PAVIMENTOS ECOLÓGICOS: MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2) MODIFICADA CON DESECHOS PLÁSTICOS

KARINA DE JESÚS BENAVIDES BURGOS

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.

2014

PAVIMENTOS ECOLÓGICOS: MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC-2) MODIFICADA CON DESECHOS PLÁSTICOS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GEOTECNIA Y MATERIALES

(GEOMAT)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: MATERIALES

INVESTIGADOR

KARINA DE JESÚS BENAVIDES BURGOS

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

MODESTO BARRIOS FONTALVO

INGENIERÍA CIVIL, Esp. Geotecnia y Gerencia de Proyectos

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Jurado

Esp., Hèctor Raùl Sànchez Zapardiel

_____

Firma del Jurado

MSc., Guilliam Rafael Barboza Miranda

Cartagena de Indias D. T. y C., _____ de _____ 2014

Benavides B., K.

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

"Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia"

Proverbios 2:6

Primeramente le doy gracias a Dios por darme las fuerzas necesarias para culminar satisfactoriamente mis estudios profesionales, por abrir las puertas para que esta investigación se desarrollara a plenitud y por motivarme a cada día ser mejor para ser un apoyo tanto para mi familia como un ente útil a la sociedad. También agradezco a mis padres *Luis Vargas y Zoila Burgos* por confiar en este sueño que inicio hace cinco años y que muestra sus frutos; Gracias a mi amado *Javier Polo* por ser un gran apoyo en el desarrollo de mi formación profesional, por luchar cada día a mi lado y dar lo mejor de sí. Agradezco además a la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLOS VÍAS S.A.S por abrir las puertas de sus laboratorios para el desarrollo de este Trabajo, por el apoyo incondicional de su cuerpo Profesional y Técnico; Gracias al *Ing. Orlando Castellón* por su dedicación a esta investigación, al *Sr Julio Gil* quien con su calidad humana y sus conocimientos contribuyo a mi formación, a *Cristian Salgado* por su paciencia y empeño para que esta investigación llegará a un feliz término. De igual manera agradecer al docente *Javier Mouthon* por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones. Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Benavides B., K.

CONTENIDO

RESUMEN ... 16
ABSTRACT ... 18
INTRODUCCIÓN ... 20
1. MARCO DE REFERENCIA ... 24
1.1. MARCO TEÓRICO ... 24
1.1.1. Pavimento ... 24
1.1.2. Pavimentos Ecológicos ... 27
1.1.3. Mezcla asfáltica ... 30
1.1.4. Factores de composición que influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas ... 32
1.1.5. Métodos de diseño de mezclas asfálticas ... 33
1.1.6. Asfaltos Modificados ... 35
1.1.7. Ensayo Método Marshall ... 35
1.1.8. Estabilidad ... 37
1.1.9. Flujo ... 37
1.1.10. Módulo de Elasticidad o de Rigidez ... 38
1.1.11. Métodos de diseño de pavimento flexible ... 38
1.1.12. Desechos Sólidos ... 40
1.1.13. Residuo Sólido ... 40
1.1.14. Plásticos ... 41
1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE ... 44
1.3. ESTADO DEL ARTE ... 52
1.4. MARCO LEGAL ... 60
2. OBJETIVOS ... 62
2.1. OBJETIVO GENERAL ... 62
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ... 62
3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN ... 63
4. METODOLOGÍA ... 69

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA DE ANTECEDENTES Y ESTADO DE ARTE ... 70
4.2. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA ... 74
4.3. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ... 75
4.3.1. Selección de Agregados pétreos y llenante mineral ... 75
4.3.2. Selección del cemento asfaltico ... 78
4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PETREOS Y LLENANTE MINERAL ... 79
4.5. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO ... 82
4.6. DISEÑO Y ENSAYOS SOBRE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ... 83
4.6.1. Determinación del Porcentaje óptimo de plástico ... 86
4.7. DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE ... 89
4.8. EVALUACIÓN TECNICA, ECONOMICA Y MEDIO AMBIENTAL ... 89
5. RESULTADOS ... 91
5.1. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA EN LA REVISIÓN BIBLIOGRAFICA ... 91
5.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS ... 93
5.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO ... 99
5.4. DOSIFICACIÓN ANALITICA ... 100
5.5. RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ... 101
5.5.1. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de PET ... 104
5.5.2. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de PEAD ... 107
5.5.3. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de ambos residuos en diferentes proporciones ... 110
5.6. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE RESIDUO PLASTICO ... 113
5.7. DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE ... 114
5.8. EVALUACIÓN ECONOMICA ... 122
5.8.1. Evaluación Económica Muestra Testigo ... 122
5.8.2. Evaluación Económica Muestra modificada con PEAD ... 124
5.9. EVALUACIÓN MEDIO-AMBIENTAL ... 125

6. CONCLUSIONES 127
7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES 130
7.1. LIMITACIONES 130
7.2. RECOMENDACIONES 131
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 132
9. ANEXOS 144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Sección típica de un pavimento. 24

Figura 2. Clasificación de los pavimentos. 26

Figura 3. Impresión de mezcla asfáltica modificada con desechos plásticos en algunas calles de Vancouver. 58

Figura 4. Ubicación de la zona de estudio. 63

Figura 5. Ubicación de los laboratorios donde se realizarán los ensayos. 64

Figura 6. Criterios para la Revisión Bibliografica de Antecedentes y Estado de Arte de la incorporación de Residuos Sólidos urbanos como modificador de la mezcla asfáltica. 71

Figura 7. Criterios para el análisis de la información y datos de las normas INVIAS aplicado durante el desarrollo de la investigación. 72

Figura 8. Diagrama de Flujo de las actividades desarrolladas. 73

Figura 9. Planta Torcoroma de la cual fueron tomados los agregados pétreos. 74

Figura 10. *(a)* Recolección de Residuos Plásticos (PEAD y PET), *(b)* Triturado Mecánico de residuos plásticos de HDE, *(c)* Tamizado de residuos de plástico de PEAD, *(d)* Triturado Mecánico de residuos plásticos de PET, *(e)* Pasa Tamiz No.4 de residuos de plástico de PEAD, *(f)* Tamaño final de las partículas de residuos sólidos empleadas en los ensayos. 75

Figura 11. Triturado Rotinet; *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material 76

Figura 12. Arena de San Juan, *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material 77

Figura 13. Arena Agracar, *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material 77

Figura 14. Arena Palmarito, *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material 77

Figura 15. Arena Palmarito, Arena Palmarito, *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material 78

Figura 16. *a)* Calentamiento de los agregados pétreos y llenante mineral, *(b)* Calentamiento de cemento asfaltico en horno, *(c)* Pesaje de los materiales, *(d)* Incorporación de los

modificadores y cemento asfaltico, *(e)* Mezclado de materiales realizado por investigador, *(f)* Mezclado de materiales realizado por laboratorista de la Planta, *(g)* Compactación realizado por el auxiliar de laboratorio de la Planta, *(h)* Compactación realizado por investigador, *h)* Mezcla compactada en los moldes. 85

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Clasificación de las mezclas asfálticas. 31

Grafica 2. Estructura del Proyecto POLYMIX. 56

Grafica 3. Aditivos utilizados en las investigaciones desarrolladas en Colombia. 59

Grafica 4. Año de Investigación Vs. Volumen. 59

Grafica 5. Ensayos Marshall iniciales para observar el comportamiento de la mezcla al incorporar PET. 87

Grafica 6. Ensayos Marshall iniciales para observar el comportamiento de la mezcla al incorporar PEAD. 87

Grafica 7. Curva Granulometrica Triturada Cantera Rotinet. 93

Grafica 8. Curva Granulometrica Arena San Juan. 94

Grafica 9. Curva Granulometrica Arena Zarandeada de Palmarito 95

Grafica 10. Curva Granulometrica Arena Palmarito lavada. 96

Grafica 11. Curva Granulometrica Polvillo de Campusano 97

Grafica 12. Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PET. 105

Grafica 13. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PET. 105

Grafica 14. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PET. 106

Grafica 15. Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PEAD. 108

Grafica 16. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PEAD. 108

Grafica 17. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PEAD. 109

Grafica 18. . Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET. 111

Grafica 19. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET. 112

Grafica 20. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET. 112

Grafica 21. Variación de coeficiente estructural a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular 116

Grafica 22. Variación de coeficiente estructural a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular 117

Grafica 23. Grafica de diseño para pavimento flexible basada en valores promedio de los diferentes datos de entrada. 118

Grafica 24. Coeficiente estructural a_1 a partir de la estabilidad. 119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas. 31
Tabla 2. Requisitos de propiedades de origen del agregado. 34
Tabla 3. Requisitos de propiedades de consenso del agregado. 35
Tabla 4. Clasificación de los residuos de acuerdo a su naturaleza y a su peligrosidad. 41
Tabla 5. Clasificación de los polímeros. 42
Tabla 6. Código de Plásticos. 43
Tabla 7. Cronología de los principales sucesos y conferencias internacionales relacionadas con la conciencia ecológica de la población. 45
Tabla 8. Especificaciones del Cemento Asfáltico. 66
Tabla 9. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos y mezclas bituminosas. 67
Tabla 10. Diseño de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo. 68
Tabla 11. Criterios para selección cemento asfaltico de acuerdo a la temperatura de la región. 78
Tabla 12. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para caracterizar los agregados pétreos. 79
Tabla 13. Porcentaje y equivalente en peso de los materiales empleados. 84
Tabla 14. Número de ensayos realizados por cada tipo de residuo. 88
Tabla 15. Modelo para el Análisis de Precios Unitarios 90
Tabla 16. Artículos científicos de bases de datos tomados como referencia acerca del uso de residuos plásticos en mezclas asfálticas. 91
Tabla 17. Granulometría Triturada Cantera Rotinet. 93
Tabla 18. Granulometría Arena de San Juan. 94
Tabla 19. Granulometría Arena Zarandeada de Palmarito 95
Tabla 20. Granulometría Arena Palmarito lavada. 96
Tabla 21. Granulometría Polvillo de Campusano 97
Tabla 22. Módulo de Finura. 98
Tabla 23. Análisis de Granulometría de Agregados pétreos. 98
Tabla 24. Resultado de caracterización del cemento asfaltico. 100

Tabla 25. Resultados útiles para la Dosificación Analítica. 101
Tabla 26. Criterios de diseño de la Mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall. 102
Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos para la muestra patrón. 103
Tabla 28. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo un porcentaje de PET. 104
Tabla 29. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PET. 104
Tabla 30. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo un porcentaje de PEAD. 107
Tabla 31. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PEAD. 107
Tabla 32. Porcentaje y equivalente en peso de los materiales empleados. 110
Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo ambos tipos de plástico PEAD-PET. 111
Tabla 34. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PEAD-PET. 111
Tabla 35. Resumen de los resultados obtenidos por la incorporación individual y combinada de los residuos. 113
Tabla 36. Resumen de diseño definitivo mediante el uso de modificador. 114
Tabla 37. Datos para el diseño de pavimento flexible. 114
Tabla 38. Diseño definitivo para muestra testigo. 120
Tabla 39. Diseño definitivo para muestra con 0.5% de PEAD. 121
Tabla 40. Reducción en el volumen de mezcla asfáltica de acuerdo con los datos dados. 121
Tabla 41. Análisis de Precios Unitarios aplicable a la muestra patrón. 122
Tabla 42. Análisis de Precios Unitarios aplicable a la muestra patrón. 124
Tabla 43. Reducción en los costos de mezcla asfáltica de acuerdo con los datos dados. 125

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Carta de Patrocinio por parte de la CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S. 144

Anexo 2. Certificado ISO 9001 de 2008 vigente con el que cuenta la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLO VIA S.A.S 145

Anexo 3. Resumen de Diseño Marshall establecido en la Planta Torcoroma. 146

Anexo 4. Gradación Mezcla MDC-2. 147

Anexo 5. Análisis Granulométrico por tamizado a Triturado pasa ¾". 148

Anexo 6. Análisis Granulométrico por tamizado a Triturado pasa ½". 149

Anexo 7. Análisis Granulometrico para Arena Zarandeada de Palmarito. 150

Anexo 8. Análisis Granulometrico para Arena Palmarito Lavado 151

Anexo 9. Análisis Granulometrico para llenante mineral 152

Anexo 10. Informe general de Caracterización de Agregados y Cemento Asfáltico Convencional. 153

Anexo 11. Peso específico y Absorción de agregados finos y gruesos. 154

Anexo 12. Desgaste en la Máquina de los Ángeles. 155

Anexo 13. Porcentaje de Caras Fracturadas. 156

Anexo 14. Equivalente de arena para las muestras seleccionadas. 157

Anexo 15. Índice de Aplanamiento de los agregados pétreos. 158

Anexo 16. Índice de alargamiento de los agregados pétreos. 159

Anexo 17. Contenido aproximado de materia orgánica en arenas, INV 212 160

Anexo 18. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones De sulfato de sodio o de magnesio en agregados gruesos 161

Anexo 19. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones De sulfato de sodio o de magnesio en agregados finos. 162

Anexo 20. Cubrimiento de los agregados con materiales asfalticos en presencia del agua (Stripping) 163

Anexo 21. Peso específico máximo teórico de la mezcla asfáltica (Rice) 164

Anexo 22. Inmersión Compresión, INV 738 165

Anexo 23. Diseño Marshall. 166

Anexo 24. Graficas Diseño Marshall. 167

Anexo 25. Dosificación analítica. 168

Anexo 26. Grafica de Gradación 169

Anexo 27. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para caracterizar el asfalto. 170

Anexo 28. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio sobre el asfalto realizados por ECOPETROL. 171

Anexo 29. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para sobre las mezclas asfálticas. 172

Anexo 30. Datos experimentales obtenidos. 173

RESUMEN

Ante la necesidad de mejorar las condiciones actuales de las redes viales a nivel nacional e internacional, se han desarrollado nuevas tecnologías que permitan incrementar la durabilidad y que adicionalmente sean económicamente factibles; asimismo el abismal crecimiento de las urbes, la inadecuada gestión de residuos, los cambios en el estilo de vida de la población y el limitado alcance de los distintos sistemas de gestión para hacer frente a la hiperproducción, ha generado un aumento indiscriminado de los residuos sólidos, y por consiguiente grandes problemas de salubridad y de tipo medio-ambiental.

Por consiguiente, el presente estudio analizó las ventajas y desventajas de la incorporación de parte de los residuos sólidos – en este caso de tipo plástico - que se desechan indiscriminadamente sin haber culminado o terminado su vida útil, en mezclas asfálticas densas en caliente tipo 2 (MDC-2), por medio del desarrollo de ensayos de laboratorio para determinar la incidencia de los polímeros desechaos sobre las propiedades físico-mecánicas de la mezcla bituminosa.

Para el análisis de la información se emplearon los procedimientos para caracterización de agregados pétreos y llenante mineral, elaboración de mezclas asfálticas, medida de estabilidad y flujo.

Entre los residuos utilizados como modificadores se encuentra el Tereftalato de polietileno (PET) y el Polietileno de Alta Densidad (PEAD); se evaluó la incidencia de manera individual y en conjunto, destacándose el PEAD como mejorador de la mezcla, aumentando la Estabilidad de la misma en un 23.3% con un porcentaje con relación al peso total de la mezcla equivalente al 0.5%.

Se realizaron análisis Técnicos, Económicos y Medio-ambientales basados en datos teóricos; se observó que al implementar esta alternativa en un kilómetro de vía se evidencia una reducción del 20% en el volumen de la carpeta asfáltica, un ahorro monetario del 21.2% con relación a la elaboración de la mezcla convencional y por cada kilómetro de vía salen de circulación aproximadamente 9.6 ton de residuos de este tipo.

Benavides B., K.

Por tanto a partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la implementación de este tipo de alternativas en la construcción, mantenimiento y reparación de la red vial departamental y nacional, generan no solo una reducción de los niveles de contaminación ambiental, sino a su vez se convierten en una opción eficiente y factible en Proyectos de infraestructura vial.

Palabras Claves: estructuras de pavimento, pavimento flexible, pavimento ecológico, residuo, estabilidad, flujo, mezcla asfáltica, asfalto.

ABSTRACT

Faced with the need to improve the current conditions of road networks in the national and international level, have developed new technologies to increase the durability and that additionally are economically feasible; Also the abysmal growth of the cities, inadequate waste management, the changes in the lifestyle of the population and the limited scope of the different management systems to cope with the hyperproduction, has generated an indiscriminate increase of solid waste, and therefore large problems of sanitation and type of environmental.

Therefore, the present study analyzed the advantages and disadvantages of the incorporation of part of the solid waste - in this case a plastic type - that are discarded indiscriminately without having completed or finished its useful life, in asphalt mixes hot thick type 2 (MDC-2), through the development of laboratory tests to determine the incidence of the polymers discarded on the physical-mechanical properties of the bituminous mixture.

Therefore, the present study analyzed the advantages and disadvantages of the incorporation of part of the solid waste - in this case a plastic type - that are discarded indiscriminately without having completed or finished its useful life, in asphalt mixes hot thick type 2 (MDC-2), through the development of laboratory tests to determine the incidence of the polymers discarded on the physical-mechanical properties of the bituminous mixture.

For the analysis of the information procedures were used for the characterization of aggregates and stone mineral binder, development of asphalt mixes, measure of stability and flow.

Analyzes were carried out technical, economic and environmental data-based theoretical; it was noted that when you implement this alternative in a kilometer of track is evidence a 20% reduction in the volume of the asphalt folder, a monetary savings of 21.2 % with

regard to the drafting of the conventional mixture and per kilometer of track out of circulation approximately 9.6 ton of this type of waste.

Therefore based on the results obtained, it can be concluded that the implementation of this type of alternative in the construction, maintenance and repair of the road network and national departmental, generate not only a reduction in the levels of environmental pollution, but in turn, becomes a efficient and feasible option in road infrastructure projects.

Key Words: structures of pavement, flexible pavement, pavement ecological, residue, stability, flow, mix asphalt, asphalt.

INTRODUCCIÓN

Un factor determinante en el desarrollo económico de una nación, es el transporte, el cual depende intrínsecamente de la infraestructura que exista para el desarrollo del mismo; éstos a su vez, deben ser más seguros, limpios y accesibles, especialmente en países en desarrollo. . (Grupo del Banco Mundial, 2013). El rápido crecimiento de las ciudades y los sistemas motorizados, exigen políticas de desarrollo que busquen implementar, ampliar y modernizar la infraestructura básica, de acuerdo con los estándares y tecnologías internacionales, con el objeto de lograr una cobertura máxima del territorio, niveles de servicibilidad altos, desarrollo de actividades comerciales, y un equilibrio con el medio ambiental. (Osequeda, 2013)

En décadas pasadas, era común idealizar los recursos de la biosfera como ilimitados, y que la naturaleza se encontraba en un constante proceso regenerativo para solventar las necesidades de la población; hoy en día, es evidente que dicha apreciación es errónea, lo cual ha suscitado la concientización mundial. (Fondo Social Europeo. *et al.*, 2006)

La problemática medio-ambiental producto de la indiscriminada explotación de los recursos naturales, el acelerado crecimiento de la población y la concepción de nuevas técnicas y tecnologías orientadas a la satisfacción de las necesidades de consumo – que en su mayoría resultan ser innecesarias –, ha influido fuertemente en la generación de residuos sólidos, y por ende, graves problemas ecológicos y de sanidad. (Fondo Social Europeo. *et al.*, 2006)

A lo largo de la historia, se ha observado el gran interés de las naciones por resolver o mitigar los efectos de dicha problemática sobre el planeta y la población en general. Por tal razón, desde la década de los 60 el concepto de "Problema ambiental" se convirtió en un componente importante en la agenda mundial, celebrando así la primera conferencia de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente (Estocolmo), la cual se convertiría en el inicio de un sin número eventos y/o sucesos cronológicos encaminados a la normalización de ideales cuya fuese de carácter internacional. (Universidad de Medellín (UDEM), 2008)

Como corolario de lo anterior, se han ideado políticas en pro de la gestión adecuada de los desechos sólidos – generalmente no biodegradables – no solo a nivel urbano sino a nivel rural; entre las políticas que actualmente se están aplicando se encuentra la "Teoría de las 4-R", la cual busca una caracterización adecuada del manejo ambiental de forma correcta, siguiendo los conceptos de reducción, reutilización, reciclaje, y recuperación de los residuos que muchas veces son desechados antes de culminar su vida útil. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2013)

Es así como se desarrolló la idea de incorporar desperdicios plásticos de degradación lenta en las mezclas asfálticas, con el fin de reducir los costos de producción de asfaltos modificados con agentes químicos industrializados y los gastos constructivos de una infraestructura vial; entre los materiales modificadores usados a nivel mundial se encuentran hule molido de neumáticos usados, látex sintéticos y natural, polímeros SBR y SBS, asfalteno natural, fibras cortas y escorias de fundición, cal hidratada y azufre, modificadores calíticos; PET (Wan Abdul & Abdul, 2013); PEBD (V.S.Puninth & Veeraragavan, 2007); residuos de vidrio y escoria de aceros (Huang. *et al.*, 2007); entre otros, los cuales han producido en la mezcla un mejoramiento de sus propiedades mecanicas y reologicas. (Figueroa & Reyes, 2006)

De acuerdo con los desperdicios de tipo polimérico que más se producen en las urbes, se han desarrollado propuestas que incluyan la adición de estos desechos en la estructura de pavimento flexible, aplicándose por primera vez sobre carreteables en Vancouver, Canadá, obteniendo resultados favorables en los costos de construcción y en las emisiones de gases por la reducción de la temperatura de mezclado del asfalto. (Lofgren, 2012)

Teniendo en cuenta las condiciones actuales del planeta, donde se agravan cada día más los problemas de tipo energético y ambiental a los que el ingeniero civil debe hacer frente, además del aumento de las cargas por eje, la modernización del parque automotor, el incremento en los costos de los productos derivados del petróleo y la materia prima empleada para la construcción de carreteras y las políticas de Infraestructura Sostenible y

medio ambiente, ha hecho desarrollar técnicas orientadas a mejorar, reciclar y sofisticar los sistemas y metodologías actuales para el diseño de las vías del mundo. (Reyes, 2008)

Empero, a pesar del gran auge a nivel mundial de estas nuevas tecnologías, en Colombia solo se han presentado algunas investigaciones, resaltando la realizada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) con incorporaciones de caucho por vía seca y húmeda. (Figueroa & Reyes, 2006)

Por esta razón, de acuerdo con lo anteriormente planteado, el presente trabajo de investigación pretendía complementar la investigación a nivel nacional en referencia a la utilización de estas nuevas tecnologías sobre mezclas asfálticas, planteando el uso de PET y PEAD de manera individual y conjunta, como agente modificador de la mezcla evaluando los efectos de esta alternativa sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de la misma, además de su incidencia sobre un diseño de pavimento (reducción de la capa de rodadura) y su impacto ambiental en la reducción de los desechos que actualmente se están generando en el Distrito de Cartagena; con el objeto de establecer los pro y los contras de la aplicación de esta técnica, y aportar así a la investigación de este tipo de solución en el grupo de investigación de Geotecnia y materiales (GEOMAT) del programa de Ingeniería Civil, asimismo motivar al desarrollo de proyectos de manera mancomunada con los distintos programas que componen la Facultad de Ingeniera de la Universidad de Cartagena y contribuir a la labor social y ambiental del Alma Mater.

En pro de garantizar la veracidad de los resultados obtenidos con la presente investigación, se desarrolló la investigación en los laboratorios de la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLOS VÍAS S.A.S con certificación de calidad ISO 9001; en primera instancia, se realizaron ensayos de caractización físico-mecánicas de agregados y del bitumen empleado para la producción de mezclas asfálticas, teniendo en cuenta las normas INV-E vigentes en el país. La metodología desarrollada para la obtención de esta mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2 (MDC-2) modificada, teniendo en cuenta las disposiciones generales dadas en el artículo 450-02 del INVIAS; pero la variación en la fabricación de la misma, consistió en la sustitución de parte de los agregados por un porcentaje especifico de

PET y PEAD a una temperatura de 150°C, inmediatamente antes de la incorporación de un asfalto con una penetración 60/70, mezclando hasta obtener una mezcla homogénea.

A manera de resumen, se puede concluir que la incorporación de residuos plásticos en mezclas asfálticas, ayuda a que la densidad de las mezclas se reduzca a medida que aumentaba el porcentaje de residuo plástico de cualquiera de los tipos empleados, debido a que estos funcionan como llenante de los espacios entre los agregados pétreos. De igual forma, se evidencio una disminución del flujo y un aumento en la estabilidad de la mezcla mayor al 6% y 10% con la adición de PET y PEAD, respectivamente. Asimismo al momento de mezclas estos dos tipos de plástico, se evidenció un comportamiento desfavorable en la mezcla asfáltica.

Adicionalmente, se evaluaron los beneficios Técnicos, Económicos y Ambientales de la aplicación de esta alternativa como iniciativa en pro de la construcción de vías más eficientes y amigables con el medio ambiente.

1. MARCO DE REFERENCIA

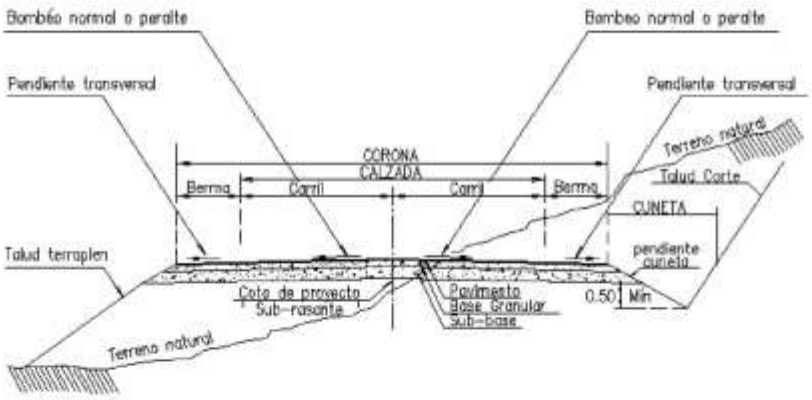
1.1. MARCO TEÓRICO

En el presente subcapítulo, se hará una descripción de los conceptos y definiciones relacionadas con las estructuras de pavimento y los nuevos agentes modificadores que el presente proyecto plantea.

1.1.1. Pavimento

Una estructura de pavimentos es un conjunto de capas superpuestas de manera relativamente horizontal, las cuales se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y debidamente compactados. Dichas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía, obtenido a partir del desarrollo de actividades de movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito, durante un periodo de tiempo bajo el cual es concebido el diseño (Figura 1). (Montejo, 2002)

Figura 1. Sección típica de un pavimento.



Fuente. Aponte, 2014

Estas estructuras deben cumplir con los siguientes requisitos, (Montejo, 2002):

- Resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito, a los agentes de intemperismo y al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos. (Montejo, 2002)
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades de diseño previstas para la circulación de los vehículos. (Montejo, 2002)
- Debe presentar una regularidad superficial transversal y longitudinalmente, que permitan una adecuada comodidad para los usuarios en función de la longitud de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación. (Montejo, 2002)
- Deber ser durable y presentar condiciones adecuadas de drenaje. (Montejo, 2002)
- El ruido rodadura en el interior así como los externos deben ser adecuadamente moderados. (Montejo, 2002)
- Debe ser económico, poseer un color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. (Montejo, 2002)

Las estructuras de pavimento pueden clasificarse en flexibles, semi-rígidos o semi-flexibles, rígidos y articulados, (Figura 2). Entre los factores que inciden en el diseño de pavimentos se destacan, (Montejo, 2002):

- *Tránsito.* Este parámetro determina el dimensionamiento de los pavimentos, las cargas pesadas por eje (simple, tándem o trídem) esperadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño adoptado. La repetición de las cargas del tránsito y la acumulación de deformaciones sobre el pavimento son fundamentales para el cálculo. Asimismo, se deben tener en cuenta las máximas presiones de contacto, las solicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración, etc.), las velocidades de operación de los vehículos, la canalización del tránsito, etc. (Montejo, 2002)

- *La subrasante.* La calidad de este, influye en el espesor que tendrá el pavimento flexible o rígido. Para evaluar esta capa se tiene en cuenta la capacidad de soporte o resistencia a

la deformación por esfuerzo cortante bajo la acción de las cargas de tránsito. (Montejo, 2002)

- *El clima.* Los factores que más afectan a la estructura de pavimento son las precipitaciones y los cambios de temperatura; el primero incide directamente sobre la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de la subrasante. El segundo puede afectar la resistencia de las capas de rodadura. (Montejo, 2002)

- *Materiales disponibles.* Incide en la selección de la estructura de pavimento más adecuada técnica y económicamente. (Montejo, 2002)

Figura 2. Clasificación de los pavimentos.

Fuente. Adaptado de Montejo, 2002.

1.1.2. Pavimentos Ecológicos

Es una estructura de Pavimento convencional amigables con el medio ambiente, ya sea contaminando menos o afectando mínimamente el entorno en el que son empleados. Se caracterizan por tener en cuenta las materias primas renovables, los procesos de fabricación con productos reciclados o naturales y el tratamiento de residuos posterior a la vida útil del material. (Construmática, 2014)

En este contexto los Pavimentos Ecológicos se clasifican de la siguiente manera:

I. Pavimentos Ecológicos por su proceso de fabricación

- *Terrizo Continuo.* Este tipo de pavimento se integra perfectamente con el medio; es ideal para parques y jardines urbanos o históricos, sendas, explanadas, aceras y aparcamientos. Se encuentra compuesto por calcín de vidrio, reactivos básicos y árido calibrado de distintos lugares; el ligante para el árido a su vez se encuentra integrado por un conglomerante que es un cemento de vidrio creado a partir del micronizado de residuos finales de estos desechos. (Construmática, 2014)

  Según su espesor, su uso puede ser peatonal o vehicular; el color de éste dependerá del árido empleado ya que no se usan colorantes. Entre las características de este pavimento se destaca, (Construmática, 2014):

  - ✓ Impermeable
  - ✓ Confiere un alto grado de resistencia para estabilizar superficies cuya pendiente sea igual o inferior al 15%
  - ✓ Evita la formación de charcos y cárcavas
  - ✓ No se forma polvo
  - ✓ No requiere mantenimiento
  - ✓ No se afecta con la salinidad marina
  - ✓ Autocicratización después de pequeñas fisuras en el pavimento por movimientos en la subbase
  - ✓ Fácil aplicación y tiempos rápidos de ejecución tanto de forma manual como mecanizada (400 m^2/días a 3000 m^2/día)

II. Pavimentos Ecológicos por los materiales que lo componen

- *Baldosas de Caucho reciclado.* Fabricado a partir de mezclas de caucho de neumáticos fuera de uso reciclado y aglomerado con ligante exento de CIFC, PCB, lindano y formaldehído, que es posteriormente moldeado y reticulado en prensas bajo presión y temperatura. Es un pavimento articulado elástico, resistente a la compresión y flexible, diseñado para exteriores por ser antideslizante; recomendado para su uso en piscinas y zonas húmedas. (Construmática, 2014)

  Las principales características de este tipo de pavimento son las siguientes, (Construmática, 2014):

  - ✓ Permeable
  - ✓ Resistente a las condiciones climatológicas adversas
  - ✓ Higiénico y durable
  - ✓ Resistente a la flexión, no se aprecia ni figuración con una flecha de 24 mm
  - ✓ Rotura a tracción y alargamiento a rotura

- *Tarima de Serrín de Madera.* Este tipo de pavimento está compuesto por un revestimiento híbrido de polímero y madera usada para suelos, paredes y techos. (Construmática, 2014)

  Cuenta con las siguientes características, (Construmática, 2014):

  - ✓ Muy ligero, inferior a 10 kg/m^2
  - ✓ Alta resistencia (500 kg/m^2)
  - ✓ Fácil y rápido de instalar con la grapa invisible, sobre rastrel del mismo material
  - ✓ No se pudre ni se descompone
  - ✓ Es antideslizante
  - ✓ No contiene elementos nocivos ni tóxicos
  - ✓ No absorbe agua ni humedad
  - ✓ No requiere pintura ni aceite para su mantenimiento
  - ✓ No atrae insectos

- *Pavimento de Polietileno Reciclado.* Está conformado en su totalidad de polietileno (40% PEAD y 60% PEBD); el 85% del material empleado proviene de residuos sólidos urbanos y el 15% restante de residuos industriales. Las piezas que componen el pavimento son ligeras, resistentes e impermeables (Construmática, 2014)

  Sus características son las siguientes, (Construmática, 2014):

  - ✓ Ligero, fácil instalación y desmontable
  - ✓ Sistema de evacuación de agua
  - ✓ Superficie rugosa antideslizante
  - ✓ Estable a la intemperie (temperaturas y rayos UV)
  - ✓ Ideal para instalaciones provisionales

III. Pavimentos Ecológicos por su funcionamiento/aplicación

- *Soluciones de césped.* La placa empleada es 100% reciclable, la cual permite reafirmar suelos de césped de manera natural, un excelente drenaje, protege de la erosión y la inundación. (Edificae, 2014)

- *Adoquines verdes.* Proveen una solución al problema de la permanente destrucción del espacio verde en áreas públicas, ya que su diseño permite que la grama crezca mientras brinda una estabilidad estructural para casi la mayoría de tráfico. Ofrece control de la erosión, estabilidad de sólidos en carreteras, canaletas de poco flujo y diques. (Edificae, 2014)

- *Pavimentos permeables o porosos.* Son pavimentos a base de granulados de origen pétreo que permiten un intercambio entre el terreno y el exterior de aire como agua. Se consideran ventajosos que los pavimentos impermeables. (Edificae, 2014)

1.1.3. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica o bituminosa se define como la combinación de áridos minerales y ligante bituminoso (asfalto) de manera que cada una de las partículas del agregado quede cubierta de forma homogénea con el ligante. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla como el rendimiento de la misma cuando es puesta en su determinado uso. (Arias. *et al.*, 2013)

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en las capas de rodadura o en capas intermedias, y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, 'facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta'. (Arias. *et al.*, 2013)

El comportamiento de la mezcla depende intrínsecamente de las circunstancias externas a ellas mismas, tales como el tiempo de aplicación de la carga y la temperatura. Por tal razón, las características y propiedades de la mezcla tienen que estar vinculado a estos factores lo que implica la necesidad de conocer la reología del material. (Arias. *et al.*, 2013). Existen varias clasificaciones para las mezclas asfálticas que dependerán del agregado pétreo, la temperatura, porcentaje de vacíos y la curva granulométrica (Gráfica 2). (Garnica. *et al.*, 2005)

El diseño de una mezcla bituminosa consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría de los áridos a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal forma que se obtengan propiedades deseadas en la mezcla que satisfagan los requisitos específicos del proyecto. Para una aplicación del procedimiento de diseño empleado, las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica son la *estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatica, resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento* y *trabajabilidad.* (Tabla 1). (Garnica. *et al.*, 2005)

Grafica 1. Clasificación de las mezclas asfalticas.

CLASIFICACIÓN **De acuerdo a las fracciones de agregado petreo**

- Mástico asfáltico
- Mortero asfáltico
- Macadam asfáltico
- Concreto asfáltico

CLASIIFICACIÓN **De acuerdo a la temperatura**

- Mezlcas en frío
- Mezclas en caliente

CLASIFICACIÓN **De acuerdo con el porcentaje de vacíos de aire**

- Mezclas densas o cerradas (porcentaje de vacíos menor del 6%)
- Mezclas semidensas o semicerradas (porcentaje de vacíos entre el 6%-12%)
- Mezcla abiertas (porcentaje de vacíos entre el 12%-18%
- Mezclas porosas (porcentaje de vacíos mayor al 20%)

CLASIFICACIÓN **De acuerdo a la estructura de los agregados petreos**

- Mezclas con esqueleto mineral
- Mezclas sin esqueleto mineral

Fuente. Adaptado de Garnica. *et al.*, 2005.

Tabla 1. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfalticas.

PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	
Estabilidad o Resistencia a las deformaciones plásticas	Se refiere a la capacidad de la mezcla asfaltica a resistir la deformación y el desplazamiento, producto de las cargas que resultan del tránsito vehicular; por tanto, un pavimento es estable si conserva su forma. Este factor depende de la fricción interna y de la cohesión.
Flexibilidad	Es la capacidad de la mezcla para amoldarse, sin sufrir agrietamiento, a los asentamientos y movimientos de la base y la subrasante.

Tabla 1. *Continuación.*

PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	
Durabilidad	**Describe la capacidad de resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar el envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película del agregado.**
Resistencia a la fatiga	Es la capacidad de la mezcla para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga se relaciona con el contenido y la rigidez del asfalto.
Resistencia al fracturamiento por baja temperatura	Es la capacidad de la mezcla para no agrietarse en condiciones de bajas temperaturas.
Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad	Es la resistencia al paso del agua y aire hacia el interior a través de la mezcla asfáltica; esta se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada.
Resistencia al deslizamiento	Es la capacidad para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular en condiciones de humedad.
Trabajabilidad	Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla es colocada y compactada en el sitio.

Fuente. Adaptado de Garnica. *et al.*, 2005.

El comportamiento de la mezcla asfáltica resultado de la integración de sus componentes es de tipo visco-elásto-plástico. Por otra parte los agregados poseen un comportamiento elásto-plástico y el asfalto con un comportamiento viscoelástico. (Garnica. *et al.*, 2005)

1.1.4. Factores de composición que influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas

Los factores más importantes que influyen en el comportamiento de la mezcla son los siguientes (Garnica. *et al.*, 2005):

- *Naturaleza del cemento asfáltico.* Las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos rígidos son menos propicias a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la

carga, teniendo mayor vida a la fatiga. Por otro lado, los asfaltos blandos producen en la mezcla una susceptibilidad a las variaciones de temperatura, haciéndolas propensas a las deformaciones permanentes. (Garnica. *et al.*, 2005)

- *Contenido de asfalto.* Este es un factor determinante, ya que si se poseen proporciones de asfalto por debajo del óptimo, la resistencia mecánica y a la fatiga aumentan con el incremento del contenido de asfalto. Por el contrario con porcentajes por encima se presenta una disminución de las características mecánicas de la mezcla incrementando el riesgo a sufrir deformaciones permanentes. (Garnica. *et al.*, 2005)

- *Porcentajes de vacíos.* Las mezclas con menor porcentaje de vacíos tienen una mayor vida a la fatiga. (Garnica. *et al.*, 2005)

- *Granulometría.* La curva granulometrica puede influir a través de dos factores: el tamaño máximo del agregado y el tipo de curva, la cual puede ser continua o discontinua. Estos componentes pueden influir en el porcentaje de vacíos y por ende sobre la resistencia a la fatiga y la deformación permanente. (Garnica. *et al.*, 2005)

- *Forma y textura del agregado.* Estos dos parámetros afectan la compacidad; los agregados angulosos con superficies rugosas son más difíciles de compactar lo que genera un menor volumen de vacíos para una misma energía de compactación y en consecuencia un módulo de rigidez más bajo. (Garnica. *et al.*, 2005)

- *Contenido de finos.* La adición de finos en las curvas granulometricas reduce el porcentaje de vacíos, con lo que el módulo de rigidez de la mezcla aumenta. (Garnica. *et al.*, 2005)

1.1.5. Metodos de diseño de mezclas asfalticas

Independientemente de la metodología empleada para el diseño de mezclas, se tienen en cuenta factores como la selección del agregado, selección de los especímenes de prueba, el

cálculo de los parámetros volumétricos y la determinación del contenido óptimo de asfalto. (Garnica. *et al.*, 2005)

Existen varios métodos de diseño, entre los cuales se destacan, (Garnica. *et al.*, 2005):

a) Método Marshall. Fue formulado por Bruce Marshall y posteriormente fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. El método sólo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla; los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las dependencias encargadas del desarrollo de la infraestructura – en este caso el INVÍAS -. (Garnica. *et al.*, 2005).

El procedimiento se basa en la preparación de probetas cilíndricas de 106.1mm (4") de diámetro y 63.5mm (2 ½") de altura, las cuales posteriormente son rotas en la prensa Marshall y se le determina la estabilidad y deformación. Si es de interés conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas se debe determinar con anterioridad las gravedades específicas de los materiales usados y de las probetas compactadas, antes de ser sometidas a rotura. (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2007)

b) Metodología SUPERPAVE. La metodología establece los requisitos de calidad del agregado a través de la evaluación de propiedades denominadas de consenso y de origen. Las siguientes tablas indican los requisitos para los parámetros establecidos por la metodología.

Tabla 2. Requisitos de propiedades de origen del agregado.

Desgaste de los Ángeles Porcentaje máximo	Sanidad del agregado por el uso de sulfato de sodio o de magnesio Porcentaje máximo	Lentes de arcilla y partículas friables en agregado Porcentaje máximo
35 - 45	10 -20[1]	0,2 – 10[2]

[1] Para cinco ciclos
[2] Dependiendo de la composición exacta del contaminante
Fuente: (Asphalt Institute SP-2, 1996)

Fuente. Garnica. *et al.*, 2005.

Tabla 3. Requisitos de propiedades de consenso del agregado.

Millones de ESALs[1]	Angularidad del agregado grueso Porcentaje mínimo		Angularidad del agregado fino Porcentaje mínimo		Equivalente de arena Porcentaje mínimo	Partículas planas y alargadas Porcentaje máximo[3]
	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm		
<0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3 < 3	75/-	50/-	40	40	45	10
3 < 10	85/80[2,3]	60/-	45	40	45	
10 < 30	95/90	80/75	45	40	45	
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	

Notas:
[1] Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado en el carril de diseño para un periodo de de 20 años. Independientemente de la vida de diseño actual de la carretera, determine los ESAL's de diseño para 20 años y selecciona el nivel N_{ini} apropiado.
[2] 85/80 indica que el 85% del agregado grueso tiene una o más caras fracturadas, y 80% tiene dos o más caras fracturadas.
[3] Criterio basado en una relación máxima a mínima de 5:1
Fuente: (C-SHRP, 1999)

Fuente. Garnica. *et al.*, 2005.

1.1.6. Asfaltos Modificados

Los asfaltos modificados son aquellos que poseen mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica, lo cual se logra mediante la incorporación de un material de características poliméricas, mediante un proceso de deshidrogenación a altas temperaturas aplicando corrientes de aire. Entre los principales tipos de asfalto modificados se encuentran: *Asfaltos oxidados o soplados, asfaltos sólidos o duros, Fluxante o aceite Fluxante, asfaltos líquidos, asfaltos de curado rápido, asfaltos de curado medio, asfaltos de curado lento, Road oil, emulsiones asfálticas, roca asfáltica, producto asfaltico de imprimación, pintura asfáltica, gilsonita y productos prefabricados.* (Gamboa Ojeda, 2012)

1.1.7. Ensayo Método Marshall

Todas las mezclas asfálticas se encuentran compuestas al menos por tres elementos: el agregado, el ligante asfáltico y el aire, los cuales brindaran grandes propiedades de acuerdo con su proporción volumétrica. Las proporciones suelen expresarse en términos de porcentaje en peso y se debe determinar los volúmenes de cada uno de ellos. (Salgado, 2002)

El diseño de las mezclas asfálticas se hace con el objetivo de determinar la proporción óptima en que deben emplearse los componentes y garanticen la mayor durabilidad y desempeño durante su periodo de servicio, dentro de los principales requerimientos que se deben cumplir están (Salgado, 2002):

- Suficiente ligante que proporcione un resistencia al agrietamiento por fatiga y tener mayor durabilidad.
- Suficiente estabilidad y rigidez que permita soportar las deformaciones generadas por el tránsito.
- Suficientes vacíos contribuyen a la compactación de la mezcla debido al tránsito y ayuda a prevenir la infiltración de agua y aire a la mezcla.
- Suficiente trabajabilidad que garantice una fácil colocación de la mezcla sin que se presente segregación de los componentes.
- Suficiente resistencia al deslizamiento si las mezclas serán empleadas como capa de rodadura.

El método del ensayo Marshall se encuentra conformado en su forma más esencial por los siguientes pasos (Salgado, 2002):

- Ensayos a la muestra de agregado
- Mezcla de los agregados
- Ensayos sobre la muestra de asfalto
- Preparación de los especímenes de las mezclas
- Ensayos de estabilidad y flujo
- Análisis de la mezcla
- Selección del porcentaje de asfalto óptimo.

Los parámetros que son estudiados en el diseño del método Marshall son (Salgado, 2002):

- Estabilidad y flujo Marshall

- Vacíos de la Mezcla (VMA)
- Vacíos en el agregado Mineral (VAM)
- Vacíos Llenos de Asfaltos (VFB)

1.1.8. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto se define como la capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; de forma inversa, una estructura inestable presenta ahuellamiento, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla. (Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), 2008)

Para definir la estabilidad es necesario realizar un análisis completo de transito; valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto menos durable que lo deseado. (Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), 2008)

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna; la fricción interna en las partículas que componen los agregados y de características tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad del ligante asfaltico. (Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), 2008)

Un grado interno de fricción y cohesión se deriva de las propiedades del agregado, entre más angular y áspera sea su textura, más alta será la estabilidad de la mezcla. (Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), 2008)

1.1.9. Flujo

Este parámetro es medido en centésimas de pulgada, representado en la deformación de la briqueta, indicada por la disminución en el diámetro vertical de la probeta ensayada. Las mezclas que presentan valores muy bajos de fluencia y altos de estabilidad son consideradas frágiles y rígidas para un pavimento en servicio; por el contrario, mezclas con fluencia alta son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse

fácilmente bajo las cargas del tránsito. (Universidad de las Americas Puebla (UDLAP), 2008)

1.1.10. Módulo de Elasticidad o de Rigidez

El módulo de elasticidad o de rigidez de una mezcla es un parámetro mecánico básico al momento de dimensionar un pavimento nuevo o para la rehabilitación del mismo por métodos analíticos. (Bardasano, 2014)

El valor del módulo de rigidez de cada tipo de mezcla puede obtenerse a partir de la aplicación de ensayos dinámicos los cuales son muy costosos; en algunos casos, el modulo se estima a partir de métodos empíricos que relacionan las propiedades del betún y la composición volumétrica de la mezcla. En este sentido, los métodos más aplicados con los del Asphalt Institute y en gran manera la metodología Shell. (Bardasano, 2014)

Este último se basa en el uso de nomogramas mediante el cual se puede determinar el módulo de la mezcla a partir de propiedades volumétricas y del módulo del ligante, el cual puede determinarse en función de la temperatura, el tiempo de aplicación de la carga y el índice de penetración del betún mediante el conocido ábaco de Van der Poel. (Bardasano, 2014)

1.1.11. Métodos de diseño de pavimento flexible

Para el dimensionamiento de una estructura de pavimento se han utilizado métodos que tienen gran correlación experimental y considerable tiempo de uso para su verificación; estos métodos pueden clasificarse en tres grupos, (Montejo, 2002):

a) *Métodos totalmente empíricos.* Se emplean factores de seguridad muy altos, lo que conllevan que se obtengan espesores mayores que no responden a las verdaderas necesidades de la vía de estudio. Un ejemplo de estas metodologías son los fundados en una clasificación de los suelos como el Índice del grupo. (Montejo, 2002)

b) *Metodos semiempíricos.* Se encuentran fundamentados en ensayos arbitrarios de laboratorio correlacionados con teorías más o menos razonables. Entre estos se encuentra todos los basados en el ensayo CBR, el método de Hveem y el de Texas. (Montejo, 2002)

c) *Metodos racionales.* Basados en consideraciones teóricas sobre distribución de esfuerzos y deformaciones. Entre estos se destacan el Navy, Shell e Instituto de Asfalto. (Montejo, 2002)

Entre las metodologías más aplicadas se encuentra:

1. **Método de la Shell.** Es un método de tipo racional que considera la estructura de pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico, en el cual se caracterizan los materiales según el módulo de elasticidad de Young y su relación de Poisson. Considera que: los materiales son considerados homogéneos e isótropos, las capas tienen extensión infinita en sentido horizontal, el transito se expresa en ejes equivalente de 8.2 toneladas y las cargas se aplican por medio de un sistema de rueda doble con área de contacto. (Sánchez, 2005)

   Considera que la deformación horizontal por tracción (ε_T) en la fibra inferior de las capas asfálticas, supere cierto límite admisible, se produciría agrietamiento de dichas capas y que la deformación vertical (ε_v) por compresión de la subrasante supere el límite admitido por ella, se produciría una deformación permanente del pavimento. (Sánchez, 2005)

   Además, el método supone al pavimento como una estructura tricapa y capas ligadas con el asfalto, eligiendo la combinación de espesores y características de los materiales de modo que las deformaciones por tracción y compresión permanezcan dentro de límites admisibles durante el periodo de diseño. (Sánchez, 2005)

2. **Método AASTHO.** El método incorpora variables de diseño como la restricción del tiempo, el tránsito, la confiabilidad del diseño, aspecto socio-económico, los factores

ambientales (temperatura, humedad y drenajes), propiedades de los materiales (módulo resiliente de la subrasante, característica de los materiales de pavimento, coeficiente de capas), criterios de comportamiento (servicibilidad). (Montejo, 2002)

3. **Modelación Mecanicista.** Supone un comportamiento lineal entre los esfuerzos y las deformaciones, es decir, una aceptación de que los materiales trabajan dentro de un rango elástico, empero la reología del asfalto indica que su comportamiento es visco elástico, dado por el estado de esfuerzos, el tiempo de aplicación de las cargas y de la temperatura; de igual forma, los agregados responden a las cargas, con base en el nivel de esfuerzos, la densidad y la humedad, demarcando un comportamiento no lineal dependiente de las características del material de la capa subyacente. (Vergara, 2014)

1.1.12. Desechos Sólidos

Son todos aquellos materiales o conjunto de materiales resultantes de cualquier proceso u operación que esté destinado al desuso, que no vaya a ser utilizado, recuperado o reciclado, lo que comúnmente se conoce como "Basura". (Jimdo, 2014)

1.1.13. Residuo Sólido

Un residuo sólido se define como:

> *Cualquier objeto o material de desecho que se produce tras la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo y que se abandona después de ser utilizado. Estos residuos sólidos son susceptibles o no de aprovechamiento o transformación para darle otra utilidad o uso directo. El origen de estos residuos se deben a las diferentes actividades que se realizan día a día, pero la mayor parte de ellos es generada en las ciudades, más concretamente en los domicilios donde se producen los llamados residuos sólidos urbanos, que proceden de las actividades domésticas en casas y edificios publicos como los colegios, oficinas, la demolición y reparación de edificios.* (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2014)

La siguiente tabla muestra la clasificación de los residuos de acuerdo a su naturaleza y a su peligrosidad.

Tabla 4. Clasificación de los residuos de acuerdo a su naturaleza y a su peligrosidad.

CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUIS SÓLIDOS	
Residuos no peligrosos	Son producto del desarrollo de las actividades, los cuales no representan ningún riesgo para la salud humana y/o medio ambiente. Dentro de este grupo se encuentran los residuos biodegradables, reciclables, inertes y ordinarios comunes.
Residuos peligrosos	Son los residuos que pueden ser infecciosos, combustibles, inflamables, explosivos, reactivas, radioactivas, volátiles, corrosivas y/o tóxicas que pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente.
Residuos Orgánicos	Son todos aquellos que pueden descomponerse de forma natural que poseen en su estructura de carbono, nitrógeno, oxigeno, e hidrogeno. Pueden ser papel, cáscaras de verduras, residuos de alimentos, frutos, bebidas, residuos de cosechas, algas, hojas de árboles, etc.
Residuos peligrosos	Son residuos que debido a su composición química sufren una descomposición natural muy lenta. Muchos de ellos son de origen natural que no son biodegradables, por ejemplo los envases plásticos. Por lo general, se reciclan a través de métodos artificiales y mecánicos.

Fuente. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA), 2014.

1.1.14. Plásticos

Son materiales orgánicos que contienen como elemento principal el carbono, combinado con el hidrogeno, oxigeno o nitrógeno. Es sólido en su estado final, pero en algunas etapas de su manufactura es suficientemente blando para ser moldeado por muchos sistemas de calor y/o presión. (Cornish, 1997)

Los plásticos son polímeros ofrecen materiales con excelentes propiedades térmicas, aislantes, resistencia a ácidos, bases y disolventes y de ratio resistencia/peso. Por tanto, se entiende por plástico 'cualquier material formado principalmente por algún polímero natural o sintético con sus aditivos correspondientes para conferirle las características deseadas'. En la actualidad, se destacan varios grupos de polímeros en fase de desarrollo según sus propiedades: piezoeléctricos, conductores, de alta resistencia térmica, fotosensibles, con propiedades ópticas no lineales. Las propiedades químicas más relevantes de los polímeros son: *resistencia al ataque químico, resistencia al envejecimiento, estabilidad térmica, permeabilidad, adherencia, propiedades mecánicas, propiedades ópticas,* y *propiedades eléctricas.* (Elías & Jurado, 2012)

Los polímeros se clasifican en termoplásticos, termoestables, materiales compuestos y aditivos plástico. En la siguiente tabla se realizar una breve descripción de cada uno de ellos.

Tabla 5. Clasificación de los polímeros.

CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS	
Termoplásticos	Son polímeros lineales o poco ramificados, lo que les permite fluir a presión por encima del punto de fusión. Pueden ser moldeados y remoldeados por medio de calor, por lo que se convierten en materiales reciclables. Suponen un 80% de los plásticos producidos actualmente. Se encuentran en los siguientes productos: PEAD, LDPE, PET, PP, PS, PVC, etc.
Termoestáticos	Sufren una transformación química al ser sometidos al calor y sus moléculas crean una red tridimensional. Una vez solidificados no pueden ser moldeados o fundidos, ya que pierden sus características. Suponen el 20% de los plásticos producidos. Se encuentran típicamente en: PUR, EPOXY y RESINAS FENÓLICAS
Materiales Compuestos	También conocidos como composites; se basan en la miscibilidad de especies poliméricas diferentes que, sin mezclarse totalmente coexisten en diferentes grados según los polímeros aportando propiedades a cada uno de los polímeros composite. Para facilitar la compatibilidad entre polímeros se añaden aditivos que reducen la tensión interfacial y estabilizan y aumentan los entrelazamientos entre ellos.

Tabla 5. *(Continuación)*

Aditivos Plásticos	Son necesarios para mantener en el tiempo las características mecánicas, físicas y térmicas de los polímeros. Se pueden distinguir: los estabilizantes, aditivos para la resistencia al impacto, retardantes de llama, cargas, antiestáticos, plastificantes, agentes de compatibilización y otros.

Fuente. Elías & Jurado, 2012

En 1988 la Sociedad de la Industria Plástica (SPI), identifican el contenido de resino del recipiente, con el objeto de brindar un sistema coherente para facilitar el reciclado de los plásticos usados, concentrarse en los recipientes plásticos, ofrecer un medio para identificar el contenido de resina de las botellas y brindar una codificación para los seis tipo de resinas más comunes además de una séptima categoría para todos los otros tipos que no estén dentro de los códigos. (Mariano, 2011)

Tabla 6. Código de Plásticos.

Símbolo	Tipo de Plástico	Propiedades	Usos Comunes
1 PET	PET PolietilenTereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
2 HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
3 PVC	PVC Policloruro de vinilo (Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P)	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
4 LDPE	LDPE Polietileno de baja densidad (Low density Polyethylene)	Suave, flexible, traslucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
5 PP	PP Polipropileno (Polypropylene)	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, traslucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico.

Tabla 6. *(Continuación)*

6 PS	PS Poliestireno (Polystyrene)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
6 PS-E	PS-E Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas.	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil
7 OTHER	OTHER Otros (SAN, ABS, PC, Nylon)	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos	Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Fuente. Mariano, 2011

1.2. ANTECEDENTES

El desarrollo de las diferentes actividades económicas se define como el producto de la apropiación y transformación de la naturaleza a beneficio de la satisfacción de las necesidades individuales y colectivas. Por tal razón, el crecimiento económico conduce a una disminución de los recursos naturales disponible y, en el largo plazo a la degradación general del medio ambiente. (Universidad de Medellín (UDEM), 2008)

A finales del siglo XVIII cuando se inicia la Revolución Industrial, gracias al avance de la ciencia y la técnica, surgen nuevas actividades industriales y se desarrolla extraordinariamente el comercio, produciendo una auténtica explosión demográfica y económica que se manifiesta en el desarrollo de la urbanización. Para esta época existían actividades marginales de reciclaje como la utilización de trozos de metal para producir nuevas herramientas y la incineración como destino final de los desechos. (Lecitra, 2010)

Ahora bien, a pesar que los procesos de transformación y consumo de los recursos naturales se han venido acelerando desde finales del siglo XIX, el concepto de problemática ambiental se convirtió en una cuestión de importancia a partir de 1972, cuando se celebró por primera vez la conferencia de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente en Estocolmo. En los años subsiguientes, las actividades encaminadas a integrar los planes de desarrollo ambiental con los procesos comerciales no llegaron muy lejos, a pesar del gran

avance científico y tecnológico, se siguió 'soslayando la cuestión de medio ambiente en el plano político, económico y se fueron agravando entre otros problemas ambientales, el agotamiento del ozono, el calentamiento de la tierra y la degradación de los bosques'. (Universidad de Medellín (UDEM), 2008)

En el segundo tercio del siglo XX, con la expansión de la economía basada en el consumo, y la cultura de "usar y tirar", y los adelantes técnicos experimentados que permiten utilizar en la producción de nuevos componentes que no están sujetos a una rápida biodegradación, cuando el problema comienza a tomar proporciones 'críticas y a generar un gravísimo impacto ambiental, sanitario, económico y social que toma otras medias para la gestión de los residuos urbanos por ser insuficientes o inadecuadas las alternativas que les precedieron'. (Lecitra, 2010)

A raíz de la preocupación por el medio ambiente, a nivel internacional se han realizado conferencias (Tabla 7), donde el punto principal ha sido la conciencia ecológica de la población, (Universidad de Medellín (UDEM), 2008); esto con el fin de no concebir la gestión de los residuos como la simple eliminación o el aprovechamiento por métodos seguros de los desechos producidos y procurar resolver la causa fundamental del problema intentando cambiar las pautas no sostenibles de producción y consumo. (Racines, 2009)

Tabla 7. Cronología de los principales sucesos y conferencias internacionales relacionadas con la conciencia ecológica de la población.

AÑO	SUCESOS Y/O CONFERENCIAS
1948	Creación de la Internacional Union for the conservation of Nature (IUCN)
1955	Simposio sobre Man's role in changing the face of the Earth, Princeton (USA)
1960 - 1970	Publicación de libros de impacto como los de R. Carson, Silent Spring (1963), K. Boulding. The Economics of the coming Spaceship Earth (1966). O.P. Ehrilch, The Population Bomb (1968)
1971	Publicación del informe Meadows, The limits of the Growth, Club de Roma. Creación del programa Mana n Biosphere (Mab) de la UNESCO
1972	Conferencia de Naciones Unidas sobre El Medio Humano, Estocolmo. Creación del Programa de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente. (PNUMA)

Tabla 7. *(Continuación)*

AÑO	SUCESOS Y/O CONFERENCIAS
1973	Primera "crisis Energética"
1976	Primera conferencia de Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos (Habitat - I) Vancouver.
1979	Segunda "crisis Energética"
1970 – 1980	Publicación de numerosos libros de impacto como H.T Odum, Environment, Power and Society (1971), B. Commoner, The closing Circle Energy (1972), E.F B37Shumacher, Small is Beautiful (1973), entre otros.
1980 - 2003	Abaratamiento del petróleo y de las materias primas en general. Decaen las publicaciones sobre el manejo de la energía y los materiales en la civilización industrial y aumenta la literatura sobre instrumentos económicos para la gestión de residuos y valoración de externalidades a fin de incluir los temas ambientales en el razonamiento económico estándar.
1987	Publicación del Informe Brundtland de la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo: Nuestro Futuro Común.
1989	Final de la "guerra Fría" Publicación del II Informe Meadows del Club de Roma, Beyond the limits
1992	Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente, Río de Janeiro. Tratado de Maastricht y V Programa de Acción sobre Medio Ambiente de la Unión Europea (UE).
1993	Publicación del Libro Blanco sobre crecimiento, productividad y empleo, de la UE. Creación del proyecto Ciudades Europeas Sostenibles.
1994	Aparecen las Agendas de Desarrollo Local.
1995	Publicación del Libro Verde sobre el medio ambiente urbano de la Comisión Europea.
1996	Segunda Conferencia de Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos. (Habitat -II) Estambul.
1998	Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Kyoto.
2002	Conferencia de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible (CNUMAD), Johannesburgo.

Fuente. Universidad de Medellín (UDEM), 2008.

En Latinoamérica, se han adelantado acciones incursionadas a un mejoramiento del manejo de los residuos sólidos, al dar cumplimiento a lo establecido en la CNUMAD, elaborando un diagnóstico sobre la situación de manejo de residuos sólidos Municipales en Suramérica

y el caribe; además, se estableció una guía para la gestión del manejo de los residuos sólidos Municipales. (Racines, 2009)

A nivel nacional, las experiencias en cuanto a la gestión integral de residuos sólidos en pequeñas comunidades, corregimientos o veredas son limitadas, y en algunos casos estas políticas existen pero no se encuentra documentadas. De igual forma, se han implementado planes de manejo integral de residuos sólidos en algunas instituciones publicas y privadas. (Racines, 2009)

En la actualidad, la nueva visión en la gestión de los residuos – que se ha popularizado – es la denominada de las tres "R" para caracterizar el manejo ambiental de forma correcta mediante los siguientes conceptos: *Reducción, Reutilización y Reciclaje*. (Lecitra, 2010). A esta política, se ha anexado una nueva técnica conocida como "La regla de las cuatro erres", la cual no sólo abarca las anteriores políticas sino incluye el concepto de *Recuperar*, la cual se relaciona con los procesos industriales, y consiste en 'recuperar materiales o elementos que sirvan como materia prima'. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2013)

Dadas las condiciones actuales del planeta, donde se presentan problemas energéticos y ambientales a los que diariamente se enfrenta la sociedad y en pro de la aplicación de las políticas actuales, como por ejemplo la "Teoria de las 4-R", en las cuales se busca reutilizar y recuperar elementos con un potencial alto para ser empleados como materia prima, y para responder al incremento de las cargas por eje, la sofisticación de la tecnología automotriz, el aumento incontrolable de los precios de los productos derivados del petróleo y la materia prima para la construcción de vías, se ha suscitado el desarrollo de técnicas macro y microscópicas para poder mejorar, reciclar y sofisticas los sistemas actuales con los que se cuentan y con los que se están desarrollando los diseños y proyectos viales en todo el mundo. (Reyes, 2008)

Es por esto, que se ha iniciado el desarrollo de técnicas de diseño racional de los pavimentos y el empleo de procedimientos químicos, físicos, o eléctricos que generen una estructura con mejoras en su durabilidad, resistencia y que conlleven a 'reducir

sustancialmente el volumen de materiales y energía a emplear en la construcción de las mismas'. (Reyes, 2008)

Entre las tecnologías empleadas sobre las mezclas asfálticas para el mejoramiento de las propiedades mecánicas, químicas y reológicas (mejorando la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, el ahuellamiento, fatiga, el envejecimiento y disminuir la susceptibilidad térmicas), se encuentra la adición de polímeros los cuales aumentan considerablemente el análisis económico del proyecto. (Rondón. *et al.*, 2010)

La mayor parte de las investigaciones desarrolladas en el área de asfaltos modificados, se emplean como agentes modificadores polímeros del tipo elastómero, los cuales al ser adicionados mejoran principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son sometidas a ciclos de carga y descarga especialmente a altas temperaturas de servicio; por otra parte, también pueden usarse aditivos del tipo plastomérico, donde se genera un incremento en la resistencia mecánicas de las mezclas a altas temperaturas debido a que el asfalto se rigidiza. (Rondón. *et al.*, 2010)

Debido al gran incremento en los costos de construcción de este tipo de estructuras moficadas con polimeros industriales, se han desarrollado investigaciones que arrojan como resultado la idea de la inclusión de materiales plásticos en la estructura de pavimento en el proceso de mezclado con el asfalto, los cuales poseen propiedades semejantes a los agentes modificadores empleados y son generados por la misma población; entre estos desechos se encuentran llantas viejas, neumáticos usados, bolsas de leche, botellas de agua del consumo diario, etc. (Reyes, 2008)

En febrero de 1982, se instaló la planta de tratamiento integral de residuos sólidos urbanos en inmediaciones del vertedero controlado de Valdemingómez en Madrid, con una capacidad de 100 toneladas diarias. Al finalizar el proceso en la planta, aplicando tecnologías metalúrgicas, se obtiene fracciones de materiales como metales, vidrios y plásticos, que pueden reciclarse en procesos agrícolas e industriales; dichos plásticos, contribuyen el 4% sobre el residuo bruto, compuesto aproximadamente de botellas y envases diversos, bolsas y envoltorios (plástico-film). (Figueroa & Reyes, 2006)

Teniendo en cuenta los antecedentes sobre el aprovechamiento de residuos y ahorro energético se tiene que el mayor interés lo ha suscitado la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). En 1980 se presentó el proyecto para la incorporación de residuos plásticos en las mezclas asfálticas, el cual recibió recursos de la Asesoría de Investigación Científica y Técnica, en Francia; durante este proceso, surgieron dos problemas, el primero fue la forma de incorporación del plástico al asfalto debido que se tenía la concepción de que el plástico solo podía mejorar las propiedades reológicas del asfalto, y el segundo era la elección de un residuo adecuado para cumplir con los objetivos deseados. (Figueroa & Reyes, 2006)

De acuerdo con lo anterior, se planteó la posibilidad de incorporar este tipo de materiales en las capas de rodaduras de las estructuras de pavimento flexible, lo cual generó a nivel mundial el desarrollo de investigaciones con el ánimo de perfeccionar la respuesta de los materiales de pétreos con el uso de estos desechos, entre dichas investigaciones se encuentra, (Figueroa & Reyes, 2006):

- *Hule molido de neumáticos usados.* Las primeras investigaciones se iniciaron en 1965 con la modificación de asfaltos para riegos de liga y en tratamientos superficiales. Se llevaron cabo en la Costa Oeste de Estados Unidos, en Arizona y California, en tratamientos superficiales de una o varias capas y en carpeta delgada. En algunos casos, la duración de estos nuevos tratamientos fue superior con respecto al tratamiento convencional. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Latex sintéticos y naturales.* Se empleó por primera vez en 1970 en Francia y España, incorporándolo al asfalto para mejorar las características de las emulsiones en riegos y morteros asfálticos; posteriormente se usó en la elaboración de mezclas bituminosas en frío y en caliente con asfaltos modificados. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Polímeros de tipo estireno-butadieno-hule (SBR) y estireno-butadieno-estireno (SBS).* Se utilizaron los SBR hace aproximadamente veinte años y posteriormente los SBS en la industria de impermeabilizantes, en proporciones del 6% al 12% con resultados

favorables. Luego, se empezó a modificar con polímeros el asfalto para pavimentos, sobre los cuales se observaron ventajas tales como el cambio de viscosidad y el comportamiento a temperaturas menores. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Asfalteno natural 'gilsonita'.* El asfalteno es un triturado de depósito de minas obtenido a bajas profundidades, presente especialmente en el estado de Utah de la Unión Americana. Se empleó como impermeabilizante primeramente y luego sobre mezclas asfálticas, brindando una mayor adhesión a la mezcla, mayor resistencia estructural y durabilidad. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Fibras cortas y escorias de fundición.* Su usó data desde hace cuarenta años, pero su desarrollo ha sido limitado ya que se generan resultados desfavorables a largo plazo y puede tener reacciones perjudiciales con ciertos materiales. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Cal hidratada y azufre.* Se han usado con buenos resultados en materiales cuarzosos, mejorando la capacidad estructura y la adherencia, pero con inconvenientes de mezclado y contaminación. (Figueroa & Reyes, 2006)

- *Modificadores catalíticos.* Se ha empleado con frecuencia en países al norte de Europa y al suroeste de Asia con buenos resultados, sin haber logrado ingresar al mercado norteamericano. (Figueroa & Reyes, 2006)

En la Universidad de Cartagena, se han desarrollado investigaciones relacionadas con el mejoramiento de mezclas asfálticas; de acuerdo con Gonzalez & Velez (2008), a medida que aumentaba el porcentaje de cal hidratada, se observo un incremento en el valor de la estabilidad final, empero, con un alto porcentaje de modificador la mezcla empezó a comportarse de forma muy rigida, lo que generaria un fraccionamiento en la estructura vial muy facilmente; de manera reciproca, a menores porcentajes de cal hidratada, la mezcla se comporta de manera 'flacida', lo que repesentaria la aparicion de fallas por exceso de

asfalto. De acuerdo con la anterior investigación, el porcentaje optimo de asfalto y de cal hidratada respectivamente fue 5% y 3%. (Gonzalez de la Hoz & Velez Velez, 2008)

Según Berrio & Contreras (2008), con la adición de Cemento Portland como llenante mineral en mezclas asfalticas densas, se evidencia un aumento en los valores de estabilidad significativos, determinando como porcentaje optimo de modificador en relación al peso total de una briqueta de 4000 g igual a 4.2%, y un porcentaje de asfalto de 4.5% . (Berrio Escobar & Contreras Contreras, 2008)

Pacheco & Perez (2009), con la utilización de microaglomerados en mezclas discontinuas en caliente, se presentan excelentes comportamientos al 'ahuellamiento, resistiendo adecuadamente las solicitaciones responsables de este deterioro, aun en condiciones extremas', lo anterior debido a la gran 'trabazón intergranular de la estructura petrea y el mastico rico en filler interactuan para lograr una mezcla muy resistente a las deformaciones plasticas'. (Pacheco Ruiz & Perez Hernandez, 2009)

Por otra parte Mena & Puerta (2010) afirman que con la incorporación de Kaoamin[1] 12 y 14 como aditivo se logra aumentar el indice de resistencia conservada; asimistmo, desde el punto de vista economico, pudieron determinar que el uso de este tipo de aditivos es factibles, ya que 'el incremento de los costos de producción de una mezcla con aditivo no es significativo en comparación con los beneficios que traeria una mezcla que pueda soportar condiciones mas adversas de trafico y clima'. (Mena Ripoll & Puerta Carrillo, 2010)

[1] Es un producto derivado de poliaminas grasas, que funciona como un aditivo promotor de la adherencia para mezclas asfalticas en frio y en caliente. (Castro García, 2011)

1.3. ESTADO DEL ARTE

Según V.S.Puninth & Veeraragavan (2007), además de los aditivos anteriormente mencionados, se pueden usar residuos solidos como poletilenos (PE) ya sea de baja (PEBD) o alta (PEAD) densidad debido que se utilizan grandemente a nivel mundial; se estima que en la India se producen aproximadamente 10 millones de toneladas de bolsas PEBD, de los cuales solo 2 millones de toneladas se reciclan y los desechos restantes son enviados a los vertederos, lo cual representa una amenaza para el medio ambiente ya que los PE de este tipo no son facilmente degradables. (V.S.Puninth & Veeraragavan, 2007)

Es por esto, que la incorporación de PEBD en la industria de asfalto ayudaría a la reducción de las bolsas de este tipo con el fin de resolver en parte la problemática ambiental y al mismo tiempo mejorar las propiedades de las mezclas. De acuerdo con la investigación desarrollada por V.S.Puninth & Veeraragavan (2007), con la adición de este tipo de residuos le brinda una mayor resistencia cortante a la mezclas en comparación a la convencionales, se puede aumentar el modilo resiliente a bajas temperaturas, aumenta el punto de inflexión, inmersión estatica y mejora la resistencia a la susceptibilidad de la humerdad de las mezclas asfalticas. (V.S.Puninth & Veeraragavan, 2007)

Por otra parte Wan Abdul & Abdul (2013), destaca que los plásticos son utilizados en innumerables actividades y que en su mayoría estos articulos – como por ejemplo botellas de plástico – se convierten en residuo en un corto tiempo sin sacarle el mayor provecho a los mismos. La mayoría de estos elementos, estan compuestos de tereftalato de polietileno (PET) en una proporción del 55% al 60%. (Wan Abdul & Abdul, 2013)

El uso de granulos de PET fue experimentado en primera instancia como un reemplazo parcial de agregado fino, obteniendo resultados desfavorables en lo concerniente al modulo resiliente de la mezcla; empero se observa una mejora en la deformación permanente de la mezcla bituminosa, aumenta la resistencia de fallas en la carretera aumentando el nivel de rendimiento y la vida útil de la misma. Ayuda además a minimizar los costos de construcción, ya que el PET reciclado es más barato que el betún y es de facil obtención. (Wan Abdul & Abdul, 2013)

De igual forma Xue. *et al.* (2008), plantea el uso de cenizan producto de la incineración de los residuos sólidos municipales como reemplazo parcial de agregado fino o de llenante mineral en mezclas asfálticas. Estas cenizas poseen dos componentes uno de fondo y otro volante. El primero es producto de materiales gruesos incombustibles y de materia orgánica sin quemar, rica en trozos de metal y relativamente pobre en metales pesados; las partículas finas posteriormente son eliminadas en un filtro previo antes del proceso de neutralización de los efluentes gaseosos que se caracterizan por su alto contenido de cloruro y significativas cantidades de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos. (Xue. *et al.*, 2008)

Estudios recientes han demostrado que el asfalto puede utilizarse como agente estabilizador y solidificador de cenizas volante; por tanto, al ser sustituido parte de los agregados con estas cenizas se mejora la estabilidad dinamica, la sensibilidad al agua y la vida util. Según Xue. *et al.* (2008), al realizar las sustituciones se cumplen con los parámetros establecidos por la metodología Marshall. (Xue. *et al.*, 2008)

Huang. *et al.* (2007), resalta que la construcción y mantenimiento de las vias requiere grandes cantidades de agregados, lo cuales representan más del 90% en peso de la mezcla asfaltica, por tanto destaca la viabilidad del uso de materiales secundarios (reciclados) en lugar de los primarios (virgen), ya que estos ayudan a aliviar las presiones sobre los vertederos y reducen la demanda de extracción, encaminando los proyectos a un sistema de infraestructura sostenible. De los materiales de desecho que pueden tener un gran potencial para ser utilizados en proyectos de construcción de carreteras se tienen los siguientes, (Huang. *et al.*, 2007):

- *Residuos de vidrio.* Se ha observado un desempeño satisfactorio de pavimentos de asfalto que contiene 10-15% triturado de vidrio en sus mezclas; el tamaño máximo comúnmente aceptado es de 4.75 mm teniendo en cuenta una amplia gama de propiedades, incluyendo temas de seguridad para la aplicación en la ingeniería. (Huang. *et al.*, 2007)

- *Escoria de acero.* La forma angular, dureza y superficie aproximadamente texturizada dan a la escoria de acero la capacidad para sustituir el agregado grueso en la mezcla asfáltica, contribuyendo en lo que se refiere a la estabilidad (resistencia a la deformación plástica permanente) y la resistencia al deslizamiento. (Huang. *et al.*, 2007)

- *Desechos de llantas.* El uso de neumáticos en mezclas de asfalto tiene generalmente dos enfoques distintos. Uno es el de disolver los gránulos de caucho en el betún como modificador de la carpeta, el otro para sustituir una parte de los agregados con caucho lo cual no se relaciona directamente con el betún. Esto se conocen como el "proceso mojado" y el "proceso seco" respectivamente. (Huang. *et al.*, 2007)

- *Plásticos.* Similar al caucho del neumático, los plásticos reciclados pueden sustituir una parte de los agregados, o servir como un modificador del betún. (Huang. *et al.*, 2007)

Otros investigadores mencionan el uso de polímeros vírgenes en pavimentos de asfalto, los cuales han demostrado ser ventajosos en términos de mejorar ciertas características del pavimento según lo revelado a través de resultados de la investigación en las últimas dos décadas. Parece haber un consenso común entre investigadores en lo concerniente a que ciertos polímeros mejoraría considerablemente el rendimiento y vida útil del pavimento cuando son adecuadamente mezclado con el betún en condiciones óptimas. Aparte de polímeros vírgenes, el uso de residuos poliméricos en pavimento asfáltico también han reflejado una mejora en ciertas propiedades del pavimento a un nivel similar al alcanzado al utilizar polímeros vírgenes. Desde el punto de vista económico, utilizando material de desecho en la construcción de carreteras y pavimento es beneficiosa en diferentes maneras. Puede ser beneficioso a través de mejorar el rendimiento del pavimento así como a partir de los vertederos residuos. Muchos de los polímeros de residuos podrían ser peligroso y aportar a la carga ambiental si no son efectivamente reciclados o reutilizados. Mediante la incorporación de residuos de polímeros en el pavimento, no sólo se mejora el rendimiento de pavimento y reducir la contaminación ambiental, la necesidad de utilizar polímeros vírgenes en el pavimento será también reducida, lo que conduce a posibles ahorros a largo plazo. (Niloofar. *et al.*, 2012)

Actualmente, en España bajo la coordinación de la Universidad de Cantabria (UNICAN) se esta desarrollando un proyecto llamado *POLYMIX*, cuyo objetivo general es 'demostrar el comportamiento de nuevas mezclas asgalticas modificadas con residuos polimericos de mejores prestaciones y amigables con el medio ambiente'. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

La estructura del proyecto esta compuesta por tres fases (Grafica 2), las cuales buscan conseguir los siguientes beneficios, (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014):

1. Reducción de los problemas ambientales como:
   - ✓ Acumulación de residuos en vertederos.
   - ✓ Contaminación relacionada con la no valorización de residuos
   - ✓ Plásticos y de neumaticos.
   - ✓ Impactos relacionados con la explotación de canteras.

2. Mejora de la resistencia y el módulo de rigidez de las mezclas asfalticas aumentando la durabilidad de la infraestructura vial.
3. Reducir las operaciones de mantenimiento de carreteras.

4. Apoyar a los responsables europeos y nacionales en la definición de prioridades para la revalorización de desechos.

5. Establecer recomendaciones y de investigación pre-normativa y de contratación publica ecológica para el sector de la construcción.

Grafica 2. Estructura del Proyecto POLYMIX.

Fuente. Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014.

Con la ejecución del proyecto POLYMIX se han obtenido los siguientes resultados, (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014):

- ✓ Se han desarrollado mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos y de neumáticos fuera de uso, lo cual se ha convertido en un beneficio ambiental, mejores características técnicas que las tradicionales y son más duraderas, lo que permite minimizar las operaciones de mantenimiento. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

- ✓ Las mezclas han sido aplicadas a lo largo de un tramo de la M-300 en los accesos a Alcalá de Henares, con un espesor de 6 centímetros de la capa de rodadura. Esta obra constituye el campo de pruebas, puesto que durante 18 meses se ha previsto medir y valorar el comportamiento de la capa de rodadura mediante una serie de ensayos de control de calidad y monitorización realizados por el Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

- ✓ En relación con su comportamiento estructural, se ha evaluado el deterioro por fatiga, la posible deformación, el efecto del agua, la evolución de la elasticidad y la formación de roderas. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

- ✓ Por otro lado, desde el punto de vista funcional, se ha analizado si tiene lugar pérdida de regularidad a lo largo del trazado, pérdida de macrotextura y pérdida de propiedades antideslizantes. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

- ✓ Actualmente se está analizando mediante metodología ACV (Análisis de Ciclo de Vida) las características ambientales de los tramos de carretera realizados. (Universidad de Cantabria (UNICAN), 2014)

De igual forma en el continente americano estas políticas se están aplicando, teniendo la primera ciudad del mundo en pavimentar sus calles con plástico reciclado. La ciudad de Vancouver se ha propuesto para antes del año 2020 convertirse en la ciudad más ecológica del mundo, iniciando su compromiso medio-ambiental con la pavimentación de sus calles con residuo polimérico, trabajando en conjunto con la compañía Green Mantra de Toronto, en la cual se funde el plástico y el asfalto para crear una mezcla bituminosa más amigable con el medio ambiente que el asfalto convencional. (Lofgren, 2012)

Para lograr que el asfalto convencional fluya con facilidad se requieren temperaturas extremadamente altas, pero al ser mezcladas con un ligante plástico reciclado el asfalto fluye a temperaturas mucho más bajas, lo cual demanda un 20% menos de combustible, logrando una reducción anual de 300 toneladas en los gases de efecto invernadero; además, reduce la cantidad de vapores que se liberan en el aire cuando se imprime el asfalto. (Lofgren, 2012)

En primera instancia, la implementación de esta nueva tecnología cuesta entre 1% - 3% mas que el pavimento tradicional, pero se espera que los costos se reduzcan a medida que aumente la demanda. La ciudad se encuentra probando dicha mezcla antes de implementarla en todo Vancouver. (Lofgren, 2012)

Figura 3. Impresión de mezcla asfáltica modificada con desechos plásticos en algunas calles de Vancouver.

Fuente. Lofgren, 2012.

A nivel nacional, en 2003 se inició una investigación entre la Universidad de la Salle y la Pontificia Universidad Javeriana, dirigida por los ingenieros Ana Sofía Figueroa y Freddy Reyes, titulada *"Asfaltos modificados con poliestireno"*; otras investigaciones desarrolladas por Freddy Reyes y Óscar Javier Reyes han sido: *"mejoramiento de las mezclas drenantes utilizando como ligante el asfalto-caucho"* y *"uso de desperdicio plástico para mejorar las propiedades mecánicas de la estructura de pavimento"*. (Figueroa & Reyes, 2006)

En materia de investigación de nuevas fuentes de materiales (Gráfica 3) para las mezclas asfalticas modificadas, se han realizados mayores estudios en el período de 2007 a 2009 (Grafica 4), teniendo como objetivos de investigación, (Pérez & López, 2014):

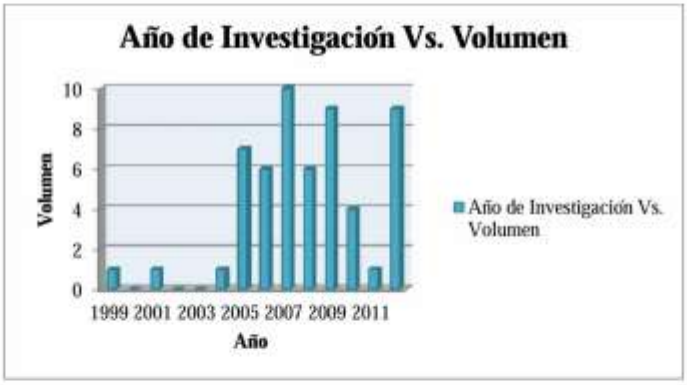
- ✓ Deformación permanente (Ahuellamiento).
- ✓ Resistencia (Estabilidad Marshall).
- ✓ Envejecimiento.
- ✓ Comportamiento térmico.
- ✓ Fatiga.

- ✓ Adherencia.
- ✓ Costos de la mezcla convencional vs. la modificada (economía).
- ✓ Beneficios ambientales.

Grafica 3. Aditivos utilizados en las investigaciones desarrolladas en Colombia.

Fuente. Pérez & López, 2014.

Grafica 4. Año de Investigación Vs. Volumen.



Fuente. Pérez & López, 2014.

La investigación de mayor relevancia nacional con el uso de desperdicios de caucho de llanta, la cual fue desarrollada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Se realizaron ensayos por vía seca y húmeda; los porcentajes aplicados por vía húmeda oscilaron entre el 14% y el 20% de caucho respecto al volumen total de la mezcla, y demostraron un mejor comportamiento a la fatiga respecto a la mezcla sin modificar, disminución de los módulos y una mayor vida útil. (Figueroa & Reyes, 2006)

1.4. MARCO LEGAL

'La construcción de carreteras ha sido unos de los primeros signos de civilización avanzada'; a medida que las civilizaciones empezaron a crecer en tamaño y densidad de población, se hizo establecer un tipo de comunicación con otras regiones para hacer llegar suministros alimenticios o transportarlos a otros consumidores. De allí la necesidad de destinar una rama de la ingeniería para la planeación, proyección geométrica y operación vehicular de carreteras y calles, con el fin de 'lograr la seguridad, eficiencia y movimiento adecuado para personas y cosas'. (Lauro & Gabriel, 2005).

Por tal motivo, la Republica de Colombia creó un 'establecimiento público de orden nacional' para la ejecución de políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la infraestructura no concesionada de la Red Vial Nacional de carreteras primarias, secundarias y terciarias, de acuerdo a los lineamientos dados por el Ministerio de Transporte, denominado Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) mediante el decreto 2171 del 30 de diciembre de 1992. De igual forma, para el fortalecimiento de la estructura interna y su relación con el sector transporte, INVIAS asumió nuevas funciones con las disposiciones instituidas en los Decretos N° 2056 t 2067 del 24 de Julio de 2003. Dentro de las funciones del INVIAS se encuentran la regulación técnica relacionada con la infraestructura vial de los modos de transporte carretero, fluvial, marítimo y férreo. (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2012)

Con relación a las Normativas Internacionales sobre la caracterización y rendimiento de materiales, productos, sistemas y servicios, bajo las cuales se fundamentan las Normas

INV-E, se encuentran las establecidas por la organización American Society for Testing Materials (ASTM INTERNATIONAL), la cual establece las normas que incluyen métodos de ensayos, definiciones prácticas, clasificaciones y especificaciones. A su vez, la ASTM INTERNATIONAL se encuentra sujeto a las leyes federales (entre las que se incluyen la Ley Sherman, la Ley Clayton, la Ley de la Comisión Federal de Comercio y la Ley Robinson-Patman), a las leyes estatales y quizá también a las leyes antimonopolio y de competencia de otros países que no sean los Estados Unidos. (American Society for Testing Materials (ASTM INTERNATIONAL), 2012)

En pro de construir vías más amigables con el medio ambiente, se han iniciado estudios para la incorporación de residuos sólidos plásticos urbanos, para el mejoramiento de propiedades físico-mecánicas en mezclas asfálticas; en Colombia, dichas políticas no se encuentran aún reglamentadas, empero, la gestión correctas de estos tipos de residuos se encuentran reguladas en cada uno de los departamentos, conocidos a nivel nacional como Planes de Gestión Integral de residuos sólidos (PGIRS), bajo los lineamientos de varios decretos y resoluciones, entre los cuales se destacan el Decreto 1713 de 2002 y el Decreto 838 de 2005. (Bermúdez, 2013)

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la incorporación de desechos plásticos sobre las propiedades físico-mecánicas de una Mezcla Asfáltica Densa en Caliente (MDC-2), mediante la metodología Marshall y los ensayos complementarios pertinentes, para evaluar su uso en el diseño y construcción de pavimentos flexibles.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los agregados finos y gruesos empleados.
- Determinar la estabilidad y el flujo de las briquetas ensayadas con los diferentes porcentajes de asfalto y adiciones de residuo sólido.
- Determinar el porcentaje óptimo de desechos plásticos a incorporar en la mezcla asfáltica MDC-2, con base en los resultados obtenidos a partir de la Metodología Marshall.
- Evaluar la variación en la capa de rodadura con la incorporación del porcentaje óptimo residuo plástico, siguiendo la metodología establecida por la Guía para el diseño de Estructuras de pavimento flexible dado por la AASTHO.
- Analizar el impacto ambiental a pequeña escala que generaría la incorporación de residuos poliméricos en las mezclas asfálticas.

3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

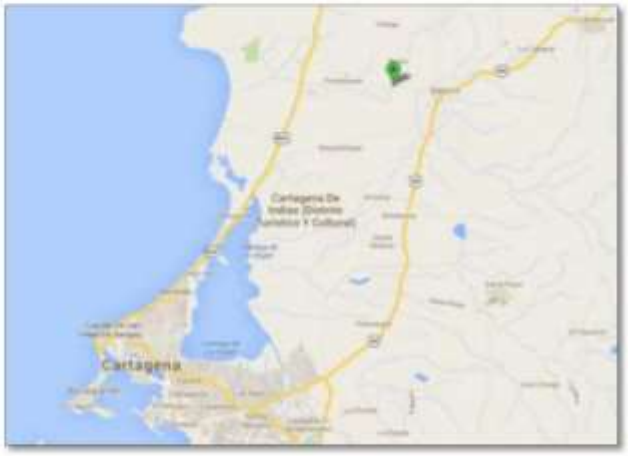
La investigación se desarrolló en el Departamento de Bolívar, bajo la jurisdicción del Distrito de Cartagena de Indias D.T. y C., el cual se encuentra ubicado sobre el Mar Caribe, cuyas coordenadas geográficas son: 10° 25' 30'' de latitud norte y 75° 32' 25'' de longitud oeste respecto al Meridiano de Greenwich, localizado en el extremo norte de la Bahía de Cartagena y al sur oriente de la Ciénega de la Virgen o de Tesca, con una extensión de 42 km (Figura 4). (Beltrán & Suárez, 2010)

Figura 4. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente. Google Maps, 2014.

La planta de producción de concretos asfálticos Torcoroma, hace parte de la Sociedad Constructora Montecarlo Vías S.A.S (Empresa patrocinadora), se encuentra ubicada hacia la vía Pontezuela-Bayunca, a unos 6 km de la carretera Vía al Mar y a 2 km de la vía Bayunca (Cartagena- Barranquilla), Figura 5. (Consultora Especializada para la Estructuración de Concesiones Viales, 2013)

Figura 5. Ubicación de los laboratorios donde se realizaron los ensayos.



Fuente. Google Maps, 2014.

El desarrollo de la investigación se dio durante el segundo semestre del presente año (2014), con una duración de cinco (05) meses; se inició con una revisión bibliografica referente a las tecnologías de mezclas asfálticas modificadas con desechos sólidos tanto a nivel internacional como nacional, las normas INVIAS aplicables a las muestras y la posterior realización de las pruebas de laboratorio pertinente.

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas, concernientes al uso de desechos plásticos como modificador potencial de mezclas asfálticas, la investigación buscó caracterizar los materiales empleados (agregados pétreos y asfalto), determinar los rangos óptimos de temperatura para el empleo del material y los porcentajes de adiciones de desperdicios plásticos, para obtener el mejoramiento en las propiedades reológicas, mecánicas y físico-químicas de las mezclas asfálticas densas en caliente, asimismo analizar la incidencia de los modificadores – tanto de forma individual como combinada – en la reducción de la capa de rodadura a partir de la metodología del método mecanicista, como el impacto medio-ambiental que tendrá reduciendo los porcentajes de desechos poliméricos

en el Distrito de Cartagena. Todo esto se logrará realizando ensayos de laboratorio y procedimientos de diseño estandarizados por las Normas INVIAS 2007, siendo comparados con una muestra testigo, aplicando principalmente la metodología Marshall, la cual permitirá identificar las mejores proporciones de los materiales para el diseño final de la mezcla.

Además se proyecta obtener resultados iguales o superiores a los mínimos establecidos por la vigente Norma INVIAS 2007:

- Los agregados pétreos y la llenante mineral para la elaboración de la MDC-2, deberán satisfacer los requisitos de calidad del aparte 400.2.1. del articulo 400 -02, *Disposiciones Generales para la ejecución de Riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas en frio y en caliente y reciclado de pavimentos asfalticos*, de la Norma. De acuerdo con dicho artículo, los agregados pétreos y la mezcla bituminosa deben cumplir con las especificaciones dadas en la Tabla 9.
- Se usará como base de diseño la gradación MDC-2, considerando que los resultados proyectados de las mezclas asfálticas serán para capas de rodaduras mayores a 300 mm.
- Se preparan por lo menos dos briquetas para cada combinación de agregados con cemento asfaltico y llenante mineral para cada una de las mezclas modificadas y la muestra testigo. Una vez frías las briquetas y extraídas del molde se espera obtener una altura menor a 2.5"; en caso contrario, se procederá a armar una nueva briqueta bajo las especificaciones de la Norma INVIAS.
- El cemento asfaltico (para MDC) debe cumplir con los requisitos de calidad en la Tabla 8.

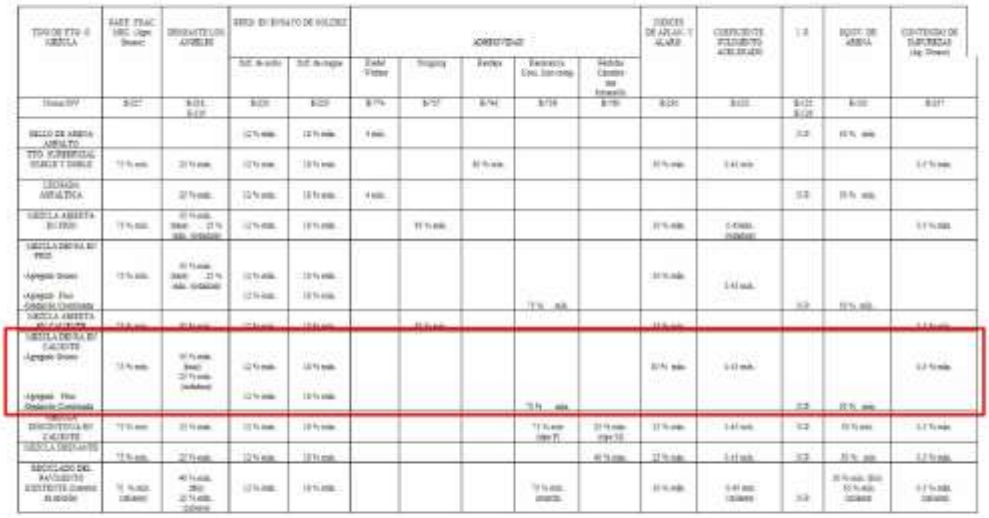
Tabla 8. Especificaciones del Cemento Asfáltico.

CARACTERISTICA		NORMA DE ENSAYO INV	60-70		80-100	
			mín	máx	mín	máx
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60° C)	P	E-716	1500		1000	
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Pérdida por calentamiento en película delgada (163°c, 5 h)	%	E-721	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento, en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-

Fuente. INVÍAS, 2014.

- Para el diseño de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo, se encuentra regida por el Articulo 450-02 *Mezcla Densa en Caliente (Concreto Asfáltico)*, siguiendo la metodología Marshall lo indicado en la Tabla 10.

Tabla 9. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos y mezclas bituminosas.



Fuente. INVÍAS, 2014.

Tabla 10. Diseño de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo.

CARACTERISTICAS		TRANSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80 kN		
		>5 x 10^6	5x10^5-5x10^6	<5 x 10^5
Compactación, golpes/cara		75	75	75
Estabilidad mínima	kg	900	750	600
Flujo	mm	2-3.5	2-4	2-4
Vacíos con aire:				
Capa de rodadura	%	4-6	3-5	3-5
Base asfáltica	%	4-8	4-8	4-8
Vacíos mínimos en agregados minerales:				
Gradación MDC-0	%	14	14	14
Gradación MDC-1	%	14	14	14
Gradación MDC-2	%	15	15	15
Gradación MDC-3	%	16	16	16
Vacíos llenos de asfalto	%	65-75	65-78	65-80

Fuente. INVÍAS, 2014.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados en el presente escrito, los resultados obtenidos de la incorporación de los modificadores se muestran en tablas, graficos y/o figuras; además, se describió de forma detallada tanto los cálculos como los análisis correspondientes a cada una de las densidades, gravedades específicas, porcentajes de vacío, porcentaje óptimo de llenante mineral y asfalto, estabilidades y flujos para cada mezcla (con PET, con PEAD, con la combinación PET-PEAD y la mezcla patrón), ayudando así a establecer la influencia de la incorporación de desechos sólidos en la misma y a su vez determinando su impacto sobre la producción de pavimentos asfalticos.

Cabe resaltar, que entre los alcances de la investigación no se contemplaron el desarrollo de ensayos de tipo dinámico, tales como Ahuellamiento, fatiga y módulo dinámico, dejando así abierta la posibilidad de ser complementado el presente proyecto. Los ensayos fueron desarrollados en la planta de producción de concretos asfálticos Torcoroma, de la empresa Montecarlo Vías S.A.S., la cual respaldó la investigación suministrando la materia prima, definida como agregado pétreo y bitumen (Anexo 1).

4. METODOLOGÍA

El enfoque de la investigación fue cuantitativo y de tipo descriptivo-experimental; ésta investigación consistió en el manejo de una o más variables -tales como la temperatura de mezclado y compactación-, rigurosamente controladas, las cuales fueron comparadas con relación al aumento o disminución de valores obtenidos por actividades establecidas y seleccionadas por el investigador, a fin de comprobar la hipótesis planteada con antelación. (Tamayo T., 2002)

De acuerdo con el tipo de investigación, se realizó una recolección de datos de laboratorio que permitieron no solo efectuar un análisis de factibilidad de la técnica para la incorporación de residuos sólidos en una mezcla asfáltica, sino además, determinar el grado de influencia de estos materiales en la estabilidad y flujo Marshall (conocida como resistencia de una mezcla asfáltica). Asimismo se determinó el porcentaje óptimo de modificador plástico a partir de la aplicación de la Normativa INVIAS 2007.

La metodología de trabajo establecida para alcanzar los objetivos propuestos y la hipótesis planteada constó de cuatro fases; la primera fase consistió en una revisión bibliográfica de la información existente con relación a mezclas asfálticas modificadas con residuos plásticos a nivel local, nacional e internacional, además, de toda la recopilación y selección de la información relacionada con el diseño y caracterización de materiales (agregados pétreos y asfalto) que conforman una Mezcla Asfáltica Densa en Caliente tipo dos (MDC-2).

La segunda fase enmarcó la selección y caracterización de los materiales, y el desarrollo de los ensayos de laboratorio necesarios para conocer las propiedades físico-química de los agregados y bitumen, y las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica teniendo en cuenta la metodología Marshall; cabe acotar, que para esta última solo se tuvo en cuenta la estabilidad y el flujo Marshall como parámetros de diseño. Esta fase fue desarrollada en la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A. (CMV S.A.) ubicada en la circunscripción del Municipio de Bayunca en el departamento de Bolívar, durante un

periodo de tiempo aproximado de dos (02) meses; CMV S.A. además de poseer una planta física y equipos de laboratorio adecuados, cuentan con la certificación de calidad ISO 9001 de 2008 (Anexo 2). Todos los materiales usados para el desarrollo de esta investigación, fueron suministrados por CMV S.A. (Anexo 1)

La tercera fase abarcó todo lo relacionado con la selección de la mejor alternativa, que no solo cumpliera con los requerimientos mecánicos proyectados en la presente investigación, sino además con las normativas INVIAS 2007; por último, la cuarta fase consistió en la evaluación de la dosificación de modificador que lograra aumentar al máximo las propiedades de la mezcla asfáltica, realizando un diseño piloto para determinar la cantidad de plástico que puede ser empleado en un kilómetro de vía, y cómo esta incorporación de plástico puede contribuir a una disminución en los volúmenes de residuos plásticos que maneja la ciudad teniendo en cuenta lo establecido en el PGIRS de la ciudad de Cartagena de Indias.

Para el desarrollo de las cuatro fases anteriormente mencionadas, se tomó un tiempo aproximado de cinco (05) meses, contados a partir del mes de Julio de 2014. En la Figura 8 se muestra grosso modo las actividades desarrolladas a través de un diagrama de flujo.

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA DE ANTECEDENTES Y ESTADO DE ARTE

Esta etapa abarcó la recopilación de la información tanto secundaria como primaria, con el fin de contar con una visión general a lo concerniente a las tecnologías de asfaltos modificados con residuos sólidos y la incidencia de los polímeros propuesto sobre una mezcla densa en caliente.

Consistió en la recolección de información acerca de capas de rodadura en pavimentos asfalticos con incorporación de residuos sólidos urbanos para el mejoramiento de propiedades reológicas, mecánicas y físico-químicas de la mezcla asfálticas, teniendo en cuenta artículos científicos, informes, libros y/o cualquier otra fuente teórica confiable en la cual se aluda al tema de investigación propuesto. Cabe destacar, que entre las fuentes de información se consideró la Base de Datos indexadas proporcionada por la Universidad de

Cartagena y algunas tesis presentadas para la obtención del título de Ingeniero Civil, páginas web y demás literatura relacionada. La consulta en bases de datos se realizó como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Criterios para la Revisión Bibliografica de Antecedentes y Estado de Arte de la incorporación de Residuos Sólidos urbanos como modificador de la mezcla asfáltica.

De igual forma, con el fin de realizar los ensayos de laboratorio de acuerdo con la normativa vigente en el país (INVIAS 2007) y establecer los formatos para la recolección de los datos pertinentes, se realizó una revisión bibliografica a las mismas, teniendo en cuenta sus objetivos y metodologías (Figura 7).

Figura 7. Criterios para el análisis de la información y datos de las normas INVIAS aplicado durante el desarrollo de la investigación.

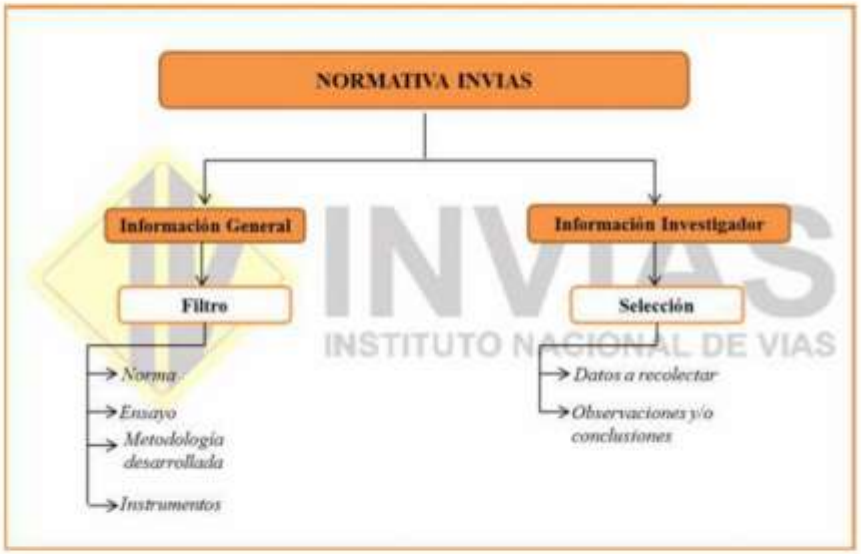
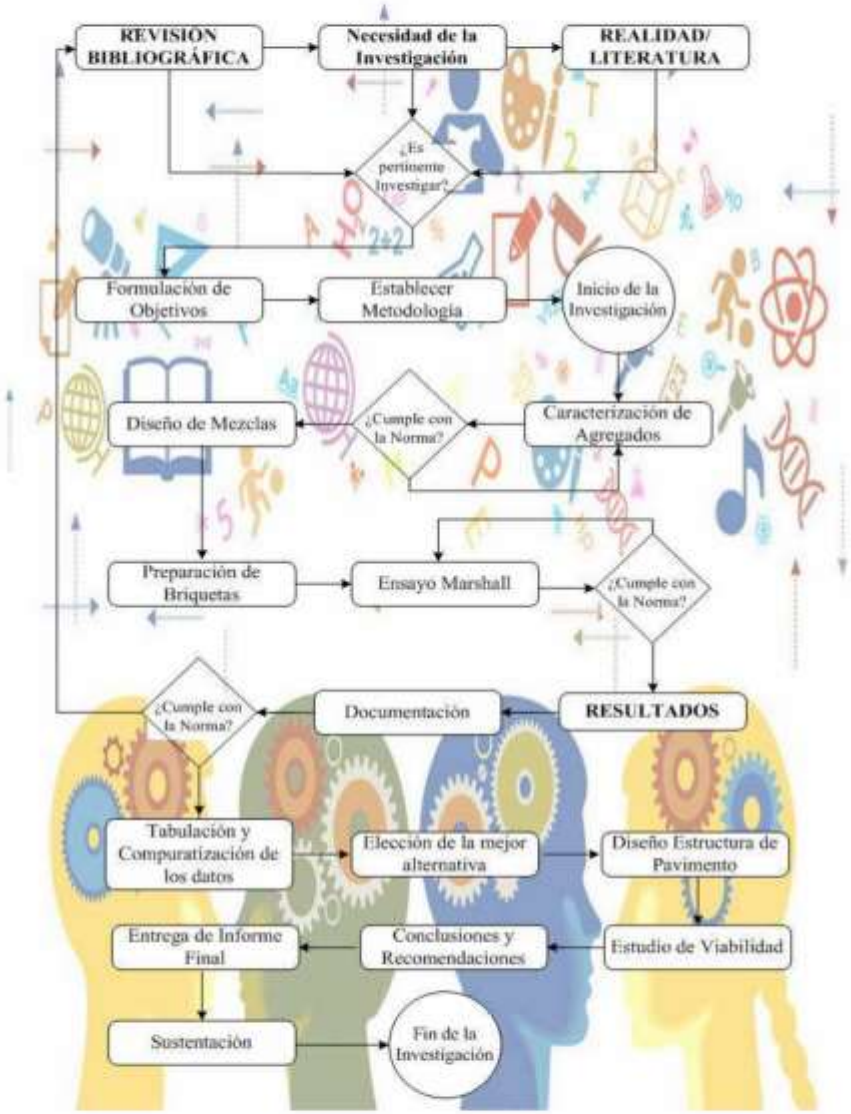


Figura 8. Diagrama de Flujo de las actividades desarrolladas.



4.2. OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para proceder a la realización de los ensayos de laboratorio para la obtención de datos primarios, se requiere contar con los materiales necesarios para el pleno desarrollo de los mismos; entre la materia prima utilizada se encuentra el asfalto, el agregado pétreo y los modificadores.

- **Asfalto y Agregados pétreos.** Estos materiales fueron suministrados por la CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S (Figura 9), producto de las actividades desarrolladas en la planta de producción de concretos asfálticos Torcoroma, en Pontezuela (Anexo 1).

Figura 9. Planta Torcoroma de la cual fueron tomados los agregados pétreos.

- **Modificadores.** Los residuos sólidos de tipo polimérico a empleados, fueron obtenidos por medio de campañas ecológicas a desarrolladas en la Universidad de Cartagena - Campus Piedra de Bolívar - , recolectando alrededor de 6 kg, distribuidos de igual forma para PET y PEAD, es decir, 3 kg de cada material. (Figura 10)

Posterior a la recolección, se procedió a realizar labores de limpieza y retiro de las etiquetas de cada uno de los envases recolectados. De igual forma, se desarrollarán labores de triturado, obteniendo partículas cuyo tamaño osciló entre 2,36 mm y 4.75 mm (de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada), el cual se realizó en primera instancia de forma manual y luego mecánicamente (por medio de un equipo alquilado).

Inicialmente se presentaron inconvenientes con el material suministrado por el proveedor ya que no cumplía con el tamaño establecido; lo anterior fue resuelto con el suministro de manera gratuita de material acorde a las necesidades de la investigación.

Figura 10. *(a)* Recolección de Residuos Plásticos (PEAD y PET), *(b)* Triturado Mecánico de residuos plásticos de HDE, *(c)* Tamizado de residuos de plástico de PEAD, *(d)* Triturado Mecánico de residuos plásticos de PET, *(e)* Pasa Tamiz No.4 de residuos de plástico de PEAD, *(f)* Tamaño final de las partículas de residuos sólidos empleadas en los ensayos.

(a) *(b)* *(c)*

(d) *(e)* *(f)*

4.3. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Con el fin de iniciar el proceso de Caracterización de los agregados pétreos y bitumen, se hizo necesario la selección de los mismos teniendo en cuenta los materiales en Stock con los que contaba la Planta de la empresa CMV S.A.S en ese momento; a continuación se explica brevemente los procesos de Selección y Caracterización de cada uno de los materiales.

4.3.1. Selección de Agregados pétreos y llenante mineral.

Para el desarrollo de la presente investigación, se tuvo en cuenta el Diseño de Mezcla para el segundo trimestre del presente año de la Planta de Mezclas Asfálticas de Torcoroma ubicada en Pontezuela. (Anexo 3)

- **Triturado de Rotinet.** Este material se extrae de la cantera de Arroyo de Piedra; su nombre se debe a las vertientes de los arroyos que se desprenden de esa zona y de los cuales se extraen los materiales que componen parte esta cantería que suministra a la planta la mayoría de los materiales gruesos como lo son triturado de 1-1/2", 1", ¾", ½" y 3/8". (
- Figura 11)

Figura 11. Triturado Rotinet; *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material

(a) *(b)*

- **Arena de San Juan.** La cantera de la cual se obtiene su nombre, se encuentra ubicada en cercanías al municipio de Luruaco. De esta cantera, se explota arena de peña de tipo aluvial, creada por formaciones anteriores de la desembocadura de un brazo del rio Cauca. El tamaño máximo de esta arena es de 3/4 ", es una arena bastante gruesa, y puede extraerse a pala o con la ayuda de un mini cargador; cabe resaltar que, la extracción requiere de mucho cuidado, ya que de tocarse el talud, se puede en primera instancia es que casi todo el material presente en el talud es de tipo arcilloso no útil en un diseño de mezcla y el segundo, es que al quitar los taludes se estaría modificando el cauce natural del arroyo. Este material se almacena y se encona en patios para sacar el exceso de humedad. (Figura 12)

Figura 12. Arena de San Juan. *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material

(a)

(b)

- **Arena Zarandeada de Palmarito.** Esta cantería se encuentra ubicada a 37 km de Cartagena, en el margen derecho de la Vía al Mar Cartagena – Barranquilla; se encarga de suministrar a la planta Torcoroma la arena triturada. (Figura 13)

Figura 13. Arena Agracar. *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material

(a)

(b)

- **Arena Palmarito.** Este material se obtiene de la cantería del mismo nombre, que se encuentra ubicada en cercanías al municipio de Arroyo de Piedra en las antiguas instalaciones de la Cantera Ingecost. (Figura 14)

Figura 14. Arena Palmarito. *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material

(a)

(b)

- **Polvillo de Campusano.** Se utilizó como llenante mineral el producido por la cantera campusano, ubicada en Turbaco y, generado por la trituración de piedra caliza. (Figura 15)

Figura 15. Arena Palmarito, Arena Palmarito, *(a)* Material en Stock de la Planta Torcoroma, *(b)* Muestra de Material

(a)

(b)

4.3.2. Selección del cemento asfaltico

Para la selección del tipo de cemento asfaltico que se utilizó en el diseño y elaboración de la MDC-2, se tuvo en cuenta la temperatura (mayor a 24°C) y el tránsito de diseño (NT2) al cual será sometido durante su vida útil; dadas las condiciones climáticas de la zona y considerando las condiciones de transito más desfavorables para el pavimento, se empleó un asfalto cuya penetración fuese 60-70, de acuerdo con las especificaciones dadas en la Norma INVIAS 2007, como se evidencia en la Tabla 11. De igual forma, CMV S.A.S. suministro el cemento asfaltico.

Tabla 11. Criterios para selección cemento asfaltico de acuerdo a la temperatura de la región.

TRANSITO DE DISEÑO (10^6 EJES DE 80 kN)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN		
	Más de 24°C	15-24°C	Menos de 15°C
Más de 5	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
Menos de 0.5	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Fuente. INVIAS, 2007

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PETREOS Y LLENANTE MINERAL

El agregado pétreo empleado para el diseño y elaboración de las Mezclas Densas en Caliente (MDC-2) de la presente Investigación se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio, de acuerdo con la Normativa INVIAS 2007 y el Diseño de Mezcla establecido en la Planta Torcoroma. (Anexo 3).

Ya que la metodología desarrollada se encuentra especificada y reglamentada en las Normas INVIAS 2007, a continuación se presenta un resumen de los diferentes ensayos realizados para caracterizar los agregados pétreos y el llenante mineral:

Tabla 12. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para caracterizar los agregados pétreos.

ENSAYOS SOBRE AGREGADOS PETREOS			
Norma	**Ensayo**	**Objetivo / Resumen Metodología**	**Observación**
INV E- 213 (Art. 450-02, mezcla densa en caliente)	Granulometría, mezcla densa en caliente	Determinar cuantitativamente los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos, por medio de tamices de abertura cuadrada. Se hace pasar el material a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menos abertura, determinando la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca de agregado.	Ya que no se cuenta con un valor de referencia aceptado para determinar las tolerancias en este método de prueba, no se pudieron determinar; los resultados de la aplicación de la normativa citada se encuentran en del Anexo 4 al Anexo 10.

Tabla12. *(Continuación)*

Norma	Ensayo	Objetivo / Resumen Metodología	Observación
INV-E 218 INV-E 219.	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles	Establecer el método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos mayores a 19 mm, mediante la máquina de los ángeles. La reducción de la muestra se hizo siguiendo el procedimiento que describe a norma INV-E- 202.	Ver Anexo 10
INV E- 133	Equivalente de Arena	Determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, material arcilloso en los agregados finos.	Ver Anexo 14
INV E-220	Sanidad de los agregados en sulfato de sodio o sulfato de magnesio	Determinar la resistencia a la desintegración de los agregados por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio; los resultados dependerán de la sal empleada.	Ver Anexo 18 y Anexo 19
INV E-227	Porcentaje de caras fracturadas	Determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos. Uno de los propósitos de estos requisitos es incrementar la resistencia al corte, aumentando la fricción entre particular en mezclas de agregados ligados y no ligados.	Ver Anexo 10, Anexo 11 y Anexo 13
INV E-223	Peso específico de agregados gruesos	Determinar peso específico aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergido en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm.	Ver Anexo 10 y Anexo 11
INV E-222	Peso específico de arenas	Determinar el peso específico aparente y real a 23/23°C, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua de los agregados inferiores a 4.75mm.	Ver Anexo 10 y Anexo 11

Tabla 12. *(Continuación)*

Norma	Ensayo	Objetivo / Resumen Metodología	Observación
INV E-230	Índice de alargamiento y aplanamiento	Determinar los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados que son empleados en la construcción de carreteras. Se define *índice de aplanamiento* el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción. Se conoce por *índice de alargamiento* al porcentaje en peso de las partículas que forman, cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción. Es aplicable a las fracciones de agregado con tamaño inferior a 6.3 mm.	Ver Anexo 15 y Anexo 16

Fuente. Adaptado de Figueroa & Reyes, 2006.

De manera complementaria, se anexan los resultados de los siguientes laboratorios desarrollados por el cuerpo tecnico de la Planta Torcoroma:

- *Contenido aproximado de materia orgánica en arenas, INV 212 (Anexo 17)*
- *Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones De sulfato de sodio o de magnesio en agregados gruesos y finos, INV 220.(Anexo 18 y Anexo 19)*
- *Cubrimiento de los agregados con materiales asfalticos en presencia del agua (Stripping). (Anexo 20)*
- *Peso especifico máximo teórico de la mezcla asfáltica (Rice). (Anexo 21)*
- *Inmersión Compresión, INV 738.(Anexo 22)*
- *Diseño Marshall. (Anexo 23)*
- *Graficas de Diseño Marshall. (Anexo 24)*
- *Dosificación analítica teniendo en cuenta el artículo 450. (Anexo 25 y Anexo 26)*

4.5. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO

La caracterización del cemento asfaltico fue proporcionado por la empresa CMV S.A.S; esta caracterización es suministrada a su vez por la empresa ECOPETROL S.A., la cual realiza los ensayos exigidos por las normas ASTM, que tiene los mismos rangos establecidos en la normativa INVIAS. (Anexo 27)

Esta caracterización no se pudo realizar por que la planta de asfalto Torcoroma no cuenta con los equipos necesarios para la realización de los ensayos impuestos por el INVIAS.

A su vez, la empresa ECOPETROL S.A. certifica y garantiza los datos que se encuentran en el Anexo 28 lo cual da confiabilidad para tomar estos como referencia en la investigación. Los rangos no son utilizados en ningún proceso de cálculo para la mezcla MDC-2 solo fueron obtenidos para garantizar que el asfalto utilizado contara con las características similares a lo recomendado por las especificaciones INVIAS 2007.

Los ensayos que se realizan en la empresa ECOPETROL S.A. al cemento asfaltico son: *Ensayo de penetración (E-706-07), Índice de penetración (E-724-07), Viscosidad absoluta (E-716-07), Ductilidad (E-702-07), Solubilidad en tricloroetileno (E-713-07), Contenido de*

agua (E-704-07), Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland o punto de Chispa (E-709-07), Perdida por calentamiento en película delgada (E-721-07), Penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento, en porciento de la penetración original (E-706-07), Punto de ablandamiento (E-712-07) e Incremento en el punto de ablandamiento luego de la perdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-712-07). (Anexo 28)

4.6. DISEÑO Y ENSAYOS SOBRE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

El método de diseño empleado para la presente investigación para el tipo de mezcla densa en caliente escogida (MDC-2) es la metodología Marshall (INV-E 738-07) y los respectivos ensayos complementarios (Anexo 29), de acuerdo con los procedimientos y especificaciones establecidas por la normativa INVIAS 2007; así mismo, este ensayo fue útil no solo para determinar las deformaciones plásticas de las briquetas que resultaron, sino además determinar el porcentaje óptimo de plástico para el diseño de mezcla determinado previamente.

Para cada diseño, se utilizaron siete porcentajes de plástico (PET y PEAD) y cinco relaciones de los residuos en conjunto (PET-PEAD), con lo cual se generó una curva que permitió determinar con mayor precisión el porcentaje óptimo de cada tipo de polímero.

En la elaboración de las briquetas cilíndricas con dimensiones de 1101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2-1/2") de altura; se utilizó la dosificación que más se ajustó a los límites de la franja, con un peso total de 4000 g por cada porcentaje de plástico con 5.5% de asfalto, lo que permitió que se elaboraran tres briquetas. Dicha elaboración consistió en calentar en una estufa los agregados pétreos y llenante en sus proporciones como se muestra en la Tabla 13 hasta una temperatura de 150°C; de igual manera, se calentó el asfalto a una temperatura de 170°C hasta notar que este estuviera viscoso.

Luego de estar ambos en su punto de temperatura, se colocó en un recipiente sobre la balanza – previamente tarado - los agregados y llenante; se procedió a extraer en peso el porcentaje equivalente a la cantidad de plástico y cemento asfaltico a adicionar a la mezcla, se llevó a la estufa eléctrica y se mezcló hasta una temperatura de 150°C; posteriormente se

adiciono el asfalto. Para garantizar que todas las partículas de los agregados quedaran cubiertas con el asfalto se mezcló, permitiendo así una mejor adherencia entre ellas, la mezcla se dejó en la estufa hasta que llegara a una temperatura aproximada entre 120°C a 150°C, para ser compactada en el molde con el martillo Marshall, se chequeaba la temperatura de compactación de las mezclas, la cual no podía ser mayor a 130°C. Después de verificar todo lo anterior, se dio paso a compactar la mezcla con 75 golpes en cada cara del molde y se dejó reposar la mezcla durante una hora para que no se desmoronaran al momento de realizar la extracción del molde. (Figura 16)

Tabla 13. Porcentaje y equivalente en peso de los materiales empleados.

MATERIAL		PORCENTAJE		PESO EQUIVALENTE		
Triturado pasa ¾"		20%		800 g		
Triturado pasa ½"		35%		1400 g		
Arena Palmarito Lavada		20%		800 g		
Arena Palmarito Sin Lavar		20%		800 g		
Llenante mineral		5%		200 g		
Asfalto		5.5%		220 g		
PLASTICOS						
0.25%	0.5%	0.6%	0.75%	0.8%	1%	1.5%
10 g	20 g	24 g	30 g	32 g	40 g	60 g

Figura 16. *a)* Calentamiento de los agregados pétreos y llenante mineral, *(b)* Calentamiento de cemento asfaltico en horno, *(c)* Pesaje de los materiales, *(d)* Incorporación de los modificadores y cemento asfaltico, *(e)* Mezclado de materiales realizado por investigador, *(f)* Mezclado de materiales realizado por laboratorista de la Planta, *(g)* Compactación realizado por el auxiliar de laboratorio de la Planta, *(h)* Compactación realizado por investigador, *h)* Mezcla compactada en los moldes.

Pasadas veinticuatro horas, se realizaron los ensayos de tipo volumetrico, los cuales consistieron en pesar la briqueta seca, luego sumergida en un tanque con agua para pesarla y superficialmente seca para tomar su peso. De este proceso se obtuvieron tres datos que se

utilizaron para verificar las características de la mezcla (peso seco, peso sss, y peso en agua). Para determinar la estabilidad y flujo de la mezcla de las briquetas, éstas fueron sumergidas en baño maría durante 30 minutos a una temperatura de 60°C, para luego ser ensayadas en la Maquina de Marshall la cual género como resultado la estabilidad y flujo de la mezcla, los cuales son parámetros importantes en las mezclas asfálticas. Para cada porcentaje de asfalto se obtuvieron quince resultados que correspondían a estabilidad (3), flujo (3) y vacíos o volumétricos (9), cada uno de los resultados fueron piezas importantes en la determinación del porcentaje óptimo de plásticos, además que eran los parámetros de diseños más estrictos de las especificaciones INVIAS 2007. Los resultados fueron graficados en una hoja programable facilitando su análisis en busca de obtener mejores conclusiones.

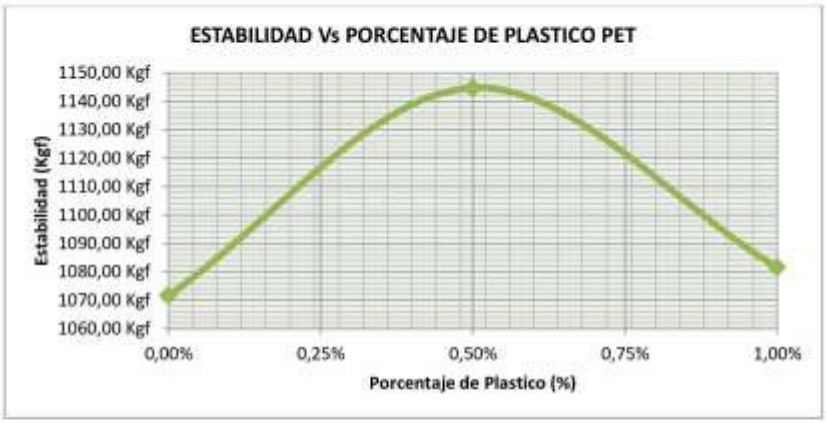
4.6.1. Determinación del Porcentaje óptimo de plástico

Para la determinación del porcentaje óptimo de plástico de la mezcla se tuvo en cuenta los parámetros tanto económicos como técnicos que rigen el contenido óptimo de plástico en la fórmula de trabajo.

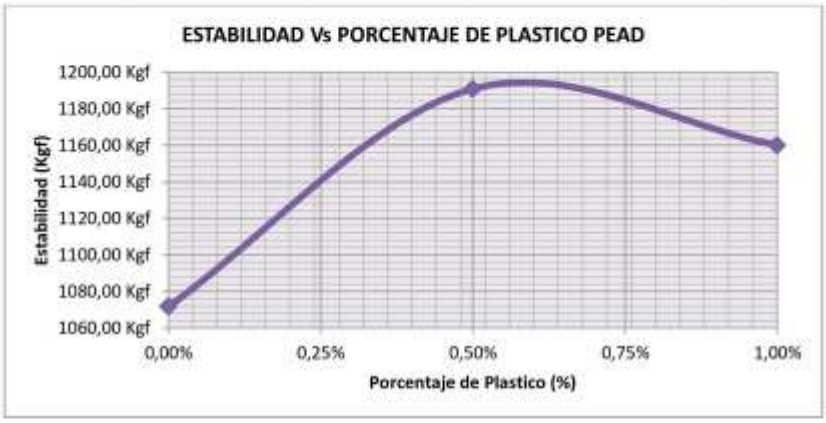
Los parámetros técnicos que se tuvieron en cuenta en esa investigación son los impuestos en las especificaciones INVIAS, que tienen como principales requisitos estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

El procedimiento en la determinación de dicho porcentaje consistió en un simple descarte, si uno de los diseños no cumplía por lo menos con uno de los parámetros impuestos por las especificaciones era retirado y se proseguía con el siguiente hasta encontrar un porcentaje que cumpliera con todos los requisitos o estuviera cerca de cumplirlos. Para determinar los porcentajes a evaluar, se inició con un ensayo patrón para observar el comportamiento de las curvas de estabilidad y flujo; se inició con 0%, 0.5% y 1% (Grafica 5 y Grafica 6) y posteriormente se procedió con puntos intermedios.

Grafica 5. Ensayos Marshall iniciales para observar el comportamiento de la mezcla al incorporar PET.



Grafica 6. Ensayos Marshall iniciales para observar el comportamiento de la mezcla al incorporar PEAD.



Luego de obtener los porcentajes óptimos de cada tipo de plástico se mezclaron (PET-PEAD) primando el material que incrementara las propiedades anteriormente mencionados, probando proporciones 50-50%, 60-40%, 70-30%, 80-20% y 90-10%.

En el caso que se presentaran dos o más puntos que cumplieran, fue criterio del investigador decidir cuál porcentaje tomar teniendo en cuenta la parte económica y técnica del diseño.

A manera de resumen la Tabla 14 muestra el número de ensayos realizados por cada tipo de polímeros y la breve justificación de los mismos.

Tabla 14. Número de ensayos realizados por cada tipo de residuo.

TIPO DE POLIMEROS	NUMERO DE ENSAYOS	JUSTIFICACIÓN
PATRÓN	*6*	Sin contenido de plástico.
PET	*39*	Se realizaron ensayos con porcentajes de plástico equivalentes a 0.5% y 1%; se procedió a ser pruebas con puntos intermedios para ratificar o no el comportamiento mostrado inicialmente. Por error se empleó un asfalto modificado lo cual arrojo un comportamiento anormal en la curva. Se realizaron 15 pruebas de control para establecer definitivamente el comportamiento final de la curva y para corroborar el mismo.
PEAD	*30*	De igual forma se realizaron ensayos iniciales con porcentajes de residuo de 0.5% y 1%; ya que las evaluaciones se desarrollaban de manera simultánea se presentó el mismo inconveniente, por tano se requirió realizar 12 pruebas de control.
PET-PEAD	*10*	Una vez encontrados los porcentajes óptimos de residuo de cada tipo se procedió a evaluar su comportamiento en conjunto primando el polímero que al ser incorporado maximizara las propiedades mecánicas; por cada combinación se realizaron dos ensayos.
TOTAL	***85 Briquetas***	

4.7. DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

En pro de evaluar la efectividad en la incorporación de residuos plásticos de PET, PEAD y la mezcla de los mismos en mezclas asfálticas, y teniendo en cuenta lo establecido en el Artículo 450-07 de la normativa INVIAS se eligió la proporción que presentará una variación significativa en relación a la muestra testigo.

Por consiguiente, procedió a realizar un diseño a partir de datos establecidos en un ejemplo ilustrativo del libro *Ingeniería de Pavimentos Fundamentos, estudios básicos y diseño (3 edición)* los cuales son netamente teóricos; se empleó como metodología de diseño la establecida en la *AASHTO Guide for Design Pavement Structure 1993 (Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento)*.

4.8. EVALUACIÓN TECNICA, ECONOMICA Y MEDIO AMBIENTAL

Con los resultados obtenidos a partir del diseño definitivo, se realizó un comparativo entre la mezcla con y sin ausencia de plástico tanto a nivel técnico, económico y medio ambiental.

✓ Para la evaluación técnica se tuvo en cuenta los límites establecidos por la normativa y los resultados obtenidos a partir del diseño.

✓ Para la evaluación económica, se realizó un Análisis de Precios Unitarios (APU) siguiendo el esquema mostrado en la Tabla 15 y los precios estándares manejados en el mercado.

✓ Para la evaluación medio ambiental; ya que la presente iniciativa busca generar un impacto ecológico positivo, se realizó un análisis estadístico ambiental a pequeña escala, el cual consistió en determinar la cantidad de residuos sólidos que se podrían emplear en un (1) kilómetro de vía a construir en pavimento flexible, y posteriormente establecer sí el uso de estos materiales contribuyen a la reducción anual de residuos sólidos en Cartagena,

teniendo en cuenta las ratas de crecimiento de desechos de este tipo en la ciudad, y partiendo de un valor inicial de residuos plásticos de 226 toneladas por día de acuerdo con la información suministrada por el PGIRS vigente de la ciudad. (Alcaldía de Cartagena. *et al.*, 2007).

Ya que no se pudo determinar la rata de crecimiento anual de los residuos plásticos en Cartagena, se tomó como punto como valor de referencia el anteriormente mencionado.

Tabla 15. Modelo para el Análisis de Precios Unitarios

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
PROYECTO:	Pavimentos Ecológicos: Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de una Mezcla Densa en Caliente (MDC-2) Modificada con Desechos Plásticos					
ITEM	Mezcla densa en Caliente (MDC-2)				**UNIDAD**	TON
I. EQUIPO						
Descripción		**Tipo**	**Tarifa/Hora**	**Rendimiento**	**Valor-Unit**	
PLANTA DE ASFALTO			$ 580.000,00	75,00	$ 6.680,07	
CARGADOR DE LLANTAS			$ 175.200,00	75,00	$ 2.336,00	
PLANTA ELECTRICA			$ 163.000,00	75,00	$ 2.173,33	
MONTACARGAS			$ 60.000,00	75,00	$ 800,00	
HERRAMIENTAS MENORES			$ 500,00	1,00	$ 500,00	
					SUBTOTAL	$ 12.476,00
II. MATERIALES						
Descripción		**UND**	**Tarifa/Hora**	**Cantidad**	**Valor-Unit**	
TRITURADO 3/4"		TON	$ 50.224,00	0,20	$ 10.044,80	
TRITURADO 1/2"		TON	$ 30.786,00	0,35	$ 10.775,10	
ARENA PALMARITO LAVADA		TON	$ 22.955,00	0,20	$ 4.590,00	
ARENA PALMARITO SIN LAVAR		TON	$ 17.543,00	0,20	$ 3.508,72	
LLENANTE MINERAL		TON	$ 14.431,00	0,05	$ 721,55	
ASFALTO 60-70		KG	$ 1.240,00	55,00	$ 68.200,00	
AGUA		M3	$ 2.000,00	1,00	$ 2.000,00	
FUEL OIL		GL	$ 2.500,00	5,00	$ 12.500,00	
ACPM		GL	$ 8.200,00	0,10	$ 820,00	
DESPERDICIO (5%)		%	$ 1.225,23	5,00	$ 6.126,15	
					SUBTOTAL	$ 121.306,92
III. TRANSPORTES						
Material	**Vol., Peso o Cant.**	**Distancia**	**M3-KM**	**Tarifa**	**Valor-Unit**	
MATERIAL INTERNO	1,3	1	1,30	$ 1.000,00	$ 1.300,00	
					SUBTOTAL	$ 1.300,00
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	**Jornal**	**Prestaciones**	**Jornal Total**	**Rendimiento**	**Valor-Unit**	
LABORATORISTA	$ 80.000,00	200,00%	$ 120.000,00	300,00	$ 240,00	
AUX. DE LABORATORIO	$ 26.667,00	200,00%	$ 53.334,00	300,00	$ 106,67	
ALMACENISTA	$ 4.587,00	200,00%	$ 9.174,00	900,00	$ 18,30	
BASCULERO	$ 22.293,00	200,00%	$ 44.586,00	500,00	$ 89,17	
OPER. PLANTA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
OPER. CALDERA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
AYUDANTES	$ 114.666,67	200,00%	$ 229.333,34	500,00	$ 458,67	
					SUBTOTAL	$ 1.232,81
				TOTAL COSTO DIRECTO		$ 136.314,77
				ADMINISTRACIÓN	10%	$ 13.631,48
				UTILIDAD	5%	$ 6.815,74
				IMPREVISTOS	10%	$ 13.631,48
				COSTO TOTAL		$ 170.393,47
				DENSIDAD SUELTA	**(TON/M3)**	1,8

5. RESULTADOS

Con base en la revisión bibliografica realizada, desarrollo de la metodología y procedimientos descritos en las normas mencionadas, se presenta a continuación los resultados y análisis respectivos permitiendo obtener un resultado definitivo una mezcla optima que puede ser utilizada en la ciudad de Cartagena.

5.1. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA EN LA REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

La información tuvo como pilar principal la información y los resultados obtenidos con el Proyecto POLYMIX desarrollado por la Universidad de Cantabria (UNICAN) con el apoyo de entes publicos y privados; otra fuente principal de información para la investigación fueron los artículos suscritos a la base de datos *Science Direct* y algunos de la *Asce Library*, presentando grandes dificultades de accesibilidad en esta ultima. En la fase de revisión bibliografica de antecedentes y estado del arte se contó con alrededor de 60 artículos cientificos recientes, aclarando que el proceso de selección de los mismos dependió directamente a criterio personal del investigador, teniendo en cuenta los objetivos de la bibliografía; sin embargo, la información se filtró a partir de palabras claves, excluidos y términos relacionados como se expone en la Figura 6. En la Tabla 16 se relacionan los artículos seleccionados y expuestos en este escrito.

Tabla 16. Artículos cientificos de bases de datos tomados como referencia acerca del uso de residuos plásticos en mezclas asfálticas.

NOMBRE	AUTOR	AÑO	OBJETIVO
Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive	V.S. PUNITH A. VEERARAGAVAN	2007	Investigar el rendimiento, propiedades de ingeniería de mezclas modificas, humedad y la temperatura de susceptibilidad de mezclas asfalticas modificadas con PE de compactación giratoria

Tabla 16. *(Continuación).*

NOMBRE	AUTOR	AÑO	OBJETIVO
A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements	YUE HUANG ROGER N. BIRD OLIVER HEIDRICH	2007	Realizar una revisión bibliografica del uso de residuos solidos como materiales para pavimentos asfalticos.
Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact	YONGJIE XUE HAOBO HOU SHUJING ZHU JIN ZHA	2008	Diseñar una mezcla asfaltica de acuerdo con el metodo volumetrico que cumpla con las pruebas de impacto ambiental por el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad EPA
A review of using waste and virgin polymer in pavement	ZAHRA NILOOFAR KALANTAR, MOHAMED REHAN KARIM ABDELAZIZ MAHREZ	2012	Revisar y comparar los beneficios de la utilización de los residuos y del uso de polímeros vírgenes en pavimentos asfalticos.
Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt	WAN MOHD NAZMI WAN ABDUL RAHMAN ACHMAD FAUZI ABDUL WAHAB	2013	Determinar el porcentaje optimo y los efectos del uso de PET reciclado como reemplazo parcial de agregado fino en mezclas asfalticas de acuerdo con el comportamiento de deformación y rigidez permanente

Asimismo se complementó la información con libros, páginas web, artículos indexados publicados en línea, y demás literatura, entre esta la Normativa colombiana e internacional (si aplicaba) que permitiera complementar el presente documento. En la actualidad la Universidad de Cartagena no cuenta con investigaciones relacionadas con el uso de residuos plásticos en mezclas asfalticas.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Para el diseño y elaboración de las mezclas asfálticas en caliente objeto de la presente investigación, fue imprescindible la caracterización de los agregados pétreos, llenante mineral y cemento asfaltico con los que se contó, para lo cual se realizaron una serie de ensayos – mencionados anteriormente –los cuales garantizaron la aceptación de los materiales teniendo en cuenta las especificaciones INVIAS (Tabla 9), y que traerían como resultado un mejor comportamiento y calidad de las mezclas.

Tabla 17. Granulometrà Triturada Cantera Rotinet.

NORMA DE ENSAYO E-213				
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	
mm	No.		TOTAL	ACUMULADO
25,0	1"	0,00	0,00	0,00
19,0	3/4"	0,00	0,00	0,00
12,5	1/2"	1744,00	74,40	74,40
9,5	3/8"	504,00	21,50	95,90
4,80	No. 4	74,00	3,20	99,10
2,0	No. 10	2,00	0,10	99,10
0,43	No. 40	2,00	0,10	99,20
0,180	No. 80	2,00	0,10	99,30
0,075	No. 200	6,00	0,30	99,60
	FONDO	10,00	0,4	100,0

Grafica 7. Curva Granulométrica Triturada Cantera Rotinet.

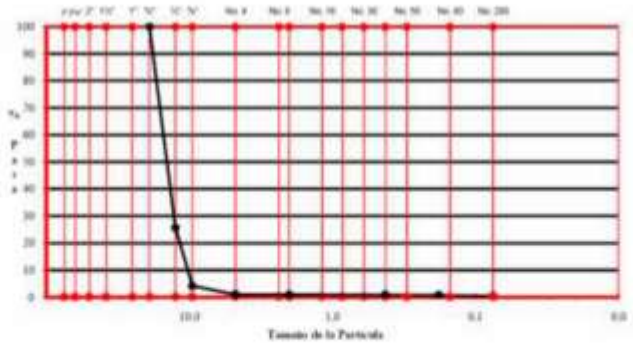


Tabla 18. Granulometría Arena de San Juan.

NORMA DE ENSAYO E-213				
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	
mm	No.		TOTAL	ACUMULADO
25,0	1"	0,00	0,00	0,00
19,0	3/4"	0,00	0,00	0,00
12,5	1/2"	0,00	0,00	0,00
9,5	3/8"	156,00	8,67	8,67
4,80	No. 4	598,00	33,24	41,91
2,0	No. 10	414,00	23,01	64,92
0,43	No. 40	312,00	17,34	82,27
0,180	No. 80	96,00	5,34	87,60
0,075	No. 200	72,00	4,00	91,61
	FONDO	151,00	8,39	100,00

Gralica 8. Curva Granulométrica Arena San Juan.

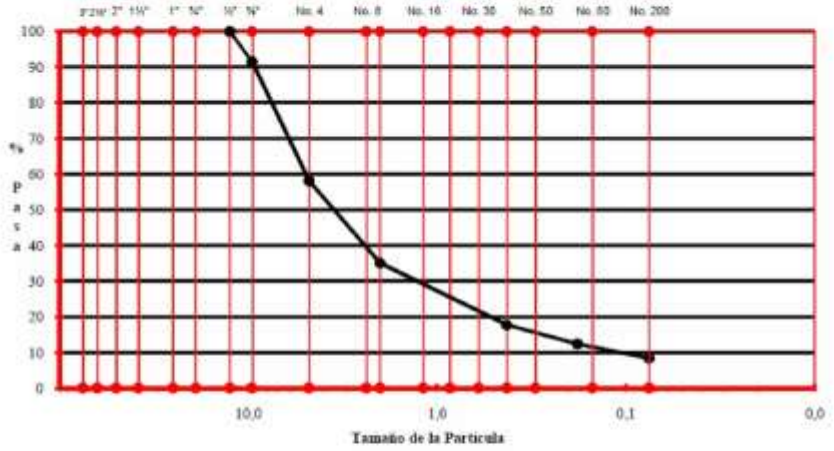


Tabla 19. Granulometría Arena Zarandeada de Palmarito

NORMA DE ENSAYO E-213				
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	
mm	No.		TOTAL	ACUMULADO
25,0	1"	0,00	0,00	0,00
19,0	3/4"	0,00	0,00	0,00
12,5	1/2"	0,00	0,00	0,00
9,5	3/8"	52,00	3,07	3,07
4,80	No. 4	322,00	19,01	22,08
2,0	No. 10	260,00	15,35	37,43
0,43	No. 40	452,00	26,68	64,11
0,180	No. 80	410,00	24,20	88,31
0,075	No. 200	76,00	4,49	92,80
	FONDO	122,00	7,20	100,00

Gráfica 9. Curva Granulometrica Arena Zarandeada de Palmarito

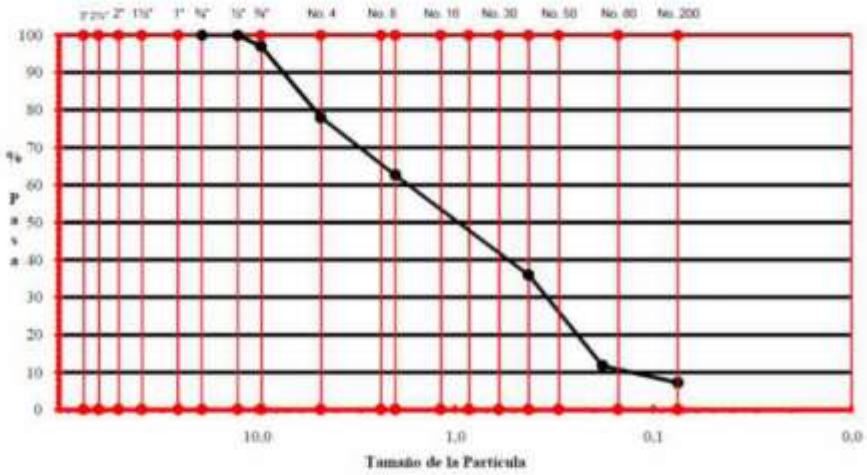


Tabla 20. Granulometría Arena Palmarito lavada.

NORMA DE ENSAYO E-213				
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	
mm	No.		TOTAL	ACUMULADO
25,0	1"	0,00	0,00	0,00
19,0	3/4"	0,00	0,00	0,00
12,5	1/2"	0,00	0,00	0,00
9,5	3/8"	16,00	0,8	0,78
4,80	No. 4	266,00	13,0	13,78
2,0	No. 10	476,00	23,3	37,03
0,43	No. 40	624,00	30,5	67,51
0,180	No. 80	492,00	24,0	91,55
0,075	No. 200	102,00	5,0	96,53
	FONDO	71,00	3,5	100,00

Gráfica 10. Curva Granulométrica Arena Palmarito lavada.

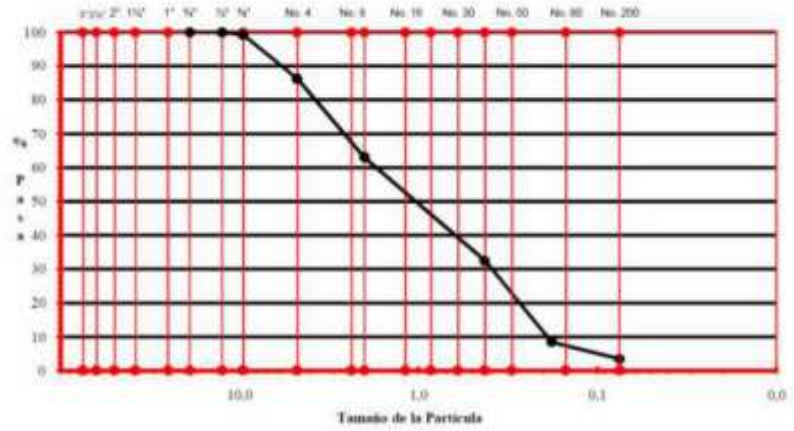


Tabla 21. Granulometrá Polvillo de Campusano

NORMA DE ENSAYO E-213				
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO	
mm	No.		TOTAL	ACUMULADO
25,0	1"	0,00	0,00	0,00
19,0	3/4"	0,00	0,00	0,00
12,5	1/2"	0,00	0,00	0,00
9,5	3/8"	0,00	0,0	0,00
4,80	No. 4	28,00	1,7	1,68
2,0	No. 10	430,00	25,7	27,43
0,43	No. 40	584,00	35,0	62,40
0,180	No. 80	188,00	11,3	73,65
0,075	No. 200	146,00	8,7	82,40
	FONDO	294,00	17,6	100,00

Grafica 11. Curva Granulometrica Polvillo de Campusano

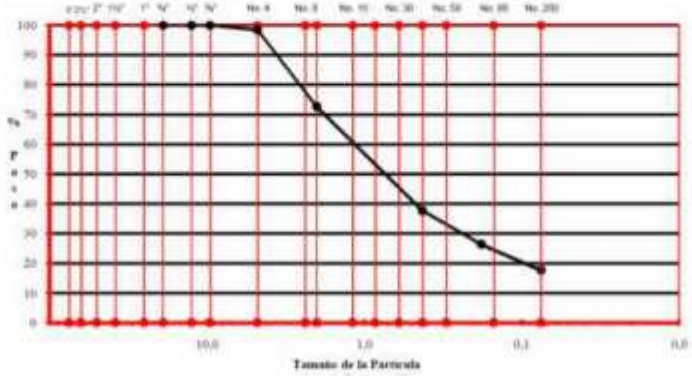


Tabla 18 a la Tabla 21 se obtuvo el módulo de finura del agregado teniendo en cuenta lo indicado en la INV E 213-07, la cual especifica:

"Se calcula el módulo de finura, cuando así se prescriba, sumando los porcentajes totales de material en la muestra, retenidos en los tamices siguientes y dividiendo la suma por 100: tamices 150 µ m (No.100), 300 µ m (No.50), 600 µ m (No.30),1.18 µ m (No.16), 2.36

mm (No.8), 4.75mm (No.4), 9.5 mm (3/8"), 19.0 mm (3/4"), 37.5 mm (1/2"), y mayores que aumenten en relación 2 a 1". (INVIAS, 2007)

$$MF = \frac{\sum \%Ret.acum.\left(No.100, No.50, No.30, No.16, No.8, No.4, {}^{3}/_{8}", {}^{3}/_{4}", {}^{1}/_{2}"\right)}{100} \quad (1)$$

El módulo de finura de un agregado fino indica aproximadamente la proporción de finos o gruesos que tienen las partículas que lo constituyen; cuanto mayor sea el modulo más grueso es el agregado.

Tabla 22. Módulo de Finura.

MODULO DE FINURA	INDICATIVO
2.3	Se trata de una arena fina
2.3 a 3.1	Se trata de una arena mediana
> 3.1	Se trata de una arena gruesa

Fuente. (Mier Cantero & Reyes Yepes, 2009)

Tabla 18 a la Tabla 21 y aplicando la ecuación (1), se determinaron los módulos de finura:

Tabla 23. Análisis de Granulometría de Agregados pétreos.

ARENA	MÓDULO DE FINURA	ANALISIS
Arena de San Juan	3.77	Se considera que es una arena gruesa de buena gradación, lo que permite que la mezcla tenga una mejor estabilidad gracias a los vacíos entre los agregados; esta arena se caracteriza por poseer muy pocos finos en su granulometría.
Arena Zarandeada de Palmarito	3.078	Se considera una arena media de gradación regular; lo anterior permite a la mezcla una buena estabilidad.
Arena Palmarito	3.072	
Polvillo de Campusano	2.475	Se considera una arena media de gradación regular; lo anterior permite a la mezcla una buena estabilidad. Esta arena presentó en su granulometría una considerable cantidad de finos lo que restringió un poco su uso en la dosificación.

Se puede concluir que tanto el Triturado de Rotinet, las arenas (Palmarito y San Juan) cumplen con los requisitos que establecen las especificaciones INVIAS 2007, para poder ser considerados como materiales aptos para su empleo en el diseño y elaboración de las mezclas asfálticas. La granulometría también permitió determinar cuales de estos agregados se podía utilizar, teniendo en cuenta la franja granulométrica impuesta a cada una de estas por las normas INVIAS.

Con el peso retenido que se obtuvo de la gradación realizada a cada material, se calcularon los porcentajes acumulados, totales, que pasa y las gráficas granulométricas como se muestran en los anexos Anexo 6 al Anexo 9.

5.3. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO

Teóricamente es conocido que el asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga; es más dura a bajas temperaturas y más blanda a altas, por lo que se seleccionó el cemento asfaltico de penetración 60-70, siendo éste el más conveniente según las especificaciones INVIAS 2007 (Tabla 11) para utilizar en una ciudad de Cartagena donde se presentan temperaturas anuales de 28°C.

Además se asumió un tránsito de diseño NT2 y capa de rodadura, considerando las condiciones más desfavorables para el diseño de las mezclas objeto de la presente investigación.

Es conveniente aclarara que en Colombia solo se tiene la posibilidad de utilizar dos tipos de asfaltos, provenientes de Barrancabermeja, Cartagena y Apiay, los cuales presentan clasificación entre AC 60-70 y AC 70-80, según lo indican los estudios recientes adelantados por la Universidad del Cauca y el Instituto Colombiano del Petróleo.

El cemento asfaltico que se utilizó para el desarrollo de esta investigación es el mismo que se utiliza en la planta de asfalto Torcoroma para la producción de mezclas asfálticas en caliente, el cual les suministra la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) ubicada en Barrancabermeja.

La planta de asfalto Torcoroma no cuenta con los equipos necesarios para el desarrollo de los ensayos para verificación de la calidad del cemento asfaltico con la cual trabajan, por tal razón y en vista del gran prestigio, confiabilidad y reconocimiento a nivel nacional e internacional con la que cuenta ECOPETROL, se tomaron los resultados de los ensayos que realiza dicha empresa a sus productos y de los cuales envían reportes de calidad actualizados, como resultado de la caracterización del cemento asfaltico que se utilizó para el desarrollo de la investigación, (Tabla 24 y Anexo 28); como se puede observar, estos resultados cumplen cabalmente con las especificaciones dadas por la normativa INVIAS (Tabla 8).

Tabla 24. Resultado de caracterización del cemento asfaltico.

CARACTERISTICAS	Cemento Asfaltico
Penetración a 25°C (0.1 mm)	67
Ductilidad a 25°C (cm)	140
Punto de Ablandamiento (°C)	47,8
Solubilidad en TCE (%)	99,9
Punto de Llama (°C)	294
Índice de penetración	-0,9
Pérdida de masa (%)	-0,2

5.4. DOSIFICACIÓN ANALITICA

Después de obtener las granulometrías de cada material y verificar su cumplimiento con las especificaciones INVIAS 2007, se seleccionaron los materiales que podían hacer parte de cada una de las mezclas, dependiendo de la franja granulométrica impuestas para cada una de ellas en dichas especificaciones; en este documento solo se indicaran las dosificaciones finales y gradaciones que fueron utilizadas para las mezclas. (Tabla 13 y Anexo 26)

Luego de realizar cada uno de los ensayos, se introdujeron los datos en la hoja de cálculo programable que le correspondía a cada uno, esta realizo los cálculos necesarios para determinar las características que se buscaban en cada ensayo. (Anexo 10)

Se observó que la mezcla presenta un alto porcentaje de partículas fracturadas porque posee en su gradación un numero aceptable de agregados gruesos que en su composición tienen

grandes porcentajes de caras fracturadas que le aportan a la mezcla un mejor comportamiento ante esfuerzos cortantes, dicha gradación presenta un desgaste en la máquina de los ángeles equivalente a 22.8%, lo que permite inferir que las partículas con gran tamaño tienden a ser desgastadas mucho más fácil que las de tamaño menor.

El equivalente de arena – que en este caso fue del 55% - se encuentra dentro de los límites permitidos (>50%) y establecidos por las especificaciones.

A manera de resumen, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización:

Tabla 25. Resultados útiles para la Dosificación Analítica.

CARACTERISTICAS	NORMA INV	Agregado Grueso	Agregado Fino (Arena)	ESPEC.
Partículas fracturadas mecánicamente (%)	E-227	92,9		>75
Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	E-218, E-219	22,8		<25
Pérdida de solidez en sulfato de sodio (%)	E-220	4,90	5,33	<12
Índice de aplanamiento (%)	E-230	26,00		<35
Índice de Alargamiento (%)	E-230	24,00		<35
Plasticidad (%)	E-125, E-126	NP	NP	NP
Equivalente de Arena (%)	E-133		55,0	>50
Resistencia Conservada Inmersión Compresión (%)	E-738	20,60%		<25
Peso Específico ponderado	E-223	2,521	2,564	**2,547**

5.5. RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

Con la dosificación final obtenida a partir de los ensayos de Caracterización, se elaboraron tres briquetas por cada porcentaje de plástico; para poder verificar que las mezclas cumplían con los requerimientos de estabilidad, flujo y condiciones volumétricas por el

INVIAS 2007 fue necesario realizar los ensayos correspondientes (Anexo 29) y comparar los resultados que estos arrojaron con los límites establecidos por dicha norma (Tabla 26).

Tabla 26. Criterios de diseño de la Mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

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

* Para bacheos en capas de 50 a 75 mm de espesor se exigirán los requisitos de vacíos con aire de "intermedia" y para los de capas de más de 75 mm se exigirán los requisitos para "base". Si se llegase a efectuar un bacheo con mezcla asfáltica en caliente en espesor mayor de 75 mm en una vía cuyo tránsito de proyecto es NT1, se aplicará el criterio de vacíos con aire para las capas de "base" con tránsito NT2 (5%-9%).

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2007

Se realizó el ensayo Marshall sin adición de los polímeros elegidos para la investigación, con el porcentaje óptimo de asfalto y la distribución de agregados pétreos y llenante mineral, teniendo en cuenta el diseño de mezcla que se manejaba en la Planta Torcoroma en el tiempo que se desarrolló la investigación. (Anexo 3).

Para la mezcla con plástico incorporado se reemplazó material granular por los residuos plásticos respecto al peso. El ensayo Marshall se desarrolló con las proporciones indicadas en la Tabla 13, realizando variaciones desde 0,5% hasta 1,5% con intervalos 0,1%

aproximadamente solo para el tramo comprendido entre 0,25% y 1%, contando con un porcentaje óptimo de asfalto equivalente al 5%.

A continuación se observan los resultados finales obtenidos; cabe aclarar que durante el desarrollo de los ensayos, se observaron datos desfavorables que no cumplían con lo establecido en la Norma INVIAS 2007 - consignados en la Tabla 26 – éstos se presentaran en los anexos de la investigación (Anexo 30).

De acuerdo con lo establecido por la metodología Marshall, se obtuvieron los siguientes datos para la muestra patrón, es decir, probetas sin ningún porcentaje de plástico:

Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos para la muestra patrón.

	VOL. PROM.	DENSIDAD PROM.	ESTABILIDAD PROM.	FLUJO PROM. (cent. de pulg)	FLUJO PROM.	ESTAB/ FLUJO (Kgf/mm)
0% Plástico	515.33 cm3	2.316 g/cm3	1071.67 Kgf	16.0	4.06 mm	263.7
NORMATIVA INVIAS			Cumple		Cumple	No cumple
			>750		2 -4	300 - 600

Teniendo en cuenta la Tabla 27 se puede observar que las briquetas cumplieron con lo establecido en la normativa INVIAS 2007 con relación a los límites de Estabilidad y Flujo promedio en las unidades dadas; con respecto a la relación Estabilidad/Flujo, se observa que la mezcla patrón se encuentra un 12% por debajo de lo admisible de la norma lo que representa que sea una mezcla relativamente frágil.

Con el fin de realizar la comparación entre la muestra testigo y las alternativas planteadas inicialmente, y por ende entre el uso de un tipo de residuo y el otro, se procederá a describir de manera individual la acción de cada polímero.

5.5.1. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de PET

Para las mezclas con adición de PET producto de la experiencia se consiguieron los datos mostrados en la Tabla 28 ; con base en la tabla anteriormente referenciada se estableció la relación matemática entre la estabilidad y Flujo (Tabla 29).

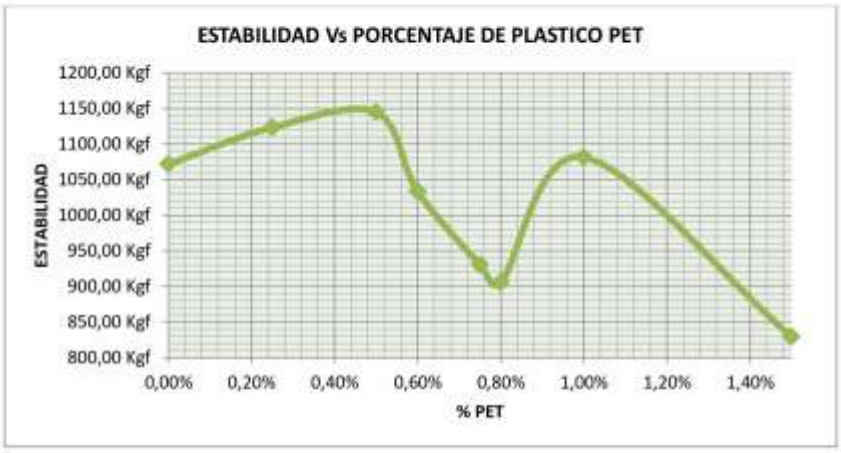
Tabla 28. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo un porcentaje de PET.

	VOL. PROMEDIO	DENSIDAD PROMEDIO	ESTABILIDAD PROMEDIO	FLUJO PROMEDIO (cent. de pulg)	FLUJO PROMEDIO
0.25% PET	516.07 cm3	2.309 g/cm3	1123.33 Kgf	15.7	3.98 mm
0.5% PET	527.53 cm3	2.260 g/cm3	1144.67 Kgf	15.7	3.98 mm
0.6% PET	520.20 cm3	2.288 g/cm3	1033.33 Kgf	16.0	4.06 mm
0.75% PET	520.30 cm3	2.295 g/cm3	930.47 Kgf	15.7	3.98 mm
0.8% PET	525.53 cm3	2.264 g/cm3	905.33 Kgf	14.7	3.73 mm
1% PET	529.80 cm3	2.253 g/cm3	1081.60 Kgf	15.7	3.98 mm
1.5% PET	540.20 cm3	2.208 g/cm3	829.25 Kgf	16.0	4.06 mm
NORMATIVA INVIAS			Cumple		Cumple
			>750		2 -4

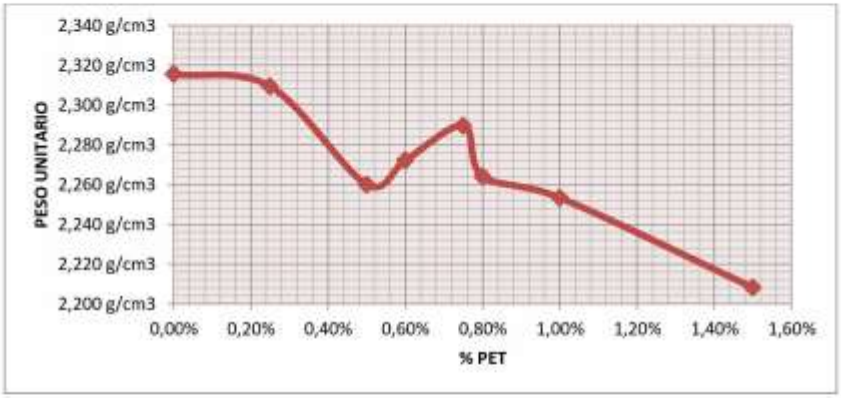
Tabla 29. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PET.

PORCENTAJE	0.25%	0.5%	0.6%	0.75%	0.8%	1%	1.5%
ESTA./FLUJO (Kgf/mmm)	282.3	287.6	254.3	233.9	243.0	271.9	204.0
NORMA INVIAS 300-600	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple

Grafica 12. Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PET.



Grafica 13. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PET.

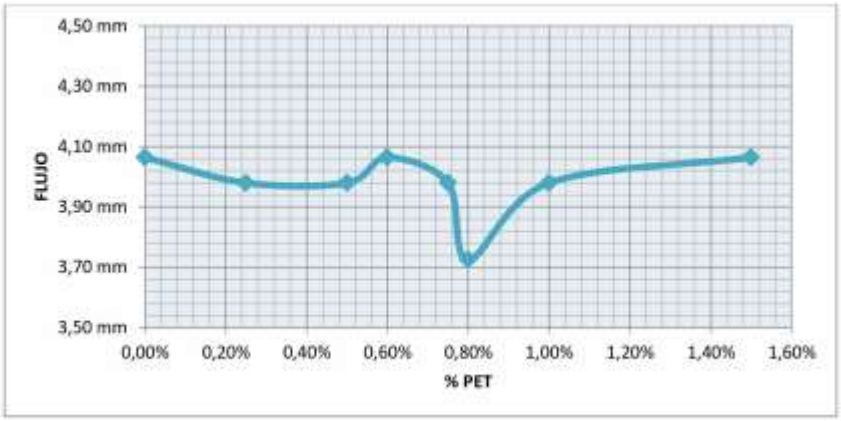


De acuerdo con la Tabla 28 y Grafica 12, se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de plástico tipo PET sobre la mezcla asfáltica la estabilidad llega a un punto máximo para un porcentaje equivalente al 0.5% y decrece abismalmente hasta encontrar otro vértice en un porcentaje el doble del anterior y nuevamente decrece; con lo anterior se puede inferir que con un remplazo del material pétreo de la mezcla por un porcentaje

mínimo de residuo se puede incrementar este parámetro en un 6.81% con relación a la muestra patrón.

Con relación al peso unitario bulk se observa (Grafica 13) que a medida que aumenta el porcentaje de PET este disminuye debido que la mezcla se hace menos densa por adición de este polímero; contrario a lo anterior sucede con el volumen de la briqueta, a medida que aumenta el porcentaje de plástico éste se ve incrementado, lo cual puede deberse a que los vacios entre los agregados pétreos son "sellados" por las partículas de polímero en su interior.

Grafica 14. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PET.



Al observar la Grafica 14 se puede concluir que la adición de este polímero con relación a la muestra patrón no incide drásticamente en la vacación de este parámetro; empero, se puede ver que para un porcentaje de plástico equivalente a 0.8% tanto para la estabilidad como para flujo las curvas decrecen.

Para evaluar claramente la incidencia de este porcentaje sobre la mezcla – ya que en la investigación este declive fue constante - , sería necesario evaluar el comportamiento físico-químico y ensayos reológicos, los cuales no se encuentran dentro de los alcances del presente texto.

5.5.2. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de PEAD

En los casos en los que se empleó como aditivo plástico tipo PEAD los resultados se encuentran computados en la Tabla 30; asimismo la relación entre la Estabilidad y Flujo se encuentran en la Tabla 31.

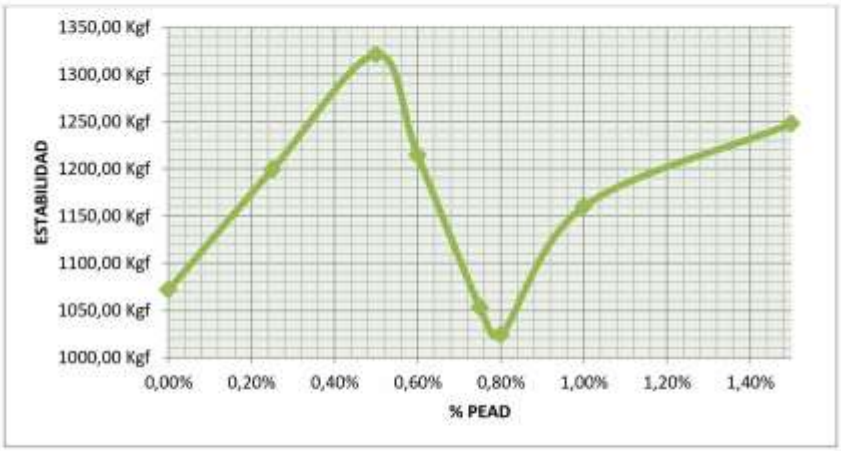
Tabla 30. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo un porcentaje de PEAD.

	VOL. PROMEDIO	DENSIDAD PROMEDIO	ESTABILIDAD PROMEDIO	FLUJO PROMEDIO (cent. de pulg)	FLUJO PROMEDIO
0.25% PET	525.17 cm3	2.275 g/cm3	1199.20 Kgf	15.9	4.05 mm
0.5% PET	522.27 cm3	2.293 g/cm3	1321.13 Kgf	15.9	4.05 mm
0.6% PET	525.67 cm3	2.272 g/cm3	1214.40 Kgf	15.8	4.02 mm
0.75% PET	521.43 cm3	2.290 g/cm3	1053.13 Kgf	15.8	4.00 mm
0.8% PET	532.73 cm3	2.247 g/cm3	1024.00 Kgf	15.7	3.98 mm
1% PET	525.37 cm3	2.277 g/cm3	1160.00 Kgf	15.7	3.98 mm
1.5% PET	543.70 cm3	2.183 g/cm3	1247.75 Kgf	15.8	4.02 mm
NORMATIVA INVIAS			Cumple		Cumple
			>750		2 -4

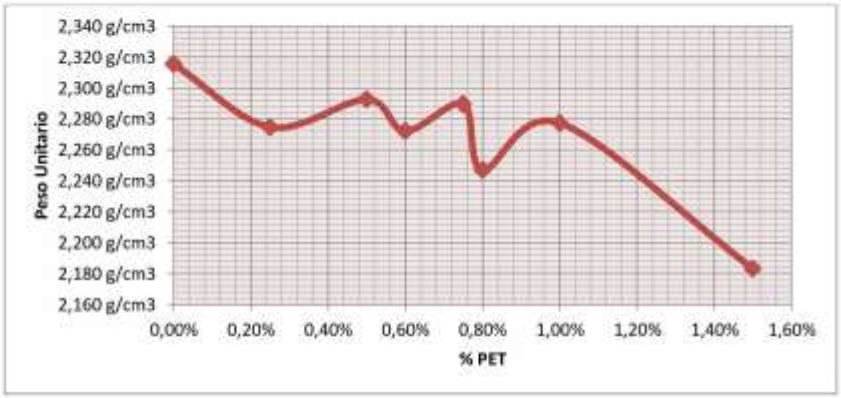
Tabla 31. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PEAD.

PORCENTAJE	0.25%	0.5%	0.6%	0.75%	0.8%	1%	1.5%
ESTA./FLUJO (Kgf/mmm)	296.4	326.4	301.9	263.0	257.3	291.5	310.25
NORMA INVIAS 300-600	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	Cumple

Grafica 15. Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PEAD.



Grafica 16. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PEAD.



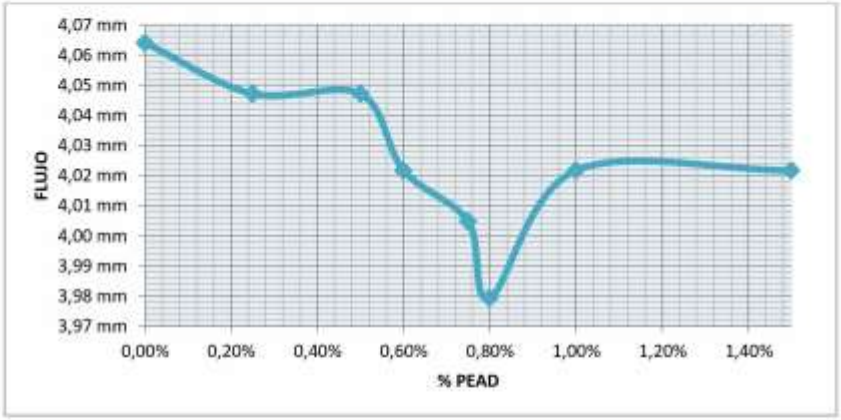
Con base en la Tabla 30 y Gráfica 15, se observa posee el mismo comportamiento de la curva de estabilidad de las muestras a las cuales se les incorporo PET como sustituyentes, pero con la variación que al momento de adicionar un porcentaje equivalente a 1.5% de PEAD la curva encuentra otro pico superior al valor de estabilidad de la mezcla patrón.

Cabe aclarar que la presente investigación solo abarcaba un porcentaje máximo de 1.5% por lo que no se verifico cuál sería el comportamiento de la mezcla a una sustitución mayor. La curva de estabilidad cuenta con dos picos máximos, uno para 0.5% y el otro a 1.5% demarcando un incremento con relación a la testigo equivalente al 23.28% y 16.43% respectivamente.

Ahora bien, en la Gráfica 16 se observa que el peso unitario bulk se mantiene cercano al valor obtenido con la ausencia de modificador; empero, al momento de emplear un porcentaje superior a 1% el peso unitario decrece un 5.71%.

En la Tabla 30 se evidencia que al momento de aumentar el porcentaje de residuos sólidos en la mezcla asfáltica el volumen se verá incrementado, persistiendo la tesis planteada acerca de la disminución de los vacíos entre agregados.

Grafica 17. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PEAD.



De acuerdo con la Gráfica 17 se observa que para el tramo de 0.25% a 0.75% se observa que el flujo decrece hasta su punto más bajo con un porcentaje de 0.8% de PEAD, como sucede con el PET; del tramo comprendido entre 0.8% y 1.5% se evidencia un aumento del mismo.

5.5.3. Resultados obtenidos a partir de la incorporación de ambos residuos en diferentes proporciones

De acuerdo con los datos obtenidos en los ítems 5.5.1. y 5.5.2. , se determinó que el porcentaje óptimo de cada tipo plástico es igual al 0.5% del peso de las probetas ensayadas. Teniendo en cuenta la proporción adecuada, se procedió a armar juegos de briquetas (dos probetas por cada dosificación) con la combinación de ambos tipos de plásticos, primando el residuo que logro maximizar las propiedades evaluadas en esta investigación; los pesos empleados se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Porcentaje y equivalente en peso de los materiales empleados.

MATERIAL		PORCENTAJE			PESO EQUIVALENTE	
Triturado pasa ¾"		20%			560 g	
Triturado pasa ½"		35%			980 g	
Arena Palmarito Lavada		20%			560 g	
Arena Palmarito Sin Lavar		20%			560 g	
Llenante mineral		5%			140 g	
Asfalto		5.5%			154 g	
PLASTICOS						
Proporción	PEAD	50%	60%	70%	80%	90%
	PET	50%	40%	30%	20%	10%
Peso Equivalente	PEAD	7 g	8,4 g	9,8 g	11,2 g	12,6 g
	PET	7 g	5,6 g	4,2 g	2,8 g	1,4 g

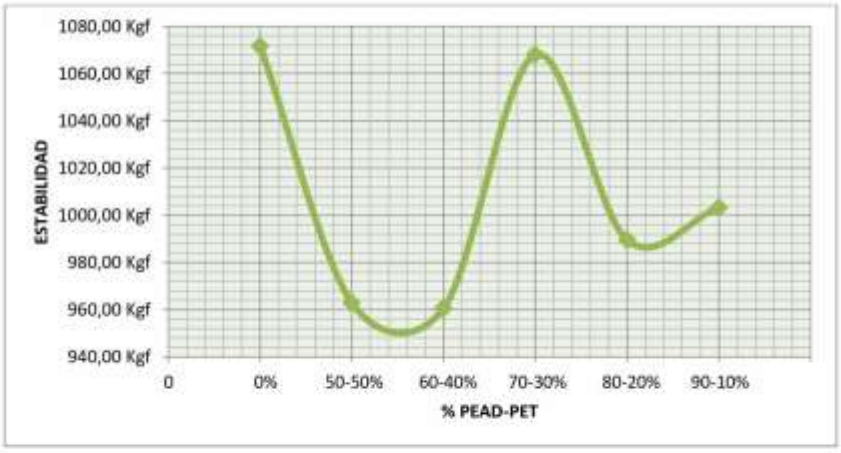
Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos para la muestra a las cuales se les incorporo ambos tipos de plástico PEAD-PET.

PEAD-PET	VOL. PROMEDIO	DENSIDAD PROMEDIO	ESTABILIDAD PROMEDIO	FLUJO PROMEDIO (cent. de pulg)	FLUJO PROMEDIO
50-50	523.80 cm3	2.277 g/cm3	962.90 Kgf	14.5	3.68 mm
60-40	525.80 cm3	2.271 g/cm3	960.60 Kgf	15.5	3.94 mm
70-30	523.25 cm3	2.284 g/cm3	1068.00 Kgf	11.5	2.92 mm
80-20	519.55 cm3	2.281 g/cm3	989.50 Kgf	14.0	3.56 mm
90-10	524.40 cm3	2.269 g/cm3	1003.20 Kgf	15.5	3.94 mm
NORMATIVA INVIAS			Cumple		Cumple
			>750		2 -4

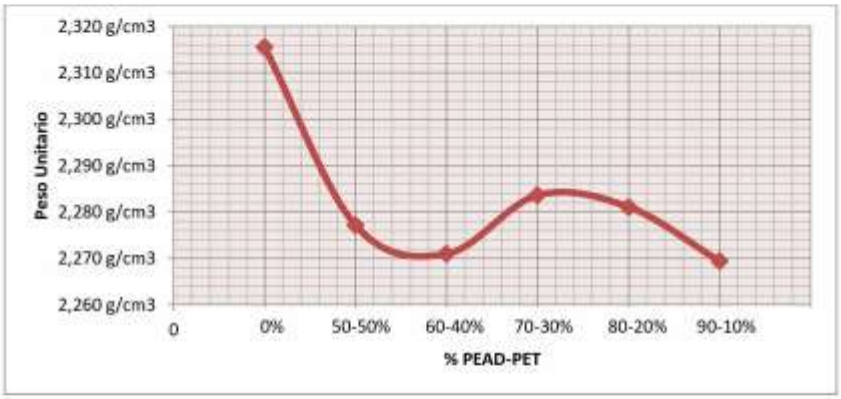
Tabla 34. Relación Estabilidad – Flujo para las mezclas a las que se les incorporo PEAD-PET.

PORCENTAJE	50-50	60-40	70-30	80-20	90-10
ESTA./FLUJO (Kgf/mmm)	261.4	244.0	365.62	278.26	254.8
NORMA INVIAS 300-600	No cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple

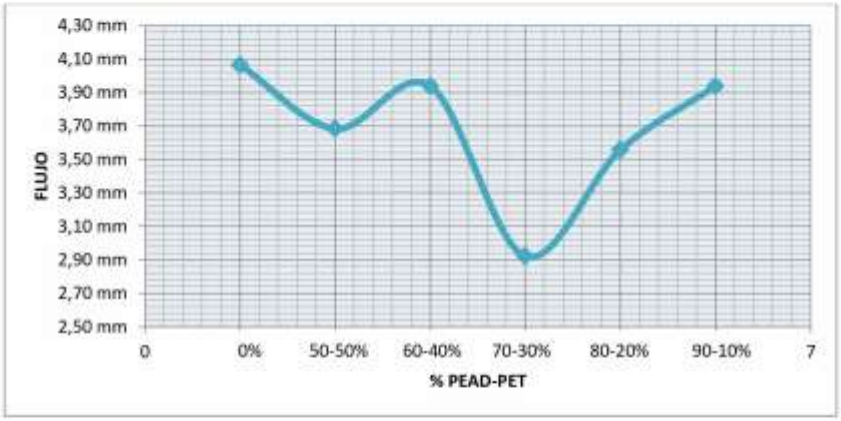
Grafica 18. . Estabilidad Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET.



Grafica 19. Peso Unitario Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET.



Grafica 20. Flujo Vs Porcentaje de Plástico PEAD-PET.



Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se evidencia en las Tabla 33 y la Grafica 18 se observa que para porcentajes casi equivalentes (50-50% y 60-40%) la Estabilidad de las muestras se ve disminuida un 10.2% aproximadamente, lo cual es contraproducente al momento de realizar el diseño de una estructura de pavimento; por consiguientes, se puede

concluir que los materiales no funcionan adecuadamente al ser ligados, lo cual podría deberse a su estructura química. En tanto, se observa que a medida que las mezclas carecen de PET sus propiedades se incrementan considerablemente.

Con relación al peso unitario (Grafica 19), el volumen (Tabla 33) y el flujo (Grafica 20), se observa un comportamiento semejante a los presentados con la incorporación de los materiales de manera individual.

5.6. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE RESIDUO PLASTICO

Una vez calculados los parámetros de medición, en este caso son la estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas, y teniendo en cuenta que las curvas expuestas anteriormente no mostraran valores absolutos que indiquen un porcentaje de residuo óptimo, se asumió – por criterio propio del investigador- como valores óptimos los que maximizaran la estabilidad, mantuvieran una deformación admisible y cumplieran a cabalidad con la normativa INVIAS. A continuación se presentan los mejores resultados de porcentajes óptimos para cada ensayo con cada material.

Tabla 35. Resumen de los resultados obtenidos por la incorporación individual y combinada de los residuos.

PARAMETROS		RESIDUO PLASTICO			
		PATRON	PET	PEAD	PEAD-PET
ESTABILIDAD		1071.67 Kgf	1144.67 Kgf	1321.13 Kgf	1068.00 Kgf
INVIAS	>750 Kgf	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
FLUJO		4.06 mm	3.98 mm	4.05 mm	2.92 mm
INVIAS	2-4 mm	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
ESTAB./FLUJO (Kgf/mm)		263.7	287.65	326.44	365.62
INVIAS	300-250	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
PORCENTAJE OPTIMO		N/A	0,5%	0,5%	70-30%

Con base en la Tabla 35 se observa que el residuo que mejor se comporta con la mezcla asfáltica es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en una proporción equivalente del 0,5%; por consiguiente el diseño final queda de la siguiente manera:

Tabla 36. Resumen de diseño definitivo mediante el uso de modificador.

ITEM	VALOR OBTENIDO
Contenido óptimo de asfalto	5.5%
Porcentaje de Plástico	0.5%
Densidad (g/cm3)	2.29
Estabilidad (kgf)	1321.13
Flujo (mm)	4.05
Estabilidad/Flujo (kgf/mm)	326.44

5.7. DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

En pro de evaluar los beneficios técnicos de la incorporación de residuos sólidos del tipo PEAD, se realizó un diseño teniendo como base un ejemplo expuesto en la literatura citada en la metodología; los datos del ejercicio teórico se encuentran contenidos en la Tabla 37.

Tabla 37. Datos para el diseño de pavimento flexible.

ITEM	VALOR
Periodo de diseño	15 años
Coeficiente de Confiabilidad	90%
Desviación Estándar	0.45
Estudio de Suelos	No existen materiales expansivos; la pluviosidad exige la construcción de dispositivos de drenaje.
Índice de servicio inicial (p_0)	4.3

Tabla 36. *(Continuación)*

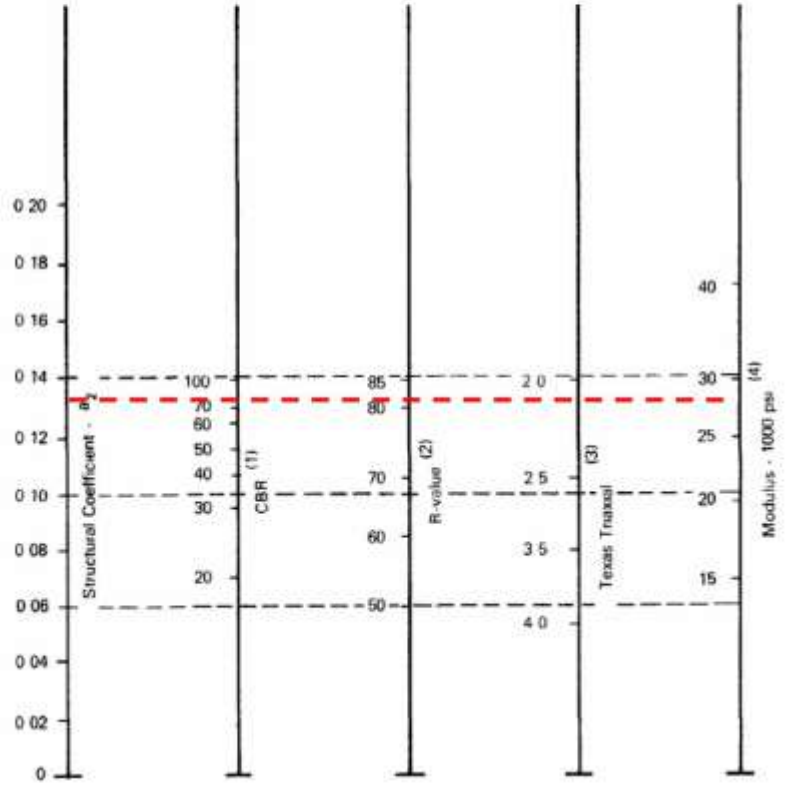
ITEM	VALOR
Índice de servicio final (p_f)	2.0
Pérdida Total (ΔPSI)	2.3
CBR Subrasante	5% MR = 7500 PSI
CBR Subbase	25% $a_3 = 0.1$
CBR Base	80% $a_2 = 0.13$
Temperatura media de la zona	15°C
Drenaje	$m_i = 1.15$
Numero de ejes equivalentes	2.0×10^6 ejes de 8.2 toneladas

Fuente: Adaptado Montejo Fonseca, 2002

Para iniciar el diseño de la estructura de pavimento se inicia con la determinación de los Módulos resilientes de la Subrasante, subbase y base granular; de acuerdo con la Tabla 37 se sabe que el módulo de elasticidad de la Subrasante es $MR_{SR} = 7500\ PSI$, pero para el cálculo de las capas siguientes se requiere del uso de los nomogramas contenidos en la AASHTO.

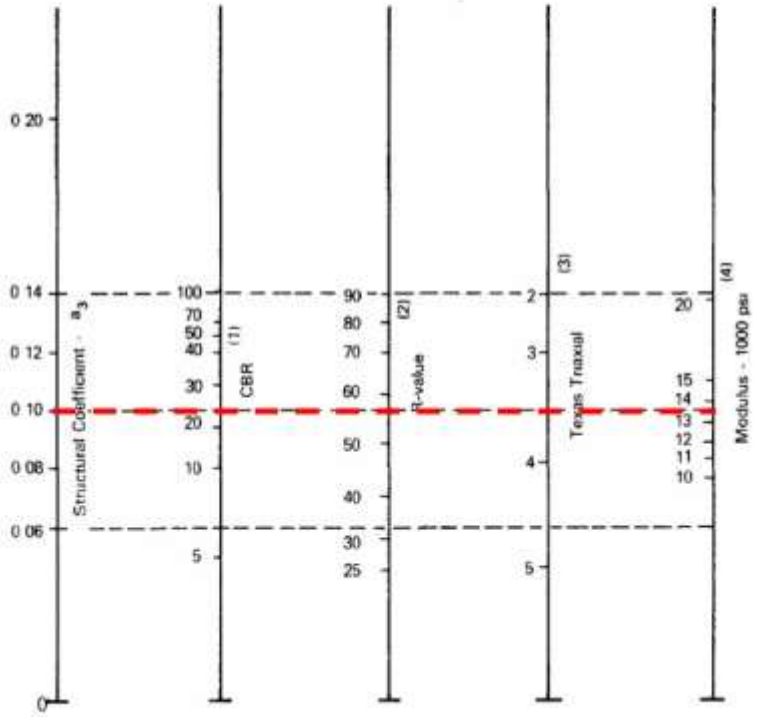
De acuerdo con la Grafica 21 el módulo resilientes de la base granular es $MR_{Sb} = 28000\ PSI$; para la subbase granular de acuerdo con la Grafica 22 el módulo resiliente es $MR_{Sbb} = 13800\ PSI$.

Grafica 21. Variación de coeficiente estructural a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular



Fuente. American Association of State Highway and Transportatio Officials, 1993

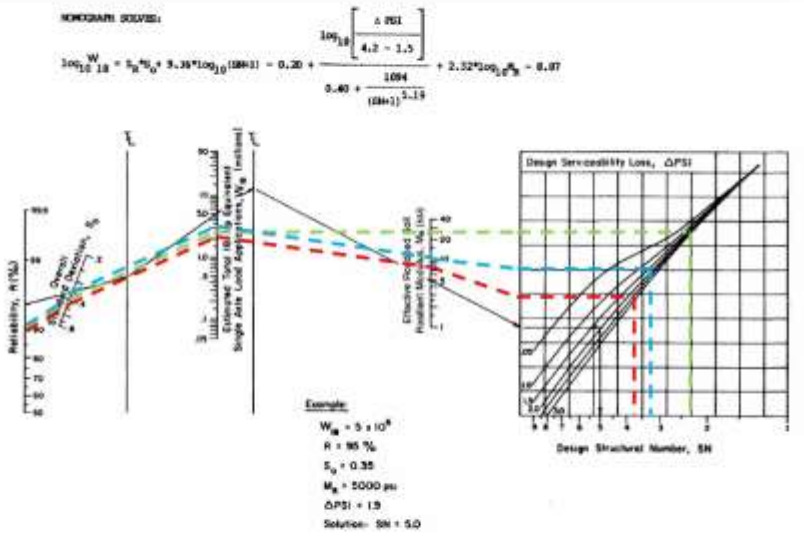
Grafica 22. Variación de coeficiente estructural a_2 con diferentes paraímetros de resistencia de la subbase granular



Fuente. American Association of State Highway and Transportatio Officials, 1993

Posteriormente se procede con el cálculo del volumen estructural de pavimento (SN) a partir del módulo resiliente de la Subrasante mediante el uso de la Grafica 23, por tanto SN=3.8 (línea roja); el numero estructural sobre la base (línea verde) es SN_1=2.3 y sobre la subbase (línea azul) es SN_2=3.2

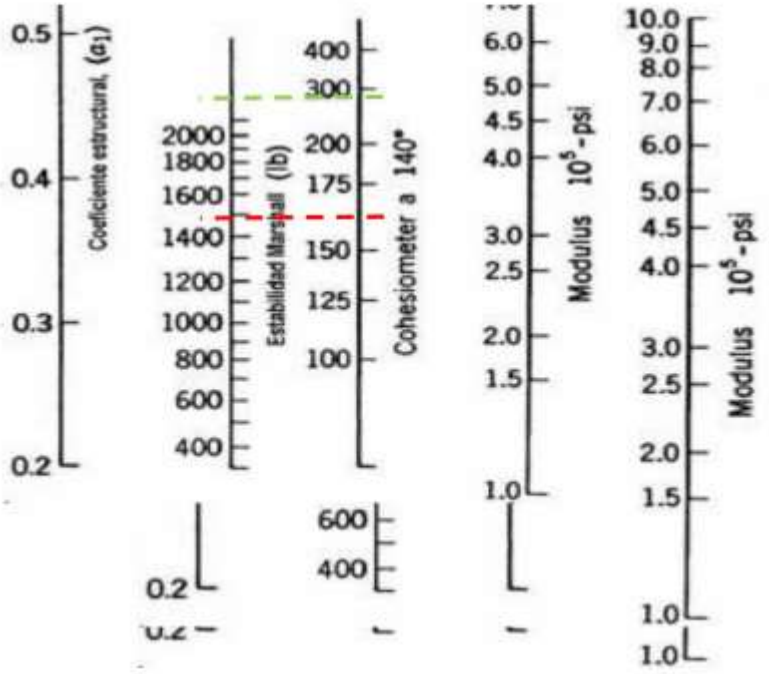
Grafica 23. Grafica de diseño para pavimento flexible basada en valores promedio de los diferentes datos de entrada.



Fuente. American Association of State Highway and Transportatio Officials. 1993

Sabiendo que $SN_1 = a_1 D_1$; para el cálculo de a_1 se tendrá en cuenta la Grafica 24; de acuerdo con la Tabla 35 la Estabilidad para la muestra patrón y con PEAD en libra es equivalente a 2362.6 lb Y 2912.5 lb respectivamente, por consiguiente $a_1(patron) = 0.48$ (línea roja) y $a_1(HDPE) = 0.57$ (línea verde).

Grafica 24. Coeficiente estructural a_1 a partir de la estabilidad.



Fuente. Corredor, 2010

- ***Diseño Muestra Patrón***

El espesor de la capa asfáltica será:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{2.3}{0.48} = 4.79\ pulg \approx 5.0\ pulg$$

Por tanto,

$$SN_1(corregido) = a_1 \times D_1 = 2.4$$

Para la base granular

$$SN\ (base\ granular) = 3.2 - 2.4 = 0.8$$

$$D_2 = \frac{SN\ (base\ granular)}{a_2 \times\ m_2} = \frac{0.8}{0.13 \times 1.15} = 5.35\ pulg \approx 6.0\ pulg$$

Recalculando el número estructural,

$$SN\ (base\ granular)(corregido) = a_2 \times D_2 \times m_2 = 0.9$$

Para la subbase granular

$$SN\ (subbase\ granular) = 3.8 - (2.4 + 0.9) = 0.5$$

$$D_2 = \frac{SN\ (subbase\ granular)}{a_3 \times\ m_3} = \frac{0.5}{0.1 \times 1.15} = 4.34\ pulg \approx 5.0\ pulg$$

Tabla 38. Diseño definitivo para muestra testigo.

CAPA	ESPESOR (pulg)
Concreto asfaltico	5.0
Base Granular	6.0
Subbase Granular	5.0

- ***Diseño Mezcla con PEAD***

El espesor de la capa asfáltica será:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{2.3}{0.57} = 4.03\ pulg \approx 4.0\ pulg$$

Por tanto,

$$SN_1(corregido) = a_1 \times D_1 = 2.28$$

Para la base granular

$$SN\ (base\ granular) = 3.2 - 2.28 = 0.92$$

$$D_2 = \frac{SN\ (base\ granular)}{a_2 \times\ m_2} = \frac{0.92}{0.13 \times 1.15} = 6.1\ pulg \approx 6.0\ pulg$$

Recalculando el número estructural,

$$SN\ (base\ granular)(corregido) = a_2 \times D_2 \times m_2 = 0.89$$

Para la subbase granular

$$SN\ (subbase\ granular) = 3.8 - (2.28 + 0.89) = 0.63$$

$$D_2 = \frac{SN\ (subbase\ granular)}{a_3 \times\ m_3} = \frac{0.63}{0.1 \times 1.15} = 5.5\ pulg \approx 6.0\ pulg$$

Tabla 39. Diseño definitivo para muestra con 0.5% de PEAD.

CAPA	ESPESOR (pulg)
Concreto asfaltico	4.0
Base Granular	6.0
Subbase Granular	6.0

Teniendo en cuenta los datos finales, la variación entre las capas de rodadura de los dos diseños mostrados es de 1 pulg aproximadamente 2.5 cm, permitiendo así una estructura más resistente, con deformaciones admisibles y de espesor reducido.

Si se proyecta una vía de 1 km de longitud, ancho de vía de 7.3 m y bermas a ambos lados de la vía de 1 m la reducción en el volumen de mezcla asfáltica sería igual:

Tabla 40. Reducción en el volumen de mezcla asfáltica de acuerdo con los datos dados.

TIPO DE MEZCLA	VOLUMEN
Mezcla Testigo	1054.1 m^3
Mezcla Modificada con PEAD	843.3 m^3
Diferencia	**210.8 m^3**

Lo anterior representa una reducción en 1 km de vía del 20%.

5.8. EVALUACIÓN ECONOMICA

En virtud de evaluar la incidencia de la presente investigación a nivel económico, se presentará un Análisis de Precios Unitarios para cada tipo de mezcla, el cual se aplicará para los datos anteriormente suministrados.

5.8.1. Evaluación Económica Muestra Testigo

De acuerdo con información de merado, el APU aplicable es el siguiente:

Tabla 41. Análisis de Precios Unitarios aplicable a la muestra patrón.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO:	Pavimentos Ecológicos: Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de una Mezcla Densa en Caliente (MDC-2) Modificada con Desechos Plásticos
ITEM	Mezcla densa en Caliente (MDC-2), PATRÓN — **UNIDAD** TON

I. EQUIPO

Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Valor Unit	
PLANTA DE ASFALTO		$ 500.000,00	75,00	$ 6.666,67	
CARGADOR DE LLANTAS		$ 175.200,00	75,00	$ 2.336,00	
PLANTA ELECTRICA		$ 163.000,00	75,00	$ 2.173,33	
MONTACARGAS		$ 60.000,00	75,00	$ 800,00	
HERRAMIENTAS MENORES		$ 500,00	1,00	$ 500,00	
				SUBTOTAL	$ 12.476,00

II. MATERIALES

Descripción	UND	Tarifa/Hora	Cantidad	Valor Unit	
TRITURADO 3/4"	TON	$ 50.224,00	0,20	$ 10.044,80	
TRITURADO 1/2"	TON	$ 30.786,00	0,35	$ 10.775,10	
ARENA PALMARITO LAVADA	TON	$ 22.953,00	0,20	$ 4.590,60	
ARENA PALMARITO SIN LAVAR	TON	$ 27.543,60	0,20	$ 5.508,72	
LLENANTE MINERAL	TON	$ 14.431,00	0,05	$ 721,55	
ASFALTO 60-70	KG	$ 1.240,00	55,00	$ 68.200,00	
AGUA	MI	$ 2.000,00	1,00	$ 2.000,00	
FUEL OIL	GL	$ 2.500,00	5,00	$ 12.500,00	
ACPM	GL	$ 8.380,00	0,10	$ 838,00	
DESPERDICIO (5%)	%	$ 1.225,23	5,00	$ 6.126,15	
				SUBTOTAL	$ 121.305,92

III. TRANSPORTES

Material	Vol., Peso ó Cant.	Distancia	M3-KM	Tarifa	Valor Unit	
MATERIAL INTERNO	1,3	1	1,30	$ 1.000,00	$ 1.300,00	
					SUBTOTAL	$ 1.300,00

IV. MANO DE OBRA

Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor Unit	
LABORATORISTA	$ 60.000,00	200,00%	$ 120.000,00	500,00	$ 240,00	
AUX. DE LABORATORIO	$ 26.667,00	200,00%	$ 53.334,00	500,00	$ 106,67	
ALMACENISTA	$ 4.587,00	200,00%	$ 9.174,00	500,00	$ 18,35	
BASCULERO	$ 22.293,00	200,00%	$ 44.586,00	500,00	$ 89,17	
OPER. PLANTA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
OPER. CALDERA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
AYUDANTES	$ 114.666,67	200,00%	$ 229.333,34	500,00	$ 458,67	
					SUBTOTAL	$ 1.232,85

TOTAL COSTO DIRECTO		$ 136.314,77
ADMINISTRACIÓN	10%	$ 13.631,48
UTILIDAD	5%	$ 6.815,74
IMPREVISTOS	10%	$ 13.631,48
COSTO TOTAL		$ 170.393,47
DENSIDAD SUELTA (TON/M3)		1,8
VALOR M3 SUELTO	**$/M3S**	$ 306.708,24

Benavides B., K.

Si se estima una vía de 1 km de longitud, ancho de vía de 7.3 m y bermas a ambos lados de la vía de 1 m, se obtiene lo siguiente:

$$Vol_{compactado} = 8.3m \times 0.127m \times 1000m = 1054.1m^3$$

Se obtienen $1054.1m^3$ de material compactado; si lo anterior se multiplica por el peso unitario,

$$ton_{MDC-2} = 1054.1m^3 \times 2.31\ ton/_{m^3} = 2435\ ton$$

Adicionalmente se sabe que la densidad del material suelto equivale a $1.8\ ton/_{m^3}$,

$$m^3{}_{suelto} = \frac{2435\ ton}{1.8\ ton/_{m^3}} = 1352.8\ m^3$$

Por tanto el precio del volumen de concreto requerido para esta vía es de:

$$\boldsymbol{VALOR\ PROPUESTA} = 1352.8\ m^3 \times \frac{\$306.708{,}2}{m^3} = \$414.903.177$$

5.8.2. Evaluación Económica Muestra modificada con PEAD

De acuerdo con información de merado, el APU aplicable es el siguiente:

Tabla 42. Analisis de Precios Unitarios aplicable a la muestra patrón.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

PROYECTO:	Pavimentos Ecológicos: Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas de una Mezcla Densa en Caliente (MDC-2) Modificada con Desechos Plásticos		
ITEM	Mezcla densa en Caliente (MDC-2), PEAD	**UNIDAD**	TON

I. EQUIPO

Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Valor Unit	
PLANTA DE ASFALTO		$ 500.000,00	75,00	$ 6.666,67	
CARGADOR DE LLANTAS		$ 175.200,00	75,00	$ 2.336,00	
PLANTA ELECTRICA		$ 163.000,00	75,00	$ 2.173,33	
MONTACARGAS		$ 60.000,00	75,00	$ 800,00	
HERRAMIENTAS MENORES		$ 500,00	1,00	$ 500,00	
				SUBTOTAL	$ 12.476,00

II. MATERIALES

Descripción	UND	Tarifa/Hora	Cantidad	Valor Unit	
TRITURADO 3/4"	TON	$ 50.224,00	0,20	$ 9.994,58	
TRITURADO 1/2"	TON	$ 30.786,00	0,35	$ 10.744,31	
ARENA PALMARITO LAVADA	TON	$ 22.953,00	0,20	$ 4.567,65	
ARENA PALMARITO SIN LAVAR	TON	$ 27.543,60	0,20	$ 5.481,18	
LLENANTE MINERAL	TON	$ 14.431,00	0,05	$ 707,12	
ASFALTO 60-70	KG	$ 1.240,00	55,00	$ 68.200,00	
PLASTICO HDPE	KG	$ 1.800,00	0,01	$ 9,00	
AGUA	M3	$ 2.000,00	1,00	$ 2.000,00	
FUEL OIL	GL	$ 2.500,00	5,00	$ 12.500,00	
ACPM	GL	$ 8.390,00	0,10	$ 839,00	
DESPERDICIO (5%)	%	$ 1.225,23	5,00	$ 6.126,15	
				SUBTOTAL	$ 121.168,98

III. TRANSPORTES

Material	Vol., Peso ó Cant.	Distancia	M3-KM	Tarifa	Valor Unit	
MATERIAL INTERNO	1,3	1	1,30	$ 1.000,00	$ 1.300,00	
					SUBTOTAL	$ 1.300,00

IV. MANO DE OBRA

Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor Unit	
LABORATORISTA	$ 60.000,00	200,00%	$ 120.000,00	500,00	$ 240,00	
AUX. DE LABORATORIO	$ 26.667,00	200,00%	$ 53.334,00	500,00	$ 106,67	
ALMACENISTA	$ 4.587,00	200,00%	$ 9.174,00	500,00	$ 18,35	
BASCULERO	$ 22.293,00	200,00%	$ 44.586,00	500,00	$ 89,17	
OPER. PLANTA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
OPER. CALDERA	$ 40.000,00	200,00%	$ 80.000,00	500,00	$ 160,00	
AYUDANTES	$ 114.666,67	200,00%	$ 229.333,34	500,00	$ 458,67	
					SUBTOTAL	$ 1.232,85

TOTAL COSTO DIRECTO		$ 136.177,84
ADMINISTRACIÓN	10%	$ 13.617,78
UTILIDAD	5%	$ 6.808,89
IMPREVISTOS	10%	$ 13.617,78
COSTO TOTAL		$ 170.222,30
DENSIDAD SUELTA (TON/M3)		1,8
VALOR M3 SUELTO	**$/M3S**	$ 306.400,13

Si se estima una vía de 1 km de longitud, ancho de vía de 7.3 m y bermas a ambos lados de la vía de 1 m, se obtiene lo siguiente:

$$Vol_{compactado} = 8.3m \times 0.101m \times 1000m = 838.3m^3$$

Se obtienen $838.3m^3$ de material compactado; si lo anterior se multiplica por el peso unitario,

$$ton_{MDC-2} = 838.3m^3 \times 2.29\,{}^{ton}/_{m^3} = 1919.7\ ton$$

Adicionalmente se sabe que la densidad del material suelto equivale a $1.8\,{}^{ton}/_{m^3}$,

$$m^3{}_{suelto} = \frac{1919.7\ ton}{1.8\,{}^{ton}/_{m^3}} = 1066.5\ m^3$$

Por tanto el precio del volumen de concreto requerido para esta vía es de:

$$\boldsymbol{VALOR\ PROPUESTA} = 1066.5\ m^3 \times \frac{\$306.400}{m^3} = \$326.776.791$$

Tabla 43. Reducción en los costos de mezcla asfáltica de acuerdo con los datos dados.

TIPO DE MEZCLA	COSTO
Mezcla Testigo	$414.903.177
Mezcla Modificada con PEAD	$326.776.791
Diferencia	**$88.126.386**

Lo anterior representa una reducción en 1 km de vía del 21.2%.

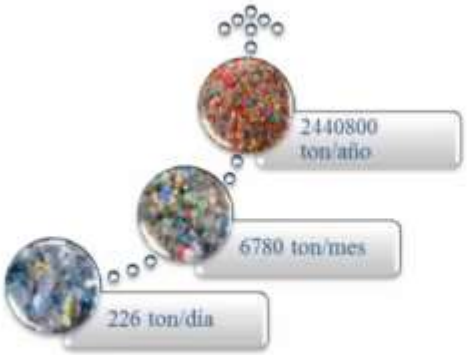
5.9. EVALUACIÓN MEDIO-AMBIENTAL

Evaluado los beneficios Técnicos y Económicos, el presente apartado tiene como objeto determinar a pequeña escala las repercusiones que tendría la implementación de esta alternativa en la ciudad de Cartagena; como se observó en el ítem anterior el volumen del material compactado equivale a 1919.7 ton de las cuales el 0.5% a Polietileno de alta densidad, por consiguiente:

$$ton_{HDPE} = 1919.7\ ton \times {}^{0.5}/_{100} = 9.6\ ton$$

Lo anterior demarca que por cada kilómetro de vía a construir con una mezcla MDC-2 modificada se emplearan 9.6 ton residuos plásticos.

Ya que no se cuenta con las ratas de crecimiento de desechos de este tipo en la ciudad, y partiendo de un valor inicial de residuos plásticos de 226 toneladas por día. (Alcaldía de Cartagena. et al., 2007), se realizará una proyección a pequeña escala de la incidencia de esta alternativa.



De acuerdo con el informe del estado de la Red vial en Colombia de acceso publico, Bolívar cuenta con 20.18 km (INVIAS, 2014)de vía en estado regular, malo y muy malo; si se reparan dichas vías, saldrían de circulación alrededor de 193,8 ton de plástico, lo que equivale al 85,8% de la producción de estos desechos al día.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto de investigación permitió determinar la incidencia de los residuos sólidos -cuya vida útil aún no ha culminado- sobre las mezclas asfálticas como sustituyente de agregados pétreos. De acuerdo con la literatura revisada los beneficios de la implementación de este tipo de alternativas depende intrínsecamente de la relación entre los entes estatales y privados y de la socialización de medidas relacionadas con el manejo de los plásticos en los hogares, escuelas e industrias.

De acuerdo con los ensayos de laboratorio realizados, como lo fueron los de caracterización de agregados pétreos, llenante mineral, bitumen y mezclas asfálticas se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Los agregados suministrados por la planta Torcoroma ubicada en Pontezuela, bolívar (Triturado de Rotinet, las arenas (Palmarito y San Juan) y llenante mineral) cumplen con los requisitos que establecen las especificaciones INVIAS 2007, para poder ser considerados como materiales aptos para su empleo en el diseño y elaboración de las mezclas asfálticas. La granulometría también permitió determinar cuáles de estos agregados se podía utilizar, teniendo en cuenta la franja granulométrica impuesta a cada una de estas por las normas INVIAS.

- El porcentaje óptimo de residuos plásticos para el diseño trabajado es de 0.5% empleando como modificador Polietileno de Alta Densidad (PEAD), con un tamaño de partícula oscilante ente 2.35 - 4.00mm y un contenido d asfalto de 5.5.%.

- El cemento asfaltico suministrado por la empresa ECOPETROL S.A. cumple a cabalidad con los lineamientos establecidos por las normas colombianas; dichos resultados no pudieron ser corroborados por la falta de equipos especializados para la caracterización del bitumen.

- Se observó que la mezcla asfáltica presentó un alto porcentaje de partículas fracturadas porque posee en su gradación un numero aceptable de agregados gruesos que le aportan a la mezcla un mejor comportamiento ante esfuerzos cortantes,

- La gradación empleada presenta un desgaste en la máquina de los ángeles equivalente a 22.8%, lo que permite inferir que las partículas con gran tamaño tienden a ser desgastadas mucho más fácil que las de tamaño menor.

- Se observó que a medida que se aumenta el porcentaje de plástico tipo PET en la mezcla, la estabilidad llega a un punto máximo para un porcentaje equivalente al 0.5 y decrece abismalmente (0.8% de plástico), hasta encontrar nuevamente otro vértice en un porcentaje equivalente al 1 y nuevamente decrece; en el caso del PEAD, la curva de estabilidad cuenta con dos picos máximos, uno para 0.5% y el otro a 1.5% demarcando un incremento con relación a la testigo equivalente al 23.28% y 16.43% respectivamente. Empero, al momento de combinar los dos tipos de plástico, se determinó que la adición de PET en proporciones equivalentes a PEAD hacen que disminuya la estabilidad de la mezcla en un 10%.

- Para ambos tipos de plástico se observó un incremento en la estabilidad con una cantidad de plástico equivalente al 0.5%, denotando un aumento para PET DEL 6.81%, y para el PEAD DEL 23.28%; en el caso de mezclarse los residuos, no se logró incrementar dicha propiedad.

- Se observó que tanto para la estabilidad como para flujo para un porcentaje de plástico equivalente a 0.8% las curvas decrecen; para determinar la causa de este comportamiento sería necesario evaluar el comportamiento físico-químico y ensayos reológicos, los cuales no se encuentran dentro de los alcances del presente texto

- Con relación al Peso Unitario observo que en todos los casos (PET, PEAD, PEAD-PET) que a medida que aumenta el porcentaje de plástico éste disminuye debido que la mezcla se hace menos densa por adición de los polímero; contrario a lo anterior sucede con

el volumen de la briqueta, a medida que aumenta el porcentaje de plástico éste se ve incrementado, lo cual puede deberse a que los vacíos entre los agregados pétreos son "sellados" por las partículas de polímero en su interior.

- Se determinó que para el porcentaje y residuo de plástico elegido (0,5% , PEAD) a partir de un diseño de una estructura de pavimento flexible con datos teórica, que la disminución entre la capa de rodadura (en un km de vía) de una mezcla convencional y la no convencional es de aproximadamente del 20%, lo cual representa u beneficio económico y medio ambiental; lo último se refleja en el uso de residuos, disminución de la emisión de gases contaminantes, reducción en el uso de materias primas, etc.

- Con base en el diseño realizado, se logró establecer que la diferencia económica por cada kilómetro de vía pavimentado con mezclas con adición de plástico y mezclas comunes es del 21.2%.

- Entre el impacto ambiental se destaca que por cada kilómetro de vía se pueden emplear alrededor d 9.6 toneladas de PEAD.

De manera general se concluye que la implementación de este tipo de iniciativas repercuten tanto a nivel Técnico como económico, y al tratar de sustituir materias primas y/o vírgenes por residuos se convierte en una propuesta amigable con el medio ambiente y los seres que habitan en él.

7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

El presente apartado tiene como objeto describir de forma general las limitaciones halladas en el desarrollo del proyecto con la solución respectiva (para las cuales fue posible aplicar) y las recomendaciones respectivas para la orientación de futuras investigaciones relacionadas con el tema de incorporación de residuos sólidos en mezclas asfálticas.

7.1. LIMITACIONES

El presente proyecto de investigación presento las siguientes limitaciones:

✓ **Obtención de información en Bases de Datos y Tesis de Grado de la Universidad de Cartagena**. Se presentaron problemas al momento de acceder a las Bases de Datos a las cuales se encuentra inscrito la Universidad, lo cual repercutió en la falta de información para comparar ciertos comportamientos en las mezclas. De igual manera, debido a que la temática es relativamente nueva no se pudo establecer un precedente en los documentos productos de investigaciones anteriores.

✓ **Dificultades Económicas.** Debido a que el proyecto fue desarrollado por una sola persona se presentaron dificultades económicas que se vieron reflejadas en la duración de la investigación.

✓ **Accesibilidad al sitio de los ensayos.** Debido a la ubicación de los laboratorios donde se desarrollaron los ensayos, se prolongó la investigación y se presentaron errores en algunos datos, los cuales se eliminaron generando así que se invirtiera el doble de tiempo y gastos.

✓ **Falta de capacitación.** Debido a que el personal técnico de apoyo de la investigación no contaba con experiencia en este tipo de mezclas modificadas, se presentaron errores en algunos datos iniciales.

7.2. RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo de la metodología y los resultados obtenidos, se recomienda a las futuras generaciones el manejo de parámetros como la temperatura de mezclado, temperatura de compactación, viscosidad y penetración del asfalto, ya que estos inciden directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Se recomienda además, el uso de mezclas semi densas ya que estas en su estructura poseen menos agregados gruesos; de igual forma, es factible trabajar con un tamaño de partículas inferiores a 2.35 mm, ya que a un menor tamaño en las partículas ayuda a generar una mejor adherencia entre los materiales empleados.

Asimismo para conocer el comportamiento físico-químico de las mezclas y complementar la investigación, establecer un convenio entre el Programa de Ingeniería Civil e Ingeniería Química.

Realizar revisiones periódicas a los datos a medida que se van obteniendo, con el objeto de establecer métodos correctivos o ampliar la investigación.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

✓ Acevedo, M. (26 de Marzo de 2014). Metodología para evaluar asfaltos modificados con polimeros. (K. Benavides, Entrevistador)

✓ Alcaldía de Cartagena; Secretario de Infraestructura; Instituo de Hidraúlica y Saneamiento Ambiental-Universidad de Cartagena. (2007). *Plan de Gestión Integral de Residuos Solidos (PGIRS). Cartagena de Indias D.T. y C. 2007 - Volumen II Diagnóstico.* Cartagena de Indias D. T. y C.

✓ Alcaldía de Pivijay - Magdalena. (15 de Agosto de 2012). *Alcaldía de Pivijay - Magdalena.* Recuperado el 30 de Septiembre de 2013, de Información General: http://www.pivijay-magdalena.gov.co/informacion_general.shtml

✓ American Association of State Highway and Transportatio Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.* Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportatio Officials.

✓ American Society for Testing Materials (ASTM INTERNATIONAL). (Abril de 2012). *Reglamento que Rige a los Comités Técnicos de la ASTM.* Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de ASTM INTERNATIONAL: http://www.astm.org/GLOBAL/images/regs_spanish.pdf

✓ Aponte, J. (2014). *Rincón del Vago.* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Carreteras: http://html.rincondelvago.com/vias.html

✓ Arias, G., Galvis, W., Orduña, L., Rodríguez, J., & Sánchez, G. (10 de Abril de 2013). *Slideshare.* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Mezclas Asfalticas: http://www.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2

✓ Bardasano, R. (3 de Febrero de 2014). *PaveIng-El asombroso mundo de la ingeniería de pavimentos.* Recuperado el 17 de Abril de 2014, de FAQ: sobre el cálculo del módulo de elasticidad de una mezcla asfáltica: http://paveing.blogspot.com/2014/02/faq-calculo-modulo-mezclas-asfalticas.html

✓ Beltrán, A., & Suárez, L. (2010). *Diagnóstico Ambiental de los cuerpos internos de agua de la Ciudad de Cartagena de Indias.* Recuperado el 13 de Marzo de 2014, de Eumed.net: http://www.eumed.net/libros-gratis/2010b/691/ASPECTOS%20GENERALES%20DE%20AREA%20DE%20ESTUDIO.htm

✓ Bermúdez, W. (2013). *Tratamiento de lixiviados en Rellenos Sanitarios por medio de Sistemas de Evaporación; Caso de Estudio: Parque Ambiental Loma de los Cocos en la Ciudad de Cartagena de Indias.* Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

✓ Berrio Escobar, C. E., & Contreras Contreras, V. A. (2008). *Mejoramiento de mezclas asfálticas en caliente mediante la adición de cemento Portland como llenante mineral.* Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

✓ Bustos, C. (20 de Junio de 2009). *La problemática de los desechos sólidos.* Recuperado el 4 de Marzo de 2014, de Saber.ula.ve: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30305/1/articulo5.pdf

✓ Cali, A. d. (Agosto de 2004). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos.* Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de Alcaldía de Santiago de Cali: http://www.cali.gov.co/publico2/documentos/varios/pgris.pdf

✓ Castro García, W. O. (2011). *Diseño de Mezclas Asfálticas gruesa con aditivo para capa de rodadura en la carretera Portoviejo-Santa Ana.* Universidad Técnica de Manabí. Manabí: Universidad Técnica de Manabí.

✓ Cerda, O., Celdón, P., & Vega-López, E. (Julio de 2011). *Ecoeficiencia y desarrollo de infraestructura urbana sostenible en Asia y América Latina. Revisión de las prácticas vigentes y los criterios utilizados para integrar aspectos ambientales y sociales en la infraestructura urbana de Chile, Colombia y México.* (N. Unidas, Ed.) Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Naciones Unidas - CEPAL: http://www.eclac.cl/dmaah/noticias/paginas/3/44973/Revisi%C3%B3n_de_las_pr%C3%A1cticas_CHILE_COLOMBIA_MEXICO.pdf

✓ COLCIENCIAS. (8 de Marzo de 2010). *Universidad Industrial de Santander (UIS).* Recuperado el 15 de Abril de 2014, de Guía para la ejecución técnica, administrativa y financiera de los proyectos financiados con recursos de COLCIENCIAS: http://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/documentos/guiaInformesColciencias.pdf

✓ Construmatica. (2014). *Pavimentos Ecológicos.* Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de Construmatica: http://www.construmatica.com/construpedia/Pavimentos_Ecol%C3%B3gicos

✓ Consultora Especializada para la Estructuración de Concesiones Viales. (Abril de 2013). *Corredor 1. Bolivar - Atlantico, Tramo 2. Circunvalar de la Prosperidad.* Recuperado el 13 de Marzo de 2014, de ftp://ftp.ani.gov.co/Cartagena%20Barranquilla%20y%20Circunvalar%20P/E%20y%20D%20Circunvalar%20Prosperidad/Capitulo%20IV%20Geologia%20y%20Geotecnia/GEOLOG%C3%8DA,%20GEOTECNIA%20Y%20PAVIMENTOS/INFORME%20DE%20GEOLOGIA-GEOTECNIA%20Y%20PAVIMENTOS%20V-03.pdf

✓ Contreras, C. (2006). *Manejo Integral de Aspectos Ambientales-Residuos Solidos.* Recuperado el 11 de Marzo de 2014, de Pontificia Universidad Javeriana: http://www.javeriana.edu.co/ier/recursos_user/IER/documentos/OTROS/Pres_Residuos_CamiloC.pdf

✓ Cornish, M. (1997). *El ABC de los plásticos.* México: Universidad Iberoamericana.

✓ Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA). (2014). *Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA).* Recuperado el 17 de Abril de 2014, de Gestión de residuos sólido en la jurisdicción de CORANTIOQUIA (GIRS): http://www.corantioquia.gov.co/docs/LOGROS/GIRS.htm

✓ Corredor, G. (2010). *Experimento Vial de la AASHTO y las Guías de Diseño AASHTO.* Peru: Universidad Nacional de Ingenieria.

✓ Edificae. (2014). *Tipos de pavimentos ecológicos.* Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de Edificae Vilssa: http://www.construccion-y-reformas.vilssa.com/articulos/tipos-de-pavimentos-ecologicos

✓ Elías, X., & Jurado, L. (2012). *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

✓ Escalante, Y. (11 de Febrero de 2009). *¿Infraestructura ambientalmente sostenible?* Recuperado el 13 de Marzo de 2014, de Banco de Desarrollo de América Latina (CAF): http://www.caf.com/media/3080/Cap4_RED2009.pdf

✓ Figueroa, A., & Reyes, F. (2006). *Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas: Síntesis de la investigación colombiana.* Bogotá D.C., Colombia: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

✓ Fondo Social Europeo; Fundación Biodiversidad; Cámara Oficial de Comercio e Industria de Valladolid. (22 de Noviembre de 2006). *Guía de Sensibilización de Problemas Ambientales.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Cámara Oficial de Comercio e Industria de Valladolid: http://www.medioambientecamaravalladolid.com/portal/pdf/problemas_ambientales.pdf

✓ Gamboa Ojeda, J. J. (Septiembre de 2012). *Universidad Pontificia Bolivariana.* (U. P. Bolivariana, Ed.) Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Modificadas Vs Mezclas Tradicionales: http://apuntesdeinvestigacion.upbbga.edu.co/wp-content/uploads/COMPORTAMIENTO-MEC%C3%81NICO-DE-MEZCLAS-ASF%C3%81LTICAS-MODIFICADOS-VS-MEZCLA-TRADICIONAL-Apuntes.pdf

✓ Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., & Delgado, H. (2005). *Instituto Mexicano del Transporte.* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Caracterización Geomecánica de mezclas Asfálticas: http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf

✓ Gonzalez de la Hoz, M. C., & Velez Velez, Á. L. (2008). *Mejoramiento de las mezclas Asfálticas utilizando Cal Hidratada como llenante mineral.* Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

✓ Grupo del Banco Mundial. (14 de Abril de 2013). *Transporte: Resultados del Sector.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de El Banco Mundial: Trabajamos por un mundo sin pobreza: http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/14/transport-results-profile

✓ Huang, Y., Bird, R., & Heidrich, O. (2007). A review of use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Elsevier B.V,* 58-73.

✓ Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (INCODER). (23 de Febrero de 2012). *Plan Estratégico 2010 - 2014.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (INCODER): http://www.incoder.gov.co/documentos/Plan_Estrategico_2010_2014_Actualizado_a_Feb_2012.pdf

✓ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2012). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).* Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de Características Climatológicas de Colombia: Promedios Climatológicos: http://institucional.ideam.gov.co/jsp/812

✓ Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2007). *Artículo 450-07 - Mezclas Asfalticas en Caliente (Concreto Asfáltico y Mezcla de alto Módulo).* Bogota: Instituto Nacional de Vías.

✓ Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (28 de Agosto de 2007). *I.N.V.E-748-07; Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.* Recuperado el 17 de Abril de 2014, de Universidad del Cauca (UNICAUCA): ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-748-07.pdf

✓ Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2007). *INV E 213-07 . Análisis Granulometrico de Agreados Gruesos y Finos.* Bogota: Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

✓ Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Disposiciones Generales para la ejecución de riegos de impresión, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos.* Recuperado el 13 de Marzo de 2014, de INVIAS: http://cumbia.invias.gov.co/info/manuales/normas/especificaciones_construccion/especificaciones/Art400.htm

✓ Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Estado de la Red vial Criterio Tecnico Enero- Junio 2014.* Bogota: INVIAS.

✓ Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (20 de Noviembre de 2012). *Objetivos y Funciones.* Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de INVIAS: http://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/objetivos-y-funciones

✓ Jimdo. (2014). *Residuos y Desechos Sólidos.* Recuperado el 13 de Octubre de 2014, de Ambiente libre de Residuos Sólidos: http://elambienteylosdesechossolidos.jimdo.com/definici%C3%B3n-y-diferencia-entre-desechos-y-residuos/

✓ Jiménez, L. (8 de Julio de 2013). *Crisis de la Movilidad en Cartagena.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Polo Democrático Alternativo-MOIR: http://moir.org.co/IMG/pdf/Crisis_y_Movilidad_en_Cartagena.pdf

✓ Lauro, A., & Gabriel, R. (2005). *Carreteras.* Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

✓ Lecitra, M. (28 de Octubre de 2010). *Grupo de Estudios Internacionales Contemporáneos (GEIC).* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Reducir, Reutilizar y

Reciclar: El problema de los residuos sólidos urbanos: http://geic.files.wordpress.com/2010/10/reducir-reutilizar-y-reciclar.pdf

✓ Lofgren, K. (11 de Noviembre de 2012). *Inhabitat.* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Vancouver Becomes First City to Pave Its Streets With Recycled Plastic: http://inhabitat.com/vancouver-becomes-first-city-to-pave-their-streets-with-recycled-plastic/

✓ Mariano. (5 de Marzo de 2011). *Tecnología de los Plásticos*, 2014. Obtenido de Códigos de los plásticos: http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html

✓ Mena Ripoll, A., & Puerta Carrillo, F. E. (2010). *Uso de aditivos mejoradores de adherencia en mezclas asfálticas compactadas para contrarrestar el efecto del agua sobre la resistencia a la compresión.* Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

✓ Mier Cantero, Y. M., & Reyes Yepes, H. J. (2009). *Diseño de Mezclas asfálticas densas en caliente según especificaciones INVIAS 2007, utilizando los materiales suministrados por la planta de asfalto Torcoroma.* Cartagena: Universidad de Cartagena.

✓ Ministerio de Transporte -INVIAS- AEROCIVIL- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (13 de Junio de 2013). *Consejo Nacional de Política Económica y Socila (CONPES 3747) - Importancia Estratégica del componente de infraestructura vial, aeroportuaria y portuaria del Contrato Plan de la Nación con el Departamento de Nariño.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Departamento Nacional de Planeación (DNP): https://www.dnp.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=SyL77lfqzYU%3D&tabid=1656

✓ Ministerio del Medio Ambiente. (27 de Agosto de 2002). *Guía para Selección de Tecnologías de Manejo Integral de Residuos Solidos.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA): http://www.cortolima.gov.co/SIGAM/cartillas/residuossolidos/LIBRO%204%20-PARTE%201ok.pdf

✓ Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda ed.). Bogotá, D.C., Cundinamarca, Colombia: Universidad Católica de Colombia.

✓ Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda ed.). Bogotá, D.C., Cundinamarca, Colombia: Universidad Católica de Colombia.

✓ Niloofar, Z., Rehan, M., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Elsevier Ltd.*, 55-62.

✓ Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo (ONUDI). (2014). *Programa 21: Capítulo 21. Gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos y cuestiones relacionadas con las aguas clocales.* Recuperado el 11 de Marzo de 2014, de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales - División de Desarrollo Sostenible: http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter21.htm

✓ Osequeda, G. (18 de Julio de 2013). *La importancia de proveer infraestructura en un país.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de La Hora: http://www.lahora.com.gt/index.php/opinion/opinion/columnas/180874-la-importancia-de-proveer-infraestructura-en-un-pais

✓ Pacheco Ruiz, D. A., & Perez Hernandez, Y. C. (2009). *Monografía sobre el mejoramiento de las mezclas asfálticas con el uso de microglomerados.* Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

✓ Pérez, C., & Yanovich, D. (Febrero de 1999). *Sector Carreteras.* Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Corficolombiana: http://www.corficolombiana.com/webcorficolombiana/Repositorio/informes/IS01021999.PDF

✓ Pérez, M., & López, J. (27 de Enero de 2014). *Universidad de San Buenaventura (USB).* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Estado del conocimeinto de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación: http://letravirtual.usbctg.edu.co/index.php/ingeniator/article/view/290

✓ Pontificia Universidad Javeriana. (4 de Febrero de 2014). *Pontificia Universidad Javeriana.* Recuperado el 16 de Abril de 2014, de Listado de precios 2014: http://puj-portal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad%20de%20Ingenieria/1pdf_depto_civil/PRECIOS_FEBRERO_2014.pdf

✓ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (3 de Enero de 2008). *Perspecticas del Medio Ambiente Mundial GEO-4, medio ambiente para el desarrollo.* Recuperado el 3 de Marzo de 2014, de United Nations Environment Programme (UNEP): http://www.unep.org/geo/geo4/report/geo-4_report_full_es.pdf

✓ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (25 de Abril de 2013). *Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Reparar, Reducir, Reciclar, Reutilizar: Las 4R - Una forma de vivir: http://www.unep.org/pdf/Tunza_11.1-Spa.pdf

✓ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA); Alcaldía de Cartagena de Indias; Establecimiento Publico Ambiental de Cartagena (EPA); Observatorio del Caribe Colombiano. (Mayo de 2009). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: Geo Cartagena.* Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): http://www.pnuma.org/deat1/pdf/2009%20-%20GEO%20Cartagena.pdf

✓ Racines, C. (Agosto de 2009). *Universidad Autónoma de Occidente (UAO).* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Propuesta para el manejo integral de residuos solidos para el corregimiento de Bocas del Palo, Municipio de Jamundí departamento del Valle del Cauca: http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/446/1/T0003405.pdf

✓ Reyes, O. (22 de Mayo de 2008). *Universidad Militar Nueva Granada (UMNG).* Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Empleo de basura para mejorar las propiedades mecánicas de una estructura de pavimento: http://www.umng.edu.co/documents/63968/74797/ghl_9articulo12.pdf

✓ Rondón, H., Fernández, W., & Castro, W. (1 de Marzo de 2010). *Scientific Electronic Library Online (Scielo)*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD): http://www.scielo.cl/pdf/ric/v25n1/art04.pdf

✓ Salamanca, L. (2005). *Diagnóstico Ambiental asociado al manejo de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Arauca*. Recuperado el 11 de Marzo de 2014, de Universidad Nacional de Colombia: http://www.bdigital.unal.edu.co/5194/1/trabajo_final_Luis_E_salamanca.pdf

✓ Salgado, M. (2002). *Scribd*. Recuperado el 17 de Abril de 2014, de Laboratorio de Pavimentos: Teorá del comportameinto de mezclas asfálticas: http://es.scribd.com/doc/96840145/Dise-o-de-Mezcla-Asf-1-MARSHALL

✓ Sánchez, H. (14 de Julio de 2005). Método Shell para el diseño de espesores de pavimentos flexibles. (K. Benavides, Entrevistador)

✓ Superintendecia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD). (25 de Abril de 2013). *Informe Nacional de Disposición Final*. Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Superintendenia de Servicios Publicos Domiciliarios (SSPD): http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=bd321493-655b-4122-9981-24fdd5091a52&groupId=2859846

✓ Superintendeia de Servicios Publicos Domiciliarios (SSPD). (Agosto de 2011). *Estudio Sectorial del Servicio Público de Aseo 2010*. Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Superintendeia de Servicios Publicos Domiciliarios (SSPD): http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=97784f1b-c9bb-43a0-93fe-d11384326fd4&groupId=342818

✓ Superintendencia de Servicios Publicos Domiciliario (SSPD). (23 de Junio de 2008). *Situación de la Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia*. Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliario (SSPD):

http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?p_l_id=25030&folderId=25192&name=DLFE-8354.pdf

✓ Tamayo T., M. (2002). El proceso de la investigación científica. En M. Tamayo T., & G. Noriega (Ed.), *El proceso de investigación científica* (Cuarta ed., págs. 37-64). México D.F., México D.F.: Limusa S.A. de C.V.

✓ Universidad de Cantabria (UNICAN). (12 de Febrero de 2014). *Universidad de Cantabria (UNICAN)*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Workshop POLYMIX: Desarrollo de asfalto con residuos plásticos: http://www.giteco.unican.es/polymix/Documentation/TripticoWorkshopPOLYMIX%202014-02-12.pdf

✓ Universidad de las Americas Puebla (UDLAP). (26 de Febrero de 2008). *Universidad de las Americas Puebla (UDLAP)*. Recuperado el 17 de Abril de 2014, de Pruebas de desempeño para mezclas asfalticas: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo4.pdf

✓ Universidad de Los Andes. (2014). *Infraestructura Vial*. Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de Universidad de Los Andes: https://civil.uniandes.edu.co/web/?seccion=7&ver=25&lenguaje=es

✓ Universidad de Medellín (UDEM). (13 de Marzo de 2008). *Universidad de Medellín*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Analisis del desarrollo sostenible en Colombia: Estado del Arte: http://cdigital.udem.edu.co/TESIS/CD-ROM26292008/07.Capitulo1.pdf

✓ V.S.Puninth, & Veeraragavan, A. (2007). Behavior of Asphalt Concrete Mixture with Reclaimed Polyethylene as Additive. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 500-507.

✓ Vergara, H. (2014). *Camioneros*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de Diseño directo de pavimentos flexibles: http://www.camineros.com/docs/cam027.pdf

✓ Wan Abdul, W. W., & Abdul, A. (2013). Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. *Elsevier Ltd.*, 124-128.

✓ Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., & Zha, J. (2008). Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavimen t performance and environmental impact. *Elsevier Ltd.*, 989-996.

✓ Yepes, T., Ramírez, J., Villar, L., & Aguilar, J. (Julio de 2013). *Infraestructura de Transporte en Colombia, Executive Summary in English*. Recuperado el 26 de Febrero de 2014, de FEDESARROLLO (Centro de Investigacón Económica y Social=: http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/Infraestructura-de-transporte-en-Colombia-Cuaderno-46-WEB.pdf

9. ANEXOS

Anexo 1. Carta de Patrocinio por parte de la CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S.

CmV

CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S
NIT. 806.008.737-1

Cartagena de Indias D. T. y C., 25 de Marzo de 2014.

Ingeniero,
RAMÓN TORRES ORTEGA
Decano
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

Cordial Saludo,

Teniendo en cuenta que los estudiantes KARINA DE JESÚS BENAVIDES BURGOS con código 0211010029 del programa de INGENIERÍA CIVIL; SAMUEL ALFONSO CONTRERAS MADERA con código 0230810021 y JEFFERSON STEADYN PALACIOS ESPINEL con código 0230920003 del programa de INGENIERIA QUIMICA, se encuentran desarrollando los siguientes trabajos de investigación titulados respectivamente:

- *"Pavimentos ecológicos: mejoramiento de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente (mdc-2) modificada con desechos plásticos"*
- *"Caracterización físico-química de asfalto modificado con residuos de PET y PEAD para aplicaciones viales"*

Para ello requieren elaborar diferentes ensayos de laboratorio empleando materiales tales como asfalto y agregados pétreos, me permito comunicarle que la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S. con NIT. 806.008.737-1 con domicilio en la ciudad de Cartagena de Indias, se compromete en apoyar en todo lo relacionado con pruebas de laboratorios y materiales, para llevar a feliz término dichas investigaciones.

Cordialmente,

DIEGO ALVAREZ HERNANDEZ
GERENTE TECNICO
CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S.

Página 1 de 1

PAF-004 VERSION 0 FECHA 6/06/12

Carrera. 51 No. 07 A-24. TEL. 2565677-2572088- Fax. 2571886
Bogotá D. C. -Colombia

Benavides B., K.

Anexo 2. Certificado ISO 9001 de 2008 vigente con el que cuenta la empresa CONSTRUCTORA MONTECARLO VIA S.A.S

ISO 9001

icontec

ICONTEC Certifica que el Sistema de Gestión de:
ICONTEC Certifies that the Management System of:

CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.S.

Autopista Bogotá-Girardot, kilómetro 108, Vereda La Esmeralda Nilo , Cundinamarca; Carrera No. 51 97A-24, Bogotá D.C.; vía Bayunca – Pontezuela, kilómetro 2 Cartagena, Bolívar; Vía Tolúviejo – San Onofre, kilómetro 3 Tolúviejo, Sucre
Colombia

ha sido evaluado y aprobado con respecto a los requisitos especificados en:
has been assessed and approved based on the specified requirements of:

ISO 9001:2008

Este Certificado es aplicable a las siguientes actividades:
This certificate is applicable to the following activities:

Construcción de obras de infraestructura vial, obras de urbanismo, redes de acueducto, alcantarillado, eléctricas y telecomunicaciones. Producción de agregados pétreos y mezclas asfálticas. Gestión de estudios y diseños en ingeniería civil

Construction of road infrastructure works, urbanism works, water supply, sewage, electrical and telecommunications networks. Production of stony aggregates and asphaltic mixtures. Management of studies and designs in civil engineering

Esta aprobación está sujeta a que el sistema de gestión se mantenga de acuerdo con los requisitos especificados, lo cual será verificado por ICONTEC
This approval is subject to the maintenance of the management system according to the specified requirements, which will be verified by ICONTEC

Certificado SC 3511-1
Certificate

Fecha de Aprobación: 2008 12 09
Approval Date

Fecha Última Modificación: 2013 07 03
Last Modification Date

Fecha de Vencimiento: 2014 12 07
Expiration Date

Directora Ejecutiva
Executive Director

Anexo 3. Resumen de Diseño Marshall establecido en la Planta Torcoroma.

CMV INGENIEROS CONTRATISTAS	RESUMEN DISEÑO MARSHALL	Código:	FLB-006
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-06

TIPO DE MEZCLA: MDC-2
ESPECIFICACION: INVIAS 450
EJECUTADO POR: JULIO CESAR GIL FECHA 20/06/2014
REVISADO POR: ING. ORLANDO CASTELLON FECHA 20/06/2014

DOSIFICACIÓN: Tri 3/4"=20% Tri 1/2 =35% Arena Agracar 20% Arena de Palmarito 20% Llenante 0-3 mm

ITEM	VALOR OBTENIDO
CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	5,5%
DENSIDAD (g/cm^3)	2,295
ESTABILIDAD (Lb)	2200
FLUJO (0.01 Plg)	13,4
VACÍOS CON AIRE (%)	5,0%
VACIOS EN AGREGADOS MINERALES (%)	15,0
VACÍOS CON ASFALTO (%)	67,0
RELACIÓN LLENANTE/ LIGANTE	0,98
TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C)	150
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	120-140

OBSERVACIONES:

LABORATORISTA INGENIERO

Anexo 4. Gradación Mezcla MDC-2.

CMV INGENIEROS CONSTRUCTORES

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A

MEZCLA MDC-2

Código:	FLB-012
Versión:	1
Fecha:	26 feb 06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S. A

OBRA: INFORME No

DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No 1

FUENTE: DOSIFICACION LABORATORIO SOLICITUD No

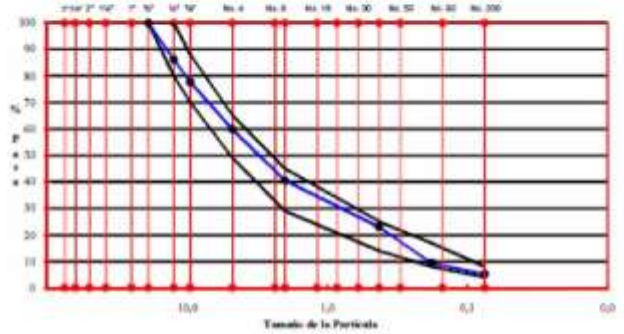
FECHA DE TOMA: 18-jun FECHA DE ENS JUN 18/2014 2014

LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ mm.	TAMIZ No.	PESO RETENIDO	%RETENIDO TOTAL	%RETENIDO ACUMULADO	%PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"						
19,0	3/4"	0	0,0	0,00	100,0	100	100
12,5	1/2"	206,00	13,7	13,73	86,3	80	100
9,5	3/8"	130,00	8,7	22,40	77,6	70	88
4,8	No.4	266,00	17,8	40,27	59,7	48	68
2,0	No.10	286,00	19,2	59,47	40,5	28	40
0,43	No.40	264,00	17,6	77,07	22,9	14	26
0,180	No.80	204,00	13,6	90,67	9,3	8	17
0,075	No.200	62,00	4,1	94,80	5,2	4	8
	FONDO	78	5,2	100,00			

PESO MUESTRA SECA(GRS) 1.609



LÍMITE LÍQUIDO	NL	Cu =	D60 / D10	ÍNDICE DE GRUPO	
LÍMITE PLÁSTICO	NP	Cg =	(D30)^2 / D10	CLASIFICACIÓN AASHTO	
INDICE PLÁSTICO	-	Cg =	(D30)^2 / D10	CLASIFICACIÓN USC	

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES: FORMULA DE TRABAJO PARA DISEÑO DE 20% TRITURADO PASA 3/4", 33% TRITURADO PASA 1/2", 20% ARENA PALMARITO LAVADA 20% ARENA PALMARITO ZARANDEADA,3% LLENANTE Cal

ESPECIFICACIONES

ENSAYOS ASOCIADOS:

RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 5. Análisis Granulométrico por tamizado a Triturado pasa ¾".

CMV	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A	Codigo:	FLB-012
		Versión:	1
	TRITURADO PASA 3/4"	Fecha:	06 feb 06

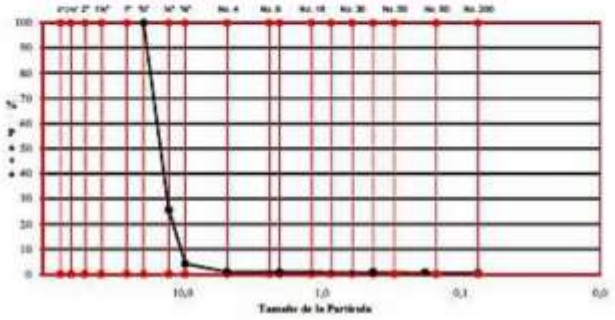
EMPRESA: CONTRUCTORA MONTECARLO VIAS S A
OBRA: INFORME No 1
DESCRIPCION: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No 1

FUENTE: CANTERA ROTINET SOLICITUD No 1
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		% PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA	
mm.	No.		TOTAL	ACUMULADO		PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"	0,0	0,0	0,0	100,0		
19,0	3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0		
12,5	1/2"	1744,0	74,4	74,4	25,6		
9,5	3/8"	504,0	21,5	95,9	4,1		
4,8	No.4	74,0	3,2	99,1	0,9		
2,0	No.10	2,0	0,1	99,1	0,9		
0,43	No.40	2,0	0,1	99,2	0,8		
0,180	No.80	3,0	0,1	99,3	0,7		
0,075	No.200	6,0	0,3	99,6	0,4		
	FONDO	10,0	0,4	100,0	0,0		

PESO MUESTRA SECA(GRS) 2.344



LÍMITE LÍQUIDO NL Cu = D60 / D10 ÍNDICE DE GRUPO
LÍMITE PLÁSTICO NP Cg = (D30)^2 * D10 CLASIFICACIÓN AASHTO
ÍNDICE PLÁSTICO - Cg = (D30) ^2 * D10 CLASIFICACIÓN USC

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

JUN 18/2014

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 6. Análisis Granulométrico por tamizado a Triturado pasa ½".

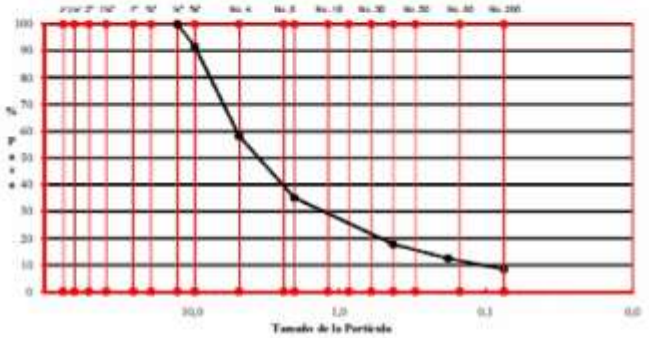
CMV INGENIEROS CONSTRUCTORES	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A TRITURADO PASA 1/2"	Código:	FLS-012
		Versión:	1
		Fecha:	06 feb 06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S A
OBRA: INFORME No
DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No
FUENTE: PRODUCTO DE TRITURACION SOLICITUD No
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ mm.	TAMIZ No.	PESO RETENIDO	% RETENIDO TOTAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"						
19,0	3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0		
12,5	1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0		
9,5	3/8"	156,0	8,7	8,7	91,3		
4,8	No.4	596,0	33,2	41,9	58,1		
2,0	No.10	414,0	23,0	64,9	35,1		
0,43	No.40	312,0	17,3	82,3	17,7		
0,180	No.80	96,0	5,3	87,6	12,4		
0,075	No.200	72,0	4,0	91,6	8,4		
	FONDO	151,0	8,4	100,0			

PESO MUESTRA SECA(ORS) 1.799



LÍMITE LÍQUIDO: NL Cu = D60 / D10 ÍNDICE DE GRUPO
LÍMITE PLÁSTICO: NP Cg = (D30)^2 * D10 CLASIFICACIÓN AASHTO
ÍNDICE PLÁSTICO: - Cg = (D30) ^2 * D10 CLASIFICACIÓN USC
CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S
OBSERVACIONES:
ESPECIFICACIONES:
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma LABORATORISTA

Nombre y Firma INGENIERO

Anexo 7. Análisis Granulométrico para Arena Zarandeada de Palmarito.

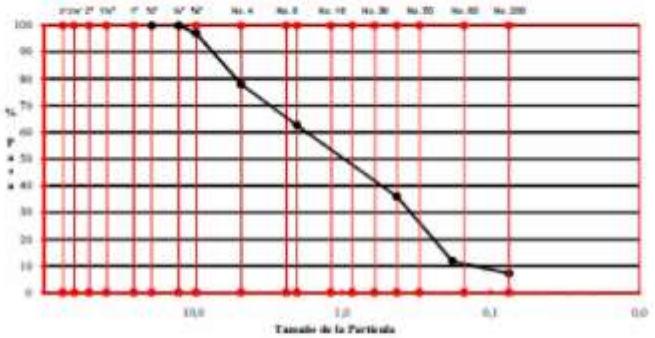
CmV INGENIEROS CONSTRUCTORES	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A	Código:	FLB-012
		Versión:	1
	ARENA ZARANDEADA PALMARITO	Fecha:	06 feb 06

EMPRESA: CONSTROCTIRA MONTECARLO VIAS S A
OBRA: DISEÑO MDC-2 — INFORME No 1 — MUESTRA No 1
DESCRIPCIÓN:
FUENTE: ARENA PALMARITO ZARANDEADA — SOLICITUD No 1
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 — FECHA DE ENSAY JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ mm	TAMIZ No.	PESO RETENIDO	%RETENIDO TOTAL	%RETENIDO ACUMULADO	%PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"	0,0	0,0	0,0	100,0		
19,0	3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0		
12,5	1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0		
9,5	3/8"	62,0	3,1	3,1	96,9		
4,8	No.4	322,0	19,0	22,1	77,9		
2,0	No.10	260,0	15,3	37,4	62,6		
0,43	No.40	483,0	28,7	64,1	35,9		
0,180	No.80	410,0	24,2	88,3	11,7		
0,075	No.200	76,0	4,5	92,8	7,2		
	FONDO	122,0	7,2	100,0	0,0		

PESO MUESTRA SECA(GRS) 1.694



LÍMITE LÍQUIDO NL — Cu = D60 / D10 — ÍNDICE DE GRUPO
LÍMITE PLÁSTICO NP — Cg = (D30)^2 ' D10 — CLASIFICACIÓN AASHTO
ÍNDICE PLÁSTICO - — Cg = (D30) ^2 ' D10 — CLASIFICACIÓN USC

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma LABORATORISTA

Nombre y Firma INGENIERO

Anexo 8. Análisis Granulométrico para Arena Palmarito Lavado

CMV	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A	Código:	FLB-012
		Versión:	1
	ARENA PALMARITO LAVADA	Fecha:	06 feb 06

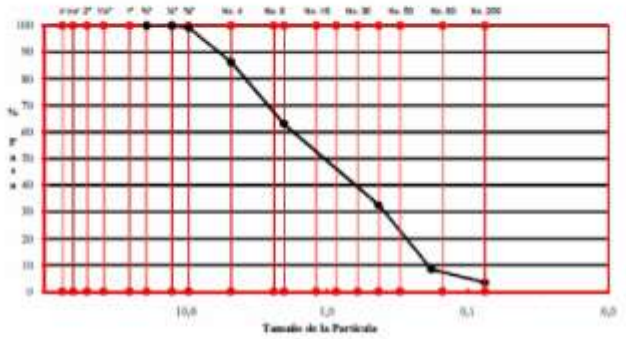
EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S A
OBRA: INFORME No: 1
DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No: 1

FUENTE: ARENA TRITURADA LAVADA PALMARITO SOLICITUD No: 1
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, SAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		% PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA	
mm.	No.		TOTAL	ACUMULADO		PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"	0,0	0,0	0,0	100,0		
19,0	3/4"	0,0	0,0	0,0	100,0		
12,5	1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0		
9,5	3/8"	16,0	0,8	0,8	99,2		
4,8	No.4	266,0	13,0	13,8	86,2		
2,0	No.10	476,0	23,3	37,0	63,0		
0,43	No.40	634,0	30,5	67,5	32,5		
0,180	No.80	492,0	24,0	91,5	8,5		
0,075	No.200	102,0	5,0	96,5	3,5		
	FONDO	71,0	3,5	100,0	0,0		

PESO MUESTRA SECA(ORIG) 2.047



LÍMITE LÍQUIDO NL Cu = D60 / D10 ÍNDICE DE GRUPO
LÍMITE PLÁSTICO NP Cg = (D30)^2 / D10 CLASIFICACIÓN AASHTO
ÍNDICE PLÁSTICO - Cg = (D30) ^2 / D10 CLASIFICACIÓN USC

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES:
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYO:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 9. Análisis Granulométrico para llenante mineral

CMV	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A	Código:	PLB-012
		Versión:	1
	LLENANTE	Fecha:	05 feb 08

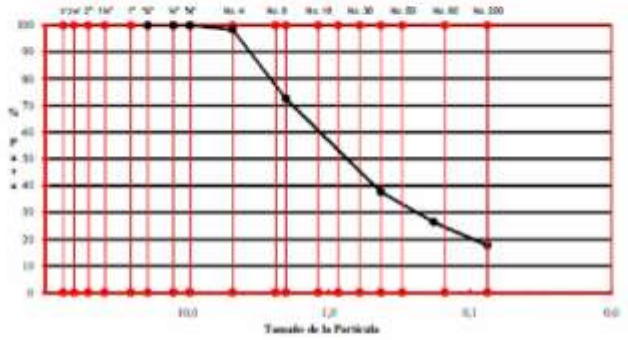
EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.
OBRA: INFORME No 1
DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No 1

FUENTE: llenante arena 0--3 m.m. SOLICITUD No 1
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCORAMA, BAYUNCA

NORMA DE ENSAYO E-213

TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		% PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA	
mm.	No.		TOTAL	ACUMULADO		PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"						
19,0	3/4"	0,0	0,0	0,00	100,0		
12,5	1/2"	0,0	0,0	0,00	100,0		
9,5	3/8"	0,0	0,0	0,00	100,0		
4,8	No.4	28,0	1,7	1,68	98,3		
2,0	No.10	430,0	25,7	27,43	72,6		
0,43	No.40	594,0	35,0	62,40	37,6		
0,180	No.80	188,0	11,3	73,68	26,3		
0,075	No.200	148,0	8,7	82,40	17,6		
	FONDO	294,0	17,6	100,00	0,0		

PESO MUESTRA SECA(GRS) 1.670



LÍMITE LÍQUIDO NL Cu = D60 / D10 ÍNDICE DE GRUPO
LÍMITE PLÁSTICO NP Cg = (D30)^2 / D10 CLASIFICACIÓN AASHTO
ÍNDICE PLÁSTICO - Cg = (D30) ^2 / D10 CLASIFICACIÓN USC

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES:
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Benavides B., K.

Anexo 10. Informe general de Caracterización de Agregados y Cemento Asfáltico Convencional.

CmV	RESUMEN - CARACTERIZACION DE AGREGADOS Y CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL	Código:	PLB-005
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A.
OBRA:
DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE MDC-2
INFORME No:
MUESTRA No:

FUENTE: MATERIALES EN STOCK
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA BAYUNCA
SOLICITUD No:
FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014

MEZCLA MDC-2

CARACTERISTICA	Partículas fracturadas mecánicamente (%)	Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	Pérdida de solidez en sulfato de sodio (%)	Adherencia en bandeja (%)	Índice de aplanamiento (%)	Índice de alargamiento (%)	Plasticidad (%)	Equivalente de arena (%)	Resistencia Conservada Inmersión Compresión (%)	Peso específico ponderado
NORMA INV	E-227	E-218, E-219	E-220	E-732	E-230	E-230	E-125/126	E-133	E-738	E-223
AGREGADO GRUESO	82,60	22,60	4,60		24,00	24,00	NP		25,0%	2,521
AGREGADO FINO (ARENA)			3,20				NP	50		2,584
ESPECIFICACIÓN	>75	<25	<12		<35	<35	NP	>50	<25	2,547

CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

CARACTERISTICA	Penetración a 25ºC (0.1 mm)	Penetración a 4ºC	Ductilidad a 25ºC (cm)	Punto ablandamiento (ºC)	Contenido de agua (%)	Solubilidad en TCE (%)	Punto de llama (ºC)	Índice de penetración	Pérdida de masa (%)	Comentarios
CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO										
CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL	67		140	47,8		99,9	294,0	-0,9	0,2	NINGUNO

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES:
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 11. Peso específico y Absorción de agregados finos y gruesos.

CHV INGENIEROS CONTRATISTAS	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS	Código:	FLB-017
		Versión:	1
		Fecha:	06 feb 06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A
OBRA: INFORME No
DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA MUESTRA No
FUENTE: MEZCLA M.D.C.2 LABORATORIO SOLICITUD No
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN TORCOROMA, BAYUNCA

AGREGADOS FINOS				
NORMA DE ENSAYO: E - 222				
EQUIPO UTILIZADO:	Equipos en codigos			
	ENSAYOS No.		1	2
1	PESO DEL RECIPIENTE, Grs.	-	227,3	
2	PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA AL HORNO, Grs.	-	718,1	
A	PESO AL AIRE DE LA MUESTRA DESECADA, Grs.	2 - 1	491,2	
S	PESO DE LA MUESTRA SSS, Grs.	-	500	
B	PESO DEL RECIPIENTE AFORADO LLENO DE AGUA, Grs.	-	655,7	
C	PESO DEL RECIPIENTE AFORADO CON LA MUESTRA Y LLENO DE AGUA,	-	964,1	
PESO ESPECIFICO APARENTE		A / (B+S-C)	2,564	
PESO ESPECIFICO APARENTE S.S.S.		S / (B+S-C)	2,610	
PESO ESPECIFICO NOMINAL		A / (B+A-C)	2,687	
ABSORCIÓN, %		100*(S - A) / A	1,8	

AGREGADOS GRUESOS				
NORMA DE ENSAYO: E - 223				
EQUIPO UTILIZADO:	Equipos en codigos			
	ENSAYOS No.		1	2
1	PESO DEL RECIPIENTE, Grs.	-	139	
2	PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA AL HORNO, Grs.	-	1260,5	
A	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA , Grs.	2 - 1	1122,5	
3	PESO DE LA CANASTA EN EL AGUA, Grs.	-	544,5	
4	PESO DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S AL AIRE, Grs.	-	1283,1	
5	PESO DE LA CANASTA + MUESTRA S.S.S EN EL AGUA, Grs.	-	1044,6	
B	PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA S.S.S., Grs.	4-1	1145,1	
C	PESO SUMERGIDO EN AGUA DE LA MUESTRA SATURADA,	5 - 3	699,9	
PESO ESPECIFICO APARENTE		A / (B - C)	2,521	
PESO ESPECIFICO APARENTE S.S.S.		B / (B - C)	2,572	
PESO ESPECIFICO NOMINAL		A / (A - C)	2,654	
ABSORCIÓN, %		100*(B - A) / A	2,0	

OBSERVACIONES: EL PESO ESPECIFICO DE LOS AGREGADOS ES 2,547

ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 12. Desgaste en la Máquina de los Ángeles.

CMV	DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES	Codigo:	FLB-015
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A
OBRA: INFORME No
DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No
FUENTE: TRITURADO 3/4 SOLICITUD No
FECHA DE TOMA: JUN 16/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 16/2014
LOCALIZACIÓN:

ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL INVIAS 450

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7
Gradación usada	B						
No. de esferas	11						
No. de revoluciones	500						
Pa= masa muestra seca	5000						
Pb= masa muestra seca	3860						
Pa - Pb = pérdida	1140						
% Desgaste= (Pa-Pb)/Pa	22.8%						
Valor según	< 25 %	< 25 %	< 25 %	< 25 %	< 25 %	< 25 %	< 25 %
Cumple especificación	SI						

DATOS SOBRE GRADACION, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES

NORMA DE ENSAYO: E - 218 E - 219								
TAMAÑOS		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA (g)						
PASA	RETIENE	A	B	C	D	E	F	G
63 mm (2 ½")	63.5 mm (2 ½")					2500		
63.5m (2 ½")	50.8 mm (2")					2500		
50.8 mm (2")	38.1 mm (1 ½")					5000	5000	
38.1 mm (1 ½")	25,4 mm (1")	1250					5000	5000
25,4 mm (1")	19 mm (¾")	1250						5000
19 mm (¾")	12.7 mm (½")	1250	2500					
12.7 mm (½")	9.5 mm (3/8")	1250	2500					
9.5 mm (3/8")	6.4 mm (No. 3)			2500				
6.4 mm (No. 3)	4.75 mm (No. 4)			2500				
4.75 mm (No. 4)	2.4 mm (No. 8)				5000			
No. DE ESFERAS		12	11	8	6	12	12	12
No. DE REVOLUCIONES		500	500	500	500	1000	1000	1000

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma LABORATORISTA

Nombre y Firma INGENIERO

Anexo 13. Porcentaje de Caras Fracturadas.

CmV	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS E ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO EN LOS AGREGADOS	Código	[illegible]
		Versión	1
		Fecha	[illegible]

EMPRESA:	MONTECARLO RAS S.A		
OBRA:		INFORME No:	
DESCRIPCIÓN:	DISEÑO MDC-2	MUESTRA No:	
FUENTE:	MEZCLA DE AGREGADOS DE LA MEZCLA	SOLICITUD No:	
FECHA DE TOMA:	[illegible]	FECHA DE ENSAYO:	[illegible]
LOCALIZACIÓN:	TORCOROMA, BAYUNCA		

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS						
NORMA DEL ENSAYO: E - 227						
EQUIPO UTILIZADO: Equipos en Código						
TAMAÑO DEL AGREGADO		PESO MUESTRA	PESO MATERIAL DE CARAS FRACTURADAS	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS	PORCENTAJE RETENIDO GRADACIÓN ORIGINAL	PROMEDIO DE CARAS FRACTURADAS
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	A	B	C = 100 * (B / A)	D	E = (C * D)
		Gm.	Gm.	Gm.	%	Gm.
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1/2"	3/8"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
TOTAL		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS = (TOTAL B / TOTAL D) =	[illegible]
VALOR ESPECIFICADO	> 75%
CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N)	S

Anexo 14. Equivalente de arena para las muestras seleccionadas.

CMV INGENIEROS CONSTRUCTORES	EQUIVALENTE DE ARENA	Código:	FLE-015
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A

OBRA: NA INFORME No

DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No 1

FUENTE: MEZCLA LABORATORIO SOLICITUD No

FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014

LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA

EQUIPO UTILIZADO: Equipos en códigos ABSCISA: n/a

NORMA DE ENSAYO: E - 133

MUESTRA No.		1			2			3		
PROBETA No.		A	B	C	A	B	C	A	B	C
A	LECTURA ARCILLA, Cms.	16,2	15,8	16,2						
B	LECTURA ARENA, Cms.	8,6	9	8,8						
	EQUIVALENTE ARENA, % = 100*B/A	53	57	54						
E.A.	EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO, %	55								

VALOR ESPECIFICADO PARA EL MATERIAL >50%

CUMPLE ESPECIFICACIÓN (S/N) S

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES

ENSAYOS ASOCIADOS:

RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 15. Índice de Aplanamiento de los agregados pétreos.

INDICE DE APLANAMIENTO				
NORMA DEL ENSAYO: E - 230				
EQUIPO UTILIZADO: Equipos en Códigos				
FRACCIÓN	PESO INICIAL FRACCIÓN	PESO QUE PASA	Porcentaje Retenido	Promedio de Aplanamiento
	A	B	Gradacion original	B*C
	Grs.	Grs.	C (%)	%
2 1/2" - 2"				
2" - 1 1/2"				
1 1/2" - 1"				
1" - 3/4"				
3/4" - 1/2"	766	123	13,7	222,9
1/2" - 3/8"	520	80	8,7	100,4
3/8" - No.4	335	138	17,9	737,4
TOTAL	1611	321	40,3	**1060,7**

PORCENTAJE DE APLANAMIENTO	**26**
VALOR ESPECIFICADO	< 30%

Anexo 16. Índice de alargamiento de los agregados pétreos.

INDICE DE ALARGAMIENTO				
NORMA DEL ENSAYO: E - 230				
EQUIPO UTILIZADO: Equipos en Códigos				
FRACCIÓN	PESO INICIAL FRACCIÓN	PESO QUE PASA	Porcentaje Retenido	Promedio de Aplanamiento
	A	B	Gradacion original	B*C
	Grs.	Grs.	C (%)	%
2 1/2" - 2"				
2" - 1 1/2"				
1 1/2" - 1"				
1" - 3/4"				
3/4" - 1/2"	766	132	13,7	239,2
1/2" - 3/8"	520	102	8,7	170,7
3/8" - No.4	335	108	17,9	577,1
TOTAL	1611	342	40,3	**986,9**

PORCENTAJE DE ALARGAMIENTO	**24**
VALOR ESPECIFICADO	< 30%

Anexo 17. Contenido aproximado de materia orgánica en arenas, INV 212

CmV INGENIEROS CONSTRUCTORES	CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA	Código:	[illegible]
		Versión:	1
		Fecha:	[illegible]

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A

OBRA: INFORME No

DESCRIPCIÓN: ARENAS MEZCLA M.D.C 2 MUESTRA No

FUENTE: STOCKS PLANTA SOLICITUD No

FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014

LOCALIZACIÓN: PLANTA DE ASFALTO TORCOROMA-BAYUNCA

NORMA DEL ENSAYO: E-212

SOLUCIÓN USADA: HIDROXIDO DE SODIO

TIEMPO DE REPOSO: 24 HORAS

RESULTADO: CUMPLE

COLOR OBTENIDO	0	~~1~~	2	3	4	5

NORMA: <3 CUMPLE
NO CUMPLE

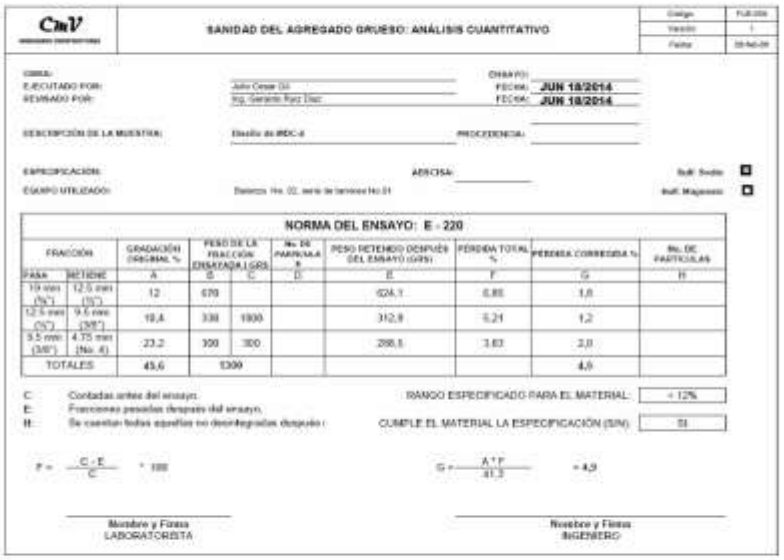
OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 18. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones De sulfato de sodio o de magnesio en agregados gruesos.



CMV	SANIDAD DEL AGREGADO GRUESO: ANÁLISIS CUANTITATIVO	Código:	FLB-016
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-09

OBRA:
EJECUTADO POR: Julio Cesar Gil
REVISADO POR: Ing. Gerardo Ruiz Díaz
ENSAYO:
FECHA: JUN 18/2014
FECHA: JUN 18/2014

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: Diseño de MDC-2
PROCEDENCIA:

ESPECIFICACIÓN:
ABSCISA:
Sulf. Sodio ☐
EQUIPO UTILIZADO: Balanza No. 02, serie de tamices No.01
Sulf. Magnesio ☐

NORMA DEL ENSAYO: E - 220

FRACCIÓN		GRADACIÓN ORIGINAL %	PESO DE LA FRACCIÓN ENSAYADA (GRS)		No. DE PARTÍCULAS	PESO RETENIDO DESPUÉS DEL ENSAYO (GRS)	PÉRDIDA TOTAL %	PÉRDIDA CORREGIDA %	No. DE PARTÍCULAS
PASA	RETIENE	A	B	C	D	E	F	G	H
19 mm (¾")	12.5 mm (½")	12	670			624.1	6.85	1,8	
12.5 mm (½")	9.5 mm (3/8")	10,4	330	1000		312,9	5,21	1,2	
9.5 mm (3/8")	4.75 mm (No. 4)	23,2	300	300		288,5	3,83	2,0	
TOTALES		45,6	1300					4,9	

C: Contadas antes del ensayo.
E: Fracciones pesadas después del ensayo.
H: Se cuentan todas aquellas no desintegradas después.

RANGO ESPECIFICADO PARA EL MATERIAL: < 12%
CUMPLE EL MATERIAL LA ESPECIFICACIÓN (S/N): SI

$$F = \frac{C - E}{C} * 100$$

$$G = \frac{A * F}{41,3} = 4,9$$

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 19. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones De sulfato de sodio o de magnesio en agregados finos.

CMV	SANIDAD DEL AGREGADO FINO: ANÁLISIS CUANTITATIVO	Código:	FLB-016
		Versión:	1
		Fecha:	06-feb-09

EJECUTADO POR: Julio Cesar Gil
REVISADO POR: Ing. Gerardo Ruiz
FECHA: JUN 18/2014
FECHA: JUN 18/2014

PROCEDENCIA: Mezcla de Materiales Palmar, Arena de Palmarito y polvillo chileno

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: Diseño de MDC-2
ESPECIFICACIÓN: 2.0 Gal
ABSCISA:
Sulf. Sodio ☐
EQUIPO UTILIZADO: Balanza No. 02, Serie de tamices No.01
Sulf. Magnesio ☐

NORMA DEL ENSAYO: E - 220

FRACCIÓN		GRADACIÓN ORIGINAL %	PESO DE LA FRACCIÓN ENSAYADA (GRS)	PESO RETENIDO DESPUÉS DEL ENSAYO (GRS)	PÉRDIDA TOTAL %	PÉRDIDA CORREGIDA %
PASA	RETIENE	A	B	C	D	E
0.5 mm (3/8")	4.75 mm (No.4)					
4.75 mm (No.4)	2.36 mm (No.8)	13,2	100	95,4	4,60	60,72
2.36 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)	12,1	100	88,8	3,40	34,34
1.18 mm (No.16)	600 um (No.30)	8,4	100	83,1	6,90	84,85
600 um (No.30)	300 um (No.50)	5,6	100	82,1	1,90	44,24
300 um (No.50)	150 um (No.100)					
150 um (No.100)						
TOTALES		36,3	400	377,2	22,800	204,16

C: Fracciones pesadas después del ensayo

PORCENTAJE DE DESGASTE AGREGADO: 5,25
RANGO ESPECIFICADO PARA EL MATERIAL: < 12%
CUMPLE EL MATERIAL LA ESPECIFICACIÓN (S/N): SI

$$D = \frac{B - C}{B}$$

$$E = \frac{A * D}{100}$$

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO DIRECTOR

- **Anexo 20**. Cubrimiento de los agregados con materiales asfalticos en presencia del agua (Stripping)

CmV INGENIEROS CONSTRUCTORES	CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING)	Codigo:	FLB-026
		Versión:	1
		Fecha:	13/02/06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A

OBRA: INFORME No

DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE MDC-2 MUESTRA N

FUENTE: Triturado 3/4 y 1/2 SOLICITUD No

FECHA DE TOMA: JUN 18/2014 FECHA DE ENSAYO: JUN 18/2014

LOCALIZACIÓN: TORCOROMA BAYUNCA

NORMA DEL ENSAYO: E - 737

PESO DEL MATERIAL	200 Grs.
% DE ASFALTO:	5,5%

RESULTADO: CUMPLE

SUPERIOR AL 95%	X
INFERIOR AL 95%	

OBSERVACIONES:

ESPECIFICACIONES

ENSAYOS ASOCIADOS:

RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 21. Peso especifico máximo teórico de la mezcla asfáltica (Rice)

ChV	PESO ESPECIFICO MAXIMO TEORICO DE LA MEZCLA ASFALTICA (RICE)	Código:	FLB-010
		Versión:	1
		Fecha:	09-feb-06

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A
OBRA:
DESCRIPCIÓN: DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA
INFORME No
MUESTRA No

FUENTE: MEZCLA LABORATORIO
FECHA DE TOMA: JUN 18/2014
LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA
SOLICITUD No
FECHA DE ENSA: JUN 18/2014

ENSAYO METODO RICE					
NORMA DEL ENSAYO: E - 735					
EQUIPO UTILIZADO: Equipos en Código:					
PRUEBA No.	1	2	3	4	5
% DE ASFALTO	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
FRASCO No	I	I	I	I	I
A, gramos	859,0	914,5	847	845,5	824,0
B, gramos	860,0	869,7	845,0	825,5	825,5
C, gramos	351	351	351	351	351
Gmm	2,469	2,433	2,465	2,375	2,355

A: Peso muestra en el aire
B: Peso del frasco + material en agua
C: Peso del frasco en agua
Gmm: Peso especifico maximo teorico medido de la mezcla

Gmm=A/(A+C-B)

OBSERVACIONES

LABORATORISTA

INGENIERO

Anexo 22. Inmersión Compresión, INV 738

CMV — ENSAYO DE INMERSION COMPRESION

Código	FLB-023
Versión	1
Fecha	30-feb-00

OBRA: VARIAS — DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:
NORMA DE ENSAYO: E-738 — PROCEDENCIA: DISEÑO MDC-2
EJECUTADO POR: JULIO GIL — FECHA: JUN 18/2014
REVISADO POR: ORLANDO CASTELLON — FECHA: JUN 18/2014
ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL: INVIAS 450

CURADO		PESO (gramos)			VOLUMEN	PESO ESPECIFICO		ESTABILIDAD (lb)		Flujo	Flujo	% De pérdida de Estabilidad	valor según	cumple
Aire	Agua	En aire	En Aire SSS	En agua	cm3	Actual	Teórico	Medida	Promedio	1/100"	Promedio		especifica	especifica
1		2008,5	2009,9	1159	900,9	2,228	2,351	2604,0						
2		1926	1929,3	1069	860,6	2,215	2,344	2605,7						
3		1975,4	1977,7	1063	894,8	2,206	2,344	2709,0						
									2706					
	4	1937,9	1940,3	1059	880,9	2,200	2,344	2198,8						
	5	1901,4	1905,1	1041	864,4	2,200	2,344	2200,0						
	6	1952,2	1955,9	1069	887	2,201	2,344	2650,0						
									2150					
												21%	<25%	SI

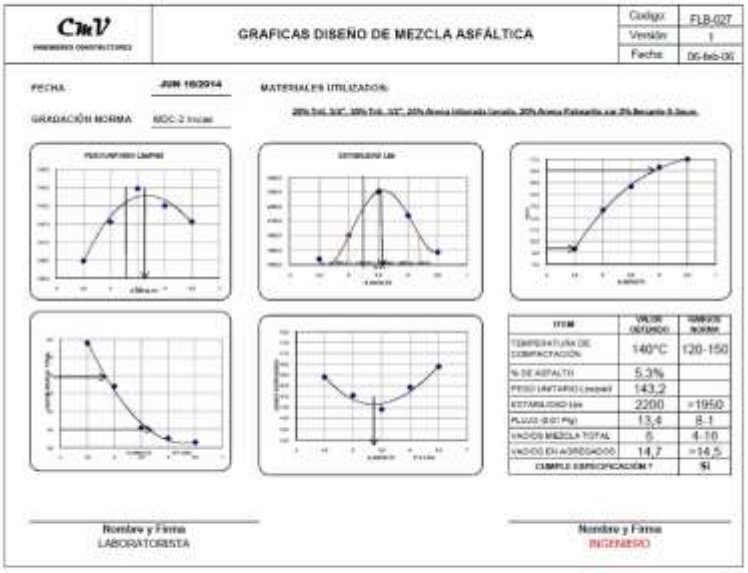
OBSERVACIONES: EL PORCENTAJE DE INMERSION-COMPRESION: 79,4%

NOMBRE Y FIRMA LABORATORISTA — NOMBRE Y FIRMA INGENIERO

Anexo 23. Diseño Marshall.

CMV — DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL

Anexo 24. Graficas Diseño Marshall.



GRAFICAS DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	Código	FLB-027
	Versión	1
	Fecha	06-feb-06

FECHA: JUN 16/2014

MATERIALES UTILIZADOS:

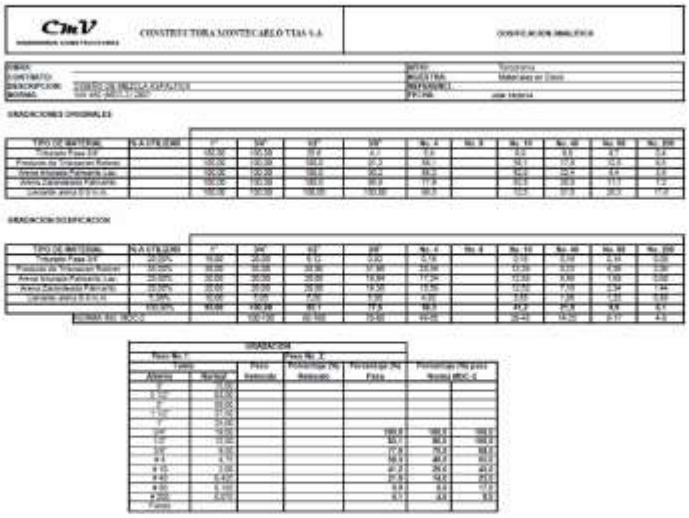
GRADACIÓN NORMA: MDC-2 Inicial

ITEM	VALOR OBTENIDO	RANGOS NORM.
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	140°C	120-150
% DE ASFALTO	5,3%	
PESO UNITARIO (kg/m3)	143,2	
ESTABILIDAD Lbs	2200	>1950
FLUJO (0.01 Plg)	13,4	8-1
VACIOS MEZCLA TOTAL	5	4-10
VACIOS EN AGREGADOS	14,7	>14,5
CUMPLE ESPECIFICACIÓN ?		SI

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

Anexo 25. Dosificación analítica.



CONSTRUCTORA MONTECARLO LTDA S.A.

DOSIFICACION ANALITICA

GRADACIONES ORIGINALES

TIPO DE MATERIAL	% A UTILIZAR	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
Triturado Pasa 3/4"	20,00%	100,00	100,00	97,6	41,7	5,6		4,5	3,5	2,7	2,4
Triturado de Trituracion Natural	30,00%	100,00	100,00	100,0	97,2	55,1		38,1	17,8	12,5	9,5
Arena triturada Pulverizada Lav.	25,00%	100,00	100,00	100,0	100,0	77,0		54,0	24,4	9,4	6,5
Arena Calcinadesta Pulverizada	25,00%	100,00	100,00	100,0	99,8	77,8		60,4	28,0	11,1	7,2
Cemento asfalto 60-70 Pt. Pt.	0,00%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0		100,0	97,9	26,0	17,9

GRADACION DOSIFICACION

TIPO DE MATERIAL	% A UTILIZAR	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
Triturado Pasa 3/4"	20,00%	20,00	20,00	19,52	8,34	1,12		0,90	0,70	0,54	0,48
Triturado de Trituracion Natural	30,00%	30,00	30,00	30,00	29,16	16,53		11,43	5,34	3,75	2,85
Arena triturada Pulverizada Lav.	25,00%	25,00	25,00	25,00	25,00	19,25		13,50	6,10	2,35	1,63
Arena Calcinadesta Pulverizada	25,00%	25,00	25,00	25,00	24,95	19,45		15,10	7,00	2,78	1,80
Cemento asfalto 60-70 Pt. Pt.	0,00%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
	100,00%	100,00	100,00	99,52	87,45	56,35		40,93	19,14	9,50	6,76
HUSOS MDC-2			100,100	90-100	76-90	45-65		29-49	14-30	6-17	4-10

GRADACION

Peso No. 1		Peso No. 2					
Tamiz		Peso Individual	Porcentaje (%) Retenido	Porcentaje (%) Pasa	Porcentajes (%) para Huso MDC-2		
Abertura	Nombre						
1"	25,000						
3/4"	19,000						
1/2"	12,500						
3/8"	9,500						
No. 4	4,750				100,0	100,0	100,0
No. 8	2,360				82,1	90,0	100,0
No. 10	2,000				77,8	76,0	88,0
No. 40	0,425				56,3	45,0	65,0
No. 80	0,180				40,9	29,0	49,0
No. 200	0,075				19,1	9,0	17,0
Fondo					6,8	4,0	6,0

Anexo 26. Grafica de Gradación

ELABORO: Julio Cesar Gil REVISION: Ing. orlando castellon APROBACION:	OBSERVACIONES:

Anexo 27. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para caracterizar el asfalto.

ENSAYOS SOBRE ASFALTOS		
Norma	**Ensayo**	**Objetivo / Resumen Metodología**
ASTM 4402	Viscosidad de Brookfield	Determinar la consistencia de un cemento asfaltico al establecer el par de torsión necesario para aplicar un eje rotacional para que gire a una cierta velocidad, controlando la temperatura.
INV E-709	Punto de ignición y punto de llama mediante la capa abierta de Cleveland	Determinar los puntos de ignición y de llama mediante la copa abierta de Cleveland a una temperatura inferior a 79°C. Esta norma se emplea para medir y describir las propiedades de materiales en respuesta al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas.
INV E-712	Punto de Ablandamiento	Determinar el punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30°C a 157°C, utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30°C a 80°C), glicerina USP (encima de 80°C a 157°C) o glicol etileno (30°C a 110°C).
INV E-706	Penetración	Determinar la consistencia de los materiales asfalticos solidos o semisolidos en los cuales el único componente principal es el asfalto. Se entiende por penetración a la distancia medida en decimas de milímetro, hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. El ensayo se realiza a 25°C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total (incluida en la aguja) de 100 g.

Fuente. Adaptado de Figueroa & Reyes, 2006.

Anexo 28. Reporte de resultados de ensayo de laboratorio sobre el asfalto realizados por ECOPETROL.

PETROL

GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA
COORDINACION INSPECCION DE CALIDAD
Reporte de resultados de ensayo de laboratorio

09/04/2014 10:57:20 J

Producto: ASFALTO 60/70
Número de muestra: 203 736 480
Fecha de Inicio: 09-04-2014 8:33:00
Almacenamiento: RC200

Vo Bo. Si

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO
CURVA REOLOGICA				
VISCOSIDAD A 60 C	cP	214000	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 80 C	cP	19800	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 100 C	cP	3225	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 135 C	cP	351.8	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 150 C	cP	170.8	REPORTAR	ASTM D 4402
DUCTILIDAD	cm	140	100 MINIMO	ASTM D 113 D
GRAVEDAD API/GRAVEDAD ESPECIF. EN LIQUIDOS				
GRAVEDAD API	Grados API	1.4	REPORTAR	ASTM D 4052
DENSIDAD A 15 °C	kg/m3	1039.1	REPORTAR	ASTM D 4052
INDICE DE PENETRACION CALCULADO				
PENETRACION A 25 C (77 F)	NAV10	66	50 MINIMO - 70 MAXIMO	ASTM D 5
INDICE DE PENETRACION	N/A	-1.1	REPORTAR	ASTM D 5
PERDIDA DE MASA (RTFOT)	g/100g	0.46	1.0 MAXIMO	ASTM D 2872
PUNTO ABLANDAMIENTO	°C	47.7	45 MINIMO - 55 MAXIMO	ASTM D 36
PUNTO DE INFLAMACION	°C	332	232 MINIMO	ASTM D 92
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99.8	99.0 MINIMO	ASTM D 2042
VISTO BUENO TANQUES				
VISN	N/A	31	REPORTAR	VISTO BUENO
COMENTARIO	N/A	NINGUNO	REPORTAR	VISTO BUENO

CUMPLIMIENTO DE ESPECIFICACIONES
CUMPLE ESPECIFICACIONES SI NO
FECHA DE REVISIÓN ABRIL 11
REVISADO POR
OBSERVACIONES 26/4
NOTA: SI NO CUMPLE DE ESPECIFICACIONES [illegible]

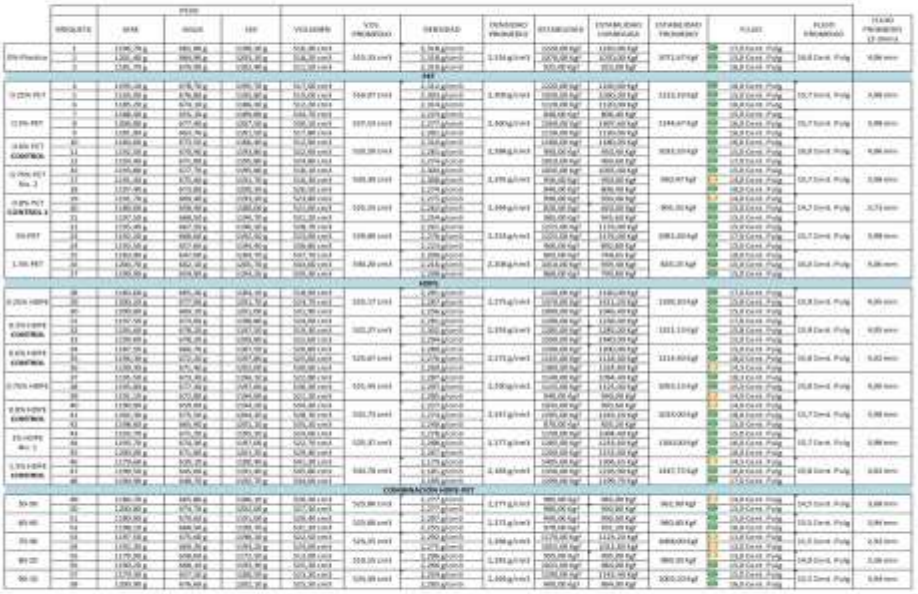
Vo Bo. Nombre

Carlos Alberto Peña Moreno

Página 1 de 2

Anexo 29. Definición sobre los diferentes ensayos a realizar para sobre las mezclas asfálticas.

ENSAYOS SOBRE MEZCLAS ASFALTICAS		
Norma	**Ensayo**	**Objetivo / Resumen Metodología**
INV E-733	Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturadas con superficie seca	Determinar el peso específico aparente y pesos específico unitario de especímenes de mezclas asfálticas compactadas de granulometría densa o que prácticamente no sean absorbentes.
INV E-735	Peso específico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos	Determinar el peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimento sin compactar.
INV E-736	Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas	Determinar el porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas.
INV E-744	Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas asfálticas	Determinar el espesor de especímenes compactados de mezclas asfálticas para pavimentos.
INV E-748	Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall	Determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas para pavimentación.

Fuente. Adaptado de Figueroa & Reyes, 2006.

Anexo 30. Datos experimentales obtenidos.