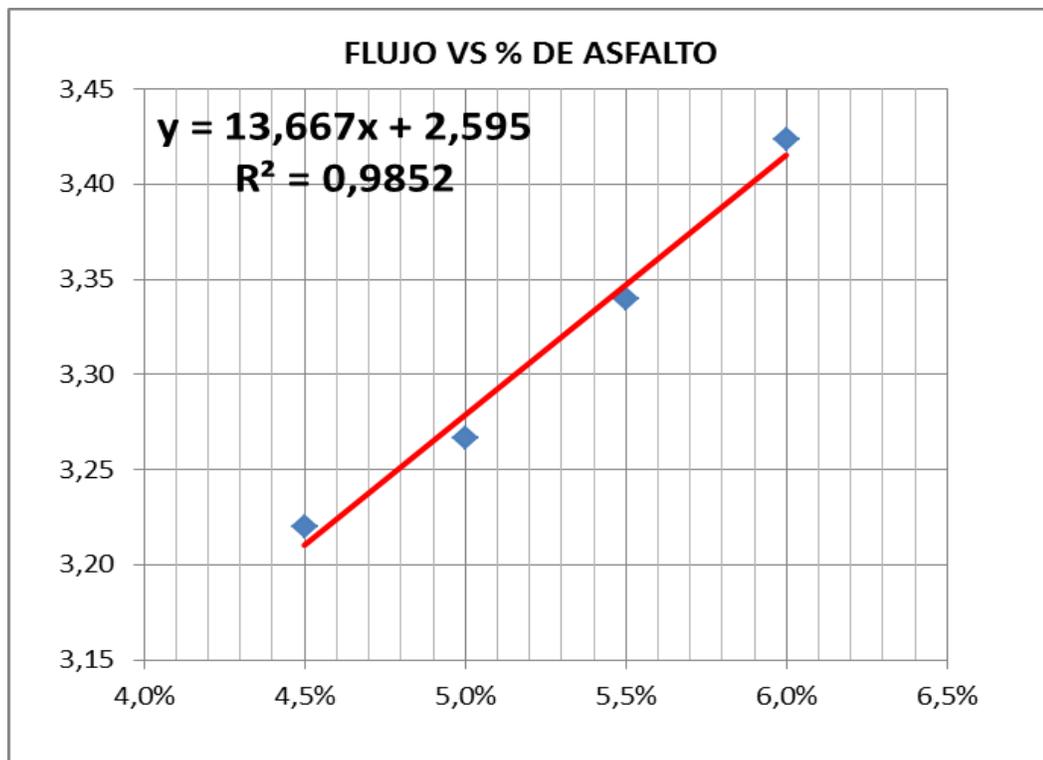
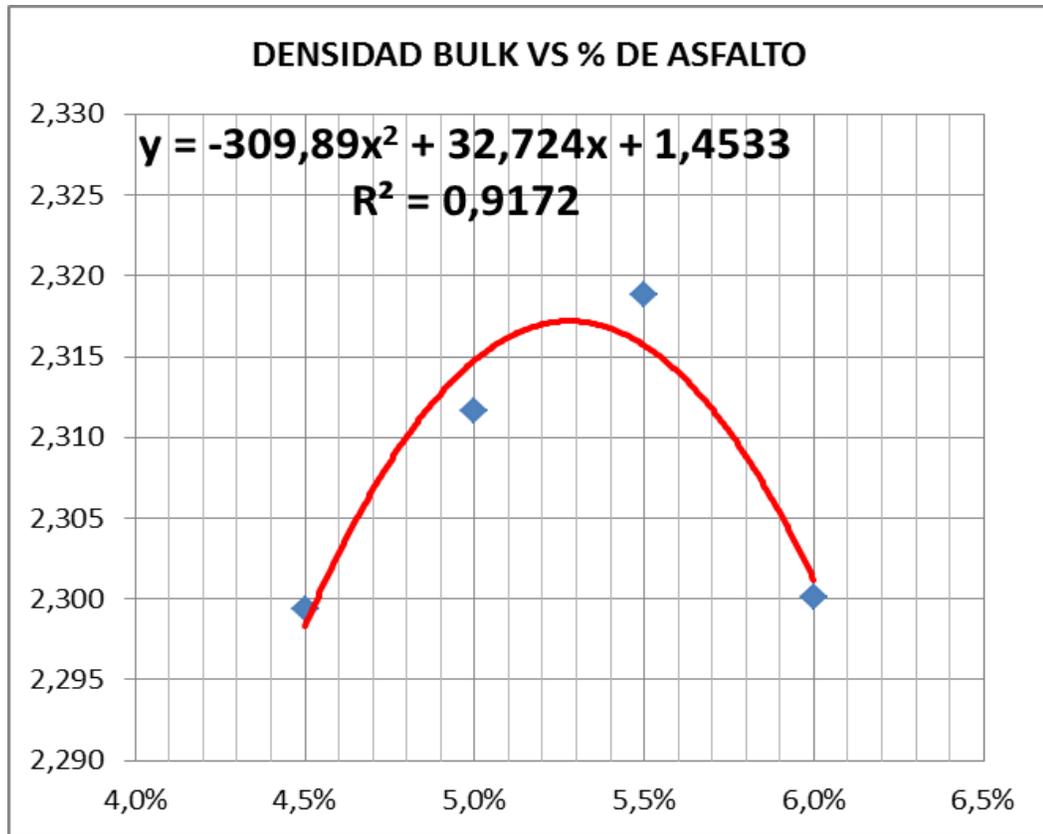
DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA METODO MARSHALL ASFALTO CON 10%Caucho																	
MEZCLA No	% DE Asfalto	ESPESOR PULGS	PESO EN GRAMOS		VOLUMEN CC	PESO ESPECIFICO		VOLUMEN % TOTAL			VACIOS %			PESO UNITARIO Lb/in ³	ESTABILIDAD		flujo 0.01"
			EN AIRE	EN AGUA		ACTUAL	TEORICO	ASFALTO	AGREGADOS	VACIOS	AGREGADO	Mezcla total	LLENOS		MEDIDA CORREGIDA		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
					d-e	d/f		$\frac{b * g}{PsAsf}$	$\frac{(100-b)g}{PsAg}$	100-i-j	100-j	$100 - \frac{100g}{h}$	$\frac{i}{i+m}$	62.4*g	Libras	Libras	
81	5,2	2,44	1191,6	673,0	518,60	2,3									2700	2700	8,5
82		2,45	1199,7	680,0	519,70	2,3									2796	2796	7,1
83		2,47	1199,4	671,0	528,40	2,3									4148	4148	4,4
84		2,47	1195,7	654,0	541,70	2,2									3152	3152	6,0
85		2,44	1205,4	678,0	527,40	2,3									3729	3729	5,0
86		2,48	1191,7	666,4	525,30	2,3									2814	2814	5,0
87		2,45	1193,1	664,8	528,30	2,3									3345	3345	6,3
88		2,51	1193,0	663,2	529,80	2,3									3264	3264	3,9
89		2,44	1185,8	661,6	524,20	2,3									3199	3199	6,5
90		2,45	1195,1	660,0	535,10	2,2									3288	3288	5,1
Promedio			1195,1	667,2	527,85	2,26	2,392	13,462	81,19	5,35	18,81	5,35	0,72	141,29		3243,5	5,8

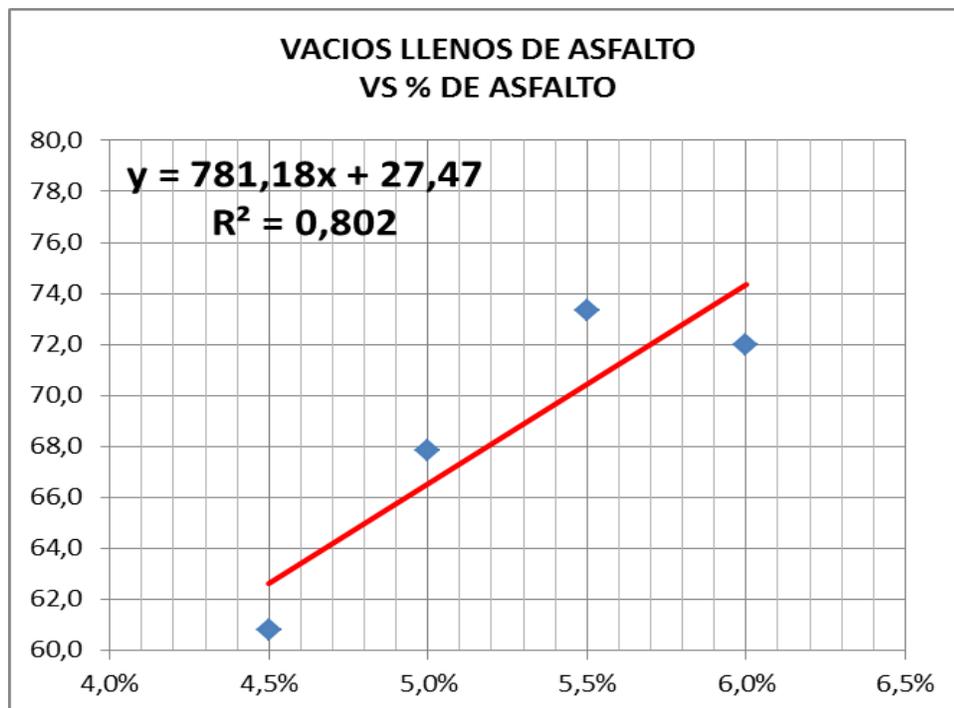
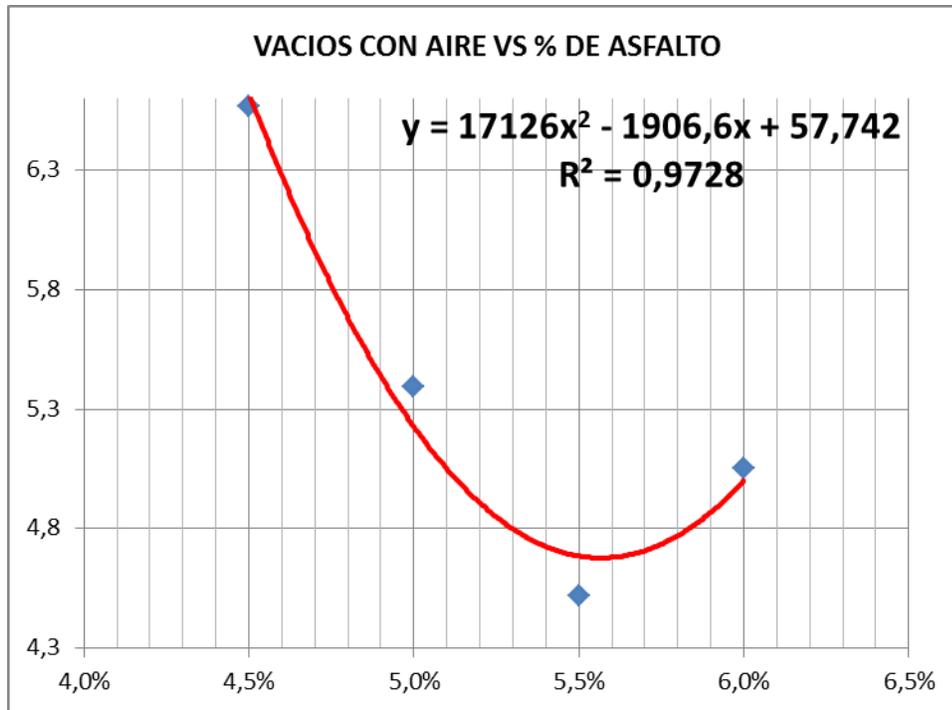
ANEXO 10. GRANULOMETRIA CAUCHO

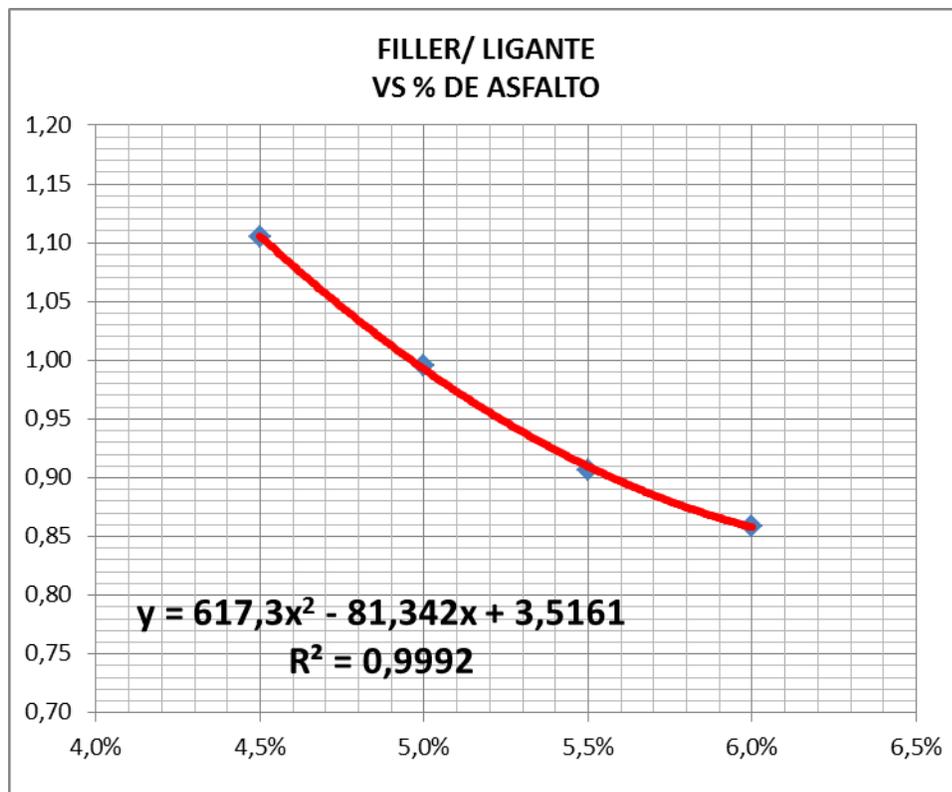
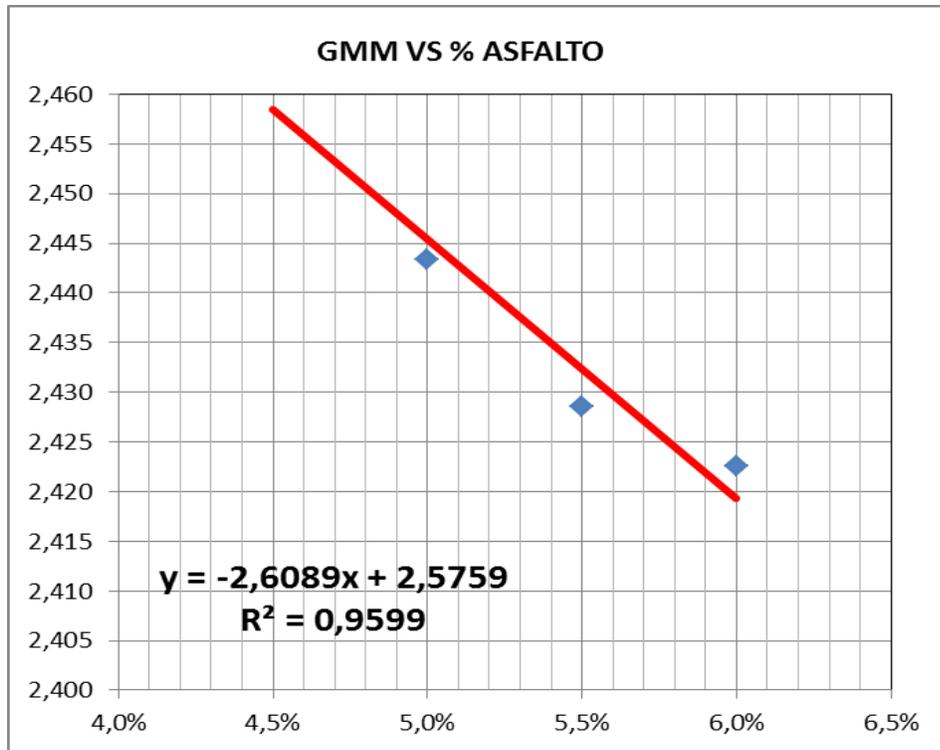


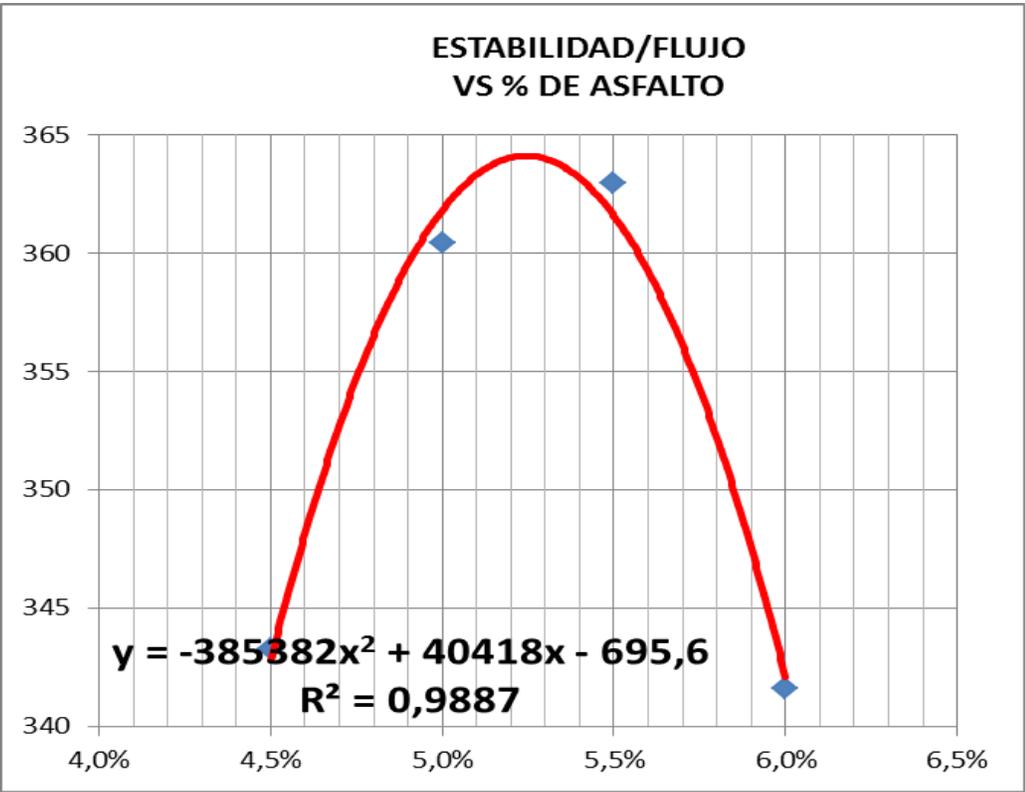
ANEXO 11. CURVAS DE DISEÑO MARSHALL











REGISTRO FOTOGRAFICO



Determinación Peso específico



Contenido de materia orgánica



Punto de ignición y de llama



Penetración y Punto de ablandamiento de los materiales bituminosos



Tamizado de agregados para la dosificación



Preparación de los materiales para la modificación del ligante



Modificación del ligante



Dosificación de los agregados



Adición de asfalto al agregado para la preparación de la mezcla



Preparación de las muestras para cada una de las briquetas



Mezcla homogénea de materiales para proceder a la compactación



Adecuación de la mezcla en el molde de compactación



Compactación de las briquetas



Ensayos de Gravedad específica y Marshall