

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MDC MODIFICADA
CON LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES-CAUCHO Y POLÍMEROS DE LA
INDUSTRIA.**

**JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA
DIEGO FERNANDO RAMIREZ MANTILLA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL
2015**

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MDC MODIFICADA
CON LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES-CAUCHO Y POLÍMEROS DE LA
INDUSTRIA.**

**JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA
DIEGO FERNANDO RAMIREZ MANTILLA**

**Monografía de grado como requisito para optar al título de Especialista en
Vías Terrestres**

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

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

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Enero 14 de 2015

DEDICATORIA

Agradecemos a nuestro Señor el todo poderoso por permitir desarrollar nuestras habilidades a lo largo del tiempo y hacer de ellas propuestas de soluciones útiles para nuestra comunidad; a los amigos que nos han acompañado en este camino y la familia que siempre está apoyando los ideales de aquellos que piensan en transformar y cambiar el mundo.

ING. JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA E ING. DIEGO RAMIREZ MANTILLA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por brindarnos un segundo hogar en el cual compartimos momentos agradables y nuevas experiencias que han dejado huella en nuestra educación como profesionales íntegros y con sentido humano.

A la Directora del Proyecto, Dra María Fernanda Serrano Guzmán por su tiempo, apoyo y dedicación durante el desarrollo el desarrollo de tesis de grado, así como su gran aporte cognitivo, humano además es una persona con un espíritu valioso y honorable.

A equipo humano de la Planta Humberto Quintero, que nos acogieron en sus instalaciones y dedicaron su valioso tiempo para dar orientación con experiencias, vivencias para dar y llevar en buen camino la presente investigación.

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.

TABLA DE CONTENIDO

| | PAG |
|---|------------|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. GENERALIDADES | 17 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 17 |
| 1.2 JUSTIFICACION | 19 |
| 1.3 OBJETIVOS | 20 |
| 1.3.1 Objetivo General | 20 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA | 21 |
| 2.1 TIPOS DE PAVIMENTO | 21 |
| 2.1.1 Pavimentos flexibles | 21 |
| 2.1.2 Agregados petreos | 22 |
| 2.1.3 Asfalto | 23 |
| 2.1.4 Mezcla asfáltica | 24 |
| 2.1.4.1 Características de la mezcla asfáltica | 24 |
| 2.1.4.2 Clasificación de las mezclas asfálticas | 25 |
| 2.1.4.3 mezcla asfaltica densa en caliente | 28 |
| 2.1.4.4 Diseño de mezclas asfálticas en caliente | 29 |
| 2.1.5 Clasificación de las mezclas MDC1 – MDC2 – MDC3 | 30 |
| 2.1.6 Cenizas volantes | 31 |
| 2.1.6.1 Clasificacion de las cenizas volantes | 32 |
| 2.1.7 Caucho | 33 |
| 2.1.8 Mezclas asfálticas con adición de caucho | 35 |
| 2.1.8.1 Porcentaje de caucho | 36 |
| 2.1.8.2 Ventajas y desventajas de uso de caucho en mezclas asfálticas | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.1.9 Asfaltos con polímeros | 37 |
| 2.1.9.1 Tecnicas en la elaboración de asfaltos modificados con polímeros | 39 |
| 2.1.9.2 Clasificaciones y usos de los polímeros | 40 |
| 2.1.9.2.1 Elastomeros | 40 |
| 2.1.9.2.2 Plastomeros | 40 |
| 2.1.9.3 Ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros | 41 |
| 2.1.10 Tipos de modificadores con polímeros | 42 |
| | |
| 3. METODOLOGIA | 43 |
| 3.1 CARACTERIZACION DE MATERIALES | 44 |
| 3.1.1 Asfalto | 44 |
| 3.1.2 Ensayos del material bituminoso | 46 |
| 3.1.3 Ceniza | 48 |
| 3.1.4 Ensayos a la ceniza volante | 48 |
| 3.1.5 Caucho reciclado de llanta | 50 |
| 3.1.6 Ensayos al caucho reciclado de llanta | 51 |
| 3.2 BRIQUETAS SEGÚN EL DISEÑO MARSHALL | 51 |
| 3.2.1 Dosificación de los agregados | 52 |
| 3.2.2 Resistencia mediante el equipo Marshall | 53 |
| 3.2.3 Diseño de briquetas (compactación) | 55 |
| 3.2.4 Pruebas mecánicas y de comportamientos de mezclas asfálticas | 55 |
| | |
| 4. RESULTADOS | 58 |
| 4.1 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE | 58 |
| 4.1.1 Contenido de materia orgánica INV e 212-07 | 58 |
| 4.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados finos | 58 |
| 4.2 CARACTERIZACION DEL ASFALTO | 59 |
| 4.3 RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL | 60 |

| | |
|--|----|
| 4.4 COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO CON POLIMEROS | 61 |
| 4.4.1 Característica de los cementos asfálticos modificados con polímeros | 62 |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 64 |
| 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA | 65 |
| 5.2 CARACTERIZACION DEL CAUCHO | 65 |
| 5.3 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO 60/70 MODIFICADO | 66 |
| 5.3.1 Peso específico del material bituminoso | 66 |
| 5.3.2 Penetración de los materiales bituminosos | 67 |
| 5.3.3 Punto de ignición y de llama mediante la capa abierta de Cleveland | 68 |
| 5.3.4 Punto de ablandamiento del material bituminoso | 69 |
| 5.4 PRUEBA MARSHALL | 70 |
| 5.5 IDENTIFICACION MEJOR MEZCLASMODIFICADAS | 77 |
| 5.6 SUMINISTRO DE CEMENTO ASFALTICO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO | 78 |
| 5.7 COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ENTRE LAS MEZCLAS MODIFICADAS CON CAUCHO Y CENIZA Y LAS MEZCLAS MODIFICADAS CON POLIMEROS | 81 |
| 6. CONCLUSIONES | 85 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 86 |
| ANEXOS | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | PAG. |
|---|-------------|
| Figura 1. Metodología | 43 |
| Figura 2. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio, gerencia de refinería de Barrancabermeja coordinación inspección de calidad | 44 |
| Figura 3. Granulometría del caucho (finos) | 66 |
| Figura 4. Peso específico del material bituminoso | 67 |
| Figura 5. Penetración de las mezclas asfálticas modificadas | 67 |
| Figura 6. Punto de inflamación de las mezclas asfálticas modificadas | 68 |
| Figura 7. Punto de llama de las mezclas asfálticas modificadas | 69 |
| Figura 8. Punto de ablandamiento de las combinaciones de asfalto | 70 |
| Figura 9. Flujo vs Combinaciones de asfalto | 72 |
| Figura 10. Estabilidad vs Combinaciones de asfalto | 73 |
| Figura 11. G_{bulk} vs combinaciones de asfalto | 73 |
| Figura 12. Peso unitario vs Combinaciones de asfalto | 74 |
| Figura 13. Vacíos agregado mineral vs Combinaciones de asfalto | 74 |
| Figura 14. Porcentaje de vacíos llenos vs Combinaciones de asfalto | 75 |
| Figura 15. Porcentaje de vacíos mezcla total vs Combinaciones de asfalto | 76 |
| Figura 16. Estabilidad/flujo vs Combinaciones de asfalto | 76 |

LISTA DE TABLAS

| | PAG |
|---|-----|
| Tabla1. Tipos de Modificadores | 42 |
| Tabla 2.Ficha técnica de calidad de ensayos de laboratorio de asfalto 60/70 realizado por ECOPETROL S.A | 45 |
| Tabla 3. Escala de vidrios de color normalizado | 49 |
| Tabla4.Proporciones de Mezclas modificadas con Ceniza y caucho | 52 |
| Tabla 5 Cantidad en gramos de material granular por briqueta | 52 |
| Tabla 6. Combinaciones para la elaboración de briquetas | 53 |
| Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente | 54 |
| Tabla 8. Contenido de materia orgánica | 58 |
| Tabla 9. Gravedad específica y absorción de los agregados finos | 59 |
| Tabla 10.Resumen caracterización del Asfalto | 60 |
| Tabla 11. Resumen de Prueba Marshall | 61 |
| Tabla 12. Especificación del asfalto modificado con polímero | 63 |
| Tabla 13. Caracterización de la ceniza volante | 65 |
| Tabla 14. Resumen de estudio de los 90 especímenes, mediante análisis de la prueba Marshall | 71 |
| Tabla 15.Comportamiento óptimo de mezcla asfáltica modificadas | 77 |
| Tabla 16.Tres mejores combinaciones de mezcla modificada | 78 |
| Tabla 17. Características del grano de caucho reciclado | 79 |
| Tabla 18.Distribucion de tamaños del grano de caucho reciclado | 79 |
| Tabla 19. Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado | 80 |

LISTA DE ANEXOS

| | PAG. |
|---|-------------|
| ANEXO 1. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA | 88 |
| ANEXO 2. FICHA TECNICA ASFALTO 60/70 ECOPEPETROL S.A | 89 |
| ANEXO 3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL METODO MARSHALL | 90 |
| ANEXO 4. GRANULOMETRIA CAUCHO | 95 |

GLOSARIO

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.

ELASTÓMEROS: Polímeros amorfos elásticos, los cuales debajo de la temperatura vítrea se convierten en rígidos vítreos y pierden toda elasticidad.

SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.

SBR: cauchos sintéticos con 25% de estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.

EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

PLASTÓMEROS: Polímeros que pueden recuperar su longitud original, tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

EVA: etileno-acetato de vinilo.

EMA: Etileno-acrilato de metilo

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

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MDC MODIFICADA CON LA ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTESCAUCHO Y POLÍMEROS DE LA INDUSTRIA.

AUTOR(ES): JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA
DIEGO FERNANDO RAMIREZ MANTILLA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): MARIA FERNANDA SERRANO GÚZMAN PhD. Ingeniería Civil

RESUMEN

Los actuales sistemas en la elaboración de mezclas asfálticas han buscado diferentes modelos y parámetros para el diseño de pavimentos en concretos asfálticos que se adapten a las diferentes condiciones medio ambientales a las zonas que requieren su implementación, debido que las solicitaciones para las vías son únicas y requieren formulas específicas para tratar la superficie de rodadura o de crear mezclas especiales mediante la modificación de ligantes ideales, los cuales tengan consistencias insensibles a los cambios de temperatura y sean capaces de resistir el ataque de los combustibles derramados sobre los pavimentos además los actuales productores de asfaltos convencionales no están ofreciendo al mercado un producto con una adecuada resistencia en cuento al ahuellamiento (deformación). La implementación de nuevos materiales en el desarrollo de mezclas asfálticas favorece en la disminución de los costos de producción, considerando la modificación de mezclas asfálticas una alternativa para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales y su uso en la pavimentación además de brindar propiedades de adhesión, flexibilidad favorecen a la sensibilidad térmica de la mezcla. La nueva tecnología en polímeros ofrecen un selecto margen de elastómeros y plastómeros con sus categorías dependiendo de las necesidades, brindando mezclas con altos módulos; la problemática actual brinda nuevos materiales no renovables pero transformables; el caucho proveniente de las llantas de los vehiculos es reutilizado para formar parte de la materia prima.. La reutilización de materiales para el diseño de asfaltos modificados pretende generar mezclas que garanticen mejorar las propiedades mecánicas en cuento 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 , buscando una relación entre la optimización entre pavimentos modificados con polímero y los implementados con emulsiones modificadas con caucho-ceniza.

PALABRAS CLAVES:

Elastómeros, plastómeros, Asfalto, pavimento, mezcla asfáltica, ceniza volante, polímeros.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF MDC CONVERTED THE ADDITION OF FLY ASHRUBBER INDUSTRY AND POLYMERS.

AUTHOR(S): JOHANY SNEYDER ARIZA MAHECHA
DIEGO FERNANDO RAMIREZ MANTILLA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: MARIA FERNANDA SERRANO GÚZMAN PhD. Ingeniería Civil

ABSTRACT

The current systems in the production of asphalt mixtures have sought different models and parameters for the design of pavements in asphalt concrete that adapt to the different environmental conditions to the areas that require its implementation, that the solicitations for the routes are unique and require specific formulas to treat surface or create special blends by modifying ideal binders which are insensitive to temperature changes consistency and be able to withstand the attack of the fuel spilled on the floors in addition current conventional asphalt producers are not offering to the market a product with adequate resistance in terms of the rut (warp). Implementation of new materials in the development of asphalt mixtures favors in the decrease of production costs, whereas an alternative modification of asphalt mixtures to improve features that have conventional asphalt mixtures and use in paving also provide adhesion properties, flexibility favour the thermal sensitivity in the mixture. New technology in polymers offer a select range of elastomer and plastomer with its categories depending, giving mixtures with high modules; the current issue offers new materials not renewable but convertible; rubber from the tires of the vehicles is reused to form part of the raw material and the fly ash as llenante in the flexible pavement mixture. The reuse of materials for the design of modified Asphalts aims to create mixes that guarantee to improve the mechanical properties in terms of the effort and deformation of the asphalt making that this asphalt has enhanced its features such as stability, strength and durability, supporting loads the requested traffic and future, looking for a relationship between the optimization between pavement polymermodified and implemented with emulsion modified with rubberash.

KEYWORDS: Elastomer, plastomer, asphalt, pavement, asphalt mix, ash, polymers.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

La infraestructura en las carreteras Colombianas se basa en vías constituidas con pavimentos flexibles del cual en su mayoría son vías de índole primaria y secundaria, permitiendo la movilización en las carreteras y facilitando el desarrollo socio-económico de una región.

Actualmente en Colombia aplicar pavimentos flexibles resulta muy costoso debido a la falta de materiales económicos y a nuevas tecnologías que permitan reducir las temperaturas de aplicación de las mezclas, la enfermedad de las vías y de su estructuras es la falta de creación de mezclas con altos módulos reduciendo notablemente el ahuellamiento producto de la carga producida por los ejes equivalentes de los vehículos, el cual transmite este esfuerzo a la carpeta asfáltica, debido a esto se empezaron hacer investigaciones para encontrar un material que resistiera lo suficiente y los costos operacionales se reduzcan, algunos modelos están implementando la ceniza volante como llenante mineral proporcionando mayor cantidad en los finos equilibrio en la mezcla, además para ocupar volumen, en el ligante asfáltico los costos también se pueden modificar con polímeros haciendo que sea más accesible en precio conservando las mismas propiedades.

Los polímeros son aquellos que muestran un comportamiento elástico. El término, que proviene de polímero elástico, es a veces intercambiable con el término goma, que es más adecuado para referirse a vulcanizados. Cada uno de los monómeros que se unen entre sí para formar el polímero está normalmente compuesto de carbono, hidrógeno, oxígeno y/o silicio. Los elastómeros son polímeros amorfos que se encuentran sobre su temperatura de transición vítrea o T_g , de ahí esa

considerable capacidad de deformación; a temperatura ambiente las gomas son relativamente blandas y deformables.

La ceniza volante se ha convertido en un subproducto industrial como consecuencia de la combustión de minerales como el carbón de las explotaciones petroleras, convirtiéndose y generando un residuo contaminante, la industria de la construcción las adapta como aditivos convirtiéndose es una alternativa en la disminución de los costos y mejora el comportamiento de las mezclas modificadas con éste llenante.

Otro producto utilizado en la modificación de mezclas asfálticas densas en caliente; 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

Los actuales sistemas en la elaboración de mezclas asfálticas han buscado diferentes modelos y parámetros para el diseño de pavimentos en concretos asfálticos que se adapten a las diferentes condiciones medio ambientales a las zonas que requieren su implementación, debido que las solicitaciones para las vías son únicas y requieren formulas específicas para tratar la superficie de rodadura o de crear mezclas más especiales mediante la modificación de ligantes ideales, los cuales tengan consistencias insensibles a los cambios de temperatura y sean capaces de resistir el ataque de los combustibles derramados sobre los pavimentos además los actuales productores e asfaltos convencionales no están ofreciendo al mercados un producto que no ofrecen una adecuada resistencia en cuenta al ahuellamiento (deformación), se han desarrollado asfaltos de alto módulo 20-30, 10-20 de los cuales alteran los porcentajes de asfalto con la aplicación de nuevas propiedades que satisfacen las solicitaciones excesivas, temperaturas extremas, la resistencia al envejecimiento y procesos de oxidación.

La historia ha demostrado con el continuo avance en la tecnología la creciente generación de nuevos elementos de los cuales pueden ser aprovechables para la obtención de nuevas materias primas; consecuencia del comportamiento humano, la falta de una política ambiental eficiente, el rápido crecimiento del parque automotor, por nombrar algunas. Las llantas son un residuo que causa un alto impacto en el medio ambiente: son de gran tamaño, y generan las condiciones propicias para el desarrollo enfermedades como dengue, chikungunya entre otras. 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 igual forma , en las locaciones petroleras y durante el proceso de exploración del crudo mediante un proceso se hace a través de diferentes temperaturas, cada una de las cuales genera un derivado diferente, los residuos lodosos son arrojados a piscinas que cuenta con proceso 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 ya sea los desechos que descansan en cuerpos de agua o cultivos, o se vayan con el aire provocando lluvia acida que resulta muy perjudicial.

Cuando se implementan mezclas asfálticas modificadas 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 comparar el comportamiento un asfalto modificado con caucho-ceniza y los cementos asfálticos con polímeros compuestos por Elastómero y Plastómeros los cuales están constituidos por dos fases , una formada por pequeñas partículas de polímeros y otra constituida por asfalto produciendo el principal efecto en el cambio en la relación viscosidad-temperatura mejorando el asfalto tanto en altas como bajas temperaturas.

La relación del caucho-ceniza se emplea cálculos de porcentajes para el reemplazo del ligante asfáltico, además de lograr una mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo que sirve de substrato para el asfalto. En la línea de investigación, donde se enmarca este trabajo de comportamiento de las dos modos de modificaciones del cemento asfáltico: 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 además de generar nuevas propiedades de aumentar la cohesión interna, disminuir la susceptibilidad térmica, encontrar flexibilidad, elasticidad a bajas temperaturas y aumentar la adhesividad árido -ligante son los objetivos de la incorporación de polímeros.

1.2 JUSTIFICACION

El estudio de nuevos materiales en el desarrollo de mezclas asfálticas favorece en la disminución de los costos de producción, considerando la modificación de mezclas asfálticas una alternativa para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales y su uso en la pavimentación además de brindar propiedades de adhesión, flexibilidad favorecen a la sensibilidad terminar de la mezcla.

La tecnología en polímeros ofrecen un selecto margen de elastómeros y plastómeros con sus categorías dependiendo de las necesidades y características propuestas por el diseñador, brindando mezclas con altos módulos; 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 volante 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 , buscando una relación entre lo optimización entre pavimentos modificados con polímero y los implementados con emulsiones modificadas con caucho-ceniza.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las características mecánicas de la mezcla asfáltica tipo MDC-2 modificadas por elastómeros, plastómeros y las mezclas modificadas con ceniza de las locaciones petroleras y caucho pulverizado de las llantas en desuso.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el comparativo en los ensayos de viscosidad, punto de ablandamiento, peso específico y penetración del cemento asfáltico con las adiciones en porcentajes de ceniza-caucho para muestras modificadas con elastómeros y plastómeros
- Comparar los resultados de las MDC-2 modificada con ceniza-caucho y las dosificaciones en cemento asfáltico de las MDC-2 con adición de polímeros, evaluados mediante el ensayo Marshall y la caracterización por medio de ensayos de laboratorio.
- Describir los materiales tales como el caucho, la ceniza volante, los elastómeros y plastómeros para las MDC-2 modificadas.

2. MARCO DE REFERENCIA

Cabe resaltar la información teórica para la evaluación de las MDC-2, las cuales pueden comprender las siguientes definiciones donde se expresa la importancia que presentan los diferentes comportamientos para los ensayos y conceptos básicos para la mezcla asfáltica modificada.

2.1 El pavimento

2.1.1 Pavimentos flexibles

Se denomina pavimentos flexibles a aquellos cuya estructura total se defleca o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings.

La construcción de pavimentos flexibles se realiza a base de varias capas de material. Cada una de las capas recibe cargas por encima de la capa.

Las capas de un pavimento flexible que conforman un suelo se colocan en orden descendente en capacidad de carga. La capa superior es la que mayor capacidad de soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la base. La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

Las capas de un pavimento flexible suelen ser:

Capa superficial: Es la que se encuentran en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas.

La Base: Se encuentra debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados y puede estar estabilizada o sin estabilizar.

La Subbase: Se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. En muchas ocasiones se prescinde de esa capa subbase.

2.1.2 Agregados Pétreos

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica o con ligantes asfálticos.

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.

Las propiedades de los agregados se pueden conceptuar bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados, o individuales, y otro como conjunto.

Tipos de agregados pétreos:

Agregados Naturales: Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

Agregados de Trituración: Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de cantera cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Agregados Artificiales: Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

Agregados Marginales: Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.1.3 Asfalto

El asfalto, también denominado betún, es un material viscoso, pegajoso y de color negro. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeabilizante de muros y tejados. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de betún bitumen. El asfalto es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo.

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.

2.1.4 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, 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 sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

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.

2.1.4.1 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 ⁸.
- 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.

2.1.4.2 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 revista 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 frio es viable desde al 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 microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se tratan de mezclas que se conforman por un árido fino en el que va incluido el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se puede trabajar y extenderse la mezcla.

e) Por la estructura del agregado pétreo

- 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.

2.1.4.3 Mezcla Asfáltica Densa en caliente

En la mayoría de los casos, es el tipo de mezcla más empleado para la construcción. Se define una mezcla asfáltica en caliente a la combinación de materiales finos seleccionados y bien gradados incluyendo polvo de tamaños finos 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

2.1.4.4 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, evaluaba el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado del material. Compara con una estabilidad ya obtenida para medir la deformación, este método funcionó adecuadamente para la evaluación de mezclas la cuales contenían agregado de tamaño pequeño o granulometrías finas, pero no se obtuvieron resultados deseados en mezclas asfálticas en caliente con agregados de tamaños máximos nominales altos.
- Método Marshall (1930's). Es el método con el cual se desarrolló esta tesis de grado, fue descubierto durante la segunda guerra mundial y después se adaptó para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. El método se desarrolló y ha funcionado de una manera adecuada desde su creación, salvo algunas modificaciones en algunas de sus especificaciones en los años 40`s .
- Método Hveem (1930's). Es un método de diseño de mezclas asfálticas contemporáneo con el método Marshall, a diferencia que el principal parámetro de evaluación de este es la estabilidad pseudotriaxial.
- Método de la Western Association Of State highway on Trasportation Officials WASTHO (1984). Este método de diseño de mezclas fue recomendado para realizar cambios que se requerían en los materiales y las especificaciones de

diseño de mezclas asfálticas en caliente para mejorar la resistencia a las roderas.

- 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.

2.1.5 Clasificación de las Mezclas MDC-1, MDC-2 Y MDC-3:

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

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

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

MDC-3: Las mezclas densas en caliente tipo MDC-3 se utilizan como capa de rodadura con espesores entre 30 Y 40 mm.

2.1.6 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, 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 $^{\circ}\text{C}$, 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.

2.1.6.1 Clasificación de las cenizas volantes

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

Existen principalmente 3 tipos de carbón utilizados para las plantas generadoras eléctricas los carbones más comúnmente usados son, carbón bituminoso, carbón 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 hidrotermico como el ópalo de origen orgánico vegetal como las tierras formadas por esqueletos de plantas de origen animal formada por caparazones animales.
- Artificiales (F): son aquellas que resultan de tratamientos térmicos de activación y se dividen en:

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

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

2.1.7 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.

La reutilización de neumáticos es de amplio uso y difusión en aquellos países que poseen normativas ambientales claras y eficientes.

El caucho puede ser natural o sintético. El de origen natural se elabora a partir del látex, que es una resina blanca lechosa que sale de la corteza del árbol de caucho.

Este, si bien es originario de Brasil, fue llevado a Inglaterra en 1876 y de allí exportando a otras zonas bajo dominio británico, determinando que hoy las principales plantaciones – un 90% del mercado mundial se encuentra en el sudeste asiático, principalmente en Malasia.

El principal objetivo al modificar asfaltos es lograr propiedades reológicas no obtenidos en los asfaltos producidos con técnicas convencionales de refinación.

Una forma de modificarlos es mediante la incorporación de polímeros, entre ellos los cauchos. Estos pueden ser especialmente fabricados o provenir de la recuperación de piezas en desuso, como es el caso de los neumáticos de vehículos. Estos poseen estructuras complejas y estables que se han venido utilizando desde hace años en países como Alemania, Portugal y Estados Unidos, con procesos de pre tratamiento y molienda variados. Las formas de utilización dependen de la competitividad entre la técnica de reciclado y la prestación final.

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

2.1.8 Mezclas asfálticas con adición de caucho

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

- **Proceso Húmedo.** La norma ASTM 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 en 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.

2.1.8.1 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) obtuvo resultados similares a los primeros, pero determino 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.

2.1.8.2 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 nuestro entorno, 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

2.1.9 Asfaltos con polímeros

Los asfaltos convencionales no ofrecen una adecuada resistencia a la deformación por ahuellamiento. Los asfaltos duros, son una eventual solución pero corren el riesgo de fisuraciones a bajas temperaturas.

Los asfaltos modificados con polímeros se aplican en aquellos casos en que las propiedades de los ligantes tradicionales son insuficientes (solicitaciones excesivas, temperaturas extremas, agentes atmosféricos, tipología del terreno).

Los asfaltos modificados con polímeros tienen su origen en Europa, particularmente en Alemania, en la década del 70. Su desarrollo se potenció con el objetivo de lograr soluciones innovadoras: utilización de capas finas (menores a 5 cm) y con una durabilidad mejorada, lo que exige en muchos casos el empleo de asfaltos modificados.

A comienzos de 1980, el desarrollo de los Betunes Modificados estuvo estrechamente vinculado al diseño de nuevas mezclas finas para capas de superficie: concretos bituminosos finos con espesores de 3-4 cm, seguido de los concretos bituminosos muy finos (2-3 cm), llegando a los ultra finos (1-2 cm).

El uso de mezclas discontinuas, el empleo de asfaltos modificados y la incorporación de fibras permitió un mayor contenido de ligante sin riesgos de exudación, lográndose mejores características cohesivas y de impermeabilidad. En Alemania se desarrollaron las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) con la adición de fibras y asfaltos modificados, al tiempo que comenzaron a utilizarse las mezclas porosas o drenantes, hoy ampliamente empleadas en caminos y autopistas con elevada densidad de tránsito.

Las mezclas muy abiertas con betunes convencionales no alcanzan una buena resistencia mecánica a causa de una insuficiente cohesión y pobre adhesividad, lo que unido a un bajo contenido de ligante resulta en una disminución de la durabilidad.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases: una formada por pequeñas partículas de polímero y la otra por asfalto. Si es baja la

concentración de polímeros, existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero.

El efecto principal de la adición de polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad y temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) mejorando el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

2.1.9.1 Técnicas en la elaboración de asfaltos modificados con polímeros

1. Técnicas convencionales: Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación (grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad). El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas (pellets) o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero.

2) Equipos especializados: Para la preparación de asfaltos modificados con polímeros; las centrales producen asfaltos modificados con polímeros que alcanzan altas prestaciones, debe seleccionarse cuidadosamente el asfalto base, tipo de polímero, dosificación, elaboración y las condiciones de almacenamiento.

Tamaño de partículas: Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, por encima de la cual el polímero solo actúa como un filler y por debajo de la cual el polímero pasa a estar muy solubilizado y aumenta la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

2.1.9.2 Clasificaciones y uso de los polímeros

2.1.9.2.1 Elastómeros

El caucho es un ejemplo. Los elastómeros son polímeros amorfos elásticos. Por debajo de la temperatura vítrea, se convierten en rígidos vítreos y pierden toda la elasticidad. Las propiedades del caucho natural, limitadas por la dependencia de temperatura, pueden ser modificadas químicamente (agregado de azufre que se conoce como vulcanización).

SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.

SBR: cauchos sintéticos con 25% de estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.

EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

2.1.9.2.2 Plastómeros

Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, recuperando su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Dentro de estos tenemos:

EVA: etileno-acetato de vinilo.

EMA: Etileno-acrilato de metilo

PE: (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.

PP: (Polipropileno).

2.1.9.3 Ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros

Ventajas:

- 1) Disminución de la susceptibilidad térmica. Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio, reduciendo el ahuellamiento; y se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento.
- 2) Disminución de la exudación del asfalto: Por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- 3) Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
- 4) Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- 5) Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
- 6) Mejora la trabajabilidad y la compactación, por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- 7) Mayor resistencia al envejecimiento
- 8) Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.
- 9) Mayor resistencia al derrame de combustibles.
- 10) Reduce el costo de mantenimiento.
- 11) Aumenta el módulo de la mezcla: permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.
- 12) Mayor intervalo de plasticidad (diferencia entre el punto de ablandamiento)
- 13) Mayor resistencia a la acción del agua.

Desventajas:

- 1) alto costo del polímero.
- 2) dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).
- 3) deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla.
- 4) los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- 5) la temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

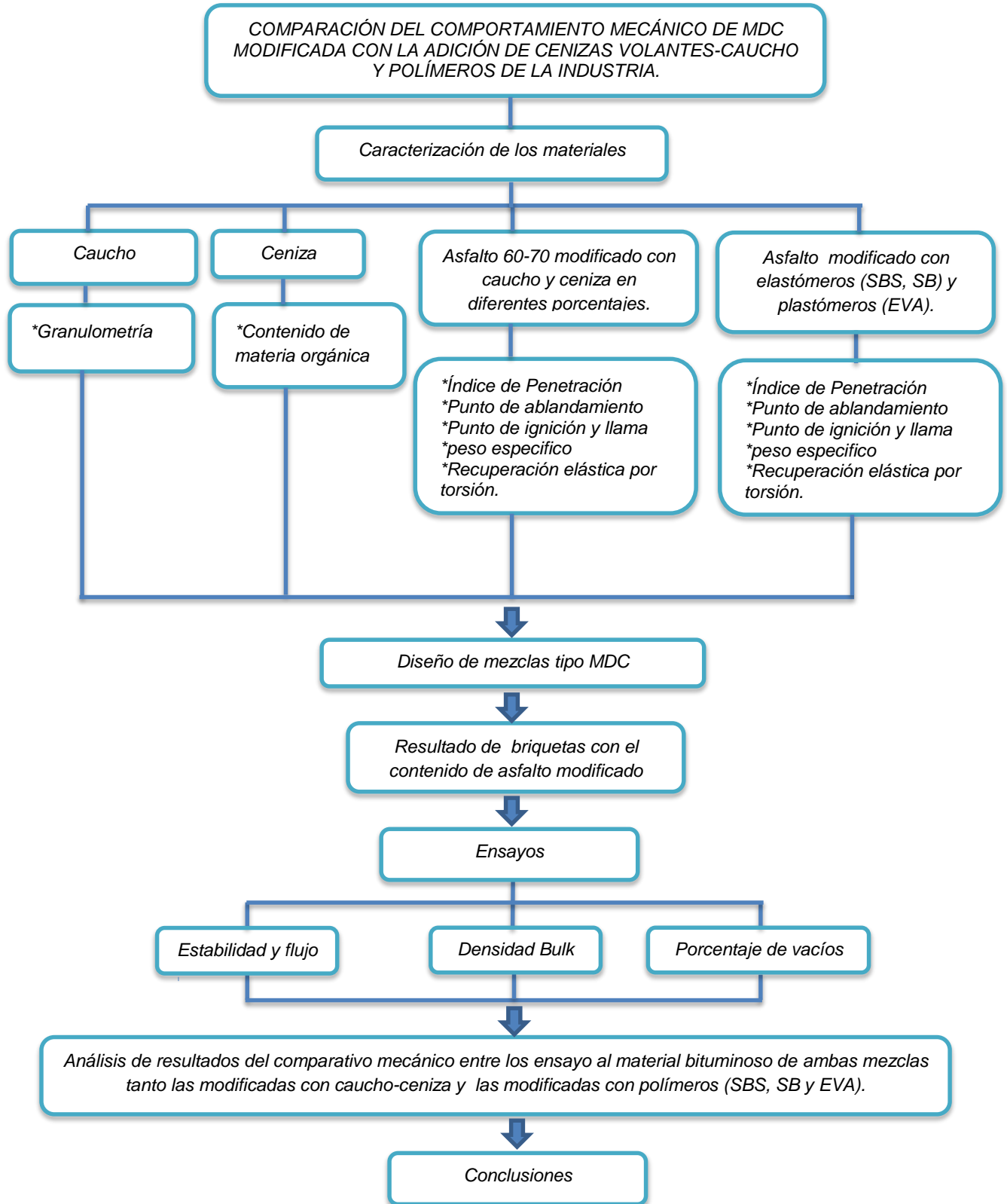
2.1.10 Tipos de modificadores con polímeros

Tabla 1. Tipos de modificadores

| | |
|--|---|
| A) Elastómeros termoplásticos | 1) Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) |
| | <p>Pueden fluir fácilmente como líquidos viscosos a altas temperaturas y comportarse elásticamente a las temperaturas de servicio, similar a los cauchos vulcanizados.</p> <p>El contenido de estireno está entre 20 y 30 %.</p> <p>Se mezclan el betún y los polímeros a temperaturas por encima del punto de fusión del polímero, mediante una adecuada agitación.</p> |
| | 2- Estireno-Butadieno (SB) |
| B) Plastómeros termoplásticos | Etil-Vinil-Acetato (EVA) |
| | <p><i>En general, los polímeros EVA más adecuados para modificar betunes presentan un contenido de acetato de vinilo comprendido entre 18 y 33%.</i></p> <p>La incorporación del copolímero al asfalto reduce la penetración, incrementa el punto de ablandamiento y reduce la susceptibilidad térmica. La magnitud de estos cambios depende del contenido de polímero.</p> |

3. METODOLOGÍA

Figura 1. Metodología



3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.1.1 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).

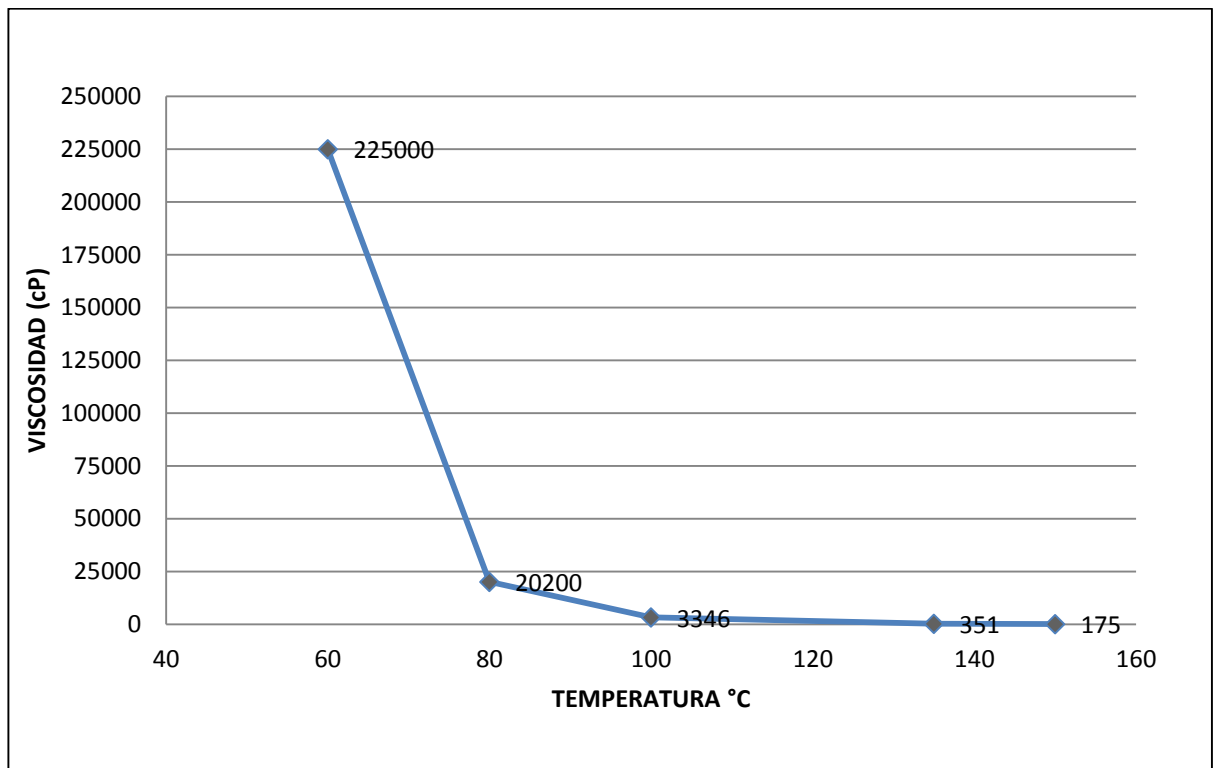


Figura 2. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio, gerencia de refinería de Barrancabermeja coordinación inspección de calidad.

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 |

3.1.2 Ensayos 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 específica, 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. (INVE 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 el 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 tasa 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.

3.1.3 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.

3.1.4 Ensayos a la ceniza volante

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.

3.1.5 Caucho reciclado de llanta

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 RENOVA).

El caucho que se empleó fue proporcionado por el GRUPO RENOVA 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.

3.1.6 Ensayos al caucho reciclado de llanta

- 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.

3.2 BRIQUETAS SEGÚN EL 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> |

3.2.1 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.

3.2.2 Resistencia mediante del equipo Marshall

Este ensayo se llevó a cabo bajo la norma INV E 748 del Instituto Nacional de Vías. Se elaboraron 90 briquetas, con diversas proporciones de caucho y ceniza adicionada 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; la idea es tener la información respecto a los resultados obtenidos con polímeros.

Tabla 6. Combinaciones para la elaboración de briquetas

| Mezcla Asfáltica | asfalto para cada briqueta gr | total de briquetas | peso de asfalto gr | peso de asfalto gr + factor de seguridad para cada tarro(gr) | cantidad de ceniza | cantidad de caucho | cantidad de asfalto | agregado para cada briqueta gr | agregado para 10 briquetas gr |
|--------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|--|
| 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 |

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 |

3.2.3 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.

3.2.4 Pruebas mecánicas y de 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 Maria 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

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

Wa=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

En el desarrollo y seguimiento de los ensayos de laboratorio que consistían en comparar la viscosidad, punto de ablandamiento, peso específico, punto de llama y penetración del cemento asfáltico con las adiciones en porcentajes de ceniza-caucho con las muestras modificadas con elastómeros y plastómeros, del cual se tomaron los resultados de la investigación sobre la adiciones de caucho-ceniza.

4.1 CARACTERIZACION DE LA CENIZA VOLANTE

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

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

De la realización de este ensayo se obtuvo el resultado consignado en la Tabla 8 Adicionalmente, los datos completos de este ensayo se encuentran en el ANEXO 1.

Tabla 8. Contenido de materia orgánica

| MUESTRA | No. GARDNER | DESCRIPCION |
|----------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 11 | Estándar |

4.1.2 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 9

Tabla 9. Gravedad específica y absorción de los agregados finos

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

4.2 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
- Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados INV.E 727-13

Los resultados resumidos se muestran a continuación en la Tabla 10

Tabla 10. 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 |

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

A continuación, en la Tabla 11 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 3.

Tabla 11. Resumen de Prueba Marshall

| TIPO DE MUESTRA | PESO UNITARIO Lb/in³ | %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 |

4.4 COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLÍMEROS (ELASTOMEROS Y PLASTOMEROS).

Las especificaciones generales de construcción de carreteras 2013 del Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Estudios e Innovación

referente al suministro de cemento asfáltico modificado con polímeros Artículo 414-13, siendo un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un cemento asfáltico deberán presentar un aspecto homogéneo y estar prácticamente exentos de agua, de modo que no formen espuma cuando se calientan a la temperatura de empleo.

4.4.1 Características de los cementos asfálticos modificado con polímeros Art.414-13

El Tipo I se basa en las propiedades de cementos asfálticos convencionales modificados con EVA o polietileno y se emplean en mezclas asfálticas de tipo drenante, en zonas en las cuales los índices de humedad y precipitación superen el 80%.

Los Tipos II, III y IV se basan en las propiedades de cementos asfálticos convencionales modificados con polímeros de bloque estirénico como el SBS.

El Tipo II se aplican en mezclas drenantes, discontinuas y densas, semidensas y gruesas en caliente en general; el Tipo III en mezclas discontinuas y densas, semidensas y gruesas en caliente en zonas de altas exigencias y el Tipo IV se utilizará en la elaboración de mezclas antirreflectivas de grietas del tipo arena asfalto o riego en caliente para membranas de absorción de esfuerzos.

El tipo V es un asfalto modificado de alta consistencia, recomendado para la manufactura de mezclas asfálticas de alto módulo. Los asfaltos modificados con polímeros tienen la tendencia de generar diferentes combinaciones que cumplan con los requerimientos exigidos por los clientes dependiendo del tipo de obra vial que se esté desarrollando. A continuación se muestra la tabla 12 especificaciones del asfalto modificado con polímeros, tomada del Art 414-13 del Instituto Nacional

de Vías en donde se muestran los diferentes rangos dependiendo de la Norma de ensayo INV.

Tabla 12. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros

| CARACTERÍSTICAS | NORMA DE ENSAYO INV | TIPO I | TIPO IIA | TIPO IIB | TIPO III | TIPO IV | TIPO V |
|---|---------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| Penetración (25°C,100 g,5s),0,1mm | E-706 | 55 a 70 | 40 a 70 | 55 a 70 | 55 a 70 | 80 a 130 | 15 a 40 |
| Punto de ablandamiento, °C, mínimo. | E-712 | 58 | 58 | 58 | 65 | 60 | 65 |
| Ductilidad (5°C,5cm/min), cm mínimo | E-702 | - | 15 | 15 | 15 | 30 | - |
| Recuperación elástica por torsión a 25°C, % mínimo | E-727 | 15 | 40 | 40 | 70 | 70 | 15 |
| Estabilidad al almacenamiento (nota 1) -Diferencia en el punto de ablandamiento, °C, máximo | E-726 y E-712 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Contenido de agua, %, máximo | E-704 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo | E-709 | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| Residuo del ensayo de perdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo (INV E-720) | | | | | | | |
| Pérdida de masa, % , máximo | E-720 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,8 |
| Penetración del residuo, en % de la penetración original, mínimo | E-706 | 65 | 50 | 65 | 65 | 60 | 70 |
| Incremento en el punto de ablandamiento, °C, máximo | E-712 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Ductilidad (5°C, 5cm/min), cm, mínimo | E-702 | - | 8 | 8 | 8 | 15 | - |

Con relación a la reunión con el personal técnico de la Planta Humberto Quintero los resultados que ellos obtienen directamente de los cementos asfálticos modificados con polímeros, están ligados y regidos por el Artículo 414-13 del Instituto Nacional de Vías y específicamente por la *tabla 12. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros*, es de resaltar que los ingenieros de la planta aclararon que las modificaciones que ellos desarrollan tienen características propias de diseño en el cual cada uno se compone de diferentes porcentajes de polímeros EVA, SBS y SB entre otras.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las tendencias tecnológicas y la disminución de costos económicos son una de las principales preocupaciones en el campo de la ingeniería civil especialmente en el campo de las vías, debido que los sistemas de producción de materias procesadas puede tener altos costos, del cual se deben encontrar soluciones favorables.

En el contenido del análisis se presenta un comparativo entre los cementos asfálticos modificados con grano de caucho y los cementos asfálticos modificados con polímeros, se ajusta al contenido de los Artículos 413-13 y el Artículo 414-13 del Instituto Nacional de Vías normas 2013.

Los ensayos INV .E efectuados principalmente a la mezcla modificada con grano de caucho están sujetos al reglamento de ensayo del año 2007 del INVIAS, pero se va hacer una relación con los datos obtenidos con la Tabla 413-3 especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado.

5.1 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 Gardner 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.

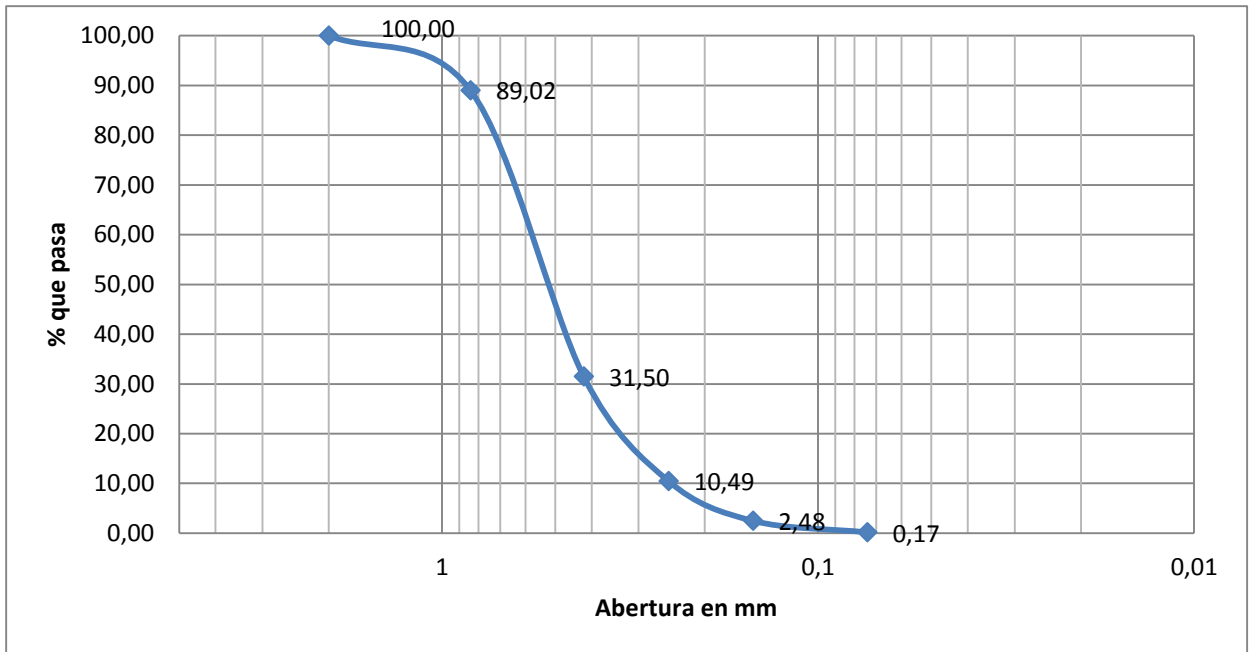
Tabla 13. Caracterización de la ceniza volante

| 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 |

5.2 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 3). Ver ANEXO 4.

Figura 3. Granulometría del caucho (finos)



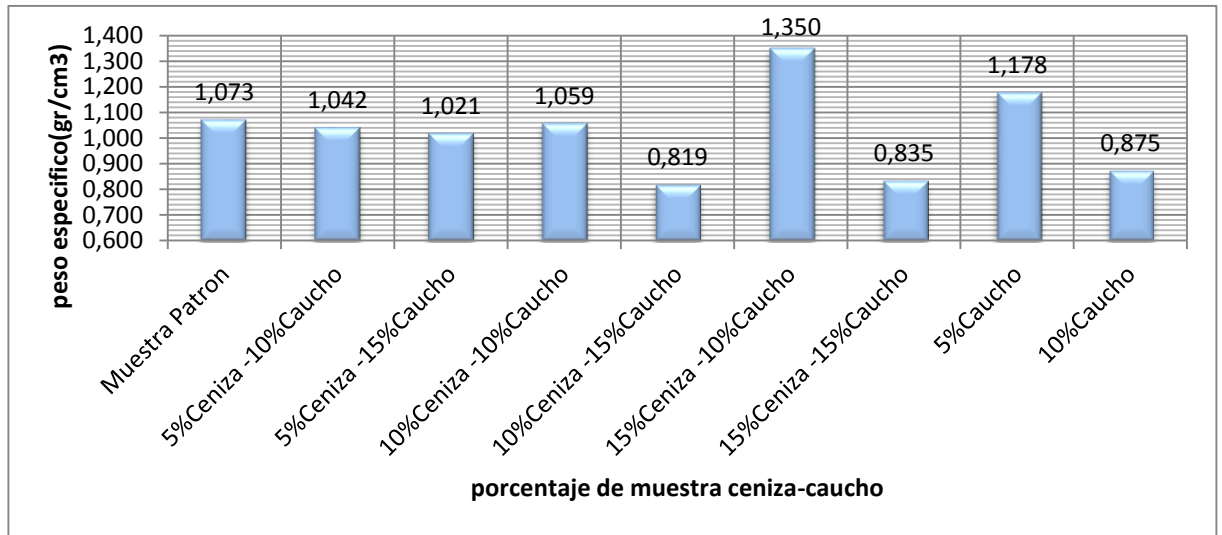
5.3 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO 60/70 MODIFICADO CON ADICION DE CAUCHO Y CENIZA VOLANTE

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.

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

En la figura 4 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.

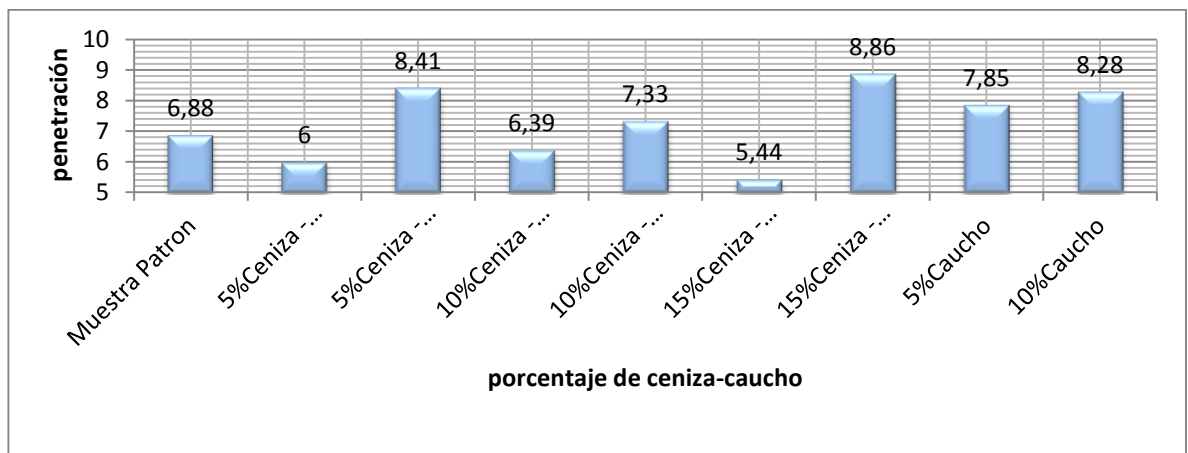
Figura 4. Peso específico del material bituminoso



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

En la figura 5 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 5. Penetración de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho.



5.3.3 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 fusiona y se combina con el asfalto, proporcionando el látex actuando como un líquido viscoso y elástico después de ser enfriado. En las siguientes figuras 6 y 7 se hace una relación entre el punto de inflamación y de llama.

Figura 6. Punto de inflamación (°C) de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho.

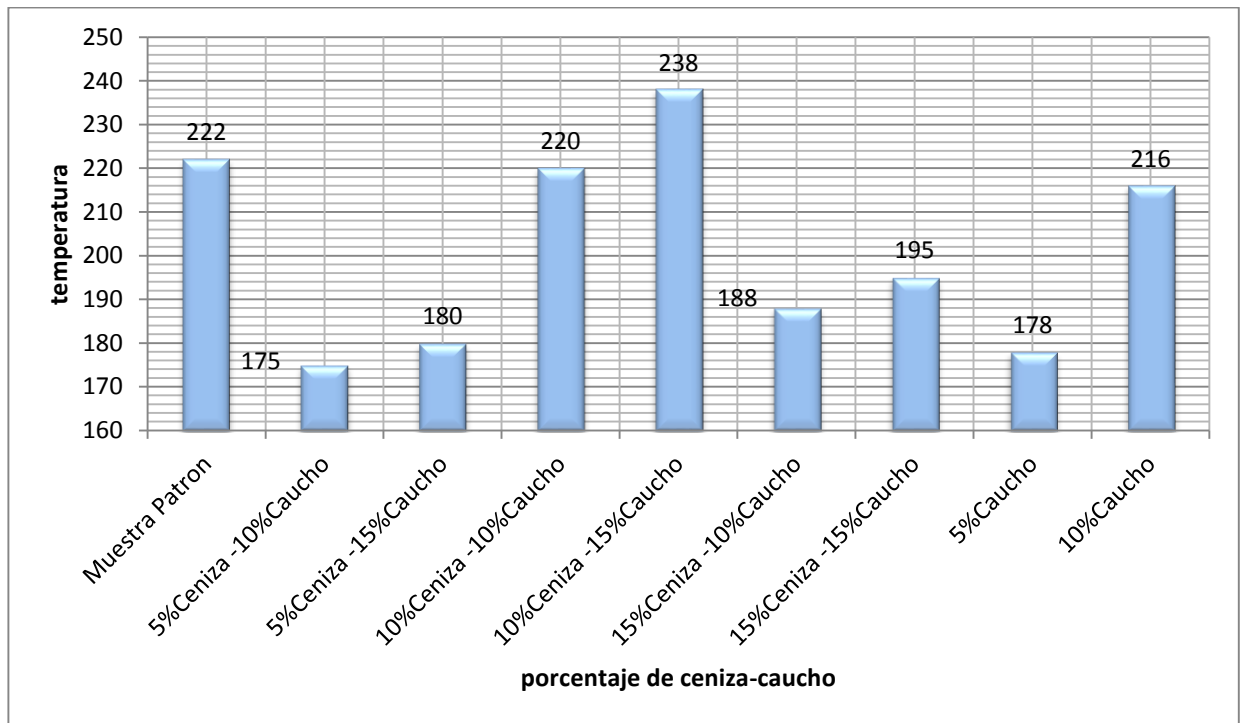
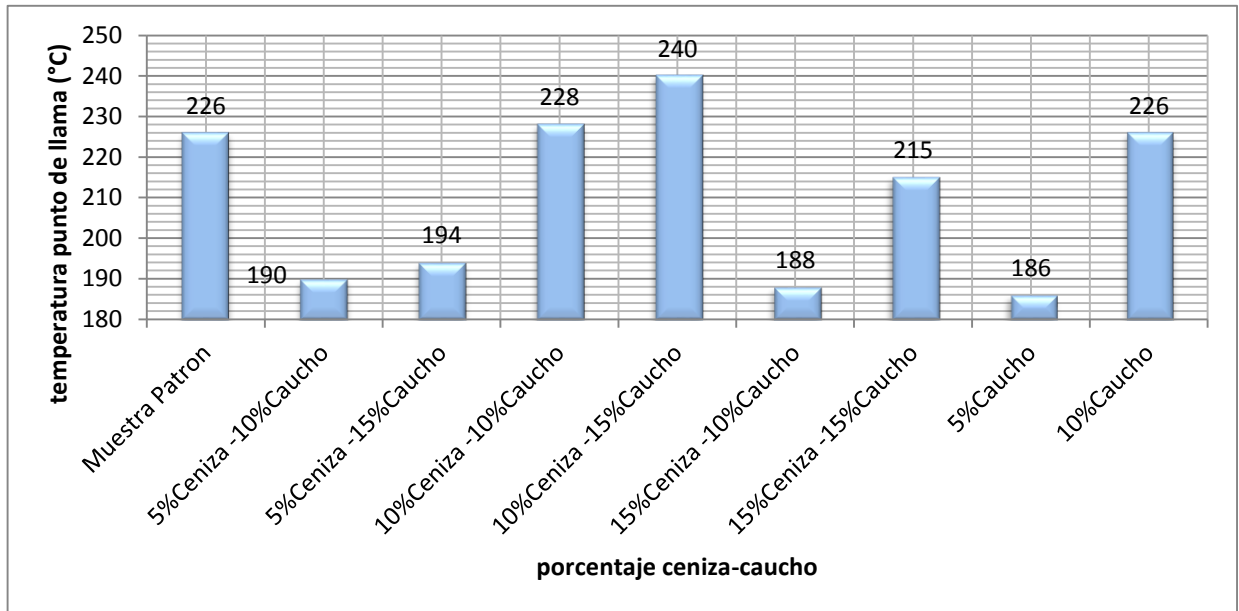


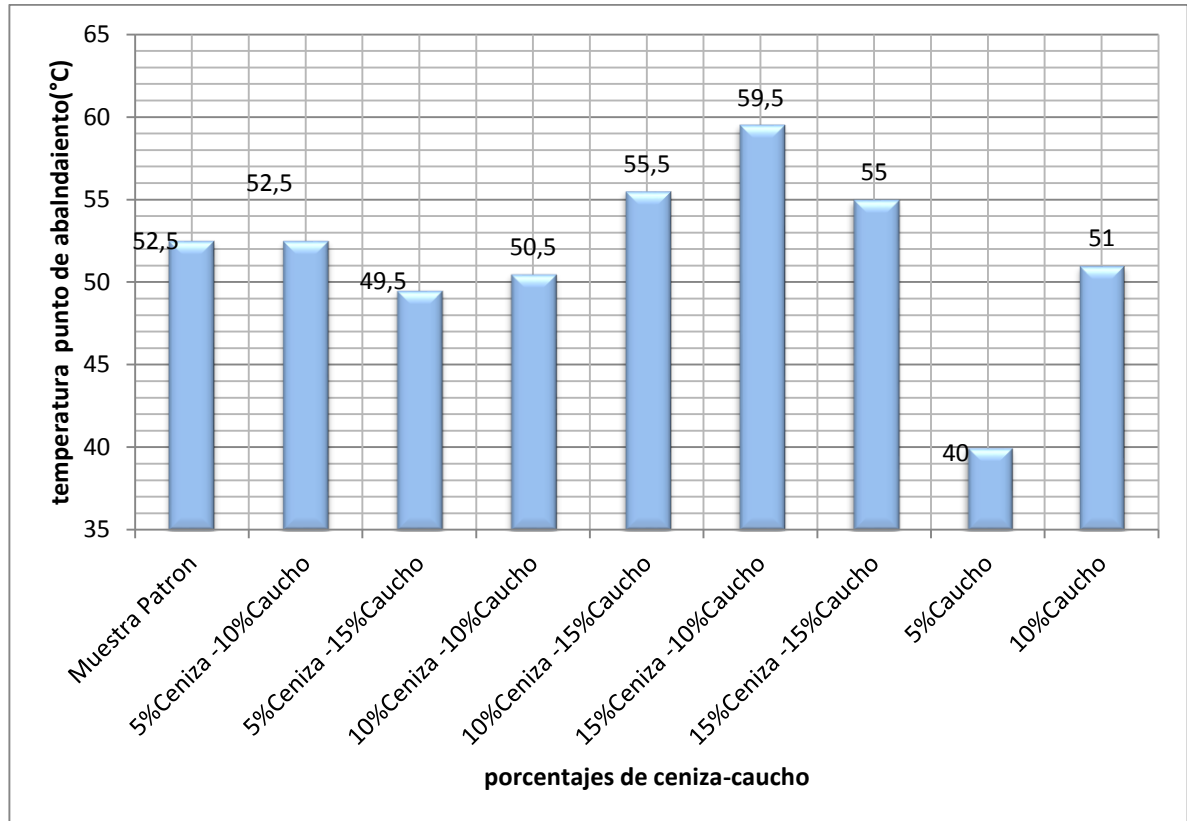
Figura 7. Punto de llama de las mezclas asfálticas modificadas con ceniza volante y caucho



5.3.4 Punto de ablandamiento del material bituminoso 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 8 se muestra el punto de ablandamiento en °C de las nueve muestras.

Figura 8. Punto de ablandamiento (°C) de las combinaciones de asfalto modificado con caucho y ceniza volante.



5.4 ENSAYO DE 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.

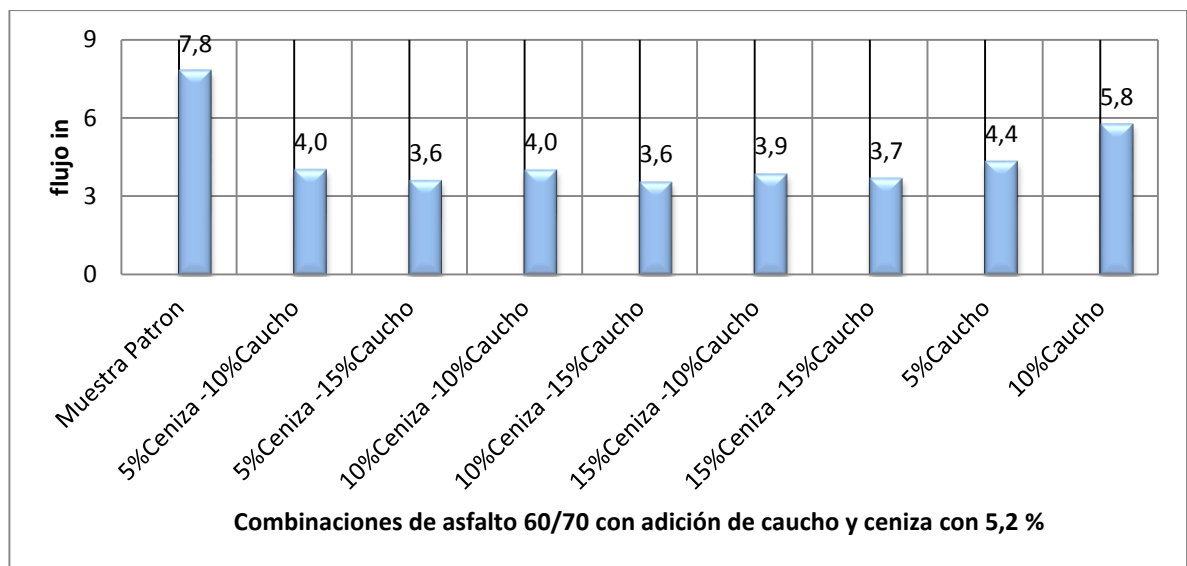
Tabla 14. Resumen de estudio de las 90 especímenes con diferentes proporciones de caucho y ceniza volante, mediante el análisis de la prueba Marshall.

| PROPORCION | | % DE ASFALTO | FLUJO | ESTABILIDAD | G _{bulk} | PESO UNITARIO Lb/in ³ | % vacíos mezcla total | % vacíos agregado mineral | % vacíos lentos | 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

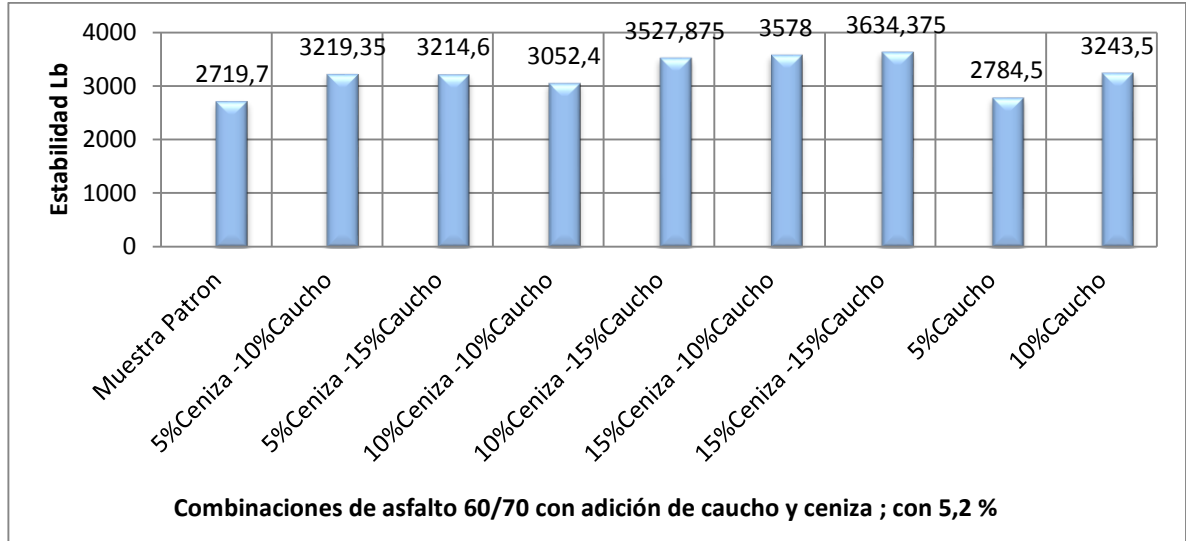
valores de ceniza y caucho se hicieron con relación al asfalto, decir que hay menos consumo del mismo, por el alto volumen de los aditivos reduce significativamente gasto de asfalto. Este mecanismo de mezclado se hizo mediante vía humedad y a una temperatura constante de 140° C.

Figura 9. Flujo vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%



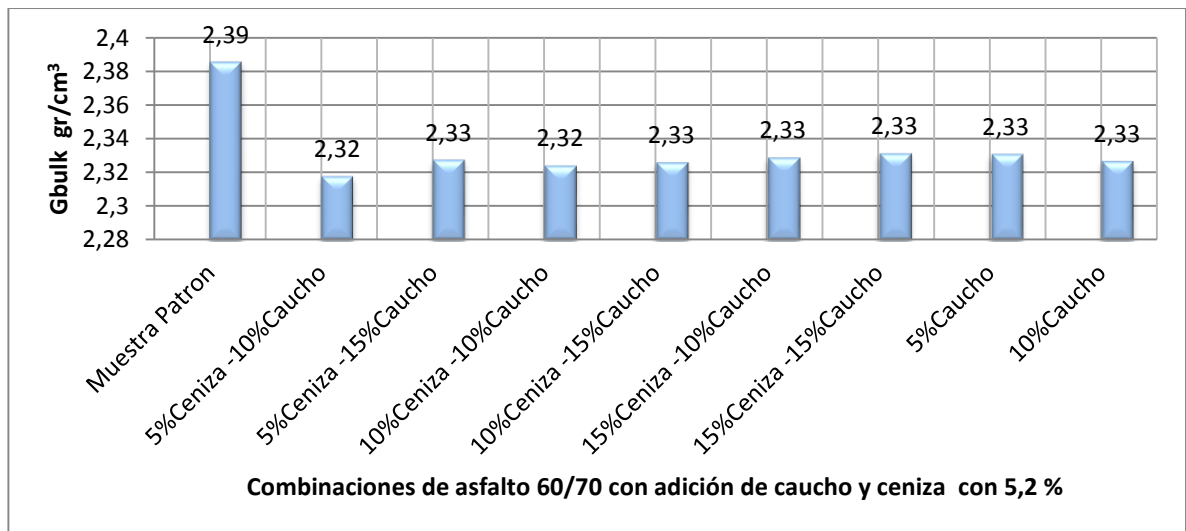
El flujo disminuyó al incrementar los valores tanto de ceniza y caucho; cabe resaltar que el comportamiento en la muestra patrón fue de 7,8 in y el espécimen con 10% de caucho arrojó un 5,8 in en su flujo. Mientras más alto sea el porcentaje de ceniza y caucho la tendencia es las muestras es a disminuir su flujo. En la figura 9 se representan los nuevos flujos y su comportamiento.

Figura 10. 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 10, 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 11. 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 12. Peso unitario vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%

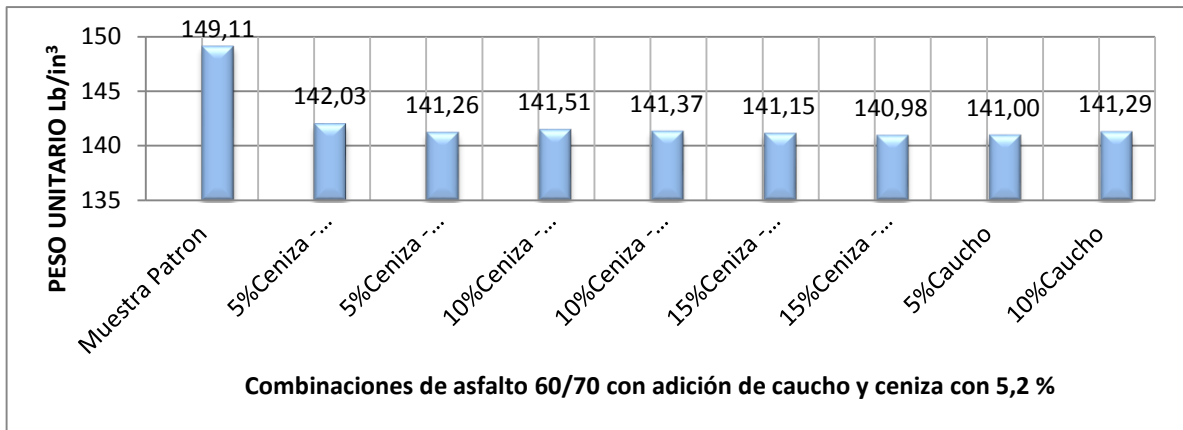
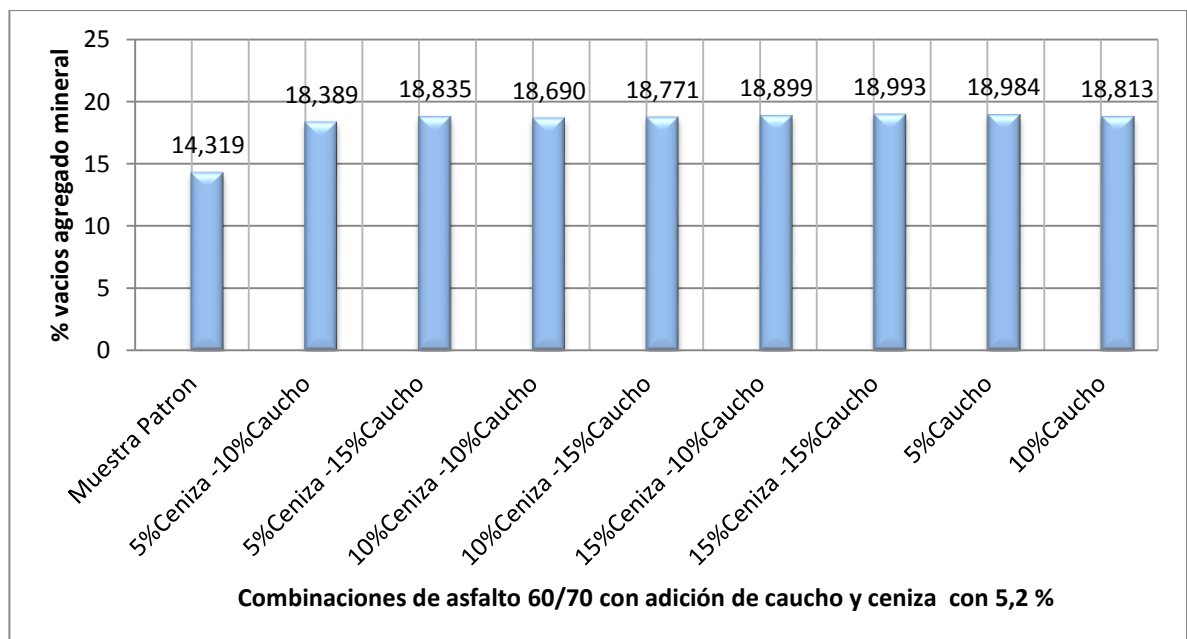


Figura 13. Vacíos agregado mineral vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



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 14. % 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.

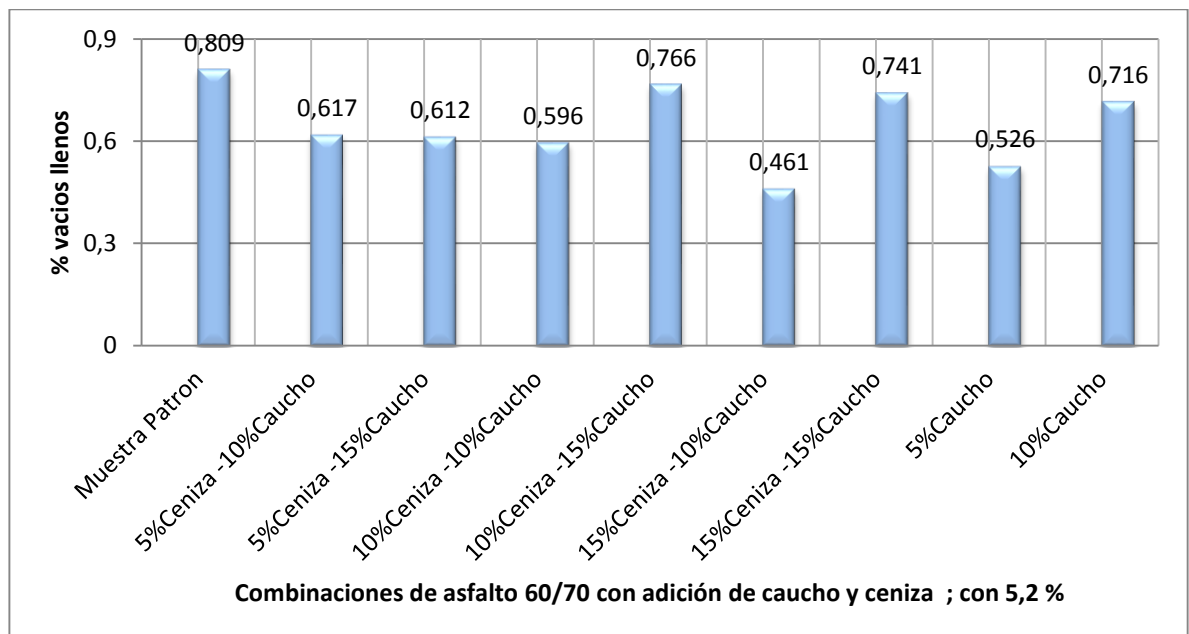
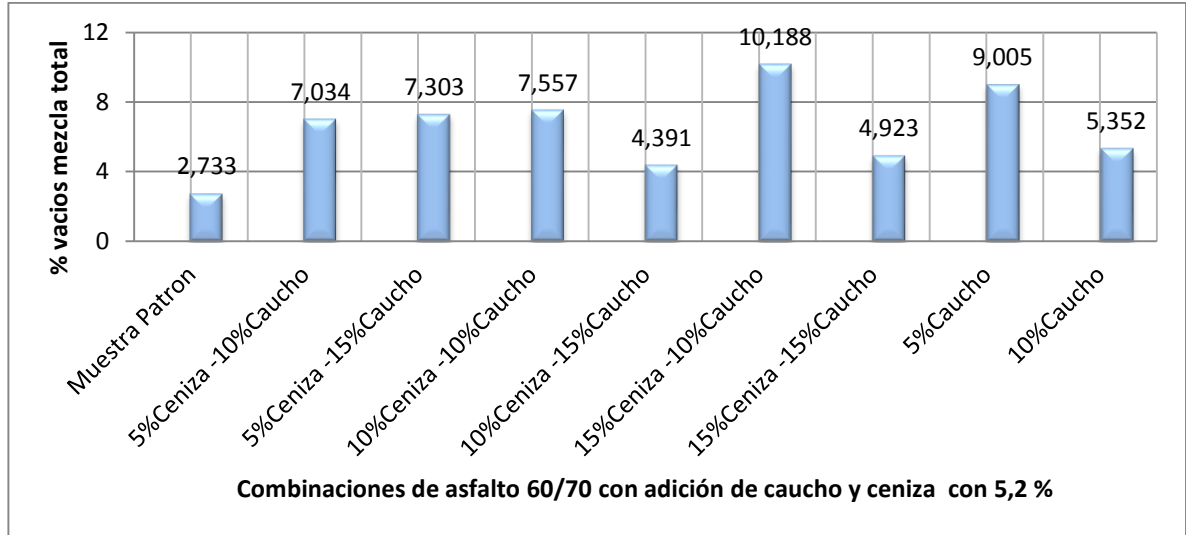
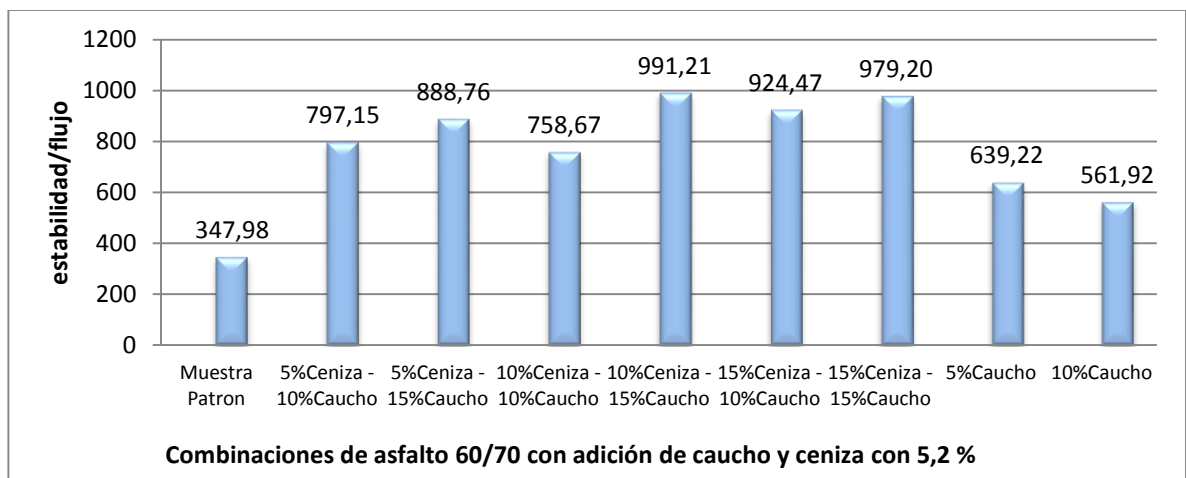


Figura 15. Porcentaje de vacíos mezcla total vs Combinaciones de asfalto con adición de ceniza y caucho, con un porcentaje del 5,2%.



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



5.5 IDENTIFICACION MEJOR MEZCLA MODIFICADA

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 15. 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 16. 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 |

5.6 SUMINISTRO DE CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO. ART.413-13

El cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado es un ligante hidrcarbonado resultante de la mezcla de cemento asfáltico, grano de caucho reciclado (GCR) y, eventualmente, otros aditivos que se requieren para utilizar el ligante en trabajos de pavimentación. El GCR corresponde a partículas de caucho obtenidas del reciclaje de llantas (vulcanizado),

El grano de caucho reciclado debe presentar las siguientes características que se mencionan en la *Tabla 17. Características del grano de caucho reciclado*, con relación a la gradación del material los márgenes se estipulan en la *Tabla 18. Distribución de tamaños del grano de caucho reciclado GCR*.

Tabla 17. Características del grano de caucho reciclado.

| Características | requisitos |
|---|--|
| Humedad | -máximo 0,75% de la masa tota de la mezcla. - el GCR debe fluir libremente. |
| Gravedad especifica | 1,15+- 0,05 |
| Contenido de metales no ferrosos | No debe haber presencia visible |
| Contenido de metales ferrosos, en masa | Máximo 0,01% |
| Contenido de fibra en masa, en masa: -para mezclas en caliente -para riego | Máximo 0,5% Máximo 0,1% |
| Contenido de polvo mineral (como talco): se suele usar para prevenir que los gramos se peguen | Máximo 4% |
| Contenido total de otros elementos extraños, en masa ; incluye: -vidrio -arena -madera, etc. | Máxima 0,25% |

Tabla 18. Distribución de tamaños del grano de caucho reciclado GCR.

| Tipo de gradación | Tamiz (mm /U.S Standard) | | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | 2,38 | 2,00 | 1,19 | 0,59 | 0,30 | 0,075 |
| | No.8 | No.10 | No.16 | No.30 | No.50 | No.200 |
| | % PASA | | | | | |
| Tipo A | 100 | 95-100 | 0-10 | - | - | - |
| Tipo B | - | 100 | 65-100 | 20-100 | 0-45 | 0-5 |

Durante el proceso de fabricación a escala industrial del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado, el constructor deberá combinar los materiales de acuerdo con el diseño del ligante aprobado por el interventor. En el proceso de mezclado del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado se deberá integrar a temperaturas elevadas y con suficiente agitación para promover la interacción física del asfalto con los componentes de caucho.

La temperatura del asfalto se deberá encontrar entre 180 y 200°C en el momento de añadir el grano de caucho. No se permitirá aglomeraciones de partículas de caucho de tamaño mayor a 5 cm dentro de la cámara de mezclado.

Según lo establecido en el Art.413-13 de las especificaciones del INVIAS, las cantidades de asfalto y caucho deberán ser dosificadas de manera precisa, de acuerdo con el diseño del ligante. El constructor deberá documentar el proceso de fabricación, incluyendo los resultados de la verificación de la uniformidad de la mezcla. El constructor deberá demostrar que los granos de caucho han sido adecuadamente mezclados de tal manera que se encuentren empapados de asfalto. Serán manifestaciones de un mezclado insuficiente la presencia de granos de caucho flotando en la superficie o aglomeraciones de partículas de caucho en la mezcla.

La temperatura del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado inmediatamente después de su elaboración deberá encontrar entre 160 y 190°C. Se deberá mantener esta temperatura por una (1) hora antes de su uso.

Tabla 19. Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado.

| PROPIEDADES | NORMA DE ENSAYO | | | | | | |
|--|---|--------|-----|---------|-----|----------|-----|
| | | TIPO I | | TIPO II | | TIPO III | |
| Viscosidad aparente a 175°C (Pa.s) | ASTM D-2196 método A modificado según ASTM D-6114 | 1,5 | 5,0 | 1,5 | 5,0 | 1,5 | 5,0 |
| Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10mm) | INV E-706 | 25 | 75 | 25 | 75 | 50 | 100 |
| Penetración a 4°C, 200g, 60s (1/10mm) | INV E-706 | 10 | - | 15 | - | 25 | - |
| Punto de ablandamiento (°C) | INV E-712 | 57 | - | 54 | - | 52 | - |
| Resiliencia 25°C | ASTM D-5329 | 25 | - | 20 | - | 10 | - |
| Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland (°C) | INV E-709 | 230 | - | 230 | - | 230 | - |
| Acondicionamiento en prueba de película delgada | INV E-720 | | | | | | |
| Penetración del residuo luego del acondicionamiento en prueba de película delgada , % de la penetración original | INV E-706 | 75 | - | 75 | - | 75 | - |

Después de su elaboración, el ligante se debe agitar entre los periodos de uso para prevenir el asentamiento de las partículas de caucho. Durante el periodo de la mezcla asfáltica, la temperatura del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado se deberá mantener entre 160 y 190°C. Sin embargo, en ningún caso se deberá mantener esa temperatura por un periodo superior a 10 horas. Si el ligante no se usa dentro de las 10 horas siguientes a su fabricación, se deberá permitir que se enfríe gradualmente. Antes de su uso, se deberá calentar de nuevo a una temperatura entre 160 y 190°C, este proceso de enfriamiento y recalentamiento no se permitirá más de una vez. El cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado no se podrá mantener a temperaturas superiores a 120°C por más de 4 días.

5.7 COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ENTRE LAS MEZCLAS MODIFICADAS CON CAUCHO-CENIZA Y LAS MEZCLAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS

Asfaltos modificados con polímeros

Relacionando la información de campo y de las especificaciones **INVIAS 2013**, se enfatiza en la modificación de asfaltos favorece al comportamiento en mejora de la tolerancia a esfuerzos y a los variables cambios térmicos con relación al balance del comportamiento en los rangos de temperaturas de aplicación de servicio.

Los beneficios que buscan están directamente relacionado con la implementación de combinación entre los elastómeros termoplásticos conocidos como los **SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)** del cual tiene un comportamiento elástico en altas temperaturas de servicio, de un comportamiento similar a los GCR; con valores de estireno que oscilan entre el 20 y 30 % generando que su punto de fusión del

polímero esté por encima siendo necesario efectuar agitación durante el proceso de mezclado en planta.

Dentro de la rama de los elastómeros encontramos el SB (estireno-butadieno) representante similar al del SBS en el comportamiento mecánico al interactuar con el cemento asfáltico, pero con un comportamiento reológico diferente debido a su macro estructura de estos polímeros no es igual al reticulado físico que genera los polímeros SBS, el cual se alcanza adicionando químicos después de la adición del polímero al ligante asfáltico con compuestos basado en azufre.

Los datos que se encontraron relacionando la información de los efectos de los SBS sobre las propiedades del asfalto se destaca la disminución de la penetración, aumento en los puntos de ablandamiento, aumento sustancial en la ductilidad a 5°C , brinda incremento notables de tenacidad y genera de manera significativa la recuperación elástica. Los elastómeros SBS que comercialmente son los más usados en la modificación de mezclas asfálticas mejoran sustancialmente la resistencia a la deformación, a la microfisuración por temperatura y a la fatiga; es un polímero favorable en la adhesión con los agregados y es crucial ante el envejecimiento del material asfáltico.

Por otro lado, los plastómeros termoplásticos están basados en polímeros Etil-Vinil-Acetato (EVA), siendo el más adecuado en cuanto a la modificación de ligantes asfálticos se menciona, debido que presenta un contenido de acetato de vinilo comprendido entre 18 y 33%; produciendo efectos sobre las propiedades del asfalto disminuyendo la penetración, aumento el punto de ablandamiento, un efecto sobre la ductilidad a 5°C es decir poca capacidad de deformación en la rotura a baja temperatura y mejoran la resistencia a la deformación permanente.

Retomando las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2013 del INVIAS, en el capítulo cuarto- pavimentos asfálticos se asocia los cementos

asfálticos modificados con polímeros en el Artículo 414-13, los ensayos que se presentan para cada uno de los tipos y los márgenes de resultados para cada muestra dadas en la tabla 414-1. Especificaciones del asfalto modificado con polímeros.

Los ligantes modificados con polímeros presentan un variedad de porciones de elastómeros, plastómeros y termoendurecibles, de la cual para su fabricación consiste en la incorporación directamente al asfalto empleando un molino coloidal de elevado poder de cizallamiento, durante tiempo y a una temperatura determinado, los ingenieros químicos del laboratorio desarrollan una serie de muestras dependiendo de la naturaleza y del contenido de cada uno de los componentes.

En el numeral 414.2.2 designación y especificaciones del artículo 414-13 de instituto nacional de vías, especificaciones generales de construcción de carreteras se presentan los tipos de asfaltos modificados con polímeros: Tipo I, es un asfalto de utilización en aglomerado asfáltico, y dentro de éste, su mayor aplicación son las mezclas drenantes. Está pensado para el uso de un polímero tipo EVA o polietileno. Tipo II, también para aglomerado asfáltico, de cualquier tipo; el polímero sería de tipo SBS y con grado de modificación intermedia, suficiente para muchas aplicaciones entre ellas los gresajes con un precio menor al de Tipo III. Tipo III, dentro del tipo para utilizar en aglomerados asfálticos, éste sería el de mayor modificación siendo su aplicación principal las mezclas densas y las mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura, el polímero es del tipo SBS. Tipo IV, de mayor penetración se aplicará antifisuras (tipo arena-asfalto) o riegos en caliente, el polímero es también SBS, el cual garantiza la alta elasticidad exigida a los ligantes en estos tratamientos; por este el nivel de modificación es elevado. Tipo V de alta consistencia es el de mayor importancia para las mezclas de alto modulo.

Análisis de los GCR-ceniza cómo modificante del asfalto.

Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con GCR es el aumento en la viscosidad de la mezcla resultante; esto hace que la mezcla asfalto-caucho-ceniza sea más flexible a bajas temperaturas mientras que a altas temperaturas logra que sea menos plástica. Entre los principales beneficios logrados en los pavimentos se encuentran las mejoras en la deformación permanente, y resistencia al fisuramiento bajas temperaturas producidas por el agua.

En la actualidad el caucho molido se ha convertido en un recurso valioso y económico en la fabricación de mezclas asfálticas y debido al creciente desecho de llantas, podemos reconocer algunas ventajas vistas durante la investigación: el gramo de caucho reciclado posee componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto; el caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento debido que al ser calentado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos , generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento. Al modificar el ligante con los GCR la mezcla resultante experimenta un incremento en la viscosidad haciéndola no apta para ser usada en ciertas aplicaciones que requieran que este sea buen fluido, este se puede solucionar usando kerosén.

6. CONCLUSIONES

6.1 GENERALES

- El grano de caucho reciclado obtenido de llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un modificador del ligante.
- Entre menor sea el tamaño máximo del grano caucho reciclado que se utilice para mejorar las mezclas asfálticas o modificar el ligante serán mejores los resultados obtenidos, esto por el hecho que facilita la homogenización de la mezcla.
- Si el porcentaje de caucho es superior al 15%, la mezcla va tener una recuperación lenta.
- El grano de caucho reciclado utilizado para el proceso húmedo mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, sin embargo hace que los módulos dinámicos disminuyan.
- Los ligantes asfálticos modificados con polímeros son un coctel de mezclas en diferentes proporciones con elastómeros, plastómeros y termoendurecedores, del cual su elaboración se basa en las especificaciones de la tabla 4.1.4-1 del artículo 414 y del criterio de experiencia del diseñador en mezclas, estas mezclas se desarrollan dependiendo del cliente y de su utilidad.

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.
- ARIZA M, J. y GARNICA , J. Evaluación de una mezcla densa en caliente modificada con la adición de cenizas volantes y caucho, tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, 2014.
- 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. 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 2. 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 3. 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 | 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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4*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 | 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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4*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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4*g | 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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4*g | 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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4g | 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 | $100 - \frac{100g}{h}$ | $\frac{i}{i+m}$ | 62.4g | 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 4. GRANULOMETRIA CAUCHO

