

Utilización de mezcla asfáltica natural (MAN), procedente de la Mina San Pedro, ubicada en el Municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, con adición de gránulo de caucho reciclado (GCR), para reparcho localizado.
Reparcho ecológico.

JUAN DAVID VILLEGAS CAMARGO
LUIS MAURICIO WILCHES GÓMEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2019

Utilización de mezcla asfáltica natural (MAN), procedente de la Mina San Pedro, ubicada en el Municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, con adición de gránulo de caucho reciclado (GCR), para reparcho localizado.
Reparcho ecológico.

JUAN DAVID VILLEGAS CAMARGO
LUIS MAURICIO WILCHES GÓMEZ

Proyecto de grado para optar al título de magister en infraestructura vial

Ing. Álvaro Correa Arroyave

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ, D.C.
2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 12 de abril de 2019.

A Dios, nuestro guía en este hermoso camino de la investigación, a nuestras familias e hijos por su compañía y entendimiento en estas largas jornadas de estudio.

Juan David Villegas Camargo y Luis Mauricio Wilches Gómez

Agradecimientos

Los autores expresan los más sinceros agradecimientos al **ingeniero Álvaro Correa Arroyave**, asesor temático y tutor de esta investigación, por su colaboración, experiencia, claridad y paciencia para ser guía en este hermoso tema. Así mismo, al **ingeniero Edgar Alexis Peña Acosta**, por su magnífica disposición y apoyo; y a las organizaciones que permitieron que esta investigación llegara al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Vialtech Ltda.

MW Ingeniería S.A.S.

Asfaltos Panamá.

Mina San Pedro.

Reciclair S.A.S.

Ingeotec N&L S.A.S.

Ingeoconsultores Ltda.

Gregorio Rojas Suelos y Pavimentos S.A.S.

Colegio Emilio Valenzuela.

Alcaldía de Tabio, Cundinamarca, Colombia.

Alcaldía de Cota, Cundinamarca, Colombia.

Alcaldía de Nemocón, Cundinamarca, Colombia.

CONTENIDO

1. RESUMEN	17
2. ABSTRACT	19
3. INTRODUCCIÓN	21
3.1 GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	21
3.2 MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL (MAN)	22
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
5. JUSTIFICACIÓN	26
6. HIPÓTESIS	29
7. OBJETIVO GENERAL	30
8. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
9. ESTADO DEL ARTE	32
9.1 ANTECEDENTES	32
9.1.1 Aplicación de granos de caucho en mezclas asfálticas	32
9.1.2 Modificación del ligante	34
9.1.3 Proceso por vía seca	35
9.1.4 Tecnologías para el uso de caucho reciclado mediante vía seca	37
9.1.5 Asfaltos naturales	40
9.1.6 Mezcla asfalto natural	41
9.1.7 Formaciones de los asfaltos naturales	41
9.1.8 Clasificación de los depósitos de asfalto natural	42
9.1.9 Distribución de asfaltos naturales en Colombia	43
9.2 EXPERIENCIAS Y FUENTES DE INVESTIGACIÓN	43
9.2.1 Easy Obras Constructora S.A.S.	49

9.2.2	Incoasfaltos	51
9.2.3	MPI especialistas en asfalto	52
9.2.4	Cámara Colombiana de Infraestructura	53
9.2.5	El Espectador	54
9.3	QUÉ LOGROS SE HAN CONSEGUIDO	58
9.4	QUÉ ASPECTOS FALTAN POR ABORDAR	59
10.	MARCO TEÓRICO	60
10.1	MARCO REFERENCIAL	60
10.2	MARCO CONCEPTUAL	60
10.2.1	Ambiente	61
11.	METODOLOGÍA	71
12.	INVESTIGACIÓN	74
12.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	74
12.2	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	74
13.	DESARROLLO DEL TRABAJO	76
13.1	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL (MAN).	81
13.1.1	Asfaltenos	84
13.1.2	Maltenos	85
13.1.3	Aceites	85
13.1.4	Agregados minerales	87
14.	RESULTADOS	99
14.1	CARACTERIZACIÓN DEL GRÁNULO DE CAUCHO (GCR)	111
14.2	CARACTERIZACIÓN EMULSIÓN ASFÁLTICA CRR-1	118
14.3	DESARROLLO INVESTIGATIVO	121
14.3.1	Porcentaje óptimo de asfalto	122
14.3.2	Procedimiento	132

14.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	142
15. EXPERIMENTACIÓN	144
16. ANÁLISIS DE RESULTADOS	160
16.1 DENSIDAD BULK Y PORCENTAJE DE VACÍOS	160
16.2 ESTABILIDAD Y FLUJO	161
16.3 ESTABILIDAD EN CONDICIÓN HÚMEDA	163
16.4 ESTABILIDAD RESIDUAL	163
16.5 FLUJO	165
16.6 MEZCLA ÓPTIMA DEL MAN VERDE	167
16.7 REPARCHEOS LOCALIZADOS DE PRUEBA	168
16.8 PROCEDIMIENTO	169
17. PRESUPUESTO DE TRABAJO DE GRADO	184
18. RECURSOS	185
19. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES EN MESES	186
20. INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	187
21. CONCLUSIONES	188
21.1 CAMPO AMBIENTAL	188
21.2 CAMPO TÉCNICO	189
22. RECOMENDACIONES	195
23. DESVENTAJAS	196
24. BIBLIOGRAFÍA	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema proceso vía húmeda	34
Figura 2. Proceso vía seca	36
Figura 3. Ubicación mina San Pedro (Armero Guayabal, Tolima, Colombia)	43
Figura 4. Neumáticos contaminantes en las calles	56
Figura 5. Extendida de Mezcla Asfáltica Natural (MAN)	65
Figura 6. Rodadura con Mezcla Asfáltica Natural (MAN), municipio del Doncello, departamento de Caquetá	65
Figura 7. Rodadura con Mezcla Asfáltica Natural (MAN), calle 2ª con 4, municipio del Doncello, departamento de Caquetá.....	67
Figura 8. Trituradora de (GCR)	68
Figura 9. Bandas transportadoras.....	69
Figura 10. Panorámica de la mina de asfalto natural San Pedro, ubicada en el municipio Armero Guayabal, Tolima, Colombia.	76
Figura 11. Mezcla Asfáltica Natural (MAN) después de pasar por la trituradora y ser tamizada en las mallas según granulometría solicitada.	77
Figura 12. Mezcla Asfáltica Natural (MAN). Los autores comprueban la homogeneidad de la mezcla luego de pasar por las mallas tamizadoras.	78
Figura 13. Empaque de las muestras de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), para su posterior clasificación en laboratorio.	79
Figura 14. Toma de muestras aleatorias de todo el material preparado	80
Figura 15. Cargue del material en el vehículo de transporte de la empresa MW Ingeniería S.A.S.....	80
Figura 16. Asfaltita. (Asfalto natural).....	81
Figura 17. Vetas y forma de explotación para porcentaje de asfaltita según requerimientos.	82
Figura 18. Verificación de la explotación y calidad de la Mezcla Asfáltica Natural. (MAN).	83
Figura 19. Asfaltenos	85

Figura 20. Composición química de la gilsonita.....	86
Figura 21. Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25)	89
Figura 22. Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) vs IDU TIPO 3	91
Figura 23. Granulometría según ensayo INVÍAS, E-213 13. Mezcla Asfáltica Natural (MAN)	92
Figura 24. Porcentajes que pasan cada uno de los tamices, de la Mezcla Asfáltica Natural. (MAN).	93
Figura 25. Curva del Proctor Modificado, a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25)	96
Figura 26. Curva de C.B.R., a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25)	98
Figura 27. Contenido de asfalto en las 5 muestras ensayadas de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).....	107
Figura 28. Copa giratoria para extracción cuantitativa de asfalto.	108
Figura 29. Colocación de la muestra. Muestra después del lavado	109
Figura 30. Copa giratoria. Sin asfalto	109
Figura 31. Apariencia del (GCR), profesional, de acuerdo a RECLAIR S.A.S. ...	113
Figura 32. Variación de los porcentajes de (GCR), que pasan los tamices.	116
Figura 33. Tamaños máximos en la utilización del gránulo de caucho reciclado (GCR)	117
Figura 34. Peso del material de muestra para realizar toma de humedad.....	127
Figura 35. Utilización del humidómetro, para determinar la humedad del material.	127
Figura 36. Lectura de humedad en el material de muestra.....	128
Figura 37. Peso de cada uno de los componentes de la mezcla.	130
Figura 38. Mezcla homogénea de todos los componentes de la mezcla.	131
Figura 39. Una vez mezclados todos los componentes, se realiza el peso nuevamente para obtener la cantidad exacta para cada briqueta	131
Figura 40. Adición del agua pre envuelta para los materiales	132
Figura 41. Máquina Marshall	133
Figura 42. Lotes de briquetas preparadas con diferentes porcentajes de asfalto, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN)	134

Figura 43. Briquetas de Mezcla Asfáltica Natural, con porcentajes de 9% y 10% de asfalto.	135
Figura 44. Briquetas sumergidas durante 4 días a una temperatura estable de 25°C, para evaluar la estabilidad residual.....	136
Figura 45. Valores ponderados de la resistencia seca para los 5 porcentajes de asfalto de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).....	138
Figura 46. Valores ponderados de la resistencia húmeda, para los 5 porcentajes de asfalto de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).....	140
Figura 47. Resultados de la resistencia conservada.....	141
Figura 48. Adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.....	144
Figura 49. Adición de gránulo de caucho reciclado a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.....	145
Figura 50. Adición de gránulo de caucho reciclado a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.....	146
Figura 51. Briquetas en inmersión de agua a 25°C, para obtener la gravedad específica.....	147
Figura 52. Resultados de Densidad Bulk.....	150
Figura 53. Valores ponderados de la estabilidad seca para los 5 porcentajes de gránulo de caucho reciclado a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).....	153
Figura 54. Valores ponderados de la estabilidad húmeda para los 5 porcentajes de gránulo de caucho reciclado a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).....	154
Figura 55. Gráfica de estabilidad residual.....	155
Figura 56. Valores resumen de la lectura de flujo en condición seca	157
Figura 57. Valores resumen de la lectura de flujo en condición húmeda.	159
Figura 58. Marcado y corte del asfalto deteriorado para reparcheo con Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.....	169
Figura 59. Demolición y cargue de escombros procedentes del asfalto deteriorado	169
Figura 60. Compactación de la rasante de los bacheos localizados.....	170

Figura 61. Imprimación de los sitios a intervenir y descargue de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	170
Figura 62. Dosificación de cada uno de los componentes de la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.	171
Figura 63. Mezcla de todos los componentes en el trompo.	171
Figura 64. Extendida de la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.	172
Figura 65-67. Compactación de la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE	172
Figura 66. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018.	174
Figura 67. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.	174
Figura 68. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018	175
Figura 69. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.	175
Figura 70. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018.	176
Figura 71. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.	176
Figura 72. Extendida y compactado de Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE .	177
Figura 73. Trabajo finalizado el 11 de julio de 2018.	177
Figura 74. Fotografía tomada 20 de febrero de 2019, a 7 meses de terminación y entrega.	178
Figura 75. Extendida y compactada de 150 m3 de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	180
Figura 76. Extendida y compactada de 150 m3 de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	181
Figura 77. Extendida y compactada de 150 m3 de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	182
Figura 78. Experiencias en los trabajos de la Calle 15 entre Carreras 4 y 16 en el municipio de Facatativá, Cundinamarca	183

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos de laboratorio para agregados pétreos combinados para la construcción de capas asfálticas con una Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	71
Tabla 2. Características que deben cumplir las emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta.....	72
Tabla 3. Composición química de la gilsonita, Mina San Pedro	83
Tabla 4. Composición química y otras características de la gilsonita, mina San Pedro.	86
Tabla 5. Grupos más comunes de rocas sedimentarias.	87
Tabla 6. Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25)	88
Tabla 7. Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) VS IDU TIPO 3	90
Tabla 8. Clasificación y límites de Atterberg para la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).....	94
Tabla 9. Ensayo de compactación densidad máxima y porcentaje de humedad óptimo, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).	95
Tabla 10. Ensayo INV-148, CBR, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).	97
Tabla 11. Ensayo de penetración CBR, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).	98
Tabla 12. Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles	99
Tabla 13. Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles	99
Tabla 14. Equivalente de arena E-133-07, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25)	100
Tabla 15. Sanidad de los agregados gruesos, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).....	101
Tabla 16. Sanidad de los agregados gruesos, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).....	101
Tabla 17. Valor de azul de metileno en agregados fino de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).....	102

Tabla 18. Determinación del porcentaje de caras fracturadas del agregado grueso, de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).	103
Tabla 19. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).	104
Tabla 20. Determinación del porcentaje de partículas planas y alargadas en la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).	105
Tabla 21. Determinación del porcentaje de asfalto en la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).	106
Tabla 22. Tabla resumen de la caracterización física y química de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN)	110
Tabla 23. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).	111
Tabla 24. Características físicas y químicas del gránulo de caucho reciclado. ...	114
Tabla 25. Granulometría realizada al gránulo de caucho reciclado (GCR)	115
Tabla 26. Características (GCR).	118
Tabla 27. Caracterización tabla resumen Emulsión asfáltica CRR-1.	120
Tabla 28. Caracterización tabla resumen de los 3 componentes de nuestra Mezcla Asfáltica Natural.	121
Tabla 29. Resultados ecuación SE INV E-741.1)	122
Tabla 30. Método del laboratorio central de puentes y caminos de Francia (LCPC)	123
Tabla 31. Método del Instituto del asfalto	123
Tabla 32. Método Marshall Modificado	124
Tabla 33. Método SAHOP	124
Tabla 34. Resumen de métodos	124
Tabla 35. Porcentajes de asfalto según norma INV Art 422P-17.	125
Tabla 36. Porcentajes de emulsión asfáltica CRR-1, para cada muestra.	126
Tabla 37. Porcentajes de emulsión asfáltica CRR-1, y agua para cada muestra.	126
Tabla 38. Porcentajes de agua para cada una de las mezclas.	128

Tabla 39. Porcentajes de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), emulsión asfáltica CRR-1, y agua.	129
Tabla 40. Preparación de las cantidades de material exactas, para cada juego de briquetas a ensayar, de acuerdo con los porcentajes de emulsión para el diseño de la mezcla.....	129
Tabla 41. Resultados de la resistencia seca para cada juego de briquetas.	137
Tabla 42. Resultados comparativos resistencia seca	137
Tabla 43. Resultados de la resistencia húmeda, para cada juego de briquetas. .	139
Tabla 44. Resultados comparativos resistencia húmeda.....	139
Tabla 45. Resultados de la resistencia conservada, para cada juego de briquetas, con sus porcentajes de asfalto.....	141
Tabla 46. Resultados de la densidad específica Bulk, para cada juego de briquetas, con sus porcentajes de gránulo de caucho reciclado.....	148
Tabla 47. Resultados de la densidad específica máxima, para cada juego de briquetas, con sus porcentajes de gránulo de caucho reciclado.....	151
Tabla 48. Resultados del porcentaje de vacíos de acuerdo a la norma INV E-736.	152
Tabla 49. Resultados de la estabilidad en estado seco para cada juego de briquetas.	152
Tabla 50. Resultados de la estabilidad húmeda para cada juego de briquetas. ..	153
Tabla 51. Resultados de la estabilidad residual para cada juego de briquetas. ..	155
Tabla 52. Resultados de la lectura de flujo en condición seca para cada juego de briquetas	156
Tabla 53. Resultados de la lectura de flujo en condición seca para cada juego de briquetas.	157
Tabla 54. Resultados de la lectura de flujo en condición húmeda para cada juego de briquetas.	158
Tabla 55. Lectura de flujo condición húmeda	159
Tabla 56. Resultados óptimos Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE	167

Tabla 57. Volúmenes de material y costos aproximados, sólo Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE	173
Tabla 58. Volúmenes de material y costos aproximados, sólo Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE	179
Tabla 59. Presupuesto trabajo de grado	184
Tabla 60. Presupuesto trabajo de grado	186

1 RESUMEN

Este trabajo de investigación aplicada se realiza para evaluar, comparar y producir un asfalto 100 % ecológico y ambientalmente sostenible, mediante la utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN). Dicha mezcla es procedente de la mina San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, y contiene adición de gránulo de caucho reciclado (GCR), para reparcho localizado.

Reparcho ecológico

El problema radica esencialmente en la producción de residuos sólidos contaminantes procedentes de las llantas fuera de uso, generación de gases contaminantes nocivos para la salud y el medio ambiente, contaminación auditiva y utilización de combustibles fósiles para la producción de mezclas densas en caliente.

Con nuestra Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE, utilizamos materiales naturales y reciclamos gran cantidad de llantas usadas (alrededor de 51.31 kg por m³). Al no requerir plantas mezcladoras en caliente ni de gran infraestructura para procesos mecánicos, evitamos la producción de gases contaminantes en un 48%, comparado con la producción de una mezcla asfáltica tradicional. El uso de maquinaria pesada es mínimo y resulta económicamente sostenible.

Mediante la aplicación metodológica de la Norma particular 442 p, del Instituto Nacional de Vías INVÍAS, evaluamos el comportamiento físico de nuestra mezcla MAN VERDE, cumpliendo con los parámetros de las especificaciones técnicas solicitadas en la norma particular.

De acuerdo con los ensayos de laboratorio se concluye que el porcentaje óptimo de adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) para nuestra mezcla es del 3%, y la adición de emulsión asfáltica tipo CRL-1, corresponde al 8 %. Con base en estos resultados realizamos los reparchos localizados en los tramos de

prueba, encontrando que luego de 8 meses de su ejecución, presentan un buen comportamiento y no se observan afectaciones superficiales.

Queremos convertir nuestro MAN VERDE en una mezcla prefabricada empacada en bultos de 25 kilos, para ser comercializada y distribuida en los municipios de la Sabana de Bogotá; también, adquirir la patente y producirla de forma industrializada ya que se podría almacenar por largos periodos de tiempo, (HASTA 12 MESES).

Se concluye que podemos utilizar los residuos de llantas usadas como modificador de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), prolongando su vida útil, incrementando su estabilidad, mejorando la adherencia, disminuyendo el ruido y aportando materiales de construcción de vías más ecológicos y limpios.

En el campo de las obras civiles se reducirían tiempos de ejecución y problemas de movilidad. Se realizarían trabajos limpios y sin materiales de escombros. De igual forma, reparcheos más duraderos y resistentes, rehabilitación de cruces de servicios domiciliarios en tiempo récord, nivelación de cargues superiores en pozos de inspección y juntas deterioradas, construcción de reductores de velocidad con diseño propio, ayudando a la movilidad de los vehículos y a la comodidad de los usuarios: “Bienvenidos al reparcheo ecológico”.

Palabras claves: Mezclas Asfálticas Naturales (**MAN**), Gránulo de Caucho Reciclado (**GCR**), reparcheo.

2 ABSTRACT

This applied research work is carried out to evaluate, compare and produce 100% ecologically and environmentally sustainable asphalt, using Natural Asphalt Mixture (MAN), from the San Pedro mine, located in the municipality of Armero Guayabal, Department of Tolima, Colombia, with addition of recycled rubber granule (GCR), for localized reparcheo.

Ecological re-patching

The problem lies essentially in the production of solid waste pollutants from tires out of use, generation of polluting gases harmful to health and the environment, hearing pollution and the use of fossil fuels for the production of hot dense mixtures.

With our GREEN MAN mixture, we use natural materials, we recycle a lot of used tires, around 51.31 kg per m³, we avoid the production of polluting gases by 48%, compared to the production of a traditional asphalt mixture, by not requiring plants hot mixers neither of great infrastructure for mechanical processes, minimum use of heavy machine and economically sustainable.

Through the methodological application of the particular Standard 442 p, of the National Institute of Ways INVIAS, we evaluate the physical behavior of our MAN GREEN mixture, complying with the parameters of the technical specifications requested in the particular standard.

According to the laboratory tests, it is concluded that the optimum percentage of addition of Recycled Rubber Granule (GCR), for our mixture is 3%, the addition of asphalt emulsion type CRL-1, corresponds to 8%, based on in these results we proceeded to make the reparcheos located in the test sections, finding that 8 months after their execution, they show a good behavior, without surface affectations such as cracking or subsidence.

We managed to manufacture and pack our MAN GREEN mixture, in 25 kg bags, with an approximate duration of 12 months, by adding a preservative derived from petroleum, we are in the process of commercialization and patent approval.

It is concluded that we can use waste tires used as a modifier of Natural Asphalt Mixtures (MAN), prolonging its useful life, increasing its stability, improving

adherence, reducing noise and providing more ecological and clean road construction materials.

In the field of civil works, execution times and mobility problems would be reduced, clean works would be carried out without debris materials, more durable and resistant reparcheos, rehabilitation of home service crossings in record time, leveling of higher loads in wells inspection and deteriorated joints, construction of speed reducers with their own design, helping the mobility of vehicles and the comfort of users. "Welcome to ecological reparcheo"

Keywords: Natural asphalt mixtures (MAN), Recycled Rubber Granule (GCR), reparcheo.

3 INTRODUCCIÓN

En proyectos de Infraestructura vial, la conservación ambiental juega un papel muy importante. Sin embargo, dentro del desarrollo profesional de la ingeniería se atenta contra los recursos naturales, se utilizan y se transforman para convertirse en obras que benefician a toda una comunidad, ¿Pero alguna vez evaluamos cuánto contribuimos a la mitigación de los daños ambientales? ¿Tratamos de compensar a la naturaleza todo lo que nos está dando? Por medio de este trabajo investigativo y práctico se logra sentar un precedente en el marco de la maestría en infraestructura vial.

3.1 GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

En la actualidad existen empresas especializadas que se encargan de recoger, almacenar y transformar los neumáticos en desuso con el fin de darle diferentes aplicaciones en la ejecución de proyectos de varias especialidades; entre ellas, la obtención de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR). La solución al problema que plantean los neumáticos fuera de uso pasa necesariamente por la búsqueda de vías, capaces de valorar adecuadamente este residuo bajo condiciones económicas aceptables y en cantidades suficientes como para hacer frente al elevado número de toneladas que se generan anualmente. Desde el punto de vista de la reutilización como materia prima, se debe tener presente que en un neumático, alrededor de un 60% de su composición son cauchos naturales o sintéticos, con posibilidades de ser utilizados en otras aplicaciones. El gránulo de caucho reciclado de neumáticos se obtiene a través de la trituración de éstos y la separación de los componentes que los constituyen, principalmente el acero y las fibras textiles. La trituración del neumático se realiza principalmente por dos métodos, uno a temperatura ambiente y otro, criogénico. El primero de ellos consiste en un proceso puramente mecánico de trituración, donde los distintos

tamaños de los granos de caucho dependen de las etapas a las que se haya sometido.

En la trituración criogénica, los neumáticos se someten a baja temperatura, con lo cual el caucho se vuelve frágil y fácil de destrozar en pequeñas partículas. A través de los procesos nombrados, se obtiene migas de caucho con determinadas granulometrías para distintas aplicaciones.

3.2 MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL (MAN)

En Colombia existen formaciones geológicas que incluyen mantos de gravas y arenas que en algún momento de la historia del planeta se impregnaron de crudos de petróleo, los cuales trataron de salir a la superficie por presión, dejando yacimientos de mezclas asfálticas naturales consideradas como materiales pétreos impregnados con asfalto. Su nombre abarca dos (2) grandes grupos: los “Conglomerados Asfálticos Naturales”, como la Asfaltita encontrada en la mina San Pedro, en el departamento del Tolima, y los “Morteros asfálticos naturales”, como la Mapia de las minas que existen en los departamentos de Caldas (La Dorada) y Caquetá, entre otros.

Las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos pueden incorporar parte importante del caucho contenido en los neumáticos desechados. La adición de caucho proveniente de neumáticos a las mezclas asfálticas es una forma de reciclar tales desechos y mejorar las propiedades del pavimento. Las mezclas asfálticas modificadas con caucho permiten obtener un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también se aumenta la resistencia a la fisuración por fatiga y al envejecimiento, aumentando la vida útil del pavimento y disminuyendo los costos de mantenimiento. Por otro lado, el incorporar caucho a las mezclas, reduce el nivel de ruido generado por el tráfico al contacto con el pavimento y ayuda a la preservación del medioambiente gracias al reciclaje de los neumáticos.

Mediante este trabajo de investigación y desarrollo queremos demostrar que es posible la utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), para reparcheo localizado y así mitigar y reducir los residuos sólidos aprovechando materiales naturales.

Para la comprobación científica de este trabajo de grado se establecerán ensayos de laboratorio para diferentes dosificaciones de (GCR) a un tipo de (MAN), esto con el fin de garantizar que el (GCR) se homogenice en toda la mezcla. Los ensayos de laboratorio son estabilidad y flujo, contenido de asfalto, granulometría, densidad de los materiales y comprobación real en un bacheo de prueba.

Una vez terminada la parte experimental, se realizarán varios reparcheos en el Colegio Emilio Valenzuela, en la ciudad de Bogotá; se reparará el parqueadero de Expreso Bolivariano, en el municipio de Soacha, y de acuerdo con la necesidad, en otros lugares escogidos por los autores para evaluar el comportamiento real de nuestra mezcla. Es de anotar que este material no debe tener cuidados ni de almacenamiento, ni de temperatura, ya que su aplicación es totalmente en frío.

La visión de este trabajo de grado es lograr someter a estudio la posibilidad de realizar los trabajos de reparcheo localizado con nuestra mezcla in situ y de esta forma reducir significativamente la producción de residuos sólidos contaminantes.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Qué método efectivo puede disponer y aprovechar los residuos contaminantes de las llantas usadas?

Los materiales utilizados para la fabricación de neumáticos son altamente contaminantes y no se pueden desechar. La variable dependiente es que el proceso de reciclaje evite que cientos de toneladas de neumáticos en desuso vayan a parar a los botaderos o a las esquinas de barrios, lotes baldíos y potreros de la ciudad. La acumulación de llantas aumenta la posibilidad de aparición de enfermedades por causa del agua reposada dentro de ellas. El reciclaje debe ser un método limpio y que a la vez presente ventajas económicas para quien lo realice. La variable independiente son los residuos sólidos que afectan la salud y aumentan la contaminación de las ciudades. En Bogotá, por ejemplo, se desechan anualmente 2'100.000 neumáticos, lo que equivale en promedio a 12.600 toneladas de neumáticos en desuso. Las reglamentaciones ambientales son claras, pero la falta de una conciencia ambiental hace más difícil que se opte por el reciclaje de materias primas.

¿Cómo fortalecer la utilización de asfaltos naturales para trabajos de reparcheo localizado?

La utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), no está lejos de ser una realidad en Colombia. En algunos municipios cerca de las minas de Asfaltita, en los departamentos de Tolima, Boyacá, Caldas y Casanare, se han realizado varios proyectos de infraestructura vial, con grandes ventajas y reducción de gastos, pero aún no existe un conocimiento real del gran potencial de este material. La reducción de agentes contaminantes a la atmosfera es realmente grande; la reducción de costos y la gran contribución al medio ambiente sería ambiciosa.

¿Cómo lograr realizar un reparcheo localizado sin contar con materiales en caliente?

Con el sistema de reparcheo tradicional requerimos bastante tiempo y trabajo, afectando la movilidad de los usuarios. Con la Mezcla Asfáltica Natural MAN no tendría problemas ni con el clima, ya que el agua no afecta su desempeño como ligante. El acopio se podría realizar en las mismas áreas de reparcheo y no se necesitarían maquinas especializadas para la realización de los reparcheos localizados.

Como profesionales idóneos, éticos y responsables con el medio ambiente, nos preguntamos: ¿Cómo reducir de manera significativa la contaminación a nuestro planeta? ¿Cómo lograr implementar nuevos materiales para desarrollar trabajos en infraestructura vial, y en especial en obras de reparcheo localizado, que contemple ahorros significativos en la ejecución y puesta en funcionamiento de las vías intervenidas? ¿Cómo crear un asfalto ambientalmente sostenible? ¿Cómo lograr que las reparaciones a las vías urbanas y rurales por la instalación de redes de servicios públicos domiciliarios no se conviertan en más deterioro de las calles al demorar su reparación?

5 JUSTIFICACIÓN

Como profesionales idóneos, éticos y responsables con el medio ambiente, queremos lograr reducir de manera significativa la contaminación; posicionar nuevos materiales para desarrollar trabajos en infraestructura vial, en especial en obras de reparcheo localizado, contemplando ahorros significativos en la ejecución y puesta en funcionamiento de las vías a intervenir.

La problemática general es netamente ambiental y nos referimos a esto con ahínco porque ya existen varios estudios, tratados, tesis y monografías sobre el tema. La mira está puesta es cómo evitar la producción de residuos sólidos contaminantes, especialmente el de los neumáticos en desuso, ya que el proceso de degradación ambiental del caucho y sus componentes tarda más de 150 años y es un gran contaminante de ríos y vegetación. Su quema es ilegal ya que produce altísimos porcentajes de CO₂, el cual es causante de la polución, la lluvia ácida y el efecto invernadero. El calentamiento global obedece en gran parte a la contaminación por quema de caucho.

El reciclaje de neumáticos en Colombia está muy lejos de ser ambientalista, ya que el 50 % de estos son desechados. Los conductores de camiones y transporte los usan casi al punto que es imposible su reencauche; por esta razón, son desechados. En algunos lugares son utilizados como combustible para hornos de producción de cemento, lo que ocasiona grandes emisiones de CO₂ contaminando la atmósfera.

Surge entonces la pregunta: ¿Qué se puede hacer con los neumáticos en desuso? A nivel mundial existen varias formas de aprovecharlos, una muy particular es la utilización de estos desechos en la mezcla asfáltica. El caucho por ser un polímero contiene propiedades químicas y físicas que modifican el comportamiento de las mezclas asfálticas incrementando su vida útil, evitando el ahuellamiento y

reduciendo significativamente el deterioro por temperatura y por efecto del agua. En Colombia algunas empresas ya fabrican asfalto modificado con (GCR), como por ejemplo MPI, del departamento de Santander. Ellos poseen plantas móviles que llegan al sitio de las obras y realizan todo el trabajo de extendida y compactada de las mezclas modificadas. En el sector del Vino, la empresa Mario Huertas posee un tramo de prueba experimental, el cual mostró que los comportamientos de las mezclas modificadas son una solución al problema de los neumáticos en desuso.

El Instituto de Desarrollo Urbano de la ciudad de Bogotá contrató los servicios de La Universidad de los Andes para que desarrollaran todos los ensayos de laboratorio, experimentaciones y tramos de prueba en los cuales se evidenciará la capacidad que tiene el caucho para mejorar las condiciones reológicas de las mezclas asfálticas. En cabeza del Ingeniero Freddy Alberto Reyes Lizcano, quien es la máxima autoridad en Colombia de los procesos de modificación de mezclas asfálticas con todo tipo de materiales reciclados, se concluyó y se recomendó, por primera vez en Bogotá, la normalización de las especificaciones técnicas para la utilización de mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho reciclado.

Toda la bibliografía de esta tecnología limita el uso de (GCR) a plantas de asfalto, las cuales deben realizar algunos cambios en su infraestructura física para lograr incorporar el caucho al bitumen, si es por vía húmeda o a los áridos si es por vía seca. Otro procedimiento un poco más complicado es hacerlo mediante una combinación de dos procesos anteriores, de acuerdo con esto se llega a la conclusión de que se debe realizar una inversión muy grande de millones de dólares para la construcción y puesta en funcionamiento de una planta de reciclaje de neumáticos en desuso. A su vez, grandes cambios en las plantas de asfalto convencionales en lograr contar con la infraestructura suficiente para estandarizar una mezcla que cumpla con las especificaciones técnicas aprobadas por las normas.

La utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN) ya está dando pequeños pasos en Colombia. El Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), con resolución No. 10099 del 27 de diciembre de 2017, resuelve que la utilización de asfaltos naturales es viable y corresponde a la innovación y manejo de materiales no convencionales para la pavimentación de vías con bajos volúmenes de tránsito, a razón de esta resolución, el Instituto Nacional de Vías, INVÍAS, crea la norma 442p-17, la cual pone en firme las condiciones específicas para la utilización de dichas mezclas.

Mejoras en los asfaltos con (GCR):

- Acción de mejoramiento en procesos medio ambientales.
- Se pretende utilizar el grano de caucho proveniente del reciclado de las llantas en desuso.
- Mejora de manera significativa algunas de las propiedades de los cementos asfálticos convencionales que se manejan en nuestro mercado.
- Son menos susceptibles al fisuramiento y a las deformaciones ocasionadas por bajas temperaturas.
- Mejoramiento en el comportamiento ante el fenómeno de la fatiga.

6 HIPÓTESIS

Al realizar la Mezcla de Asfalto Natural (MAN), con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), se puede obtener una mezcla homogénea que cumpla con las especificaciones técnicas vigentes.

- De acuerdo con la fórmula de trabajo, se podrían aprovechar los neumáticos en desuso para realizar mezclas asfálticas naturales utilizadas en reparcheo localizado.
- En los sitios de trabajos se podrían disponer patios de acopio para el material mezclado, sin la preocupación de las condiciones climáticas.
- Realizando un estudio de costos detallado se podría afirmar que los costos disminuirían en un 20%, respecto a las mezclas tradicionales.
- Se incrementaría la compra eficiente a las empresas especializadas recicladoras de neumáticos en desuso.
- Podríamos ayudar en la protección del medio ambiente, realizando todos los reparcheos localizados con esta mezcla.
- Reparación de excavaciones por intervención de servicios públicos domiciliarios
- Renivelación de zonas aledañas a cargues superiores de pozos de inspección
- Construcción de reductores de velocidad.

7 OBJETIVO GENERAL

Utilizar Mezcla Asfáltica Natural (MAN), procedente de la mina San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), para reparcho localizado. Reparcho ecológico.

8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar residuos de llantas usadas para modificar las condiciones naturales de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN)
- Caracterizar todos los componentes de nuestra mezcla MAN VERDE para establecer sus condiciones físicas y químicas.
- Verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de la norma 442p-17 INVÍAS.
- Ejecutar reparcheos localizados de prueba en el que se evidencien las ventajas y desventajas del trabajo investigativo de grado.
- Empacar y comercializar nuestro MAN VERDE para facilitar su transporte, almacenaje y posterior utilización.

9 ESTADO DEL ARTE

Para la realización del estado del arte de este proyecto, nos basamos en los antecedentes de nuestro tema, las experiencias de otros autores, nuevas ideas investigativas y bibliografía consultada.

Durante la investigación previa identificamos diferentes escenarios de recopilación de la información: las características semejantes, la utilización de las especificaciones técnicas vigentes en Colombia sobre el uso de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), y los trabajos realizados con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), adicionado en mezclas asfálticas.

9.1 ANTECEDENTES

Dentro del estado del arte de nuestra investigación existen antecedentes en cuanto a la utilización de gránulo de caucho reciclado (GCR), en mezclas asfálticas en caliente, mezclado y homogenizado en plantas especializadas con tolvas a altas temperaturas. También diseños especiales de mezclas mediante el diseño Marshall, pero no hay suficiente información en la utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR).

9.1.1 Aplicación de granos de caucho en mezclas asfálticas

El caucho proveniente de neumáticos desechados puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de tres métodos diferentes denominados como: 1) proceso por vía húmeda, 2) proceso por vía seca y 3) proceso en refinería. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que, en el proceso seco, el caucho es usado como una porción de agregado fino. En el proceso en refinería, la mezcla del caucho con el cemento asfáltico se realiza en la planta productora de asfalto, para luego transportarlo a obra, donde

se combina con los áridos para producir la mezcla asfáltica. Cada proceso es utilizado dependiendo del producto que se quiera obtener.¹

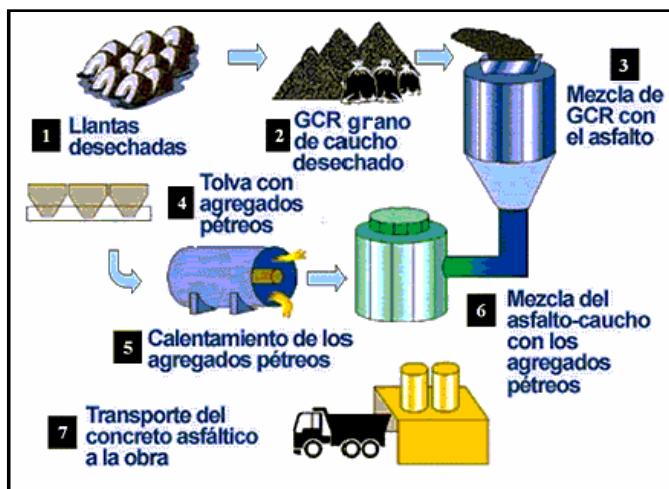
En el proceso por vía húmeda, se unen los granos de caucho con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada llamada asfalto-caucho, que es usada de la misma manera que un ligante modificado. Este proceso se encuentra definido en la norma ASTM D8-88.

La fabricación de asfalto-caucho consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 0.85 mm, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición de caucho es de 24% con respecto al peso del ligante. Para promover la unión del asfalto y el caucho es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 180-210° C por 1 a 4 horas.

Según los requerimientos del proceso húmedo, se establece que el estanque agitador debe estar en el terreno, ubicado junto a la planta asfáltica. Una vez que el asfalto-caucho alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora en un proceso continuo al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos. En la Figura 1 se muestra la fabricación de las mezclas asfalto-caucho por el proceso vía húmeda.

¹ SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México. [En línea] 2014. [Citado el: 6 de marzo de 2019.] <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>.

Figura 1: Esquema proceso vía húmeda.



Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes.²

Una vez terminado el mezclado del asfalto-caucho con los agregados pétreos, el concreto asfáltico obtenido se transporta al sitio de pavimentación y se coloca por medio de una finisher tradicional. Para la compactación, generalmente se utiliza un rodillo liso de doble tambor. El ligante asfáltico modificado con granos de caucho mediante el proceso húmedo, también puede ser utilizado como riego. El más común es el llamado SAM (Stress Absorbing Membrane) que evita la aparición de grietas. Cuando el riego SAM es puesto entre capas es llamado SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), este riego de liga es recomendado cuando la mezcla asfalto-caucho se coloca sobre pavimento antiguo de hormigón.

9.1.2 Modificación del ligante

Los granos de caucho al mezclarse con el cemento asfáltico reaccionan con éste, hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos, los cuales son componentes químicos del asfalto que le dan la consistencia para que sea trabajable. Las partículas hinchadas se vuelven pegajosas, desarrollando propiedades adhesivas. Además, a medida que se reducen los aceites aromáticos que lubrican la mezcla, se observa un aumento en la viscosidad. El proceso de

² Ibid.

hinchamiento de las partículas de caucho no es del tipo químico, pues las partículas no se funden con el asfalto.³

El proceso se asimila a lo que sucede con una esponja seca y dura al sumergirla en agua, pues a medida que la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda. El grado de modificación del ligante depende de ciertos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción de los granos de caucho, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla y el componente aromático del cemento asfáltico. La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción; es por esto que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante el mezclado y el tiempo de reacción, hasta obtener la viscosidad requerida.

9.1.3 Proceso por vía seca

El proceso por vía seca es el método mediante el cual el caucho reciclado es mezclado con los agregados, antes de adicionar el cemento asfáltico. En este proceso, se usan los granos de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como un árido más o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el 1 y 3 % del peso total de los agregados de la mezcla. Si bien los granos de caucho son tratados como un árido, no pueden considerarse un material inerte, pues interacciona con el ligante de la mezcla asfáltica. Este proceso de interacción suele llamarse “digestión” del caucho, mediante este proceso el caucho pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante en la mezcla asfáltica.

La digestión es un proceso que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, por lo que será más rápida cuanto más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica y cuanto más

³ Ibid.

elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio, la digestión puede simularse manteniendo la mezcla en horno, a una temperatura en un rango 150-170°C y un tiempo de una a dos horas, previamente a la compactación de la probeta. En la Figura 2 se muestra el proceso por vía seca. Durante la digestión no se producen reacciones importantes entre el caucho y cemento asfáltico debido al corto tiempo de mezclado, donde éste no es suficiente para que se produzca una reacción similar al proceso húmedo; por lo tanto, se asume que el efecto de la reacción caucho-ligante en el proceso seco es menor y, así mismo, tiene un efecto limitado en el comportamiento de la mezcla.⁴

Figura 2: Proceso vía seca.



Fuente: Secretaría de comunicaciones y transportes.⁵

Sin el tiempo de digestión, no podría obtenerse la interacción entre el ligante y el caucho, provocando que éste funcione como un árido elástico de granulometría muy concentrada, lo que por un lado produce la apertura de huecos y por otro, impide la compactación por su componente elástico. Este tiempo de curado de la

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante, sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional. Sin digestión, se producen riesgos por deterioros prematuros de la mezcla asfáltica en terreno. Se ha observado que el principal riesgo es por el ataque del agua a la mezcla colocada, llevándola a desintegrarse progresivamente. Para evitar esta situación, es necesario, durante el diseño de la mezcla asfáltica, estimar cuál será la temperatura y el tiempo de digestión mínimo para alcanzar el grado de digestión suficiente, esto puede hacerse a través del ensayo de Inmersión-Compresión, que mide el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas.⁶

Los granos de caucho son mezclados con los áridos, anteriormente calentados. El cemento asfáltico es el mismo que se usa para mezclas convencionales; sin embargo, las temperaturas de mezclado son más altas, por lo general entre 160° y 190° C, al igual que las de compactación, que están entre 150° y 160°C.

A diferencia del proceso húmedo, este método no requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando éstos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado. Luego de mezclar el ligante con los agregados más el caucho, se le debe dar el tiempo a esta mezcla para que suceda el proceso de digestión. La mayoría de las veces, el tiempo en obra está garantizado con el tiempo que toma el camión entre la planta, en la que se elabora la mezcla, y el lugar de colocación del concreto asfáltico utilizando una extendedora tradicional.

9.1.4 Tecnologías para el uso de caucho reciclado mediante vía seca

Las tecnologías más usadas en Estados Unidos para el uso de caucho reciclado mediante este proceso son la tecnología Plus Ride y la tecnología Genérica o

⁶ Ibid.

sistema TAK. Otra tecnología muy popular es la desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países, conocida como convencional.

Tecnología Plus Ride: Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 60's, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial Plus Ride, por la firma Enviro Tire. El caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1% a 3% del peso total de los agregados. Los granos de caucho utilizados son gruesos para sustituir algunos agregados de la mezcla. Las partículas de caucho van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz N°10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2% y 4%, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5% a 9%.

Tecnología Genérica: El sistema fue desarrollado por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 80's y a principio de los años 90's, para producir mezclas asfálticas en caliente con granulometría densa. Este concepto emplea, tanto el caucho reciclado grueso, como el fino para compatibilizar la granulometría de los agregados, obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso, la granulometría del caucho es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. A diferencia de las mezclas Plus Ride, la granulometría del caucho se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico, mientras la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en las mezclas asfálticas. El caucho puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar una óptima protuberancia de la partícula. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no debe exceder el 2% del peso total de la mezcla para carpeta de Rodadura.

Tecnología Convencional: Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el caucho reciclado en la mejora de mezclas asfálticas, empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menor cantidad de caucho, aproximadamente un 2% del peso total de los agregados. El caucho utilizado es generalmente de granulometría fina, con

tamaños de los granos no mayor a 0.5 mm. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

Asfaltos naturales: Durante más de 5000 años a los asfaltos naturales se les ha dado innumerables usos: Impermeabilizaciones, revestimiento de tuberías, construcción de pavimentos, fabricación de medicamentos, lacas, barnices, baterías, llantas y otros. Se han mercantilizado a través del tiempo, confundiendo con el uso del petróleo que brotaba en forma natural en distintas partes del mundo, y han sido utilizados por las diferentes civilizaciones en todos estos años.

Según excavaciones arqueológicas se han encontrado aplicaciones en caminos desde 3200 a 540 A.C. en el Valle del Éufrates, en Mesopotamia (actualmente Irak) y del Indo. Cristóbal Colón descubrió el lago de la isla de Trinidad y utilizó el betún para reparar las embarcaciones. En 1802, en Francia, se empleó un asfalto natural del Valle del Ródano para el terminado superficial de pisos, puentes y bermas; posteriormente, Estados Unidos lo importó para construir unas bermas en Filadelfia (1838). A su vez pavimentaron unas vías en Newmark (Nueva Jersey 1870) adicionando, además de asfalto del lago de Trinidad, la primera capa de mezcla asfáltica con arena, en Washington D.C. (1876).

Desde hace mucho tiempo en Colombia se tienen noticias sobre la utilización de asfaltos naturales en la construcción de pavimentos para carreteras y calles. En 1928, por encargo del Gobierno Nacional, el geólogo Emil Grosse realizó un estudio preliminar sobre los yacimientos de asfalto en la región central de Boyacá. En aquel entonces se explotó el asfalto con fines comerciales, aunque en forma muy rudimentaria. La explotación se hacía a tajo abierto o subterráneamente,

mediante galerías o cruzadas, sistema que producía⁷ pérdidas hasta del 45%. En este estudio se encontraron porcentajes de asfalto bajos y un comportamiento deficiente de los asfaltos en los pavimentos.

En 1941, a raíz de una proposición del Consejo de Tuta (Boyacá), en la que se ofrece a la nación la explotación de los yacimientos asfálticos de dicho municipio, resurge en el país el interés por los asfaltos naturales. En opinión de los ingenieros y geólogos de los Ministerios de Minas y Obras Públicas, el poco éxito alcanzado hasta el momento no fue más que el reflejo de la falta de conocimiento del comportamiento del producto natural. Se consideró entonces que los bajos contenidos de asfalto de los depósitos hasta el momento estudiados (< 9%), podían mejorarse mediante un proceso de concentración, pensando en la aplicación directa del conglomerado mineral impregnado para el mejoramiento de las vías.

Por tal motivo se propuso un nuevo estudio a cargo de estos ministerios, quienes realizaron ensayos y pruebas sobre muestras de asfaltos naturales de diferentes regiones del país. Por el año de 1968 ya se tenía conocimiento de una extensa zona en el Caquetá, en la cual se encontraban yacimientos, algunos de estos en explotación o estudio, y que se utilizaban en carreteras.

9.1.5 Asfaltos naturales

Son formaciones minerales que afloran a la superficie en forma líquida o sólida. Proceden de la familia de los hidrocarburos del tipo del petróleo y se han formado en la naturaleza por un fenómeno de migración de determinados petróleos naturales hacia la superficie terrestre. Dicha migración ocurre a través de fisuras y rocas porosas, seguido o combinado con una volatilización de sus componentes más ligeros y la consiguiente concentración de los compuestos asfálticos ya

⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS . Normas Técnicas Instituto Nacional de Vías. [En línea] 2013. [Citado el: 5 de febrero de 2019.] <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>.

existentes en el mismo, que de otra forma se encuentran normalmente mezclados con mayor o menor proporción de materia mineral, denominados comúnmente agregado.

9.1.6 Mezcla asfalto natural

Es un material compuesto por un esqueleto mineral y asfalto natural. Estas mezclas pueden usarse para capas de afirmado, subbase y base en todo tipo de pavimentos y en capas de rodadura. Todo previo a un análisis granulométrico y la correcta dosificación y adición de un ligante que puede ser emulsión asfáltica o un crudo pesado. También existen asfaltos naturales de composición granular fina, a los cuales se les realiza un ajuste granulométrico según la aplicación.

La Asfaltita es un hidrocarburo sólido derivado del petróleo, su color es negro brillante hasta negro mate. Es un producto mineral liviano, quebradizo, con escasas impurezas y alto poder calórico, de aspecto resinoso y fractura coloidal en las formas frescas, dotadas de un punto de fusión elevado, superior a 110° C. Químicamente está constituida por hidrocarburos muy pobres en oxígeno y parafinas cristalizables, siendo compuestos de alto peso molecular. En su génesis intervienen factores físico-químicos y procesos geológicos de índole dinámica, en escala y magnitud variable. Su origen es gracias a la conversión de un petróleo asfáltico que, debido a cambios de temperatura y presión creciente, seguiría los pasos siguientes: Petróleo asfáltico, Asfalto blando, Asfalto duro, Asfaltitas, Piro bitúmenes asfálticos.

9.1.7 Formaciones de los asfaltos naturales

La aparición de los asfaltos sobre la superficie puede presentarse en forma de flujos superficiales, en rocas impregnadas o venas llenas de asfalto. Las formaciones de flujos superficiales se clasifican de la siguiente manera:

Manantiales: Solo se encuentra el petróleo y los asfaltos líquidos los cuales llegan a la superficie a través de una fisura o falla.⁸

- **Lagos:** Son manantiales de gran tamaño. Ejemplo: los lagos de asfalto de Trinidad y Tobago.
- **Filtraciones:** Se presenta cuando las rocas impregnadas de asfalto están de soporte o en la base de una montaña o peñasco. El peso de tales formaciones o el aumento de temperatura provocada por las radiaciones solares genera una cierta cantidad de asfalto que fluye al exterior de la roca.
- **Venas llenas de asfalto:** Los asfaltos duros se encuentran normalmente llenando fisuras en direcciones que dependen del tipo de falla.

9.1.8 Clasificación de los depósitos de asfalto natural

De acuerdo con el contenido de asfalto, los depósitos se clasifican de la siguiente manera:

Depósito con alto contenido de asfalto: A este grupo pertenecen las Asfaltitas, en las cuales su contenido de asfalto es mayor del 80 %. Aparecen en forma de vetas. Las Asfaltitas se clasifican según sus propiedades físicas en Gilsonita, Grahamita y Glace Pitch, son asfaltos muy duros, negros y brillantes y con elevado punto de fusión.

Depósitos con contenido medio de asfalto: Son los depósitos naturales más conocidos en el mundo y contiene asfalto en una proporción del 25-80% asociado con material mineral, arcillas coloidales, arenas y materia orgánica. Se presenta en forma de flujos superficiales y el depósito de mayor proporción es el lago asfáltico de la isla Trinidad.

⁸ Ibid.

Depósitos con bajo contenido de asfalto: Se presenta como rocas impregnadas de asfalto con proporciones entre el 5-15%. Generalmente, el material mineral está conformado por calizas o areniscas.

9.1.9 Distribución de asfaltos naturales en Colombia

En Colombia se encuentran varios depósitos de asfalto natural, casi siempre rocas impregnadas y, en menor proporción, flujos superficiales y vetas. Los principales yacimientos en el país se ubican en los departamentos de Santander, Norte de Santander, Boyacá, Antioquia, Cundinamarca, Caldas, Chocó, Tolima, Meta, Cauca y Caquetá. En algunos de ellos como el de Pesca en Boyacá y el de San Pedro en el Tolima (Figura 3), se han explotado en forma artesanal desde comienzos del siglo X.

Figura 3: Ubicación mina San Pedro (Armero Guayaba, Tolima, Colombia).



Fuente: Google Maps.

9.2 EXPERIENCIAS Y FUENTES DE INVESTIGACIÓN

En nuestra investigación encontramos varias tesis de grado que tocan el tema de la adición de (GCR) a mezclas asfálticas y concretos como sigue:

- “Adición in situ de gránulo de caucho reciclado a mezclas densas en caliente para reducción de residuos sólidos”.

Autor: Juan David Villegas Camargo-Andrés Jaramillo Pinzón.

Escuela de ingenieros militares.

Fecha: 2010.

- “Influencia del triturado de restos de llantas como agregados en mezclas asfálticas”.

Autor: Jaime Francisco García Burgos.

Universidad de Cartagena.

Fecha: 2014.

- “Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad en concreto adicionado con residuo de llantas de caucho”.

Autor: Hermes Andrés Torres Ospina.

Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.

Fecha: 2014.

- “Evaluación del comportamiento de gránulo de caucho de llanta reciclada en la producción de concreto para la empresa Argos”.

Autor: Laura Carolina Venegas Ramírez

Fundación Universitaria de América.

Fecha: 2016.

- “Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá”.

Autor: Armando Ramírez Villamizar, Ingrid Lorena Ladino Rubio, Juan Pablo Rosas Ramírez.

Universidad Católica de Colombia.

Fecha: 2014.

- “Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá”.

Autor: Cesar Mauricio Díaz Claros, Liliana Carolina Castro Celis.

Universidad Santo Tomas.

Fecha: 2017.

- “Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia”.
Autor: Rafael Humberto Pérez Verdugo.
Universidad Militar Nueva Granada.
Fecha: 2014.
- “Estudio en tramos de prueba del comportamiento de mezclas de gradación densa, elaboradas en caliente con ligante asfáltico modificado con gránulo de caucho reciclado de llantas usadas”.
Autor: María Luisa Arbeláez Patiño.
Universidad Nacional de Colombia.
Fecha: 2015.
- “Caracterización, diseño y verificación de una mezcla asfáltica drenante en caliente modificada con grano de llanta triturado y fibra kaltex”.
Autor: Yee wan Yung Vargas.
Universidad Nacional de Colombia.
Fecha: 2013.
- “Análisis comparativo del proyecto de norma de 044-16 con la especificación Idv 560 y con el artículo INVÍAS 467-13 y la norma inv-e-824-13 de mezclas asfálticas con grano de caucho mejorado”.
Autor: Yee Wan Yung Vargas.
Universidad Militar Nueva Granada.
Fecha: 2016.

Al realizar nuestra investigación bibliográfica de los trabajos anteriores, encontramos que la temática investigativa se basa en la adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a mezclas asfálticas en caliente, y se clasifican como sistemas por vía húmeda o vía seca, explicadas anteriormente. Esto nos lleva a mencionar que en Colombia la adición de desechos de llanta **NO SE HA REALIZADO A MEZCLAS ASFALTICAS NATURALES.** Sin embargo,

encontramos que la adición de caucho a materiales utilizados en pavimentación de carreteras presenta los siguientes beneficios:

- La adición de Gránulo de Caucho Reciclado es confiable para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, usándolo como un agregado (siguiendo el proceso por vía seca), o como un modificador del ligante (siguiendo el proceso por vía húmeda).
- La resistencia a la fatiga de los asfaltos modificados con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) se aumenta hasta un 8%, respecto a las mezclas asfálticas sin adición.
- La vida útil de un pavimento construido con mezclas asfálticas adicionadas con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), aumenta considerablemente.
- La adición de Gránulo de caucho Reciclado a mezclas asfálticas disminuye el ahuellamiento.
- Las mezclas asfálticas con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), no aumenta la emisión al ambiente de compuestos orgánicos volátiles.

Los autores de los trabajos investigativos anteriores resaltan notablemente los beneficios de calidad de las mezclas asfálticas adicionadas con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), pero a diferencia, nuestra investigación tiene un enfoque ambiental sobre la adición de desechos sólidos contaminantes a los materiales asfálticos para pavimentación de vías. En la elaboración de nuestro estado del arte, nos surge la inquietud de ir más adelante y preparar una mezcla totalmente ecológica y ambientalmente sostenible.

Los resultados de los trabajos de investigación sobre el tema de adición de Gránulo de Caucho Reciclado, abarcan grandes logros aumentando la calidad y durabilidad de mezclas asfálticas en caliente. Para Mezclas Asfálticas Naturales (MAN) no encontramos bibliografía, trabajos investigativos o documentos que vinculen **los asfaltos naturales con el gránulo de caucho**. De esta forma el aporte investigativo, innovador y científico nos lleva a ser pioneros en crear una mezcla asfáltica natural, adicionada con desechos sólidos contaminantes, creando una mezcla ambientalmente sostenible y amigable con el medio ambiente.

Dentro de nuestra investigación realizamos un resumen bibliográfico de textos existentes en Colombia, en los últimos 10 años; y a nivel internacional nos referimos a las últimas técnicas y procedimientos en el campo de infraestructura vial y protección medioambiental.

En Bogotá, con el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, estamento que da cumplimiento a la resolución conjunta de la Secretaría Distrital de Ambiente y de Movilidad No. 6981, del 27 de diciembre de 2011: “Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, en el Distrito Capital”.

Esta resolución y su posterior aplicación busca, entre otras directrices, la utilización y reciclaje de llantas usadas, su correcta manipulación, transporte y transformación en gránulos. Las investigaciones recientes hablan y muestran cifras sobre la contaminación con la quema de llantas a cielo abierto, estas generan emisiones contaminantes como partículas, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Estos también incluyen contaminantes peligrosos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, (PAHs), dioxinas furanos, cloruro de hidrogeno, benceno, bifenilos policlorados (PCBs), y metales tales como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio, que afectan

significativamente la salud, generando irritaciones en piel y ojos, atacando membranas mucosas, el sistema nervioso central y produciendo cáncer.⁹

El almacenamiento inadecuado de las llantas usadas tiene un impacto visual negativo. Existe riesgo de derrumbes por su acopio inadecuado, riesgo de incendios de gran magnitud, proliferación de moscos, zancudos, roedores, entre otros, gracias a aguas estancadas en su interior y al difícil acceso a los sitios de acumulación.

El Instituto de Desarrollo Urbano IDU, realiza convenios con la Universidad de los Andes y realiza varios tramos de prueba, incorporando gránulo de caucho reciclado a mezclas densas en caliente, mediante ambos métodos, por vía seca y por vía húmeda, llegando a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos mediante el proceso por vía seca no fueron los esperados, este tipo de mezcla se caracterizó por tener baja adherencia y poca resistencia durante los ensayos de desempeño practicados. Se recomienda profundizar en este tipo de mezclas, en especial en el tema de la granulometría de la muestra.
- Entre menor sea el tamaño máximo del GCR que se utilice para mejorar las mezclas asfálticas, o al modificar el ligante, serán mejores los resultados obtenidos. Esto por el hecho que facilita la homogenización de la mezcla y disminuye los tiempos de reacción durante el proceso de modificación.
- El GCR utilizado para el proceso húmedo mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas. Sin embargo, hace que los módulos dinámicos disminuyan.
- El empleo de GCR incrementa la vida útil de un pavimento.

⁹ IDU, Boletín Técnico No3, Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado-GCR.

- Luego de haber construido un tramo de prueba a escala real, sometido al clima y a las cargas reales, se puede concluir que la metodología por proceso húmedo es mucho más confiable que la metodología por proceso seco.
- Los ligantes y mezclas con asfalto caucho se postulan como una excelente alternativa ambiental en la disposición de desechos de llantas, de la misma forma se abren paso como el ligante modificado del futuro a corto plazo en Colombia.¹⁰

Analizando los resultados de los anteriores postulados, llegamos a la conclusión de que en Colombia la adición de gránulo de caucho a mezclas asfálticas convencionales se creó buscando una solución a la problemática de los residuos sólidos contaminantes, mejorando las características de las mezclas asfálticas convencionales y garantizando que los contratos realizados con el Instituto de Desarrollo Urbano, en la Ciudad de Bogotá, que tengan mezclas asfálticas, deban tener por lo menos el 10% de asfalto modificado con gránulo de caucho reciclado. Las empresas privadas participan en la innovación y desarrollo y crean mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho. A continuación, enunciamos y analizamos las más importantes en Colombia.

9.2.1 Easy Obras Constructora S.A.S.

Es una empresa dedicada a la ejecución de obras civiles, en especial a la pavimentación de vías, con la particularidad que utiliza Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), como su principal insumo, con domicilio en el departamento de Antioquia. Esta empresa se ha caracterizado por realizar un buen trabajo investigativo y conceptual sobre los asfaltos naturales en Colombia. En la práctica

¹⁰ Universidad de los Andes-Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas-contrato 306-2003.

han realizado los mantenimientos y adaptación de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), en más de 20 kilómetros de vías terciarias a lo largo del territorio nacional. Su más reciente trabajo fue en el municipio de Facatativá, en el departamento de Cundinamarca, el cual se referencia en la página 177 de este documento investigativo.

Allí se llevó a cabo el mantenimiento de la Calle 15, la principal y más congestionada vía de todo el Municipio, con alto tráfico de camiones C2-S3. El procedimiento fue fresar la carpeta asfáltica existente y realizar una nivelación de la rasante existente. Posteriormente se extendió y compactó la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), procedente de la mina San Pedro y Norcasia, la cual fue mezclada en patio y adicionada con una emulsión modificada con polímeros. Obviamente, no tuvimos acceso a la información de porcentajes ni componentes de dichos materiales, pero sí pudimos llegar a la conclusión que este tipo de mezclas son de gran calidad y se pueden utilizar, incluso, en vías de alto volumen de tráfico.

Otros trabajos de esta empresa son:

- Vía Puerto Boyacá, Campo Velásquez, 1.2 kilómetros por 5 de ancho.
- Puerto Gaitán, Meta, Campo rubiales, 4 Kilómetros por 6 de ancho.
- Carrera 2, La Dorada, Caldas, 300 Metros por 5 de ancho.
- Puerto Berrio, Antioquia, Vía a Yondó, 1.2 kilómetros por 5 de ancho.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por esta empresa, podemos concluir que las Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), son un material versátil para cualquier capa de la estructura del pavimento.

Los datos de investigación físico-química de los materiales no fueron suministrados por la empresa, ya que lo consideran como secreto organizacional.

9.2.2 Incoasfaltos

Incoasfaltos es una empresa dedicada al diseño, producción, comercialización y transporte de materiales asfálticos utilizados en el sector de infraestructura vial, en combinación con la prestación de servicios especializados de construcción, como micro pavimentos en frío, tratamientos superficiales, pinturas asfálticas y sello de juntas y fisuras Asfaltos Modificado con (GCR). En el mes de Julio de 2014, inició producción de asfalto modificado con Grano de Caucho Reciclado (GCR), con resultados altamente satisfactorios. Durante estos 7 meses han producido 800 toneladas de producto, el cual se ha instalado con éxito en importantes vías de Bogotá D.C., reciclando aproximadamente 7.200 llantas usadas.

Para nuestra investigación solicitamos una cita con el Ingeniero Duván Martínez, quien amablemente nos recibió en las oficinas de Incoasfaltos, ubicadas en la Carrera 5 No. 16-70, en el municipio de Chía, Cundinamarca. Con su ayuda recopilamos la información suministrada y encontramos que Incoasfaltos, produce en su planta ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca, una mezcla asfáltica modificada con gránulo de caucho reciclado, combinando 5 diferentes granulometrías y porcentajes de adición por vía húmeda. Es decir, adicionando el gránulo de caucho directamente al bitumen dentro de la tolva dosificadora. Las experiencias de esta técnica les han significado proveer al mercado en la ciudad de Bogotá el 29.3% de la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado, ejecutada por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU. Como aporte a nuestra investigación el Ingeniero Martínez, nos señala que Incoasfaltos no ha trabajado con Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), pero nos apoya en nuestro proyecto y nos ofrece la Emulsión asfáltica tipo CRL- 1, modificada con polímeros para ser adicionada a nuestra mezcla MAN VERDE. Realizamos la visita a la planta y obtenemos las fichas técnicas utilizadas en nuestra investigación.

Las conclusiones más importantes y en referencia con esta empresa son;

- La adición de gránulo de caucho reciclado a mezclas asfálticas en caliente, aumenta la durabilidad del asfalto.
- El precio de una mezcla modificada con gránulo de caucho reciclado es 65% más costosa que una mezcla convencional.
- La temperatura de la planta para producir una mezcla asfáltica modificada con gránulo de caucho reciclado se incrementa en 15°, comparada con una mezcla convencional.
- Los pedidos de las mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho reciclado, se deben realizar con 15 días de anticipación. El pago se debe realizar con la orden de compra y los saldos para el retiro de la mercancía deben estar cubiertos al 100%.

9.2.3 MPI especialistas en asfalto

Es una empresa constituida en 1974, líderes en tecnologías y aplicaciones para asfaltos modificados y adicionados con gránulo de caucho reciclado. Son únicos exportadores de asfalto en Colombia, innovadores en modificación de asfalto con celulosa. Dentro de sus investigaciones determinaron que el asfalto modificado con gránulo de caucho reciclado presenta mayor flexibilidad ante cambios de temperatura, alta resistencia a la deformación plástica, menor envejecimiento y una baja susceptibilidad térmica. Así mismo, menor reflexión de fisuras, aumento de la cohesión interna, mejoramiento de la elasticidad, aumento en la adhesividad árido-ligante mayor durabilidad y menor mantenimiento.

Modalidad de venta - GRANEL. Se despacha en carro tanques especiales con capacidad de 28 toneladas, provistos de un sistema de calentamiento y agitación para mantener el producto en condiciones óptimas para la producción de la mezcla asfáltica en planta. La entrega del asfalto incluye la adaptación de un

sistema de bombeo del asfalto desde el vehículo directamente hasta el mezclador de la planta, junto con el acompañamiento y asesoría de personal calificado.¹¹

9.2.4 Cámara Colombiana de Infraestructura

La Cámara Colombiana de Infraestructura ha desarrollado grandes adelantos investigativos. Dentro de nuestra recopilación bibliográfica podemos destacar las siguientes: Se contempla el uso del asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) en la construcción de pavimentos flexibles, utilizando la normatividad empleada por el Instituto Nacional de Vías, para lo cual se mostrará un tramo construido con esta técnica. Respecto del diseño estructural el Instituto Nacional de Vías, considera utilizar una equivalencia estructural con una relación 1:1 de las mezclas asfálticas convencionales en relación con la mezcla asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR). INVÍAS incorporará en los pliegos de condiciones para contratación en el otorgamiento de puntaje por factor de calidad, los incentivos y requisitos del instituto para los contratistas, que consiste en asignar hasta 100 puntos a los proponentes que se comprometan con incluir en su propuesta la implementación de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado (GCR) en una longitud continua, no menor del 10% de la longitud total del proyecto; una vez se haya cumplido con todos los demás requisitos exigidos en los pliegos.

La actividad no es objeto de licencia ambiental, de acuerdo con lo estipulado por el decreto 2820 del 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, debido a que las llantas en desuso no son consideradas residuos y/o desechos peligrosos por la normatividad ambiental vigente (Decreto 4741 de 2005, del MAVDT).

- No existen vertimientos.

¹¹ MPI ESPECIALISTAS EN ASFALTO. Página de inicio. MPI Especialistas en Asfalto. [En línea] s.f. [Citado el: 26 de enero de 2019.] <http://www.mpi.net.co/index.html>.

- No existen emisiones de vapores.
- No hay contaminación auditiva.
- No requiere explotación de recursos naturales.

Esta actividad no requiere trámites para la captación de aguas, permiso de emisiones atmosféricas, ni permiso de vertimientos; sin embargo, es nuestra responsabilidad clarificar la gestión que se le da a las aguas residuales, domésticas e industriales generadas durante el funcionamiento de la actividad (vigilado por CORNARE).

El apoyo de la Cámara Colombiana de Infraestructura a los productores de asfaltos modificados con gránulo de caucho, ha contribuido al desarrollo de nuevas tecnologías, logrando el apoyo a nivel gubernamental, y exigiendo en los pliegos la incorporación de esta tecnología.¹²

9.2.5 El Espectador

Investigamos las publicaciones realizadas por este importante diario colombiano, encontrando lo siguiente:

“Son varias las propuestas que han llegado a la Mesa Nacional de Llantas, que lidera el Gobierno Nacional y que busca modificar la norma actual sobre estos residuos e implementar acciones sostenibles para la reutilización de los neumáticos, que ocasiona graves daños ambientales, cuando se dejan a la deriva. Una de ellas fue presentada por el Distrito y consiste en reencauchar y reutilizar llantas usadas y sus subproductos como insumo en mezclas asfálticas, para que sean usadas para la construcción y reparación de vías. Por los buenos resultados, el Gobierno decidió adherirla a la nueva reglamentación para todas las ciudades del país.

¹² CÁMARA COLOMBIANA DE INFRAESTRUCTURA. Página de inicio. Cámara Colombiana de Infraestructura. [En línea] s.f. [Citado el: 5 de marzo de 2019.] <http://www.infraestructura.org.co/2017/>.

Este proyecto proviene de un plan piloto que adelanta la Secretaría de Ambiente en Bogotá, desde hace tres años, y que obliga a todas las personas o empresas que ejecuten la construcción de obras de infraestructura del transporte urbano, a utilizar materiales provenientes del aprovechamiento de estos elementos, en un porcentaje no inferior al 5% de metros cuadrados por cada contrato. Así lo contó Alberto Acero, subdirector de Ecourbanismo y Gestión Ambiental Empresarial de la Secretaría de Ambiente.

“A la fecha, el Distrito ha cumplido la meta que se estipuló desde el segundo semestre de 2012, con un 15% ejecutado, en 125.223 m² de infraestructura vial construida con el asfalto modificado, utilizando grano de caucho reciclado (GCR)”, aseguró Acero. Sin embargo, la administración reconoce que falta aumentar la meta de la utilización de grano de caucho en estas obras. El objetivo es aumentarlo entre un 40% y 60% en 5 años, es decir, que esto será obligación del futuro alcalde.

La idea surgió a partir de la problemática de la ciudad acerca de la falta de control sobre los fabricantes, que en su mayoría dejaban botadas las llantas en calles y separadores, provocando una grave contaminación y la proliferación de roedores. Como la Capital no cuenta con un lugar donde se puedan almacenar estos residuos, ni donde se puedan tratar, decidieron aprovecharlos para hacer más vías y tapar 20.000 huecos con los casi 2,5 millones de llantas usadas que se producen en Bogotá.

La falta de control se debe a que la resolución que expidió el Ministerio de Ambiente en 2010, con la que pretendía reglamentar la disposición de las llantas usadas, tiene muchos vacíos, pues no se establecen obligaciones estrictas a los productores, ni hay sanciones para quienes no cumplan. Además, la resolución 1457, si bien obliga a los fabricantes y comercializadores de llantas a encargarse

de crear sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental, deja de lado a los actores que más contaminan: los talleres y los montallantas.

En Bogotá las llantas, por un lado, son recogidas por un grupo creado por la Asociación Nacional De Empresarios de Colombia (ANDI), organización que hace dos años creó su programa de posconsumo. Hoy hay 85 empresas inscritas que pagan una cuota para que se recojan las llantas que fabricaron y las lleven a 92 puntos. Por el otro, aunque no es su responsabilidad, también las recolecta el Distrito, que realiza operativos en ocho localidades críticas de arrojo de llantas. Ya ha impuesto 24 sanciones por comparendo ambiental y 24 cerramientos por el incumplimiento a la normativa ambiental. Este año ha recogido 9.346 llantas usadas en las localidades de Puente Aranda, Antonio Nariño, Rafael Uribe Uribe, Barrios Unidos, Kennedy, Ciudad Bolívar y Suba. En la Figura 4 se evidencia a dónde van a parar las llantas usadas.¹³

Figura 4: Neumáticos contaminantes en las calles.



Fuente: El Espectador¹⁴.

En nuestra investigación abordamos el campo internacional, en la cual los avances en cuanto a la utilización de asfaltos naturales y la modificación de asfaltos con caucho reciclado se resume en los siguientes aspectos.

¹³ EL ESPECTADOR . Iglús en Colombia? Sí, pero de llantas de desecho. *Nacional* . [En línea] 27 de marzo de 2015. [Citado el: 4 de febrero de 2019.] <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/iglus-colombia-si-de-llantas-de-desecho-articulo-551771>.

¹⁴ Ibid.

En 1712 el Griego Eiri D'Eyrinis descubrió el yacimiento de asfalto natural Val de Travers, ubicado en Suiza; posteriormente el yacimiento Seyssel, en el valle de Rodamo. A partir de esos descubrimientos se elaboró el primer "Mastic de asfalto", el cual fue utilizado para revestir caminos y senderos. El primer antecedente de asfalto natural utilizado fue en Francia en el año de 1802, por la fabricación de adoquines de asfalto natural; con ellos se adoquinó la Plaza de la Concordia y los campos Elíseos de París. A partir de ese momento el auge del asfalto brillaba en toda Europa. En la construcción de la carretera Paris-Perpiñan, fue utilizado el asfalto natural de Val de Travers. El primer procedimiento de asfalto natural fue introducido en 1869, llamado "procedimiento de Londres"; luego se procedió a calentar el asfalto natural proveniente del lago natural de Trinidad para la construcción de la carretera Rue Du Louvre y la avenida Victoria en París, en el año de 1900. Dos años después y con la destilación del petróleo en Estados Unidos, el asfalto natural se convierte en una forma más complicada en cuanto a su explotación e importación del bitumen. Por esta razón, el asfalto obtenido de la destilación es un producto más puro y económico respecto al asfalto natural.

La adición de gránulo de caucho reciclado a las mezclas asfálticas en caliente fue aplicada en la Unión Europea desde los años 70. Inicialmente esta adición se realizaba a los áridos, dentro de las tolvas de las plantas de fabricación del asfalto. Luego de varios tramos de prueba se llegó a la conclusión, que la parte árida no producía una buena adherencia con el bitumen; razón por la cual, las investigaciones apuntaban a mezclar el caucho directamente al bitumen, en ese momento los productores de asfalto descubrieron que esta adición producía un asfalto más fuerte y con mayores efectos en la durabilidad. ¹⁵

¹⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819302284>

En nuestra investigación encontramos la evolución de la adición de gránulo de caucho reciclado a mezclas asfálticas. En el artículo “Rheological characteristics of unaged and aged epoxidised natural rubber modified asphalt”, los investigadores analizan el comportamiento reológico de un asfalto convencional frente a un asfalto modificado con caucho natural, envejecido y sin envejecer, midiendo las propiedades físicas de ambos compuestos. Los resultados de las pruebas arrojaron un aumento en el comportamiento de rigidez y elasticidad del aglutinante, particularmente, a altas temperaturas de las mezclas modificadas con caucho natural envejecido frente a las modificadas con caucho no envejecido. Al finalizar las investigaciones se concluyó que los asfaltos modificados con gránulo de caucho reciclado presentan mayor durabilidad que los no modificados.¹⁶

Dentro del estado del arte de nuestra investigación, no se pudo encontrar bibliografía nacional ni internacional donde se le adicione Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) a Mezclas Asfálticas Naturales (MAN).

9.3 QUÉ LOGROS SE HAN CONSEGUIDO

El Instituto de Desarrollo Urbano de la ciudad de Bogotá, contrató los servicios de La Universidad de los Andes, para que desarrollara todos los ensayos de laboratorio, pruebas, experimentaciones y tramos de prueba en los cuales se evidenciara la capacidad que tiene el caucho para mejorar las condiciones reológicas de las mezclas asfálticas. En cabeza del Ingeniero Freddy Alberto Reyes Lizcano, quien es la máxima autoridad en Colombia de los procesos de modificación de mezclas asfálticas con todo tipo de materiales reciclados, la conclusión y recomendación final fue la normalización de las especificaciones técnicas por primera vez en Bogotá para la utilización de mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho reciclado. Sección 560-11 mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda.

¹⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815305481>

El Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), en su artículo 442P-17, dicta las normas para el trabajo con asfaltos naturales y en el mes de diciembre de 2017, expide la resolución 10099, en la cual reglamenta, promueve y certifica la utilización de asfaltos naturales como una forma innovadora en cuanto a materiales para pavimentos en vías con bajos volúmenes de tránsito.¹⁷

9.4 QUÉ ASPECTOS FALTAN POR ABORDAR

Dentro de nuestra investigación, no se tiene conocimiento de la utilización de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN) con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), para reparcho localizado.

Por esta razón se convierte en un reto como aspirantes al título de MAGISTER EN INFRAESTRUCTURA VIAL, lograr evaluar y cuantificar la calidad de esta mezcla.

¹⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op. cit.

10 MARCO TEÓRICO

10.1 MARCO REFERENCIAL

Para llevar a cabo nuestro trabajo decidimos utilizar la Mezcla Asfáltica Natural (MAN) existente en la mina San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima; el Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), reciclado, procesado y clasificado por la empresa Reciclair S.A.S, ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca, y la emulsión asfáltica, procesada y distribuida por la empresa Incoasfaltos S.A, ubicada en municipio de Mosquera, Cundinamarca.

10.2 MARCO CONCEPTUAL

Dentro de nuestra investigación y de acuerdo con las citas bibliográficas, experiencias y fuentes de información presentadas en el estado del arte, realizamos una síntesis del análisis de las especificaciones técnicas en la utilización de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), en Colombia.

Conforme a la resolución No. 10099 del 27 de diciembre de 2017 del Ministerio de Transporte, el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) resuelve adoptar las especificaciones particulares de construcción, para la utilización de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN). La ve como gran alternativa en vías con bajos volúmenes de tránsito y en las que se determina la utilización de fuentes de asfalto naturales, clasificando este material como “materiales de construcción no convencionales generando innovación en la construcción de carreteras de la red vial nacional,”¹⁸ . Y realiza un estudio de la utilización de este material, el cual ya se venía aplicando como mejoramiento superficial en varias vías de la geografía

¹⁸ Ibid.

nacional, pero con muy bajos parámetros de calidad y supervisión, por la ausencia de especificaciones técnicas. Así se hizo en vías como en San Pedro, vereda de Armero Guayabal, en el Tolima; vías internas de plantas de extracción de petróleo, accesos a cabecera municipales como en Norcasia, Ambalema y La Dorada. Sumado a esto, el gran peso político que tiene el monopolio de asfalto en Colombia con empresas como Ecopetrol, que es la única compañía que suministra los derivados del petróleo en todas sus presentaciones, especialmente asfaltos y emulsiones asfálticas, convirtiendo estos materiales naturales en una especie de competencia para la entidad del Estado. Sin embargo, los propietarios de los yacimientos y canteras de Asfaltita en Colombia, presentan las bondades de este material y realizan una presión política para que el INVÍAS decrete y apruebe la utilización de asfaltos naturales, derivando esta resolución. El tema parece no ser tan justo, ya que primero lo reglamenta únicamente para vías con bajos volúmenes de tránsito; y, en segundo lugar, solicita una serie de ensayos de laboratorio superiores a una mezcla tradicional en caliente. La conclusión de los autores de esta investigación es que la adopción de normas tan complejas dificulta la utilización de este tipo de mezclas para las vías terciarias de orden nacional. Si bien son especificaciones técnicas, se deberían adelantar investigaciones más profundas que permitan adoptar una forma más sencilla y sin tantas “trabas” para lograr utilizar esta mezcla, que es más amigable con el medio ambiente, más ecológica y conservadora de los recursos naturales.

10.2.1 Ambiente

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emite la Resolución No. 1326 del 7 de julio de 2017, la cual reglamenta los “sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones”¹⁹ donde claramente vinculan a los importadores y productores de llantas a nivel nacional,

¹⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. RESOLUCIÓN 1326. Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones. Bogotá : s.n., 2017.

para que reciban las llantas usadas de los compradores que hacen uso de sus establecimientos y servitecas, se reglamentan los formatos de presentación de los resultados de la recolección de las llantas usadas, igualmente se decretan las prohibiciones para este tipo de residuos sólidos así,

Prohibiciones:

- El abandono o eliminación de llantas usadas en el territorio nacional.
- Enterrar llantas usadas como método de disposición final.
- Disponer llantas en los rellenos sanitarios.
- Acumular llantas usadas a cielo abierto, salvo para el caso a que se refiere el anexo 1 de la presente resolución.
- Abandonar llantas usadas en el espacio público.
- Quemar llantas usadas.
- Utilizar las llantas usadas como combustible sin el cumplimiento de lo establecido en las normas ambientales que rigen la materia.²⁰

Así pues, una forma de apoyar esta resolución del Estado, es en buena parte la utilización de mezclas asfálticas con la adición de gránulo de caucho reciclado (GCR). Dentro del INVÍAS existe ya una ponderación de puntos en las licitaciones de contratos de obra, para premiar a los proponentes que incluyan en los ítems, el suministro de mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho reciclado. En el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, es obligatorio el uso de al menos el 5% de mezclas asfálticas modificadas con gránulo de caucho reciclado, del total de m³ del contrato, y esta certificación la expide la planta de asfalto a la cual se le compra dicho material.

En las experiencias en nuestro país, gran parte se centra en las vías pertenecientes a los departamentos de Boyacá, Caquetá y Tolima, pues existen grandes yacimientos de Asfaltita y conglomerados de asfalto natural, algunos de los municipios al no contar con recursos para la intervención de sus vías

²⁰ Ibid.

municipales y departamentales optan por aplicar las mezclas de asfalto natural. Numerosos estudios muestran los beneficios de estos materiales. Se han clasificado y realizado ensayos, colocando la Asfaltita como parte del bitumen que normalmente se utiliza para las mezclas asfálticas en caliente y se une mediante un proceso en caliente moliendo la Asfaltita y el 70-100 de Apiay, o de Barrancabermeja. Poca es la bibliografía en cuanto a la utilización de la mezcla asfáltica natural, tal como sale de la mina; es decir, para utilizarse como un todo. En nuestra investigación encontramos la empresa EASY OBRAS S.A.S, de Norcasia, la cual trabaja la mezcla asfáltica natural y la adiciona con una emulsión patentada por ellos mismos. Al igual que en otras fuentes, obviamente no se logró tener la información sobre los componentes de la emulsión, así que los autores realizamos varios análisis para tratar de conseguir la emulsión más efectiva a la hora de mezclar con la mezcla asfáltica natural. Hicimos numerosas visitas a distribuidores de productos asfálticos como Incoasfaltos, quienes nos ofrecen una emulsión modificada con polímeros a la cual le realizamos las pruebas pertinentes y nos dio buenos resultados.

Por las investigaciones realizadas encontramos un contrato del año 2017, en el municipio de Facatativá, Cundinamarca, en el cual se hace un esfuerzo entre la Alcaldía Municipal, que suministra la maquinaria y la mano de obra; y por otra parte, las compañías transportadoras y productoras de combustibles, agremiadas en ASGREM. Juntos pondrán los recursos para la compra del material a utilizar, el cual será Mezcla Asfáltica Natural (MAN), cuyo proveedor será la empresa Easy Obras S.A.S. Es tan poca la información, que la misma Alcaldía publica en su página textualmente: “Para la recuperación de la Calle 15 se estima la instalación de una capa de asfalto de 14 centímetros de espesor y se espera poder vincular a las empresas del sector y empresarios a fin de embellecer la vía, sus alamedas y pasos peatonales, y darles a los espacios comunes de los complejos

habitacionales una nueva vida y mejores condiciones para los habitantes del sector y de todo el municipio”.²¹

Claramente analizamos que en primer lugar no es una capa de asfalto tradicional, es una serie de capas de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), la cual no va a presentar las mismas características de una pavimentación tradicional, iniciando con su color, ya que el MAN, tiene un color café y no negro como las mezclas tradicionales. Esto ha causado cierta desconfianza en los habitantes del Municipio quienes interpretan esto como materiales de baja calidad. Los autores realizamos un recorrido por el proyecto y tomamos fotografías para evidenciar la investigación sobre este contrato. Sin embargo, existe muy poca información sobre el desarrollo de las obras y el contrato se encuentra suspendido por falta de pago a los proveedores del material. A su vez, encontramos un muy buen desempeño de la capa instalada de mezcla asfáltica natural, al parecer falta una segunda capa de 0.075 m, para completar el diseño estructural. Después de realizado un conteo de vehículos, se evidencia el paso de unos 115 camiones de tipo C3-S3, por día. Analizando este tráfico, podemos concluir que la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), claramente puede ser utilizada en vías diferentes a las denominadas t1, o de bajo volumen de tránsito, como lo expresa la Resolución No. 10099 del 27 de diciembre de 2017. Hace parte fundamental de esta investigación estar al tanto de los contratos desarrollados para promover la utilización de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

La investigación y desarrollo de este material como capa de rodadura en nuestro país, está lejos de ser una realidad. Existen pocas empresas y pocos profesionales dispuestos a mostrar las bondades de este material. Su aplicación se realiza igual que una mezcla asfáltica en caliente (en la Figura 5 se evidencia el

²¹ ALCALDÍA MUNICIPAL DE FACATATIVÁ CUNDINAMARCA . Página de inicio. Alcaldía Municipal de Facatativá Cundinamarca . [En línea] s.f. [Citado el: 8 de marzo de 2019.] <http://www.facatativa-cundinamarca.gov.co/noticias/alcaldia-de-facatativa-llegara-con-todos-sus-servicios>.

proceso), la extendida se realiza con una terminadora de asfalto tradicional, la gran diferencia radica en que es en frío.

Figura 5: Extendida de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: La Guía Cundinamarca.

En el 2017, en el municipio de El Doncello, departamento de Caquetá, se evidencia la extendida y compactación de Mezcla Asfáltica Natural (MAN) en más de 12 vías internas y veredales. Esto nos indica que en otras regiones del país ya se trabajaba con este material sin estar reglamentado y ni contener las especificaciones técnicas por parte del INVÍAS. El uso de este recurso natural economiza dineros comparándolo con Mezclas Asfálticas en Caliente. (En la Figura 6 observamos la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), utilizada como rodadura en la vía Calle del Cementerio, barrio El Recreo, municipio de el Doncello, departamento del Caquetá).

Figura 6: Rodadura con mezcla asfáltica natural (MAN), Municipio de El Doncello, departamento de Caquetá.



Fuente: Informe de Gestión Alcandía Municipal de El Doncello.

En este Municipio el 40% de las vías internas se encuentran pavimentadas con Mezcla Asfáltica Natural (MAN). En nuestra investigación pudimos ver que el Ejército Nacional, con su batallón de Ingenieros militares, provee la maquinaria y la mano de obra para llevar a cabo estos trabajos. La Mezcla Asfáltica Natural (MAN) se encuentra en el yacimiento Las Pavas, en el municipio de Paujil, y es trasladada hasta el municipio de El Doncello, a 18 kilómetros de distancia. Los costos en referencia a una mezcla asfáltica tradicional disminuyen en un 80%, pues el m³ de mezcla asfáltica natural se consigue en \$ 60.000, mientras que una mezcla mdc-19, vale \$ 312.000. (en la Figura 7, vemos el avance y la terminación de una vía interna del municipio de El Doncello).

Figura 7: Rodadura con Mezcla Asfáltica Natural (MAN), calle 2ª con 4, municipio de El Doncello, departamento de Caquetá.



Fuente: Informe de Gestión Alcaldía Municipal de El Doncello.

Los beneficios de la mezcla asfáltica natural son muchos, y en Colombia las vías terciarias componen 142.000 km, esto es casi el 82 %, de la red nacional. Sería una salida económica y mejoraría de manera significativa la movilidad de los campesinos y de todos los productos de consumo. Se beneficiarían los habitantes de los municipios productores de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), habría mayor demanda de maquinaria por parte de los municipios y se podría masificar de una forma sencilla y práctica.

En Colombia existen pocas organizaciones dedicadas al reciclaje de los neumáticos. Es un negocio poco rentable, las máquinas especializadas para el proceso (Figura 8) tienen valores muy altos, 78.000 dólares, aproximadamente, y la recuperación del capital invertido tiene una tasa de retorno de 10 años.

Figura 8: Trituradora de (GCR).

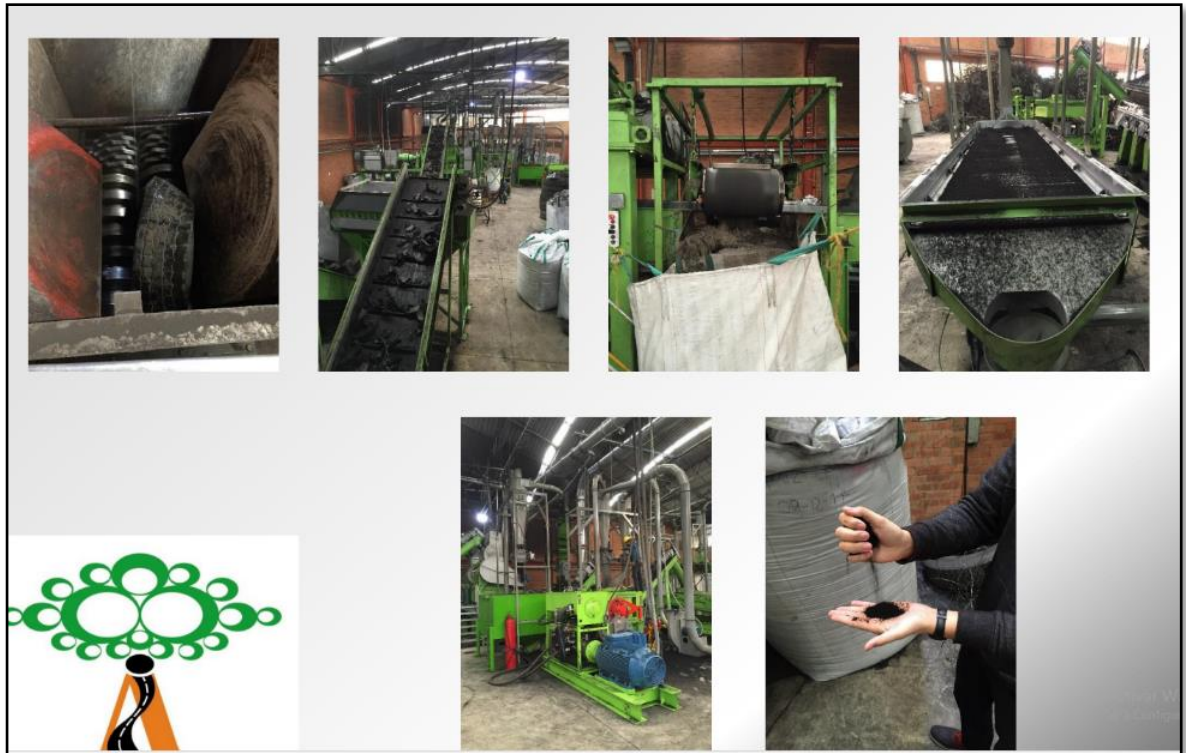


Fuente: Reciclair S.A.S.

Todo el proceso para reciclar las llantas usadas se debe realizar en una bodega, no puede ser almacenada al aire libre, esto demanda unas instalaciones muy grandes para lograr acomodar la materia prima y la maquinaria. (En la Figura 9 se ilustran las máquinas que hacen parte del proceso de trituración de llantas usadas)

- Maquinaria para trituración de las llantas usadas.
- Molino.
- Banda transportadora.
- Electroimán.

Figura 9: Bandas transportadoras.



Fuente: Incoasfaltos

En nuestro proyecto, queremos adicionar el gránulo de caucho a la mezcla de asfalto natural, mediante un proceso en seco, mezclado in situ, sin la necesidad de maquinaria especializada ni plantas de asfalto que consuman combustibles fósiles. Es una gran apuesta para la conservación del medio ambiente. La investigación en Colombia no está amparada por decretos ni entidades que faciliten los recursos económicos para ensayos de laboratorio y caracterización de los materiales. La información existente es poca, y quién la posee no tiene la disposición para compartirla. Es un juego en el que los empresarios desean constituir monopolios para su beneficio personal y prima más el aspecto económico que lograr sacar de la miseria. Es evidente la falta de vías terciarias capaces de suplir las necesidades de transporte de un país inmensamente rico en recursos naturales, pero apático y negligente para desarrollar métodos racionales para la academia.

En nuestra investigación nos enfrentamos a todo: compañías sumidas en el silencio ante la eventual copia o robo de información, alcaldías que no tienen claro los procedimientos o caracterización de materiales a utilizar en sus propios contratos, corrupción y licitaciones en las cuales ni siquiera se cumplen con los estudios previos. Además, se entregan contratos a ´dedo´ y hay falta de transparencia en los estudios y contrataciones. Es un tema demasiado interesante para algunas instituciones que tal vez lo único que esperan es lucrarse y no realizar cambios para mejorar nuestro país.

Sin embargo, los autores expresamos la satisfacción que sentimos al investigar este tema tan noble que aporta al medio ambiente. Trataremos de seguir adelante por medio de nuestras empresas y contando con el apoyo de las Universidades para cada día tener más información de las Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), adicionadas con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR).

11 METODOLOGÍA

Nuestro trabajo de investigación y desarrollo busca diseñar y utilizar una Mezcla de Asfalto Natural (MAN), adicionada con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), para bacheo localizado. Dentro de nuestra metodología, primero debemos caracterizar todos los materiales que utilizaremos en nuestra mezcla. Se usará como marco de referencia la especificación técnica artículo 442p del INVÍAS, dentro de la cual exige los cumplimientos de los ensayos que se encuentran en la Tabla 1, para los agregados pétreos combinados para la construcción de capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural.

Tabla 1: Ensayos de laboratorio para agregados pétreos combinados para la construcción de capas asfálticas con una Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

Norma del ensayo	Requisito	
E-218-13	ENSAYO DESGASTE AGREGADOS GRUESOS	25/35
E-232-13	COEFICIENTE DE PULIMIENTO ACERELARO PARA RODADURA	0,45 MINIMO
E-220-13	PERDIDA EN ENSAYO DE SOLIDEZ EN SULFATO DE MAGNESIO	18 MAXIMO
E-237-13	IMPUREZAS EN AGREGADO GRUESO	0,5 MAXIMO
E-125-13	INDICE DE PLASTICIDAD	7 MAXIMO
E-126-13	INDICE DE PLASTICIDAD	7 MAXIMO
E-133-13	EQUIVALENTE DE ARENA	50 MINIMO
E-235-13	VALOR DE AZUL DE METILENO	10 MAXIMO
E-240-13	PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS 5:1	10 MAXIMO
E-227-13	CARAS FRACTURADAS	75/60
E-239-13	ANGULARIDAD DE LA FRACCION FINA, MÉTODO A	40/35
E-757-13	ADHESIVIDAD AGREGADO GRUESO	Reportar
E-774-13	ADHESIVIDAD AGREGADO FINO	4 MINIMO

Fuente: Elaborado por el autor.

Posteriormente se realizará la caracterización de la emulsión asfáltica y se utilizará como marco de referencia la especificación técnica artículo 411-13 del INVÍAS, el cual exige el cumplimiento de las características presentadas en la tabla 2, normas de ensayo de materiales 2013.

Tabla 2: Características que deben cumplir las emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta.

ENSAYOS SOBRE LA EMULSIÓN	NORMA DE ENSAYO INV	ROTURA LENTA			
		CRL – 1		CRL - 1h	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.
Viscosidad					
Saybolt Furol a 25°C, S	E-763-13	20	200	20	100
Saybolt Furol a 50°C, S		-	-	-	-
Contenido de agua, %	E-761-13	-	43	-	43
Estabilidad durante almacenamiento (24 horas), %		-	1	-	1
Sedimentación a los 5 días, %	E-764-13		5		5
Destilación					
Contenido de asfalto residual, %		57	-	57	-
Contenido de aceite, %	E-762-13	-	-	-	-
Tamizado					
Retenido tamiz No. 20 (850 µm), %	E-765-13	-	0.10	-	0.10
Demulsibilidad, %	E-766-13	-	-	-	-
Rotura en ensayo de mezcla con cemento, %	E-770-13	-	-	-	2.0
Carga de partícula	E-767-13	Positiva		Positiva	
pH	E-768-13	-	6	-	6
Cubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento					
- Con agregado seco	E-769-13	-	-	-	-
- Con agregado seco y acción del agua		-	-	-	-
- Con agregado húmedo		-	-	-	-
- Con agregado húmedo y acción del agua		-	-	-	-
Ensayos sobre el residuo de destilación					
Penetración (25°C, 100 gr, 5s), 0.1 mm				60	100
- ARD	E-706-13	60	100		
- ARB		100	250		
Ductilidad (25°C, 5 cm / min), cm	E702-13	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713-13	97.5	-	97.5	-

Fuente: Normas de ensayo de materiales, Invías 2013.

Determinaremos la proporción de adición de la emulsión asfáltica de acuerdo con el método INVÍAS E-741-13, calculando la superficie específica del agregado.

Posteriormente tendremos un porcentaje teórico de la emulsión requerida, y siguiendo el procedimiento Marshall modificado del Instituto Norteamericano del asfalto, en su apéndice H del manual MS-14, buscaremos 4 formulas; dos por debajo, y dos por encima para validar los datos teóricos obtenidos en la primera fase de la experimentación. Seguidamente y teniendo nuestra fórmula de trabajo analizaremos la adición del Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), en porcentajes de acuerdo con nuestra experiencia y a la consulta de fuentes investigativas presentes en nuestro estado del arte.

12 INVESTIGACIÓN

Con base en la formulación del problema y los objetivos trazados, nuestra modalidad de trabajo de grado es de tipo investigativo. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes que se tienen en cuenta para el desarrollo del presente proyecto:

Lugar: Bogotá D.C., Soacha y Cota Cundinamarca.

Toma de la información: Se realizó la toma de muestras necesarias para la realización de ensayos de laboratorio, para seguir los lineamientos de las normas INVÍAS en el trabajo con Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

Instrumentos: Para el desarrollo de la investigación formativa de este proyecto de grado se tuvo en cuenta los siguientes instrumentos:

- Laboratorio de asfaltos certificado y especializado.
- Maquinaria necesaria para la ejecución del tramo de prueba.

12.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación corresponde al análisis y afectación que pueden tener la Mezcla Asfálticas Naturales (MAN), al agregarle Gránulo de Caucho Reciclado (GCR).

12.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El proceso para esta investigación se sustenta en la implementación de ensayos de laboratorio que evidencien el cumplimiento de las especificaciones técnicas de la norma 442p-17, y a partir de estos resultados, adicionar porcentajes de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a la mezcla inicial de (MAN). Posteriormente se realizarán bacheos localizados para evaluar el comportamiento real de nuestra

mezcla. Finalmente, presentaremos correcciones, conclusiones y observaciones al comportamiento de nuestra mezcla.

Nuestros resultados se verán reflejados en unos cuadros comparativos de costos vs mejoras ambientales en el manejo de los recursos naturales no renovables, en implementar usos del reciclaje de llantas usadas, y cómo mejoramos y aportamos una salida más amigable con el medio ambiente. Será satisfactorio crear una mezcla ecológica a los problemas de movilidad y comodidad a los usuarios de las vías en ciudades y municipios.

13 DESARROLLO DEL TRABAJO

Como primer paso realizamos una visita a la mina de asfalto natural, llamada San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayaba, en el departamento del Tolima. (En la Figura 10 se observa la organización y forma de explotación de los yacimientos de Mezcla Asfáltica Natural (MAN)).

Figura 10: Panorámica de la mina de asfalto natural San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se hace un reconocimiento de la mina y la inducción se realiza por parte del señor Omar Castillo, administrador de la mina. Se conoce el material después de pasar por la trituradora y las mallas tamizadoras. (Figura 11 es el mismo proceso utilizado en cualquier cantera de explotación de material granulares).

Figura 11: Mezcla Asfáltica Natural (MAN), después de pasar por la trituradora y de ser tamizada en las mallas según granulometría solicitada.



Fuente: Elaborado por el autor.

Verificamos que salga sin arcilla o materiales contaminantes como ramas o pedazos de madera. Es muy importante que las volquetas transportadoras de materiales se encuentren limpias al momento del cargue de material, ya que, por información del administrador de la mina, se han presentado inconvenientes con el material una vez sale de allí. Debe ser una mezcla homogénea y limpia (ver Figura 12). Personalmente solicitamos el pedido y verificamos las características del material.

Figura 12: Mezcla Asfáltica Natural (MAN). Los autores comprueban la homogeneidad de la mezcla luego de pasar por las mallas tamizadoras.



Fuente: Elaborado por el autor.

Luego de la verificación del tamaño máximo de agregado solicitado ($3/4$ ”), procedemos a empacar las primeras muestras para caracterizar la Mezcla Asfáltica Natural (MAN) (Figura 13). Aproximadamente, necesitaríamos 100 kilos, para realizar los primeros ensayos de laboratorio y comprobar las granulometrías y saber a qué tipo de clasificación corresponde, según el INVÍAS se clasifican: en MAN 38, MAN 25 O MAN 19.

Figura 13: Empaque de las muestras de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), para su posterior clasificación en laboratorio.



Fuente: Elaborado por el autor

Solicitamos la producción de una muestra representativa con tamaño máximo de agregado para tamiz No 25 o 1", con el ánimo cumplir con la especificación técnica para MAN-25 (Figura 14). Las muestras se deben tomar de una forma aleatoria y procurar no tomar el material superficial, ya que puede presentar excesos de humedad o, por el contrario, encontrarse muy seco debido a las altas temperaturas de la región. Estas muestras se empacaron en sacos que permitieran su traslado al vehículo (Figura 15). En total empacamos 8 bultos de aproximadamente 20 kilos cada uno.

Figura 14: Toma de muestras aleatorias de todo el material preparado.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 15: Cargue del material en el vehículo de transporte MW Ingeniería S.A.S.



Fuente: Elaborado por el autor.

13.1 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL (MAN).

De acuerdo con las especificaciones vigentes para Colombia y con Instituto Nacional de Vías INVÍAS, existen 3 tipos de clasificación para las mezclas asfálticas naturales, MAN 38, MAN 25 Y MAN 19. En nuestro caso trabajaremos con la recomendación de la norma para rodadura, MAN 25.

La Mezcla Asfáltica Natural (MAN) posee Asphaltita (Figura 16). La Asphaltita es un hidrocarburo sólido derivado del petróleo, su color es negro brillante, hasta negro mate. Es un producto mineral, liviano, quebradizo, con escasas impurezas y alto poder calórico, de aspecto resinoso y fractura coloidal en las formas frescas. Dotadas de un punto de fusión elevado, superior a 110° C. Químicamente están constituidas por hidrocarburos muy pobres en oxígeno y parafinas cristalizables, siendo compuestos de alto peso molecular.²²

Figura 16: Asphaltita. (Asfalto natural).



Fuente: Elaborado por el autor.

En su génesis intervienen factores físicos-químicos y procesos geológicos de índole dinámica, en escala y magnitud variable. Su origen es debido a la

²² <https://www.scribd.com/doc/41972029/ASFALTITAS>

metamorfosis de un petróleo asfáltico. Las asphaltitas se discriminan en tres sustancias: Gilsonita, Grahamita y Glase pitch. Todas ellas son sólidos, con dificultad para fundirse y con diferentes grados de dureza que dependen de su grado de polimeración en el tiempo geológico.²³

La Asphaltita predominante en la mina San Pedro es la Gilsonita, de acuerdo con la veta, puede variar el contenido de Asphaltita, (Figura 17). Los operadores de la mina ya conocen como mezclar y explotar los diferentes afloramientos para tener casi siempre el contenido de asfalto sin variaciones superiores al 2%.

Figura 17: Vetas y forma de explotación para % de Asphaltita según requerimientos.



Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con los pedidos realizados y a la granulometría requerida, los operadores de la mina cambian las diferentes mallas para tamizado y la trituración. Se puede realizar hasta 2 veces. La calidad de la mezcla final se puede comparar a otras gradaciones, (Figura 18). Para la realización del pedido lo mejor es

²³ ABRAHAM, y otros. Recent Advances in the Recycling of Rubber Waste. [aut. libro] Fainleib y Grigoryeva. Recent Developments in Polymer Recycling. Kerala : Transworld Research Network, 2011, pp. 47-100.

asegurarse personalmente de la calidad de los materiales que se están produciendo.

Figura 18: Verificación de la explotación y calidad de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Las propiedades físicas y químicas de la Asfaltita, presentes en la Mezcla Asfáltica Natural procedente de la mina San Pedro, fueron caracterizadas y analizadas. A continuación, se presentan algunos resultados, (ver Tabla 3). Las muestras fueron representativas del lote con la granulometría para MAN 25.

Tabla 3: Composición química de la Gilsonita mina San Pedro.

Composición química de la Gilsonita mina San Pedro	
Asfaltenos	57%
Resinas (Maltenos)	37%
Aceites	6%

Fuente: Elaborado por el autor.

13.1.1 Asfaltenos

Son compuestos aromáticos y nafténicos de alto peso molecular con un rango de 1000 a 50000 kg/kgmol, que se encuentran en dispersión coloidal en algunos crudos. Se definen como fracciones que se encuentran en el crudo, solubles en solventes aromáticos como el benceno, tolueno y xileno, pero insoluble en n-alcános de cadena corta (bajo peso molecular); como por ejemplo, el n-pentano. Pueden ser derivados del petróleo y/o carbón. Los asfáltenos son partículas sólidas semicristalinas de color café o negro que contienen anillos condensados de hidrocarburos aromáticos.²⁴

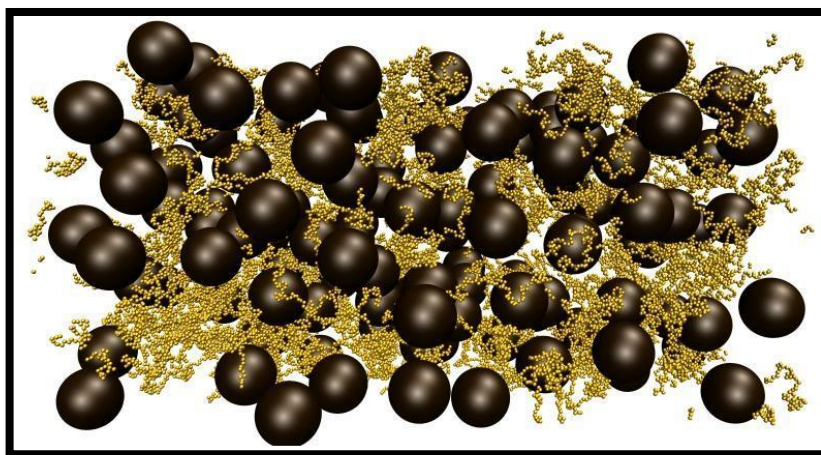
Los asfáltenos no son una especie química sino una familia de compuestos que presentan sólo un comportamiento global característico: Son de tipo polar, de estructura amorfa y de fórmula empírica promedio.

Bajo el término “asfáltenos” se agrupa a los componentes que quedan como fracción insoluble luego de tratar una mezcla en determinadas condiciones (solventes, temperaturas, etc.).

La composición de esta fracción insoluble varía de petróleo en petróleo y la característica común, que los hace importantes en el estudio de los yacimientos y en la producción de petróleo, es que suelen originar precipitados (sólidos) al agruparse por sufrir alteración en su ambiente (ver Figura 19), dañando el medio poroso o bloqueando las tuberías de producción y evitando así el flujo de hidrocarburos en pozos petroleros. La cantidad de asfáltenos en el petróleo varía dependiendo de la fuente, profundidad, gravedad API del crudo y contenido de azufre.

²⁴ PORTAL DEL PETRÓLEO. Página de inicio. Portal del Petróleo . [En línea] s.f. [Citado el: 21 de marzo de 2019.] <http://www.portaldelpetroleo.com/>.

Figura 19: Asfaltenos.



Fuente: Portal del petróleo.

13.1.2 Maltenos

Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas; generalmente, existe mayor proporción de maltenos que de asfaltenos, cuando se habla de asfaltos.

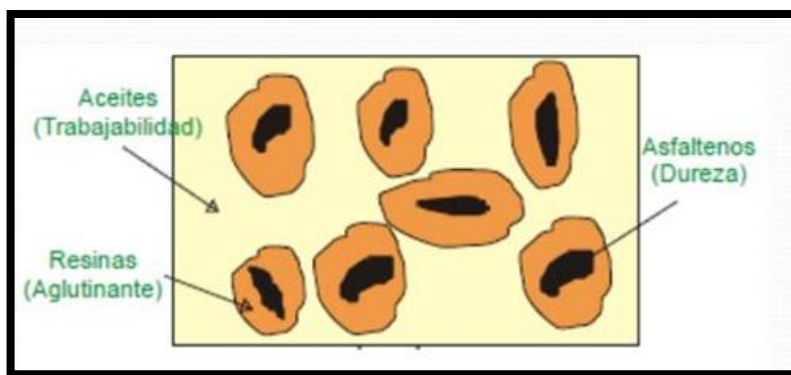
El mayor contenido del maltenos es el que le brinda la calidad a un asfalto. Esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.²⁵

13.1.3 Aceites

Los aceites malténicos actúan como disolventes y a su vez como fluidificante volátil (Figura 20).

²⁵ <https://es.wikipedia.org/wiki/Maltenos>

Figura 20: Composición química de la Gilsonita.



Fuente: Cartilla del asfalto Asopac.

De acuerdo con la composición química de la Gilsonita, y otras características, se presentan los datos más importantes (Tabla 4). Además de los porcentajes de presencia de elementos como el carbono, azufre e hidrógeno.

Tabla 4: Composición química y otras características de la Gilsonita mina San Pedro.

COMPOSICION QUIMICA DE LA GILSONITA MINA SAN PEDRO	
PUNTO DE INFLAMACION	315 °C
GRAVEDAD ESPECIFICA	0,01
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	150 °C
PUNTO DE IGNICION	240 °C
COLOR	NEGRO
HUMEDAD	0,50%
CARBONO TOTAL	82,00%
HIDROGENO	9,20%
CENIZA	4,30%
AZUFRE	4,50%
NITROGENO	1,20%

Fuente: INVÍAS.

13.1.4 Agregados minerales

En general la mayor parte de los agregados minerales encontrados dentro de los mantos asfálticos naturales son de origen sedimentario. Así que tales factores formadores, físicos y/o químicos se presentan como simples fracturas mecánicas, pero en general el ataque químico es universal y los procesos que dejan sueltos los cristales crean puntos débiles que implican el ataque, ya sea en forma de disoluciones generadas por el agua, oxidaciones en materiales ferrosos e hidratación que se da en todos los materiales. Los factores biológicos son muy importantes en la fijación de elementos del aire y la creación de carbonatos; de la misma forma las bacterias formadoras de sulfatos y óxidos de hierro entran a participar en la conformación mineralógica de los suelos.

En la Tabla 5, se relacionan los grupos más comunes de rocas sedimentarias que se encuentran combinadas con los asfaltos naturales.

Tabla 5: Grupos más comunes de rocas sedimentarias.

TIPO	MINERALOGIA
ARENISCAS	CUARZO, FELDESPATO
PIZARRAS	MINERALES DE ARCILLA, CLORITAS CARBONATOS
CALIZAS	CALCITA DOLOMITA
CHERT	CUARZO HEMATITES
FOSFORITA	APATITO
ARCILLAS	MINERALES COMPLEJOS DE ARCILLA CUARZO

Fuente: INVÍAS

Caracterización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

Siguiendo las especificaciones vigentes para Colombia, y de acuerdo al Instituto de vías INVÍAS (Tabla 6), existen 3 tipos de clasificación para las mezclas asfálticas naturales, MAN 38, MAN 25 Y MAN 19, para nuestro caso trabajaremos con la recomendación de la norma para rodadura, MAN 25.

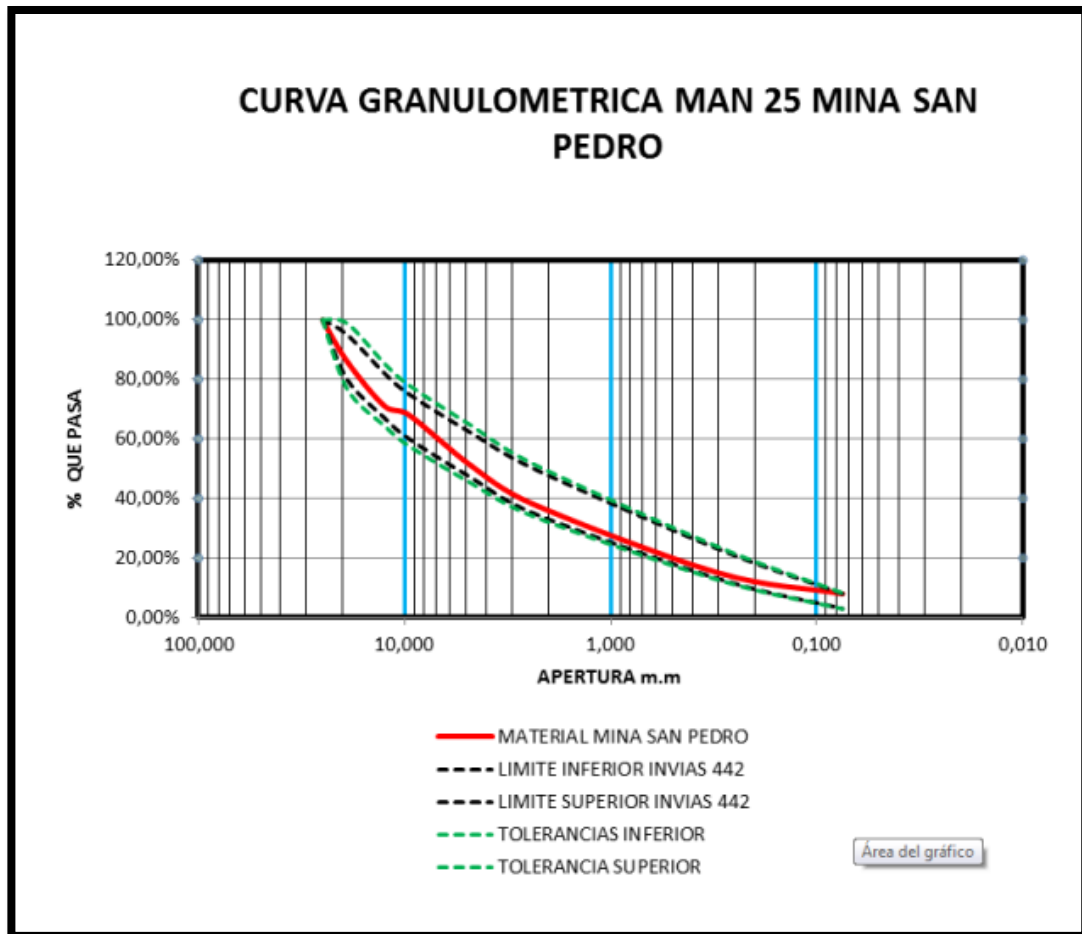
Tabla 6: Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

GRANULOMETRÍA						
MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL MAN 25						
			MAN		TOLERANCIAS	
TAMIZ	MM	% QUE PASA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
1,1/2"	37,5					
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19	86,00%	80,00%	95,00%	76,80%	98,80%
1/2"	12,5	71,00%	67,00%	82,00%	64,32%	85,28%
3/8"	9,5	68,00%	60,00%	75,00%	57,60%	78,00%
No 4	4,75	51,00%	47,00%	62,00%	45,12%	64,48%
No 8	2,36	38,00%	35,00%	50,00%	33,95%	51,50%
No 50	0,3	15,00%	13,00%	23,00%	12,61%	23,69%
No 200	0,075	8,00%	3,00%	8,00%	2,91%	8,24%

Fuente: Elaborado por el autor.

Teniendo en cuenta nuestra solicitud en la mina San pedro, el tamaño máximo de agregado debería ser retenido entre el tamiz de 1" y ¾" (Figura 21), la curva en color rojo es la granulometría de nuestro material.

Figura 21: Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).



Fuente: Elaborado por el autor.

Dentro de la especificación técnica, el INVÍAS da tolerancias del 4% hasta el tamiz No. 4, del 3% en los tamices No. 8 y No. 50; y del 1% en el tamiz No. 200. Estas tolerancias son las identificadas en color verde. Se determina que la curva granulométrica tal como sale de la preparación en planta presenta una leve tendencia al límite inferior, pero con las tolerancias cumple la norma.

También realizamos la comparación de nuestra gradación con la norma del Instituto de Desarrollo Urbano IDU, de la ciudad de Bogotá, para analizar el cumplimiento de la norma (Tabla 7).

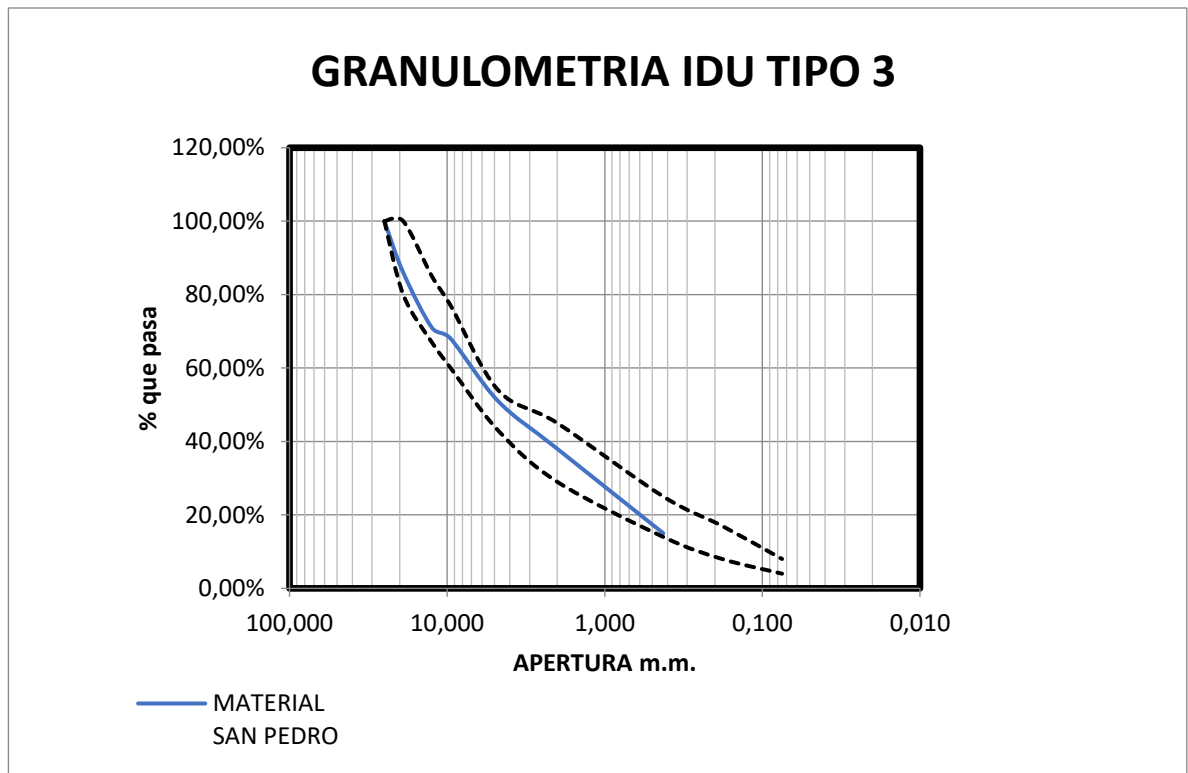
Tabla 7: Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) VS IDU TIPO 3.

Granulometría						
Mezcla asfáltica prefabricada tipo 3 IDU Norma 580-11						
			TIPO 3		TOLERANCIAS	
TAMIZ	MM	% QUE PASA	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
1,1/2"	37,5					
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%		
3/4"	19	86,00%	100,00%	80,00%		
1/2"	12,5	71,00%	85,00%	67,00%		
3/8"	9,5	68,00%	77,00%	60,00%		
No 4	4,75	51,00%	54,00%	43,00%		
No 10	2	38,00%	45,00%	29,00%		
No 40	0,425	15,00%	25,00%	14,00%		
No 80	0,18		17,00%	8,00%		
No 200	0,075	8,00%	8,00%	4,00%		

Fuente: Elaborado por el autor.

La Figura 22 muestra la curva granulométrica de nuestro material, comparada con los rangos de la especificación técnica del IDU tipo 3 para parcheo de pavimento asfáltico con mezclas asfálticas prefabricadas almacenadas.

Figura 22: Granulometría Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) vs IDU TIPO 3.



Fuente: Elaborado por el autor.

La curva azul pertenece a nuestro material. Se observa claramente que cumple por granulometría para la especificación técnica del IDU tipo 3.

Para la granulometría se siguieron los procedimientos de la especificación técnica INVÍAS E-213-13. En la Figura 23 se observan la gradación y clasificación de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

Figura 23: Granulometría según ensayo INVÍAS, E-213 13. Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Los ensayos de granulometría fueron realizados en los laboratorios de la empresa Asfaltos Panamá, ubicados en el municipio de Soacha, Cundinamarca.

Los porcentajes de los materiales retenidos en cada tamiz (Figura 24), evidencian el cumplimiento de la especificación técnica para Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

Figura 24: Porcentajes que pasan cada uno de los tamices, de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

La especificación técnica INVÍAS en su artículo 442p-17, exige la norma de ensayo E-123, E-125, E-126, para granulometría; límites de Atterberg y clasificación. En la Tabla 8 se encuentran los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

Tabla 8: Clasificación y límites de Atterberg para la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

PESO TOTAL DE LA MUESTRA HÚMEDA (g)	HUMEDAD NATURAL		
	$(W1-W2)/(W2-W3)*100$		
	W1	W2	W3
4637	1564	1564	600

MODULO DE FINURA	2,670	CU	0,00
%RETENIDO TAMIZ No 4	42,400	CC	0,00
% RETENIDO ENTRE 4 Y 200	45,600	D10	0,00
% PASA 200	8,000	D30	0,82
% DE ERROR GRADACIÓN	0,000	D60	5,30

CLASIFICACIÓN

LIMITE LIQUIDO (%)	N.L	ÍNDICE GRUPO	0
LIMITE PLÁSTICO (%)	N.P	AASHTO	A-1-b
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	N.P	U.S.C	SP-SM

Fuente: Elaborado por el autor.

Nuestro tipo de suelo es, según la AASHTO, A-1-b. Incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien gradado para la clasificación de los límites de Atterberg. Presenta la característica de ser no plástico.

También realizamos la norma de ensayo de material INV-E-142-13, a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25), para evaluar sus características de compactación (Tabla 9), encontrando la densidad máxima y el porcentaje óptimo de humedad, mediante el Proctor Modificado.

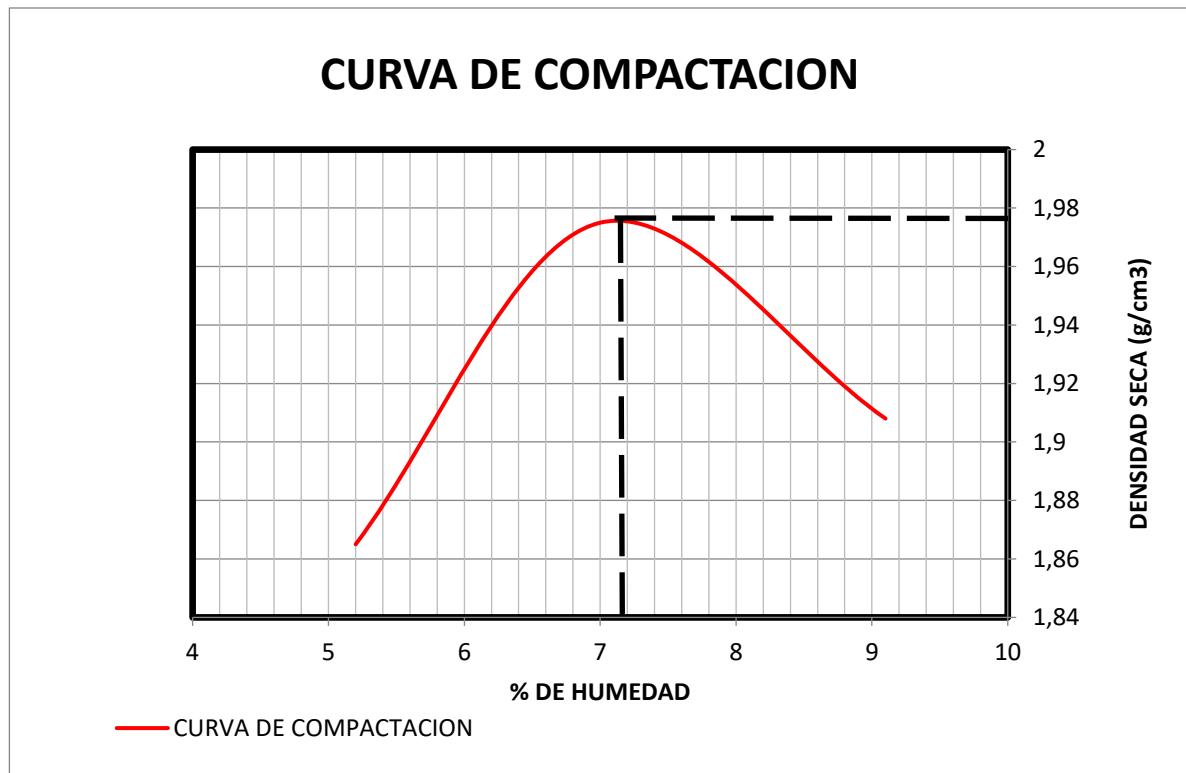
Tabla 9: Ensayo de compactación densidad máxima y porcentaje de humedad optimo, para nuestra Mezcla
Asfáltica Natural (MAN25).

ENSAYO DE COMPACTACION EN EL LABORATORIO NORMA INV-E-142					
PRUEBA No		1	2	3	
Numero de golpes		56	56	56	
Humedad deseada	(%)	5	7	9	
Humedad natural de la muestra	(%)	5,2	5,2	5,2	
Humedad adicional	(%)	-0,2	1,8	3,8	
Peso de la muestra humeda	(g)	6000	6000	6000	
Peso de muestra seca	(g)	5704	5704	5704	
Agua adicional	(cm3)	-11	103	217	
Molde No		2	2	2	
Peso de la muestra humeda +molde	(g)	6508	6834	6764	
Peso molde	(g)	2290	2290	2290	
Peso de la muestra humeda	(g)	4218	4544	4474	
Tara No		12	8	7	
Peso suelo humedo + tara	(g)	1544,5	1449,1	1412,2	
Peso suelo seco + tara	(g)	1495,1	1393,1	1344,2	
Peso tara	(g)	543	596,3	595,6	
%Humedad (horno)	(%)	5,2	7	9,1	
Peso de la muestra seca	(g)	4010	4246	4101	
Volumen del molde	(cm3)	2150	2150	2150	
Densidad de la muestra seca	(g/cm3)	1,865	1,975	1,908	
DENSIDAD MAXIMA	1,977	g/cm3			
HUMEDAD OPTIMA	7,4	%			

Fuente: Elaborado por el autor.

Siguiendo los datos obtenidos se procede a dibujar la curva (Figura 25), para obtener el porcentaje óptimo de humedad para la máxima densidad.

Figura 25: Curva del Proctor Modificado, a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).



Fuente: Elaborado por el autor.

Ya conocemos el porcentaje de humedad óptima de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25). Posteriormente, con este dato procederemos a realizar los ensayos de resistencia de nuestra mezcla definitiva.

Realizamos la norma de ensayo de material INV-E-148-13. Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido debido a su origen como CBR (California Bearing Ratio). Tabla 10, el ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; pero también puede operarse en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno.²⁶

²⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op. Cit.

Tabla 10: Ensayo INV-148, CBR, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

COMPACTACION EN EL LABORATORIO NORMA INV-E-148				
PRUEBA No		1	2	3
Numero de golpes		56	26	12
Humedad deseada	(%)	7,4	7,4	7,4
Humedad natural de la muestra	(%)	5,2	5,2	5,2
Humedad adicional	(%)	2,2	2,2	2,2
Peso de la muestra humeda	(g)	6000	6000	6000
Peso de muestra seca	(g)	5704	5704	5704
Agua adicional	(cm3)	126	126	126
Molde No		4	1	6
Peso de la muestra humeda +molde	(g)	10148	10105	9907
Peso molde	(g)	5230	5307	5300
Peso de la muestra humeda	(g)	4918	4798	4607
Tara No		29	41	42
Peso suelo humedo + tara	(g)	663	686	810
Peso suelo seco + tara	(g)	624	642	758
Peso tara	(g)	80	66	60
%Humedad (horno)	(%)	7,2	7,6	7,4
Peso de la muestra seca	(g)	4589	4457	4288
Volumen del molde	(cm3)	2317	2317	2317
Densidad de la muestra seca	(g/cm3)	1,981	1,924	1,85

Fuente: Elaborado por el autor.

A partir de la norma E-148, se realiza la tabla de penetración para encontrar un índice de resistencia a las muestras de suelos y evaluar su soporte dentro de la estructura, Tabla 11.

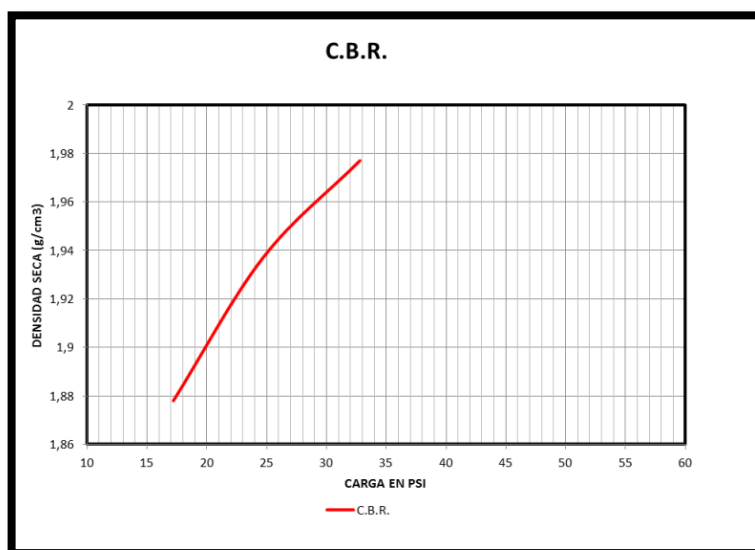
Tabla 11: Ensayo de penetración CBR, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

PENETRACION C.B.R. NORMA INVIAS E-148						
Penetracion en pulgadas	Carga total	Carga PSI	Carga total	Carga PSI	Carga total	Carga PSI
0,005						
0,025	25,000	65,000	15,000	39,000	5,000	13,000
0,050	55,000	142,000	40,000	103,000	10,000	26,000
0,075	80,000	207,000	55,000	142,000	20,000	52,000
0,100	110,000	285,000	70,000	181,000	35,000	91,000
0,150	150,000	388,000	100,000	259,000	55,000	142,000
0,200	190,000	491,000	130,000	336,000	75,000	194,000
0,250	230,000	595,000	165,000	427,000	100,000	259,000
0,300	270,000	698,000	200,000	517,000	125,000	323,000
0,400	340,000	880,000	255,000	660,000	180,000	466,000
0,500	410,000	1.061,000	310,000	802,000	230,000	595,000
Humedad de penetracion (%)	7,4		7,3		7,5	
C.B.R. Corregido a 0,1"	28,45		18,11		9,05	
C.B.R. Corregido a 0,2"	32,8		22,4		12,9	

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los datos obtenidos en la tabla anterior se procede a construir la gráfica (Figura 26) y obtener los valores corregidos de C.B.R.

Figura 26: Curva de C.B.R., a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).



Fuente: Elaborado por el autor.

14 RESULTADOS

Se realiza el ensayo INV-E-218. Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1½"), por medio de la máquina de Los Ángeles. Los resultados obtenidos de laboratorio se muestran en la tabla 12 y tabla 13.

Tabla 12: Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles.

Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles	
NORMA INVIAS E-218-219	
Prueba	1
Gradación usada	A
No de esferas	12
No de revoluciones	500
Estado de la muestra	Seca
Pa=Peso de la muestra inicial (g)	5000
Pb=Peso de la muestra después del ensayo lavado en el tamiz No 12 (g)	3250,9
Perdida =Pa-Pb	1749,1
% Desgaste (Pa-Pb)/Pa*100	34.982
Especificación (%máximo)	35

Fuente: Elaborado por el autor:

Tabla 13: Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles.

TAMAÑOS		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA (g)						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2,1/2"					2500		
2,1/2"	2"					2500		
2"	1,1/2"					5000	5000	
1,1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	No 3			2500				
No 3	No 4			2500				
No 4	No 8				5000			
No de esferas		12	11	8	6	12	12	12
No de revoluciones		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fuente: Elaborado por el autor.

Se realiza el ensayo de laboratorio según las especificaciones INV-133-07, equivalente de arena (Tabla 14). Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo.²⁷

Tabla 14: Equivalente de arena E-133-07, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

Equivalente de arena					
NORMA INV -E-133					
Ensayo No		1	2	3	PROMEDIO
Probeta No		1	2	3	
Lectura de la arena (A)	(pulg)	3,1	3,1	3	3,1
Lectura de la arcilla(B)	(pulg)	7,5	7,2	7,3	7,3
C=A/B	(%)	41,30%	43,10%	41,10%	41,80%

Resultados	
Equivalente de arena	41,80%
Porcentaje mínimo Especificaciones	40%
Estado	ACEPTADO

Fuente: Elaborado por el autor.

Continuamos con los ensayos y realizamos el ensayo INV E- 220-07. Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio (Tabla 15 y 16), seguido de secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables. La fuerza de expansión interna derivada de la rehidratación de la sal después de reinmersión simula la expansión del agua por congelamiento.²⁸

²⁷ Ibid.

²⁸ Ibid.

Tabla 15: Sanidad de los agregados gruesos para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

SANIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS FRENTE A LA ACCIÓN DEL SULFATO DE SODIO						
NORMA INV E-220						
TAMAÑO TAMICES		Gradación original (%)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida total (g)	Perdida corregida (g)
Pasa	Retenido en					
2,1/2"	1,1/2"					
1,1/2"	3/4"	27,5	1500	1350	10	2,75
3/4"	3/8"	40,2	1000	962	3,8	1,53
3/8"	No 4	32,3	300	253	15,67	5,06
TOTALES		100	2800	2565	29,47	9,34
(A) Porcentaje retenido en cada fracción					$(D) = (B) - (C9 / (B) * 100$	
(B) Fracciones pesadas antes del ensayo						
(C) Fracciones pesadas después del ensayo					$(E) = (A) * (D) / 100$	
Perdidas en sulfato de sodio				9,30%		
Porcentaje especificaciones				12,00%		
Estado				ACEPTADO		

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 16: Sanidad de los agregados gruesos para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

SANIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS FRENTE A LA ACCIÓN DEL SULFATO DE MAGNESIO						
NORMA INV E-220						
TAMAÑO TAMICES		Gradación original (%)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida total (g)	Perdida corregida (g)
Pasa	Retenido en					
2,1/2"	1,1/2"					
1,1/2"	3/4"	27,5	1500	1346	10,27	2,83
3/4"	3/8"	40,2	1000	957	4,3	1,73
3/8"	No 4	32,3	300	246	18	5,82
TOTALES		100	2800	2549	32,57	10,37
(A) Porcentaje retenido en cada fracción					$(D) = (B) - (C9 / (B) * 100$	
(B) Fracciones pesadas antes del ensayo						
(C) Fracciones pesadas después del ensayo					$(E) = (A) * (D) / 100$	
Perdidas en sulfato de magnesio				10,40%		
Porcentaje especificaciones				18,00%		
Estado				ACEPTADO		

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la especificación técnica del porcentaje de pérdidas en sulfato de sodio y sulfato de magnesio, nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) cumple satisfactoriamente los límites.

Se realiza la especificación técnica INV-E-235-13. Este ensayo consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua. Después de cada dosis se comprueba la absorción de solución colorante por parte de la muestra, realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre. Una vez confirmada la presencia de colorante libre, se calcula el valor de azul de metileno (Tabla 17), expresado en gramos de colorante absorbido por kilogramo de la fracción granulométrica ensayada.²⁹

Tabla 17: Valor de azul de metileno en agregados fino de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

ÍNDICE DE AZUL DE METILENO	
C= concentración solución azul de metileno mg*ml solución	5
V= ml solución azul de metileno requerido en titulación	10
W=gramos de material seco utilizado en prueba	10
VA= $C*V/W$ valor azul de metileno	5

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la especificación técnica del porcentaje de azul de metileno, nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) cumple satisfactoriamente los límites.

Resultados norma INV-E-227-13. Porcentaje de caras fracturadas en un agregado grueso (Tabla 18), una superficie angular áspera o quebrada de una partícula de

²⁹ Ibid.

agregado formada por trituración por medios artificiales o por la naturaleza. Una cara será considerada fracturada, sólo si tiene un área proyectada al menos tan grande como un cuarto de la máxima área proyectada (máxima área de la sección transversal) de la partícula, y la cara tiene bordes cortantes y bien definidos³⁰

Tabla 18: Determinación del porcentaje de caras fracturadas del agregado grueso, de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN25).

% CARAS FRACTURADAS		
CRITERIO DE FRACTURA	UNA CARA	DOS CARAS
TAMIZ UTILIZADO	3/8"	3/8"
MASA TOTAL gr	1.070,00	1.070,00
PESO FRACTURADAS gr	1.015,10	909,6
PESO PARTÍCULAS DUDOSAS gr	22,3	22,3
PESO NO FRACTURADAS gr	32,6	138,1
% FRACTURADAS	96	86

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la especificación técnica del porcentaje de caras fracturadas, nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) cumple satisfactoriamente los límites.

Realización norma INV E-237-13. Esta norma describe el procedimiento para determinar la limpieza superficial de los agregados, tanto de origen natural como artificial, con tamaños superiores a 4.75 mm., utilizados en la construcción de carreteras. El ensayo consiste en separar por lavado, mediante un tamiz de referencia, las partículas menores de 0.5 mm. mezcladas o adheridas a la superficie de los agregados gruesos (Tabla 19), las cuales se consideran como impurezas. Posteriormente, se calcula el porcentaje en masa de las impurezas respecto de la masa seca de la muestra total.³¹

³⁰ Ibid.

³¹ Ibid.

Tabla 19: Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso de nuestra Mezcla
Asfáltica Natural (MAN25).

DETERMINACIÓN DE LA LIMPIEZA SUPERFICIAL DE LAS PARTÍCULAS DE AGREGADO GRUESO	
PESO MUESTRA HUMEDAD	3252,5
PESO MUESTRA SECA	3195,6
ÍNDICE DE SEQUEDAD	0,018
MUESTRA DEL ENSAYO	
PESO HÚMEDO MUESTRA ENSAYO	3321,2
PESO SECO MUESTRA ENSAYO	3262,1
PESO SECO RETENIDO No 35 MUESTRA ENSAYO	3252,6
IMPUREZAS	
PESO SECO MUESTRA ENSAYO	3262,1
PESO SECO RETENIDO No 35 MUESTRA ENSAYO	3252,6
IMPUREZAS	9,5
COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL	
IMPUREZAS	9,5
PESO SECO RETENIDO No 35 MUESTRA ENSAYO	3252,6
COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL	0,29

Fuente: Elaborado por el autor.

Ensayo INV-E-240-13. Este método cubre la determinación del porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso. Esta norma puede involucrar materiales, operaciones y equipos con algún riesgo de manejo (ver Tabla 20). La norma no tiene el propósito de identificar los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las prácticas de seguridad y de salubridad apropiadas; además de determinar la aplicabilidad de limitaciones regulatorias antes de su uso.³²

³² Ibid.

Tabla 20: Determinación del porcentaje de partículas planas y alargadas en la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS (RELACIÓN 5:1)						
FRACCIÓN		PESO DE LA MUESTRA	PESO PLANAS Y ALARGADAS	% PLANAS Y ALARGADAS	% RETENIDO GRADACIÓN	% PLANAS Y ALARGADAS CORREGIDAS
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E
1,1/2"	1"	0	0	0	0	0
1"	3/4"	0	0	0	0	0
3/4"	1/2"	589,6	0	0	25	0
1/2"	3/8"	232,2	0	0	41,8	0
3/8"	1/4"	136,5	2,7	2	31,3	0,6
TOTAL		958,3	2,7	2	98,1	0,62
% PROMEDIO PONDERADO DE PLANAS Y ALARGADAS						0,63

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la especificación técnica del porcentaje de partículas planas y alargadas, nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25) cumple satisfactoriamente los límites.

Ensayo de extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos, INV-732-13. Esta norma describe el proceso para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente. En muestras tomadas en pavimentos, los resultados (Tabla 21) se entregarán de manera clara y enunciando el porcentaje real de asfalto presente en la muestra.

Tabla 21: Determinación del porcentaje de asfalto en la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).

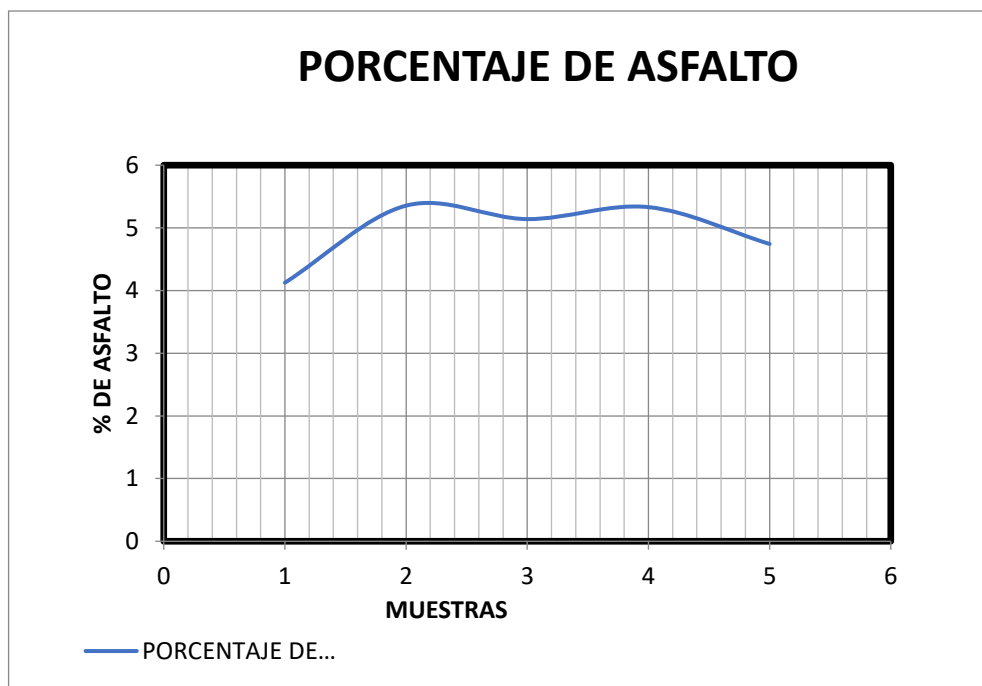
EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DE ASFALTO EN MEZCLAS PARA PAVIMENTOS							
INVIAS E-732-13							
MUESTRA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	PESO FILTRO 1 (g)	PESO FILTRO 2 (g)	DIFERENCIA (g)	TOTAL (g)	% ASFALTO
1	1.748,00	1.677,00	15	16,1	71	72,1	4,124714
2	1.845,00	1.747,00	15	15,8	98	98,8	5,3550136
3	1.786,00	1.695,00	15	15,8	91	91,8	5,1399776
4	1.812,00	1.716,00	15	15,6	96	96,6	5,3311258
5	1.695,00	1.615,00	15	15,4	80	80,4	4,7433628
PROMEDIO		4,93883875					

Fuente: Elaborado por el autor.

Este dato obtenido será el real existente dentro de la muestra de la mezcla asfáltica natural y servirá para descontarlo del óptimo requerido en las pruebas de tanteo con las briquetas.

En la interpretación de los datos se presentan (Figura 27) los contenidos de asfalto en las 5 muestras ensayadas. Para realizar la extracción del asfalto, se tuvo que realizar en promedio 4 lavados de cada muestra, pues con menos lavados aún permanecían los áridos impregnados de asfalto.

Figura 27: Contenido de asfalto en las 5 muestras ensayadas de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN 25).



Fuente: Elaborado por el autor.

PROMEDIO	4,93883875
----------	------------

Luego de determinar el promedio del porcentaje de asfalto, se toma el valor de 4.9% para todos los siguientes cálculos de porcentaje óptimo de asfalto.

Para la extracción cuantitativa de asfalto a la muestra de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), se utilizó la copa giratoria del laboratorio de la empresa Asfaltos Panamá, (Figura 28), siguiendo las especificaciones de la norma INV-732-13.

Figura 28: Copa giratoria para extracción cuantitativa de asfalto.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se determina el peso inicial antes del centrifugado, posteriormente se coloca la muestra en la copa centrifugadora (ver Figura 29) y se procede con el ensayo. Luego de 4 lavados se observa cómo queda la muestra después del lavado (ver Figura 30).

Figura 29: Colocación de la muestra. Muestra después del lavado.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 30: Copa giratoria. Sin asfalto.



Fuente: Elaborado por el autor.

Para facilitar los análisis de resultados obtenidos al realizar todos los ensayos de laboratorio se presenta una tabla resumen (Tabla 22). Caracterización completa.

Tabla 22: Tabla resumen de la caracterización física y química de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

MEZCLA ASFALTICA NATURAL (MAN 25)					
TIPO DE ASFALTO	GILSONITA	ASFALTENOS 57%	MALTENOS 37%	ACEITES 6 %	
PUNTO DE INFLAMACION		315°C	GEOLOGIA AGREGADOS		
GRAVEDAD ESPECIFICA		0,01	ARENISCAS	CUARZO PELDESPATO	
PUNTO DE ABALNDAMIENTO		150°C	PIZARRAS	CLORITAS CARBONATOS	
PUNTO DE IGNICION		240°C	CALIZAS	CALCITA DOLOMITA	
COLOR		NEGRO	CHERT	CUARZO HEMATITES	
HUMEDAD		0,50%	FOSFORITA	APATITOS	
CARBONO TOTAL		82%	ARCILLAS	MINERALES COMPLEJOS	
HIDROGENO		9,20%	MATERIAL NO PLASTICO		
CENIZA		4,30%	CLASIFICACION		A-1-b
AZUFRE		4,50%	ARENA GRUESA BIEN GRADADA		
NITROGENO		1,20%	GRANULOMETRIA		MAN 25 INVIAS
DENSIDAD MAXIMA		1977 g/cm3	C.B.R.		32,8
HUMEDAD OPTIMA		7,40%	DESGASTE M. ANGELES		34,98%
EQUIVALENTE DE ARENA		41,80%	SULFATO DE MAGNESIO		10,40%
SULFATO DE SODIO		9,30%	AZUL DE METILENO		5
CARAS FRACTURADAS		1 CARA	96%	% DE	4,90%
		2 CARAS	86%	ASFALTO	
COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL					0,29
% DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS					0,63%

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el material de muestra, tomado en la mina San Pedro y caracterizado en laboratorio, se evidencia que el material cumple las especificaciones técnicas de la norma INVÍAS 442P-17, y las normas del IDU 580-11. (Tabla 23).

Tabla 23: Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

TABLA RESUMEN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS DEL ART 442 P INVIAS					
CARACTERIZACION	INVIAS	IDU	MATERIAL SAN PEDRO	REQUISITO	
				INVIAS	IDU
GRANULOMETRIA	MAN 25	TIPO 3	MAN 25 TIPO 3	CUMPLE	CUMPLE
INDICE DE PLASTICIDAD	7% MAX	N.P	N.P	CUMPLE	CUMPLE
DESGASTE M. DE LOS ANGELES	40 % MAX	40 % MAX	34,98%	CUMPLE	CUMPLE
SULFATO DE MAGNESIO	18 % MAXIMO	18 % MAXIMO	10,40%	CUMPLE	CUMPLE
SULFATO DE SODIO	12 % MAXIMO	12 % MAXIMO	9,30%	CUMPLE	CUMPLE
AZUL DE METILENO	10 MAXIMO	8 MAXIMO	5	CUMPLE	CUMPLE
EQUIVALENTE DE ARENA	40 % MINIMO	40 % MINIMO	41,80%	CUMPLE	CUMPLE
CBR			32,8		
CARAS FRACTURADAS MINIMO	75/60	75/60	96/86 %	CUMPLE	CUMPLE
COEFICIENTE LIMPIEZA %	0,5 MAXIMO	0,5 MAXIMO	0,29%	CUMPLE	CUMPLE
% PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	10 MAXIMO	10 MAXIMO	0,63%	CUMPLE	CUMPLE
% DE ASFALTO			4,9 5%		
HUMEDAD OPTIMA %			7,40%		

Fuente: Elaborado por el autor.

14.1 CARACTERIZACIÓN DEL GRÁNULO DE CAUCHO (GCR)

El Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) proviene de la trituración de las llantas usadas. El principal componente de las llantas es el caucho y ocupa casi la mitad de su peso.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira. El caucho natural se extrae a partir del árbol *Hevea Brasiliensis*, que es un látex con partículas de caucho en suspensión. Después de un proceso de secado y de ahumado se utilizan diferentes productos, hoy en día alcanza el 30% del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos.

Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de llantas son Cauchos Naturales (NR), Polibutadienos (BR), Estireno-Butadieno (SBR) y Polisoprenos sintéticos (IR).³³

La matriz de caucho más utilizada es el copolímero Estireno-Butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25% en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR.

Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación. La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica.

Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito. El proceso de vulcanización a que se someten los neumáticos es un entrelazamiento de cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura.³⁴

Además de caucho, las llantas están compuestas por:

- Rellenos reforzantes: El negro de humo, formado de partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y da resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste.
- Fibras reforzantes: Textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos, estos son el algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante.

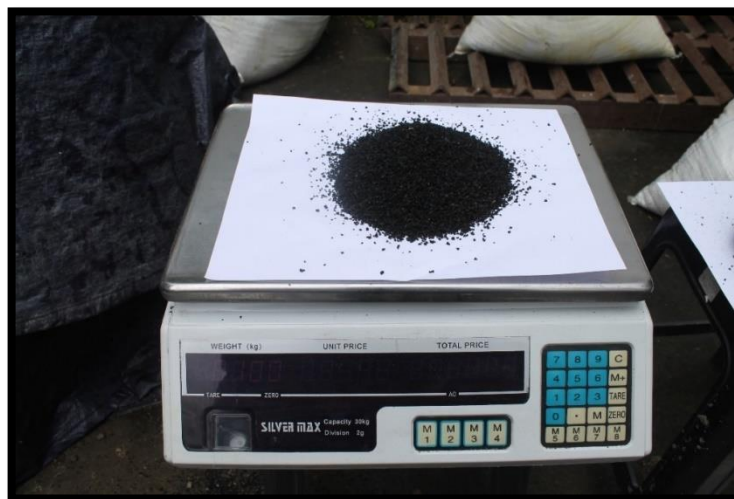
³³ EUROPEAN TIRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION [ETRMA]. Statics Booklet. Bruselas : s.n., 2014.

³⁴ EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION [ETRMA] . End of Life Tyres: A Valiable Resource with Growing Potential. Bruselas : s.p.i, 2010.

- **Plastificantes:** Se adicionan para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, utilizándose para el control de la viscosidad. Reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto con la ayuda de aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster.
- **Agentes vulcanizantes:** El azufre se usa para entrecruzar las cadenas de polímero en el caucho.
- **Acelerantes:** Compuestos órgano-sulfurados, benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico.
- **Retardantes:** N-nitroso difenil amina.
- **Otros componentes** (antioxidantes o antiozonizantes, adhesivos).

La apariencia del granulo de caucho reciclado (Figura 31), es una mezcla de pequeños gránulos, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño máximo.

Figura 31: Apariencia del (GCR), profesional, de acuerdo a RECLAIR S.A.S.



Fuente: Elaborado por el autor.

En nuestra labor bibliográfica encontramos la empresa Renecal, fábrica de reciclados de Castilla y León, España, quienes a lo largo de sus investigaciones clasifican el Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) (Tabla 24). Ellos nos permiten tener las características físicas y químicas. (Renecal Fabrica de reciclados de Castilla y Leon España, 2011)

Tabla 24: Características físicas y químicas del gránulo de caucho reciclado.

4. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS.	
PROPIEDADES FISICAS	DESCRIPCION
Forma	Sólidos en forma de granulados y polvo.
Color	Negro.
Olor	Caucho.
Densidad (gr/cm ³)	0,40 - 0,50
Peso específico	1,15 – 1,27
Humedad (%)	< 0,75
Punto de combustión (°C)	300 - 450
PROPIEDADES QUIMICAS	DESCRIPCION
Extracto cetónico (%)	5,00 – 22,00
Contenido en cenizas (%)	7,00 – 11,00
Contenido en polímeros NR/SR (%)	70/30 – 60/40
Contenido de negro de humo (%)	26,00 – 38,00
Contenido de caucho natural (%)	10,00 – 35,00
Contenido en hidrocarburo de caucho (%)	57,00 - 58,00
Azufre (%)	1,0 – 7,00
pH (25°C)	8,12 – 8,20
Solubilidad	Insoluble en agua, parcialmente soluble en acetona.

Fuente: Renecal fabrica de reciclados de Castilla y León, España.

Para complementar las características físicas del Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), realizamos la clasificación granulométrica (Tabla 25) del material comprado la empresa RECYCLAIR S.A.S,

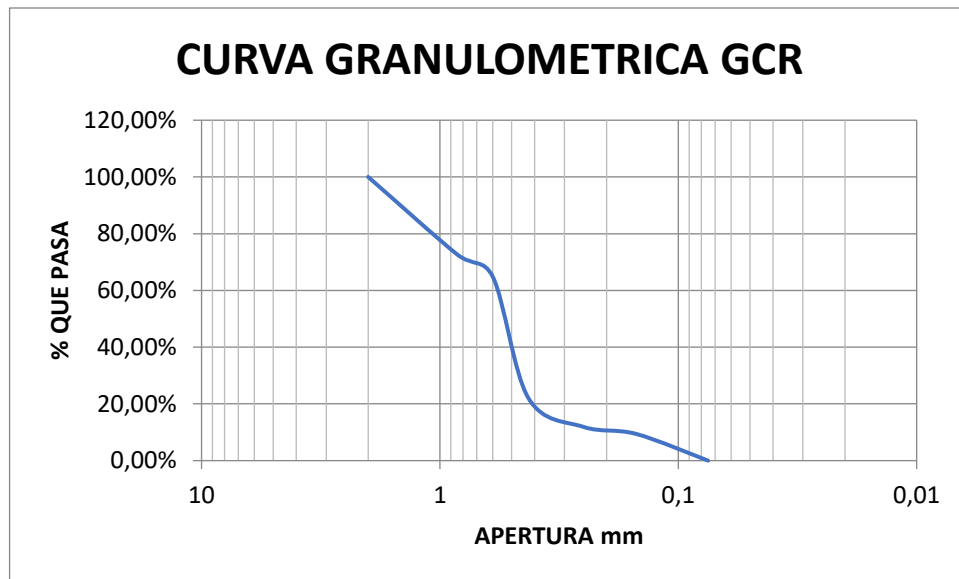
Tabla 25 Granulometría realizada al gránulo de caucho reciclado (GCR).

GRANULOMETRÍA		
GRANULO DE CAUCHO RECICLADO		
TAMIZ	APERTURA mm.	% QUE PASA
No 10	2	100,00%
No 20	0,85	72,80%
No 30	0,6	64,80%
No 40	0,425	22,00%
No 60	0,25	11,90%
No 100	0,15	9,40%
No 200	0,075	-
FONDO		
GRAVA %	0	
ARENA %	98,7	
FINOS %	1,3	
CLASIFICA %	-	

Fuente: Elaborado por el autor.

Gracias a los resultados, obtenemos la curva granulométrica de nuestro Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) (Figura 32).

Figura 32: Variación de los porcentajes de (GCR), que pasan los tamices.

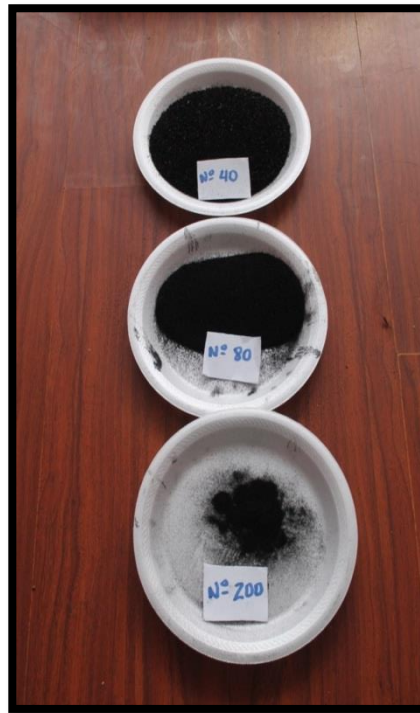


Fuente: Elaborado por el autor

Teniendo en cuenta nuestras investigaciones previas, la fracción a utilizar en las diferentes adiciones de gránulo de caucho reciclado a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN), serán los porcentajes que pasan por el tamiz No. 30 y retenidos en el tamiz No. 40.

En la Figura 33 se observa la diferencia entre este material seleccionado, pasa tamiz No. 30.

Figura 33: Tamaños máximos en la utilización del Gránulo de Caucho Reciclado (GCR).



Fuente: Elaborado por el autor.

Dentro de nuestra experiencia en la manipulación del GCR, solo tomaremos el porcentaje que pasa el tamiz No. 30 y retenido en el tamiz No. 40. Esto de acuerdo con el desplazamiento volumétrico del GCR, en comparación con los áridos y material arenoso de nuestra mezcla, así el volumen ocupado por un gránulo de caucho de tamaño 2 mm., sería muy grande y deformaría la mezcla. Entonces decidimos utilizar el tamaño de GCR estándar de 0.6 mm.

Presentamos la tabla resumen (Tabla 26), de la caracterización físico-química del Gránulo de Caucho Reciclado (GCR).

Tabla 26: Características (GCR).

TABLA RESUMEN GRANULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)			
FORMA	gránulos	% DE CENIZAS	7,00 - 11,00
COLOR	negro	% DE POLIMEROS	70/30
OLOR	caucho	% NEGRO DE HUMO	26 - 38
DENSIDAD (gr/cm3)	0,40 - 0,50	% CAUCHO NATURAL	10,00 - 35,00
PESO ESPECIFICO	1,15 - 1,27	% HIDROC CAUCHO	57,00 - 58,00
HUMEDAD	menor 0,75	% AZUFRE	1,00 - 7,00
PUNTO DE COMBUSTIÓN °C	300 - 400	PH (25°C)	8,12 - 8,20
GRANULOMETRÍA	0,06 MM	VALOR KG (COP)	\$1.200,00

Fuente: Tomada de RENEAL.

14.2 CARACTERIZACIÓN EMULSIÓN ASFÁLTICA CRR-1

Las emulsiones asfálticas se definen como dispersiones de pequeños glóbulos de un cemento asfáltico en una solución de agua y un agente emulsificante de carácter aniónico o catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión.

La clasificación de las emulsiones se realiza con base en: 1) El carácter del agente emulsificante, que puede ser catiónico o aniónico. 2) La velocidad de rompimiento, que puede ser rápido, medio o lento. 3) La viscosidad. Según su carácter, una emulsión puede ser tipo C (catiónica) o tipo A (aniónica); dada la velocidad de rompimiento, la emulsión puede ser de RR (rompimiento rápido), RM (rompimiento medio), RL (rompimiento lento); teniendo en cuenta su viscosidad, una emulsión puede ser de código 1 (baja viscosidad) o 2 (alta viscosidad). Cuando el nombre de la emulsión incluye la letra h, se indica que es de alta estabilidad.³⁵

³⁵ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Normas Técnicas Instituto de Desarrollo Urbano Bogotá. IDU. [En línea] 2011. [Citado el: 14 de febrero de 2019.] <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/portafolio-inno>.

Para nuestro proyecto utilizaremos la emulsión asfáltica de tipo CRR-1, suministrada por INCOASFALTOS S.A.S, siguiendo la ficha técnica suministrada.

Este tipo de emulsión está diseñada para reaccionar en un periodo de 5 a 15 minutos, lapso en el cual deben revertir de la condición de emulsión a la de asfalto.

Las emulsiones asfálticas no deben mezclarse con agua, ya que los porcentajes de asfalto residual varían respecto a la cantidad total de agua.

Dentro de nuestra caracterización de la emulsión asfáltica, realizaremos los cálculos con el porcentaje de asfalto residual de la ficha técnica equivalente al 59%. Es decir, para un porcentaje de 10%, necesitaremos un 15.9% de emulsión asfáltica CRRL-1, tal cual como viene del proveedor. El restante de los cálculos será agua y el porcentaje de agua de la ficha técnica 41%, para el mismo 10% será de un 6.51% de agua.

Las características físicas y químicas de nuestra emulsión asfáltica se presentan como una tabla resumen para una mejor comprensión y análisis (Tabla 27).

Tabla 27: Caracterización tabla resumen Emulsión asfáltica CRR-1.

CARACTERIZACIÓN EMULSIÓN ASFÁLTICA	
TIPO DE EMULSIÓN	CRR-1
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 25°C	20/100
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 50°C	N/A
CONTENIDO DE AGUA EN VOLUMEN (%)	40 MAX
SEDIMENTACIÓN A 24 HORAS (%)	1
SEDIMENTACIÓN A 5 DÍAS (%)	5
CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL (%)	60 MIN
CONTENIDO DE ACEITES SOLVENTES (%)	3
TAMIZADO Retenido No 20	0,1
ROTURA	40 MIN
CARGA DE PARTÍCULAS	POSITIVA
PH	6
PENETRACIÓN (0,1 mm)	60/100
PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	N/A
DUCTILIDAD (cm)	40 MIN
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	97,5 MIN
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (%)	N/A
COLOR	NEGRO
ESTADO	LIQUIDO

Fuente: Tomada de INCOASFALTOS S.A.S.

Las características físicas y químicas de nuestra Mezcla Asfáltica Natural, con adición de emulsión asfáltica tipo CRR-1 y adición de gránulo de caucho reciclado se muestra en la tabla resumen (Tabla 28).

Tabla 28: Caracterización tabla resumen de los 3 componentes de nuestra mezcla.

MEZCLA ASFALTICA NATURAL (MAN 25)				
TIPO DE ASFALTO	GILSONITA	ASFALTENO	MALTENOS	ACEITES 6 %
		S 57%	37%	
PUNTO DE INFLAMACION		315°C	GEOLOGIA AGREGADOS	
GRAVEDAD ESPECIFICA		0,01	ARENISCAS	CUARZO PELDESPATO
PUNTO DE ABALNDAMIENTO		150°C	PIZARRAS	CLORITAS CARBONATOS
PUNTO DE IGNICION		240°C	CALIZAS	CALCITA DOLOMITA
COLOR		NEGRO	CHERT	CUARZO HEMATITES
HUMEDAD		0,50%	FOSFORITA	APATITOS
CARBONO TOTAL		82%	ARCILLAS	MINERALES COMPLEJOS
HIDROGENO		9,20%	MATERIAL NO PLASTICO	
CENIZA		4,30%	CLASIFICACION	A-1-b
AZUFRE		4,50%	ARENA GRUESA BIEN GRADADA	
NITROGENO		1,20%	GRANULOMETRIA	MAN 25 INVIAS
DENSIDAD MAXIMA		1977 g/cm3	C.B.R.	32,8
HUMEDAD OPTIMA		7,40%	DESGASTE M. ANGELES	34,98%
EQUIVALENTE DE ARENA		41,80%	SULFATO DE MAGNESIO	10,40%
SULFATO DE SODIO		9,30%	AZUL DE METILENO	5
CARAS FRACTURADAS		1 CARA	96%	% DE
		2 CARAS	86%	ASFALTO
COEFICIENTE DE LIMPIEZA SUPERFICIAL				0,29
% DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS				0,63%

CARACTERIZACION EMULSION ASFALTICA	
TIPO DE EMULSION	CRR-1
VISCOCIDAD SAYBOLT FUROL A 25°C	20/100
VISCOCIDAD SAYBOLT FUROL A 50°C	N/A
CONTENIDO DE AGUA EN VOLUMEN (%)	40 MAX
SEDIMENTACION A 24 HORAS (%)	1
SEDIMENTACION A 5 DIAS (%)	5
CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL (%)	60 MIN
CONTENIDO DE ACEITES SOLVENTES (%)	3
TAMIZADO Retenido No 20	0,1
ROTURA	40 MIN
CARGA DE PARTICULAS	POSITIVA
PH	6
PENETRACION (0,1 mm)	60/100
PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	N/A
DUCTILIDAD (cm)	40 MIN
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	97,5 MIN
RECUPERACION ELASTICA (%)	N/A
COLOR	NEGRO
ESTADO	LIQUIDO

TABLA RESUMEN GRANULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)			
FORMA	granulos	% DE CENIZAS	7,00 - 11,00
COLOR	negro	% DE POLIMEROS	70/30
OLOR	caucho	% NEGRO DE HUMO	26 - 38
DENSIDAD (gr/cm3)	0,40 - 0,50	% CAUCHO NATURAL	10,00 - 35,00
PESO ESPECIFICO	1,15 - 1,27	% HIDROC CAUCHO	57,00 - 58,00
HUMEDAD	menor 0,75	% AZUFRE	1,00 - 7,00
PUNTO DE COMBUSTION °C	300 - 400	PH (25°C)	8,12 - 8,20
GRANULOMETRIA	0,06 MM	VALOR KG (COP)	\$ 1.200,00

Fuente: Elaborado por el autor.

14.3 DESARROLLO INVESTIGATIVO

Ya teniendo nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN) caracterizada y cumpliendo todas las especificaciones técnicas, en lo referente a los componentes granulares, vamos a lograr determinar cuál es el porcentaje óptimo de asfalto en nuestra mezcla, teniendo como referencia la norma INV-E-741-13.

14.3.1 Porcentaje óptimo de asfalto

De acuerdo con la solicitud de la norma INV E-622-13 para la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), en su numeral 4.2.2.2.1, diseño preliminar, realizamos el cálculo y la comprobación de los porcentajes óptimos de asfalto en nuestra mezcla. Utilizamos el cálculo guiándonos de 5 diferentes Entidades Mundiales.

Con el Método INVÍAS se calcula la superficie específica del agregado combinado incluido en la mezcla con la expresión:

$$Se=0.41+0.0041a+0.0082b+0.01164c+0.0287d+0.0614e+0.1229f+0.3277g$$

A cada variable alfabética le corresponde el porcentaje de la muestra que pasa cada tamiz definido en la norma, seguidamente hallamos el valor (SE) (Tabla 29), y reemplazamos los valores en la ecuación.

Tabla 29: Resultados ecuación SE (INV E-741.1).

TIPO	TAMIZ	%PASA	CONSTANTE	(*)
a	4	51	0,0041	0,2091
b	8	43	0,0082	0,3526
c	16	23	0,0164	0,3772
d	30	19	0,0287	0,5453
e	50	13	0,0614	0,7982
f	100	9	0,1229	11,061
g	200	8	0,3277	26,216
RESULTADOS		60,101	0,41	6,4201 m2/kg

Fuente: Elaborado por el autor.

$$Pbe = Pb - Pba \quad (100 - Pb)/100 = 8\% \quad 0.28 \quad (100 - 8)/100 = 5.73\%$$

$$Pb/Db = 8/1.003 = 7.88$$

$$Pba * Pg = 0.28 * 0.2576 = 0.2576$$

$$Pba \text{ masa}/Db = 0.2576/1.003 = 0.2568$$

$$Pbe \text{ volumen} = Pb \text{ volumen} - Pba \text{ volumen} = 7.88 - 0.2568 = \underline{\underline{7.6\%}}$$

$$Ha = (Pbe \text{ volumen}/SE * Pg) * 10 = 7.6/6.4201 * 0.92 * 10 = 12.88 \text{ um}$$

Para realizar un cálculo más aproximado utilizamos también el método del Laboratorio central de puentes y caminos de Francia (Tabla 30).

Tabla 30: Método del laboratorio central de puentes y caminos de Francia (LCPC).

		G		g		A		F
(1/100)	0,24	33,00	1,60	37,00	12,85	13,00	117,80	8,00
		7,821		59,2		167,05		942,4
1,176,471		1,176,471						

Fuente: Elaborado por el autor.

También realizamos el cálculo por medio del Instituto de asfalto. Las variables se identifican en la Tabla 31.

Tabla 31: Método del Instituto del asfalto.

	a		b	k	c	K
0,035	13	0,045	37	0,18	8	2
	0,455		1,665		1,44	
	7,48					

Fuente: Elaborado por el autor.

Cálculo por el método de Marshall modificado. Los valores de las variables se identifican en la Tabla 32.

Tabla 32: Método Marshall Modificado.

	A		B		C
0,05	0,62	0,10	30	0,5	8
	0,031		3		4
	7,031				

Fuente: Elaborado por el autor.

Cálculo por el método de la Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas de México (SAHOP) (ver Tabla 33).

Tabla 33: Método SAHOP.

		G		g		A		F
0	0,41	69	2,05	28	15,38	7	53,3	8
		28,29		57,4		107,66		426,4
7.9		619,75						

Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con los cálculos realizados anteriormente, podemos organizar los datos obtenidos por cada uno de los métodos en la Tabla 34.

Tabla 34: Resumen de métodos.

ENTIDAD	INVIAS	LCPC	MIA	MARSHALL M	SAHOP
%	7.60%	11,76 %	7,48 %	7,0 %	7,9 %
PROMEDIO				8,34 %	

Fuente: Elaborado por el autor.

Para continuar con nuestro trabajo, tenemos como dato teórico óptimo de asfalto 8%. Teniendo en cuenta esto, trabajaremos como lo estipula la norma particular, con 2 puntos por encima y dos puntos por debajo, como sigue (Tabla 35).

Tabla 35: Porcentajes de asfalto según norma INV Art 422P-17.

ELABORACION DE ESPECIMENES DE MUESTRA					
6%	7%	8%	9%	10%	

Fuente: Elaborado por el autor.

Cálculo de la expresión para porcentaje de asfalto presente en la emulsión catódica rápida (CRR-1).

Amparados en la ficha técnica de la emulsión CRR-1, suministrada por Incoasfaltos S.A.S., y como la emulsión asfáltica por naturaleza no posee en su totalidad asfalto, se debe calcular el porcentaje de asfalto residual. De acuerdo con la ficha técnica, el 59% es asfalto, el restante es agua.³⁶

Entonces procedemos a calcular la cantidad de emulsión que se debería adicionar a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (Tabla 36), para alcanzar los porcentajes presentes en cada una de las muestras.

³⁶ INCOASFALTOS. Op. Cit.

Tabla 36: Porcentajes de emulsión asfáltica CRR-1, para cada muestra.

		MAN	% OPTIMO	DIFERENCIA
% ASFALTO		4.93%	8%	3.07%

EMULSIÓN		3.07%	59%	5.20%
----------	--	-------	-----	-------

DIFERENTES MEZCLAS					
% ASFALTO	6%	7%	8%	9%	10%
EMULSIÓN	1.81%	3.50%	5.20%	6.89%	8.59%

Fuente: Elaborado por el autor.

Guiados por la anterior información, también se debe calcular la humedad óptima de compactación para el material MAN, ya que al agregar la emulsión asfáltica estaríamos agregando agua a la mezcla. De esta forma se debería secar la mezcla o realizar una prehidratación de la mezcla con agua. Los siguientes son los porcentajes de peso en agua (Tabla 37), de acuerdo con la adición de emulsión asfáltica.

Tabla 37: Porcentajes de emulsión asfáltica CRR-1, y agua para cada muestra.

DIFERENTES MEZCLAS					
% ASFALTO	6%	7%	8%	9%	10%
% AGUA	0,74%	1,43%	2,13%	2,82%	3,52

Fuente: Elaborado por el autor.

Porcentaje de humedad del material MAN. Para este proceso se realizó la toma de la humedad, mediante humedómetro, con esferas y carburo. Se tomaron 25.5g de material MAN, pasa tamiz No. 40, y se procedió a mezclar los materiales hasta tener la lectura (Figura 34).

Figura 34: Peso del material de muestra para realizar toma de humedad.



Fuente: Elaborado por el autor.

Determinación de la humedad presente en la mezcla (MAN), mediante humidómetro (Figura 35).

Figura 35: Utilización del humidómetro, para determinar la humedad del material.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se tomaron 2 lecturas para la mezcla de los materiales, y así poder realizar las pruebas con los 5 tipos de contenido de asfalto, arrojando en promedio 4% de humedad (Figura 36).

Figura 36: Lectura de humedad en el material de muestra.



Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con el ensayo preliminar de porcentaje de humedad óptima en la curva de compactación, nuestro material necesita un 7.4% de humedad.

Resumimos en la Tabla 38, los porcentajes de agua para cada una de las mezclas.

Tabla 38: Porcentajes de agua para cada una de las mezclas

% ASFALTO	6%	7%	8%	9%	10%
% AGUA	0,74%	1,43%	2,13%	2,82%	3,52
ADICIÓN DE AGUA	2,66%	1,97%	1,27%	0,58%	- 0,12%

Fuente: Elaborado por el autor.

Siguiendo los cálculos se presenta la tabla con los datos reales de cada componente, la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), la emulsión asfáltica (CRR-1), y el agua de adición (Tabla 39). Esta última se utilizará como el agua preenvuelta.

Para el caso de la mezcla con el 10% de asfalto, se debe secar la muestra hasta alcanzar una humedad de 3.88 %.

Tabla 39: Porcentajes de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), emulsión asfáltica CRR-1, y agua.

% ASFALTO	MAN (g)	EMULSION (g)	AGUA (m.l)	PESO TOTAL (g)
6%	1.706,22	32,58	61,2	1800
7%	1.675,80	63,00	61,2	1800
8%	1.645,20	93,60	61,2	1800
9%	1.614,78	124,02	61,2	1800
10%	1.584,18	154,62	61,2	1800

Fuente: Elaborado por el autor.

Los porcentajes de agua no varían, ya que debemos compactar con la humedad óptima. Los porcentajes de material MAN varían con relación al porcentaje de emulsión y agua adicionado a la mezcla, cuyo valor sería el resultante de restar la emulsión y el agua al peso total de la muestra (Tabla 40).

Tabla 40: Preparación de las cantidades de material exactas, para cada juego de briquetas a ensayar, de acuerdo con los porcentajes de emulsión para el diseño de la mezcla.

# BRIQUETAS	% ASFALTO	MAN (gr)	EMULSIÓN (gr)	AGUA (m.l)	PESO TOTAL (gr)
6	6%	10.237,32	195,48	367,2	10.800,00
6	7%	10.054,80	378,00	367,2	10.800,00
6	8%	9.871,20	561,60	367,2	10.800,00
6	9%	9.688,68	744,12	367,2	10.800,00
6	10%	9.505,08	927,72	367,2	10.800,00

Fuente: Elaborado por el autor.

Preparación de la mezcla. Se realiza el mezclado para cada uno de los especímenes, realizando una capa de agua preenvuelta en los materiales de la

mezcla MAN. La emulsión se va agregando de forma lenta sin parar de mezclar todos los materiales. Este proceso no puede demorar más de 2 minutos.

La preparación de la mezcla para cada contenido de asfalto, se realizó para el juego total de briquetas. Es decir, se mezcló el peso aproximado para 9 briquetas de cada porcentaje de asfalto (Figuras 37-38-39-40).

Figura 37: Peso de cada uno de los componentes de la mezcla.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 38: Mezcla homogénea de todos los componentes de la mezcla.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 39: Una vez mezclados todos los componentes, se realiza el peso nuevamente para obtener la cantidad exacta para cada briqueta.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 40: Adición del agua pre envuelta para los materiales.



Fuente: Elaborado por el autor.

14.3.2 Procedimiento

Ya teniendo los materiales dosificados y homogenizados, se procede a compactar las muestras aplicando sobre la mezcla una presión inicial o de asentamiento de 1MPa (10kgf/cm²) o de 150 lbf/pg² (ver Figura 41). Con el objeto de asentar inicialmente la mezcla, se retiran entonces las dos varillas de soporte para compactar por el sistema de doble embolo y se comienza la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente, regulando la velocidad lo más uniforme posible, hasta alcanzar un tiempo de 2 a 3 minutos, una presión máxima de 20.7 MPa (210 kg/cm²) o de 3000 lbf/pg²; manteniendo esta presión sobre la mezcla durante 2 minutos. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm (4) de diámetro, esta presión viene a representar una carga de unos 170 KN.

Figura 41. Máquina Marshall



Fuente: Elaborado por el autor.

Siguiendo el procedimiento solicitado por la norma INVIAS 442p, se debe realizar el ensayo de las muestras, con el porcentaje óptimo de asfalto, y otras dos dosificaciones, 2 por debajo y dos por encima. Es decir, se deben realizar mínimo 3 muestras por lote, para un total de 15 briquetas. En la Figura 42 se evidencia la toma de briquetas.

Figura 42. Lotes de briquetas preparadas con diferentes porcentajes de asfalto, para nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Los porcentajes resultantes de la dosificación son, en su orden 6%, 7%, 8%, 9% y 10% de asfalto.

Para cada muestra de material se prepararon un juego de 6 briquetas, 3 se ensayarán a una temperatura ambiente de 25°C, y las otras 3 se tendrán en un baño de agua a temperatura constante de 25°C, durante 4 días. En la Figura 43 se muestran los juegos de briquetas.

Figura 43. Briquetas de Mezcla Asfáltica Natural, con porcentajes de 9% y 10% de asfalto.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se realizaron las briquetas por juegos de contenido de asfalto. Se evaluaron todos los parámetros requeridos (ver Figura 44), incluidas las evaluaciones de susceptibilidad al agua, para posteriormente determinar la relación de resistencia residual.

Figura 44. Briquetas sumergidas durante 4 días a una temperatura estable de 25°C, para evaluar la estabilidad residual.



Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para cada juego de briquetas de la mezcla asfáltica natural, en estado seco (ver tablas 41-42).

Tabla 41. Resultados de la resistencia seca para cada juego de briquetas.

RESISTENCIA SECA							
INVIAS E-622-13							
EMULSIÓN 6%	RESISTENCIA SECA (Mpa)		EMULSIÓN 7 %	RESISTENCIA SECA (Mpa)		EMULSIÓN 8 %	RESISTENCIA SECA (Mpa)
1	ROTA		1	2,2		1	2,45
2	1,62		2	2,1		2	2,65
3	1,42		3	2,3		3	2,5
PROMEDIO	1,52		PROMEDIO	2,20		PROMEDIO	2,53
EMULSIÓN 9 %	RESISTENCIA SECA (Mpa)		EMULSIÓN 10 %	RESISTENCIA SECA (Mpa)			
1	2,42		1	1,95			
2	2,62		2	1,95			
3	2,3		3	1,88			
PROMEDIO	2,45		PROMEDIO	1,93			

Fuente: Elaborado por el autor.

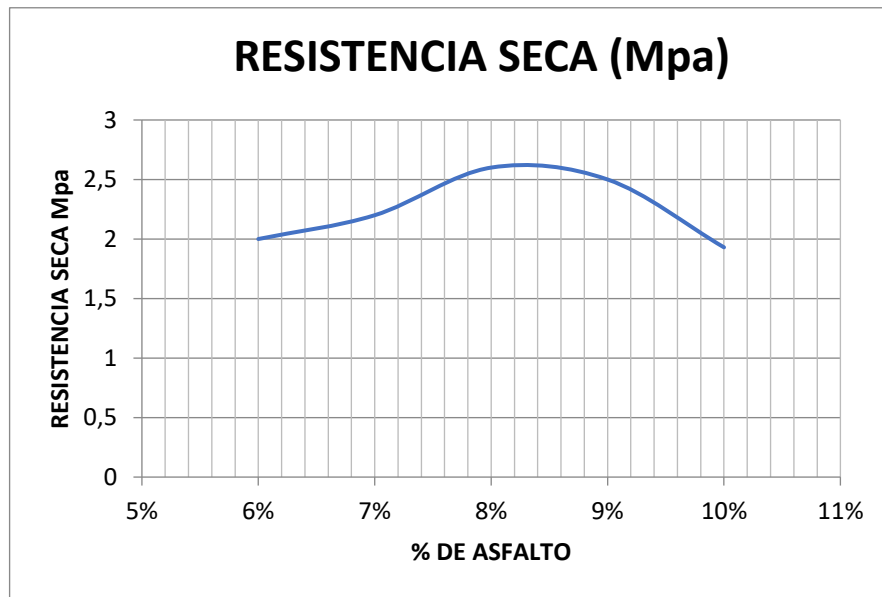
Tabla 42. Resultados comparativos resistencia seca.

% EMULSIÓN	RESISTENCIA SECA (Mpa)
6%	1,5
7%	2,2
8%	2,53
9%	2,45
10%	1,93

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los datos obtenidos se procede a realizar la Figura 45, correspondiente a los valores obtenidos de la resistencia seca de cada juego de briquetas.

Figura 45. Valores ponderados de la resistencia seca para los 5 porcentajes de asfalto de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para cada juego de briquetas de la mezcla asfáltica natural, en estado húmedo (Tablas 43-44).

Tabla 43. Resultados de la resistencia húmeda, para cada juego de briquetas.

RESISTENCIA HUMEDA							
INVIAS E-622-13							
EMULSIÓN 6%	RESISTENCIA HÚMEDA(Mpa)		EMULSIÓN 7 %	RESISTENCIA HÚMEDA (Mpa)		emulsión 8 %	RESISTENCIA HÚMEDA (Mpa)
1	1,38		1	1,72		1	1,99
2	1,40		2	1,75		2	2,15
3	1,43		3	1,7		3	1,9
PROMEDIO	1,415		PROMEDIO	1,72		PROMEDIO	2,01
emulsión 9 %	RESISTENCIA HÚMEDA (Mpa)		emulsión 10 %	RESISTENCIA HÚMEDA (Mpa)			
1	1,93		1	1,5			
2	1,98		2	1,69			
3	1,95		3	1,92			
PROMEDIO	1,95		PROMEDIO	1,70			

Fuente: Elaborado por el autor.

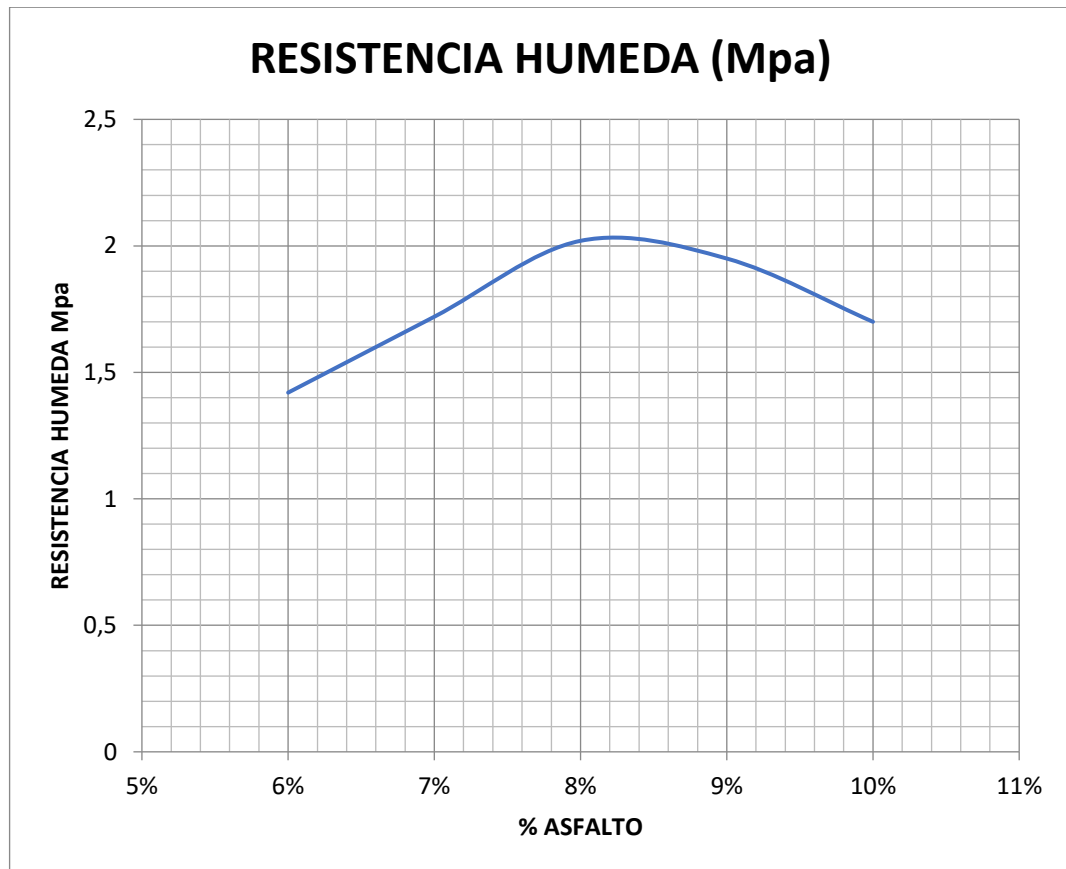
Tabla 44. Resultados comparativos resistencia húmeda.

% EMULSIÓN	RESISTENCIA HUMEDA (Mpa)
6%	1,42
7%	1,72
8%	2,02
9%	1,95
10%	1,7

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los datos obtenidos se procede a realizar la Figura 46, correspondiente a los valores obtenidos de la resistencia húmeda de cada juego de briquetas.

Figura 46. Valores ponderados de la resistencia húmeda, para los 5 porcentajes de asfalto de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Se complementa la información tabulando los resultados de cada porcentaje de asfalto, y se despeja la ecuación de resistencia conservada, $R_c = R_h / R_s$ %, obteniendo la Tabla 45.

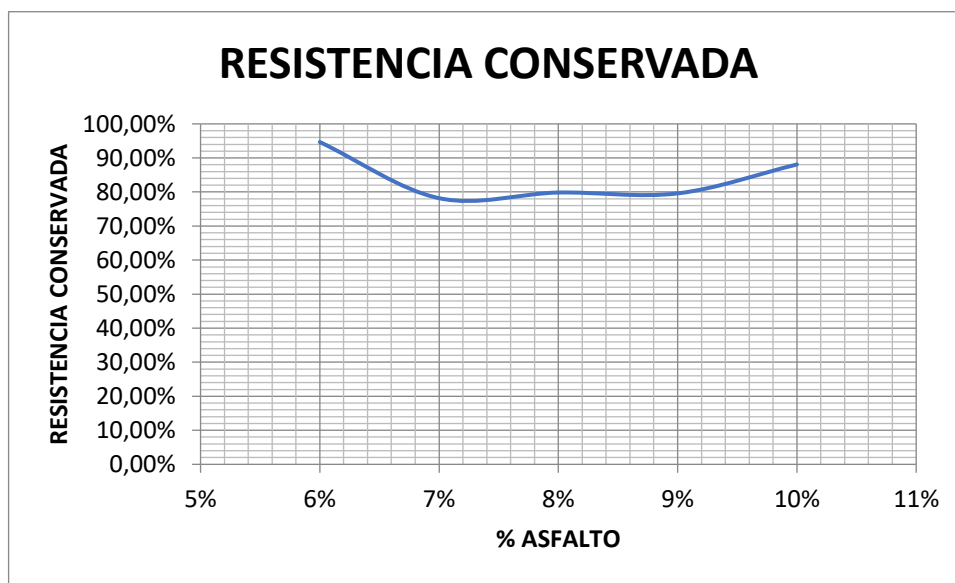
Tabla 45. Resultados de la resistencia conservada para cada juego de briquetas, con sus porcentajes de asfalto.

% EMULSIÓN	RESISTENCIA SECA (Mpa)	RESISTENCIA HÚMEDA (Mpa)	RESISTENCIA CONSERVADA %
6%	1,5	1,42	94,67%
7%	2,2	1,72	78,18%
8%	2,53	2,02	79,84%
9%	2,45	1,95	79,59%
10%	1,93	1,7	88,08%

Fuente: Elaborado por el autor.

Se grafican los resultados, Figura 47.

Figura 47. Resultados de la resistencia conservada.



Fuente: Elaborado por el autor.

14.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al comparar cada una de las resistencias en su estado seco, se observa una variación a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto en las mezclas. Sin embargo, para porcentajes muy altos de asfaltos, se comporta como un fluido y no alcanza a seguir con la tendencia de ascenso de la resistencia, tal como se evidencia en los resultados de acuerdo con la norma E-622-13, para este tipo de material, en la resistencia húmeda, por razones obvias. Este material al ser preparado en frío pierde algunas características por el efecto del agua, pero ligeramente sobrepasan los límites permitidos para mezclas en frío, y para los datos obtenidos en la curva de resistencia conservada, todos cumplen el mínimo porcentaje del 75%, pero si tomamos el punto de resistencia máxima conservada que para nuestro caso es del 6%, esta no cumpliría con los parámetros de las resistencias seca y húmeda, respectivamente. Con base en estas deducciones se toma el valor de 8% como porcentaje óptimo de asfalto para todas nuestras pruebas.

Teniendo ya los datos claros de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), procedemos a la fabricación de las briquetas variando los porcentajes de adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) a la mezcla.

Siguiendo nuestra experiencia profesional e investigativa, la siguiente experimentación se hará combinando porcentajes de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a nuestra mezcla MAN, que a partir de este punto de la investigación se llamará **MAN VERDE**. Siguiendo con el proceso analítico, investigativo y científico de nuestro trabajo, se procede a la elaboración de briquetas con porcentajes de gránulo de caucho reciclado en las proporciones desde el 1% hasta el 5%. La mezcla óptima se alcanzará hasta que el porcentaje de gránulo de caucho adicionado empiece a disminuir las condiciones de estabilidad y flujo, también se evaluará la condición económica y ambiental de nuestro **MAN VERDE**.

Se realizará un balance económico de la producción y la sustentabilidad ambiental. Se valora en términos de ahorro de emisiones de gases contaminantes a la atmosfera y horas de maquinaria; en el campo humano, la disminución de problemas respiratorios por la baja exposición a los contaminantes.

Continuando con nuestro método investigativo se realizarán varios tramos de prueba evaluando el desempeño real de nuestro MAN VERDE, en diferentes usos. La metodología aplicada será la norma INVÍAS E-748, con todo sus componentes y la evaluación química, que nos permita contar con una mezcla prefabricada que se pueda almacenar por largos periodos de tiempo y al ser extendida, no pierda sus condiciones físicas ni químicas. Esto será posible en gran parte a la forma de almacenamiento y fácil manipulación de la mezcla, siempre buscando la comodidad del usuario final.

15 EXPERIMENTACIÓN

Tomamos nuestra mezcla MAN VERDE, y la mezclamos con diferentes porcentajes de gránulo de caucho reciclado (ver Figura 48).

MAN + 1% DE GCR.

MAN + 2% DE GCR.

MAN + 3% DE GCR.

MAN + 4% DE GCR.

MAN + 5% DE GCR.

Figura 48. Adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Para cada elaboración de las briquetas, se distribuyó el peso del gránulo de caucho reciclado de la siguiente manera:

MAN + 1% DE GCR.	18 gramos.
MAN + 2% DE GCR.	36 gramos.
MAN + 3% DE GCR.	54 gramos.
MAN + 4% DE GCR.	72 gramos.
MAN + 5% DE GCR.	90 gramos.

Se procedió a compactar las briquetas en 6 especímenes por cada porcentaje de gránulo de caucho reciclado, ver Figura 49.

Figura 49. Adición de gránulo de caucho reciclado a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se realizó el mismo procedimiento para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto, llevando 3 briquetas para resistencia en seco y 3 para resistencia húmeda, por cada porcentaje de gránulo de caucho reciclado (Figura 50).

Figura 50. Adición de gránulo de caucho reciclado a la Mezcla Asfáltica Natural MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Se realiza la medición de los pesos sumergidos, superficialmente secos, y seco de cada una de las briquetas para hallar la gravedad Bulk, y seguidamente la relación de % de vacíos de la mezcla.

Se sumerge cada briketa en agua a una temperatura constante de 25°C, en la Figura 51 se evidencia el procedimiento.

Figura 51. Briquetas en inmersión de agua a 25°C, para obtener la gravedad específica.



Fuente: Elaborado por el autor.

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

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

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

De acuerdo con los resultados obtenidos se realiza el Tabla 46 y se calcula la gravedad específica Bulk, para cada una de las briquetas elaboradas.

Tabla 46. Resultados de la densidad específica Bulk, para cada juego de briquetas, con sus porcentajes de gránulo de caucho reciclado.

DENSIDAD BULK				DENSIDAD BULK		
INVIAS E-733				INVIAS E-733		
No BRIQUETA	TIPO	DBULK=(P/V)		No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
1	SIN GCR	2,16		7	GCR al 1%	2,03
2	SIN GCR	2,13		8	GCR al 1%	2,21
3	SIN GCR	2,14		9	GCR al 1%	1,98
4	SIN GCR	2,15		10	GCR al 1%	1,92
5	SIN GCR	2,15		11	GCR al 1%	1,93
6	SIN GCR	2,15		12	GCR al 1%	1,52
PROMEDIO		2,14666667		PROMEDIO		1,93166667

DENSIDAD BULK				DENSIDAD BULK		
INVIAS E-733				INVIAS E-733		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA		No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
13	GCR al 2%	1,902		19	GCR al 3%	1,893
14	GCR al 2%	1,896		20	GCR al 3%	1,875
15	GCR al 2%	1,93		21	GCR al 3%	1,896
16	GCR al 2%	1,923		22	GCR al 3%	1,845
17	GCR al 2%	1,92		23	GCR al 3%	1,879
18	GCR al 2%	1,893		24	GCR al 3%	1,845
PROMEDIO		1,91066667		PROMEDIO		1,87216667

DENSIDAD BULK				DENSIDAD BULK		
INVIAS E-733				INVIAS E-733		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA		No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
25	GCR al 4%	1,801		31	GCR al 5%	1,74
26	GCR al 4%	1,793		32	GCR al 5%	1,752
27	GCR al 4%	1,7956		33	GCR al 5%	1,793
28	GCR al 4%	1,8123		34	GCR al 5%	1,785
29	GCR al 4%	1,802		35	GCR al 5%	1,796
30	GCR al 4%	1,81		36	GCR al 5%	1,72
PROMEDIO		1,80231667		PROMEDIO		1,76433333

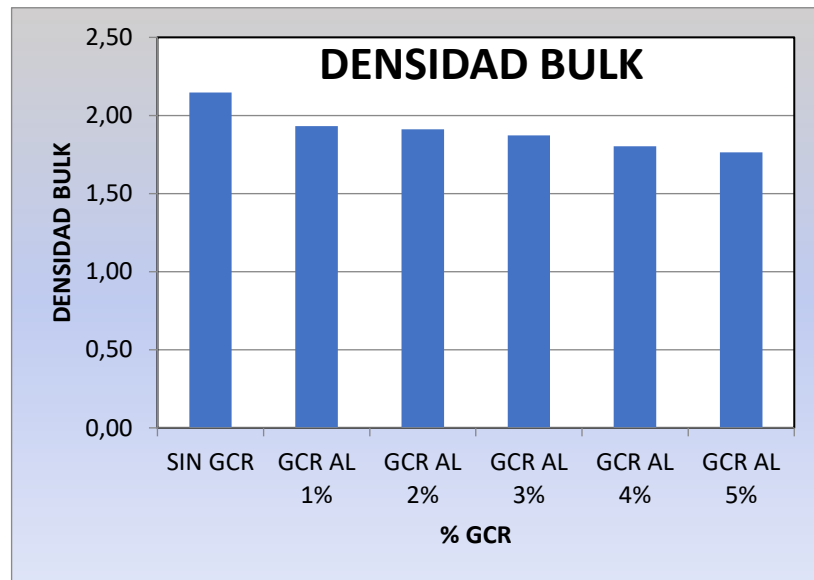
DENSIDAD BULK	
INVIAS E-733	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	2,15
GCR al 1%	1,93
GCR al 2%	1,91
GCR al 3%	1,87
GCR al 4%	1,8
GCR al 5%	1,76

Fuente: Elaborado por el autor.

Claramente observamos la disminución de la densidad, a medida que adicionamos mayores porcentajes de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), a la mezcla MAN VERDE.

Construimos una gráfica en la cual comparamos los resultados obtenidos para cada porcentaje de gránulo de caucho reciclado (GCR) (Figura 52).

Figura 52. Resultados de Densidad Bulk.



Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se realiza el ensayo INV E-735-13, el cual se refiere al procedimiento para determinar la gravedad específica máxima a 25°C, de mezclas asfálticas en caliente para pavimentos. Las mezclas se deben ensayar en estado suelto.

A continuación, se presentan los resultados de acuerdo con cada porcentaje de adición de gránulo de caucho reciclado (ver Tabla 47).

Tabla 47. Resultados de la densidad específica máxima para cada juego de briquetas con sus porcentajes de gránulo de caucho reciclado.

GRAVEDAD ESPECIFICA MÁXIMA		
INVIAS E- 735		
No BRIQUETA	TIPO	DEM
1	SIN GCR	2,22
2	GCR al 1%	1,998
3	GCR al 2%	1,974
4	GCR al 3%	1,932
5	GCR al 4%	1,854
6	GCR al 5%	1,81

Fuente: Elaborado por el autor.

Seguidamente el artículo INV-442P, nos indica calcular el porcentaje de vacíos en la mezcla siguiendo el procedimiento INV-E736, mediante la expresión;

- $Va = (Gmb/Gmm) \cdot 100$.
- Va= Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada respecto al volumen total.
- Gmm= Gravedad específica máxima.
- Gmb= Gravedad específica bulk de espécimen compactado.

El resultado del porcentaje de vacíos de la mezcla se muestra en la Tabla 48, ya despejando la variable Va.

Tabla 48. Resultados del porcentaje de vacíos de cuerdo a la norma INV E-736.

% DE VACIOS DE LA MEZCLA		
INVIAS E- 736		
RESULTADO	TIPO	LECTURA
1	SIN GCR	3,3
2	GCR al 1%	3,31
3	GCR al 2%	3,32
4	GCR al 3%	3,09
5	GCR al 4%	2,78
6	GCR al 5%	2,52

Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para cada juego de briquetas, de la mezcla asfáltica natural en estado seco, adicionada con los porcentajes de gránulo de caucho reciclado (ver Tabla 49).

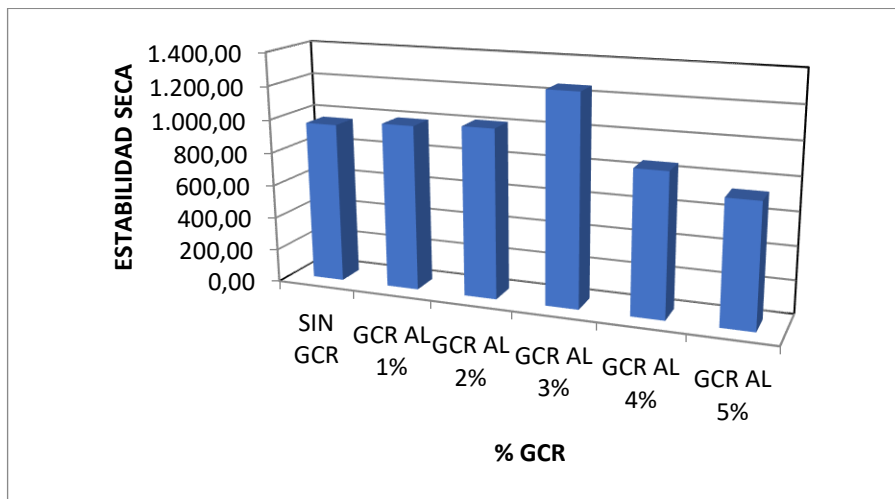
Tabla 49. Resultados de la estabilidad en estado seco para cada juego de briquetas.

ESTABILIDAD MARSHALL SECA	
INVIAS 748-13	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	963,44
GCR al 1%	993,79
GCR al 2%	1.015,62
GCR al 3%	1.257,19
GCR al 4%	855,51
GCR al 5%	737,67

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los datos obtenidos se procede a realizar la Figura 53, correspondiente a los valores obtenidos de la estabilidad seca de cada juego de briquetas.

Figura 53. Valores ponderados de la estabilidad seca para los 5 porcentajes de gránulo de caucho reciclado a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para cada juego de briquetas, de la mezcla asfáltica natural en estado húmedo, adicionada con los porcentajes de gránulo de caucho reciclado (ver Tabla 50).

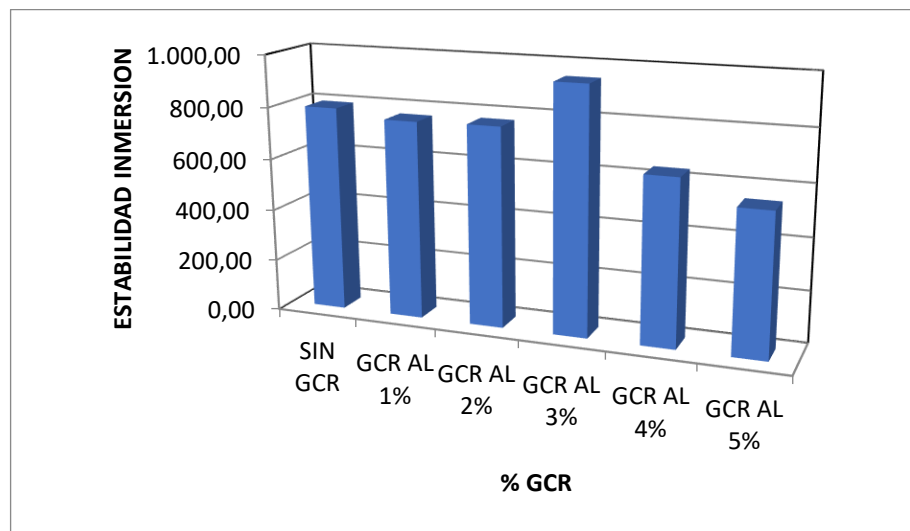
Tabla 50. Resultados de la estabilidad húmeda para cada juego de briquetas.

ESTABILIDAD MARSHALL INMERSION	
INVIAS 748-13	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	794,36
GCR al 1%	765,09
GCR al 2%	770,32
GCR al 3%	946,31
GCR al 4%	637,76
GCR al 5%	548,54

Fuente: Elaborado por el autor.

Con los datos obtenidos se procede a realizar la Figura 54, correspondiente a los valores obtenidos de la estabilidad húmeda de cada juego de briquetas.

Figura 54. Valores ponderados de la estabilidad húmeda para los 5 porcentajes de gránulo de caucho reciclado a nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con los resultados anteriores, podemos despejar la ecuación de estabilidad residual, como sigue:

$$\text{Estabilidad residual} = (\text{estabilidad sumergida} / \text{estabilidad seca}) * 100.$$

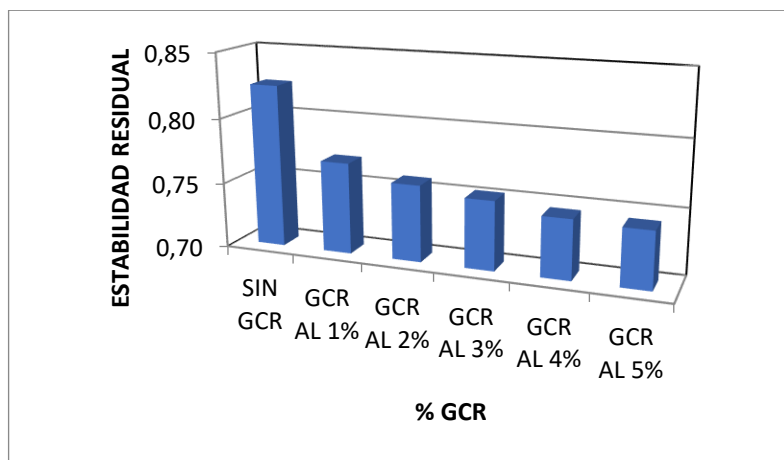
En la tabla 51 se presentan los resultados, y su respectiva gráfica en la Figura 55.

Tabla 51. Resultados de la estabilidad residual para cada juego de briquetas.

ESTABILIDAD MARSHALL RESIDUAL	
INVIAS 748-13	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	0,8245
GCR al 1%	0,76987
GCR al 2%	0,75847
GCR al 3%	0,75272
GCR al 4%	0,74548
GCR al 5%	0,74361

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 55. Gráfica de estabilidad residual.



Fuente: Elaborado por el autor.

Ahora tomamos las lecturas de flujo en condición seca, de acuerdo con la carga aplicada para cada juego de briquetas (ver Tabla 52).

Tabla 52. Resultados de la lectura de flujo en condición seca para cada juego de briquetas.

FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
1	SIN GCR	7,6
2	SIN GCR	8,1
3	SIN GCR	7,9
4	SIN GCR	8,3
5	SIN GCR	8,2
6	SIN GCR	8,1
PROMEDIO		8,033333333

FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
7	GCR AL 1%	9,2
8	GCR AL 1%	9,1
9	GCR AL 1%	9,3
10	GCR AL 1%	9,2
11	GCR AL 1%	9,4
12	GCR AL 1%	9,2
PROMEDIO		9,233333333

FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
13	GCR AL 2%	11,2
14	GCR AL 2%	11,5
15	GCR AL 2%	11,8
16	GCR AL 2%	11,9
17	GCR AL 2%	11,4
18	GCR AL 2%	11,6
PROMEDIO		11,56666667

FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
19	GCR AL 3%	12,9
20	GCR AL 3%	12,8
21	GCR AL 3%	13,1
22	GCR AL 3%	13,5
23	GCR AL 3%	12,8
24	GCR AL 3%	12,8
PROMEDIO		12,98333333

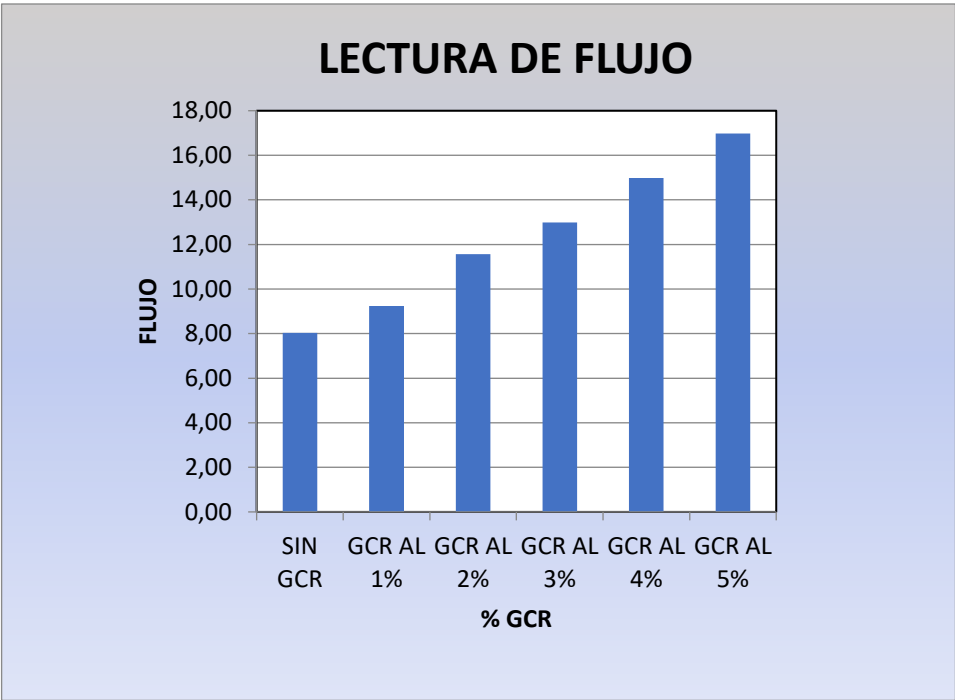
FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
31	GCR AL 5%	16,8
32	GCR AL 5%	18,1
33	GCR AL 5%	17,6
34	GCR AL 5%	16,8
35	GCR AL 5%	16,59
36	GCR AL 5%	16
PROMEDIO		16,98166667

FLUJO 0,01" (25°)		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
25	GCR AL 4%	14,9
26	GCR AL 4%	14,8
27	GCR AL 4%	14,9
28	GCR AL 4%	15,1
29	GCR AL 4%	15,2
30	GCR AL 4%	15
PROMEDIO		14,98333333

Fuente: Elaborado por el autor.

Con base en los resultados obtenidos en la lectura del flujo realizamos la Figura 56, para ilustrar mejor los resultados.

Figura 56. Valores resumen de la lectura de flujo en condición seca.



Fuente: Elaborado por el autor.

En la Tabla 53 podemos apreciar los valores promedio de la lectura de flujo.

Tabla 53. Resultados de la lectura de flujo en condición seca para cada juego de briquetas.

FLUJO 0,01" (25°)	
INVIAS 748-13	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	8,03
GCR AL 1%	9,23
GCR AL 2%	11,57
GCR AL 3%	12,98
GCR AL 4%	14,98
GCR AL 5%	16,98

Fuente: Elaborado por el autor.

Tomamos las lecturas de flujo en condición húmeda, de acuerdo con la carga aplicada para cada juego de briquetas de acuerdo a la Tabla 54.

Tabla 54. Resultados de la lectura de flujo en condición húmeda para cada juego de briquetas.

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
7	GCR AL 1%	10,1
8	GCR AL 1%	10,5
9	GCR AL 1%	11
10	GCR AL 1%	10,9
11	GCR AL 1%	10,5
12	GCR AL 1%	10,4
PROMEDIO		10,5666667

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
1	SIN GCR	8,2
2	SIN GCR	8,1
3	SIN GCR	8,3
4	SIN GCR	8,4
5	SIN GCR	8,2
6	SIN GCR	7,9
PROMEDIO		8,183333333

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
13	GCR AL 2%	12,1
14	GCR AL 2%	14,5
15	GCR AL 2%	12,6
16	GCR AL 2%	12,5
17	GCR AL 2%	12,5
18	GCR AL 2%	12,8
PROMEDIO		12,83333333

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
19	GCR AL 3%	13,8
20	GCR AL 3%	13,5
21	GCR AL 3%	12,9
22	GCR AL 3%	13,5
23	GCR AL 3%	14,3
24	GCR AL 3%	14,1
PROMEDIO		13,68333333

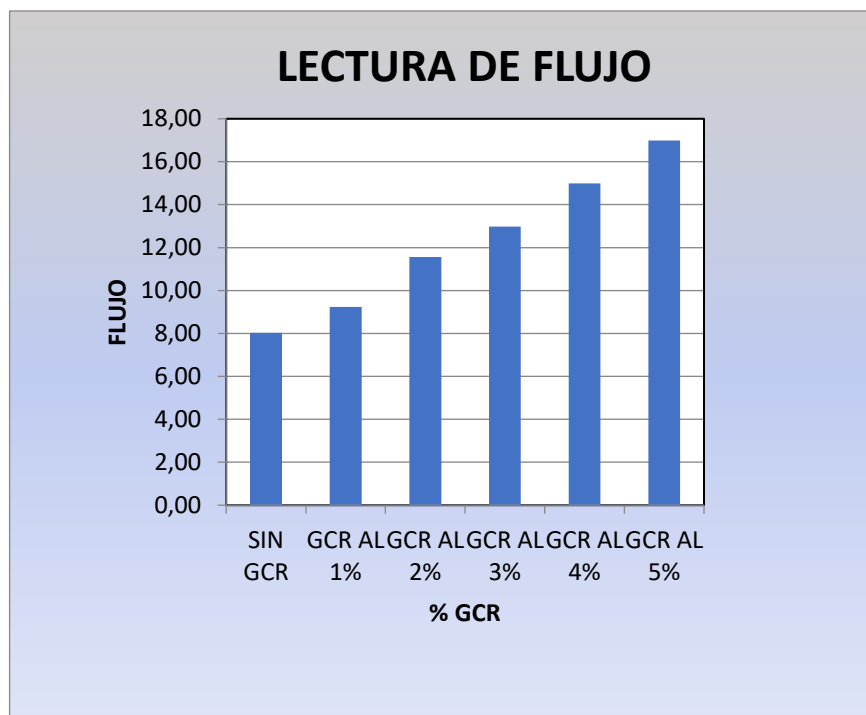
FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
31	GCR AL 5%	17,8
32	GCR AL 5%	15,6
33	GCR AL 5%	18,6
34	GCR AL 5%	17,5
35	GCR AL 5%	17,3
36	GCR AL 5%	18
PROMEDIO		17,4666667

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION		
INVIAS 748-13		
No BRIQUETA	TIPO	LECTURA
25	GCR AL 4%	15,8
26	GCR AL 4%	15,9
27	GCR AL 4%	15,7
28	GCR AL 4%	15,9
29	GCR AL 4%	15,4
30	GCR AL 4%	14,8
PROMEDIO		15,58333333

Fuente: Elaborado por el autor.

Con base en los resultados obtenidos en la lectura del flujo, realizamos la gráfica correspondiente para ilustrar mejor los resultados (Figura 57).

Figura 57. Valores resumen de la lectura de flujo en condición húmeda.



Fuente: Elaborado por el autor.

Valores promedio de la lectura de flujo (Tabla 55).

Tabla 55. Lectura de flujo condición húmeda.

FLUJO 0,01" (25°) INMERSION INVIAS 748-13	
TIPO	PROMEDIO
SIN GCR	8,18
GCR AL 1%	10,57
GCR AL 2%	12,83
GCR AL 3%	13,68
GCR AL 4%	15,58
GCR AL 5%	17,47

Fuente: Elaborado por el autor.

16 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a la granulometría obtenida en los ensayos de laboratorio, podemos evidenciar que el tamaño máximo de agregado de gránulo de caucho reciclado es de 0.85 mm. Por esta razón, la curva granulométrica del material combinado únicamente tendría variación en los materiales clasificados como arenas y fino. El comportamiento de los demás criterios no se evaluará, ya que para las pruebas de laboratorio se tomará como máximo un aporte del 5% en peso de la mezcla total en gránulo de caucho reciclado, y se variarán estas dosificaciones en disminución hasta el 1%. Posteriormente se analizarán los resultados y se determinará el porcentaje más favorable a la mezcla asfáltica natural.

En el transcurso del análisis de las mezclas se podrá observar el resultado en cuanto a estabilidad y flujo, datos que son los más importantes para evaluar la durabilidad de las mezclas. También se harán pruebas mezclando algunos porcentajes de emulsión asfáltica de rotura lenta, con el fin de lograr mayor adherencia entre los componentes de la mezcla.

Se evaluará la mezcla homogénea de los materiales mediante un mezclador tipo trompo y se tomarán mediciones de los pesos y cantidades exactas de los materiales para ir incrementando de poco a poco las dosificaciones.

16.1 DENSIDAD BULK Y % DE VACÍOS

De acuerdo con la especificación técnica, el porcentaje de vacíos se debe encontrar entre los rangos de 3 % - 5 %. Como podemos notar a medida que incrementa la adición de gránulo de caucho reciclado, la densidad Bulk disminuye. Para la densidad específica máxima, en los datos arrojados por el ensayo vemos una leve disminución al despejar la variable de porcentaje de vacíos en la mezcla. Las únicas que se encuentran en el rango aceptable son las mezclas sin adición

de gránulo de caucho reciclado, y las adicionadas en el 1%, 2% y 3 %. Continuaremos evaluando el cumplimiento de las especificaciones técnicas de acuerdo con los ensayos de estabilidad y flujo para todos los grupos de briquetas presentadas en un comienzo de la fase experimental.

16.2 ESTABILIDAD Y FLUJO

Este método de ensayo se usa para la medición de la resistencia al flujo plástico de los especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica para pavimento, aplicando la carga en dirección perpendicular al eje cilíndrico, utilizando equipo Marshall.

Los valores de estabilidad y flujo Marshall, junto con la densidad, vacíos de aire y vacíos llenos de asfalto, son usados para el diseño de mezcla en laboratorio y la evaluación de mezclas asfálticas.

La estabilidad es la carga máxima de resistencia obtenida de la deformación a velocidad constante en una secuencia de carga. El flujo es la medida de la deformación de la mezcla determinada durante el ensayo de estabilidad.

La estabilidad es la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito. Un pavimento estable debería de ser capaz de mantener su forma y acabado bajo cargas repetidas de tránsito. Cuando el pavimento presenta roderas o ahuellamiento en su superficie, así como corrugaciones, es evidencia de poca estabilidad.³⁷

Valores de estabilidad muy altos producen un pavimento demasiado rígido comprometiendo su durabilidad y facilitando el agrietamiento. La estabilidad depende de la fricción y la cohesión interna de la mezcla; la fricción se relaciona con características del agregado como la forma y la textura. La cohesión es resultado de la capacidad del ligante asfáltico.

³⁷ CARRASCO FLORES, Dean Orestes. Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias. Trabajo de grado . Perú : Universidad de Piura , 2004.

Una buena fricción y cohesión en la mezcla evitan que el agregado se desplace por cargas vehiculares. Entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura, más estable será la mezcla.

El flujo es una medida de la deformación vertical de la muestra antes de la falla por tortura. Valores altos de flujo indican una mezcla plástica, valores bajos de flujo indican una mezcla con vacíos de aire más altos.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno entonces un valor más alto será mucho mejor. Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es frecuentemente una medida de su calidad. Sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

Para el análisis comparativo de los resultados, debemos tener en cuenta que este tipo de mezclas asfálticas naturales presentan un comportamiento muy diferente a la mezcla asfáltica en caliente tradicional. Las resistencias alcanzadas equivalen al 41% de mezclas en caliente. La estabilidad de una mezcla va directamente relacionada a la densidad del asfalto utilizado para la cohesión entre partículas, en nuestro caso se trata de una emulsión asfáltica, que obviamente no se podría comparar a un asfalto líquido, el cual presenta un comportamiento no newtoniano en su fluencia y manejabilidad, ya que cambia la viscosidad con el aumento o disminución de la temperatura, y la tensión cortante que se le aplica.

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

En la interpretación de los resultados tenemos que a medida que incrementamos los porcentajes de gránulo de caucho reciclado (GCR) a nuestra mezcla, aumenta la estabilidad respecto a la que no tiene (GCR), pero llega un punto en el cual esta estabilidad empieza a disminuir por la variación volumétrica del GCR. En los ensayos de laboratorio se evidencia que el porcentaje óptimo de GCR, es de 3%, de acuerdo con la eficacia de reducir los desechos de llantas usadas. En la parte práctica podríamos concluir que se puede añadir GCR, a la mezcla asfáltica natural, mejorando sus condiciones hasta un porcentaje que no supere el 3%, ya que con porcentajes superiores la mezcla no cumpliría con los criterios de estabilidad para la norma Invías 442 p.

16.3 ESTABILIDAD EN CONDICIÓN HÚMEDA

Después de la inmersión durante 4 días a una temperatura constante de 25 ° c, podemos analizar y evidenciar que las mezclas naturales con emulsión asfáltica pierden alrededor de un 20% de la estabilidad, comparada con las estabilidades en seco. El agua afecta de manera significativa la cohesión y fricción dentro de las partículas de la mezcla, haciéndolas menos resistentes cuando están en presencia de agua. Sin embargo, al adicionar el GCR a la mezcla se observa un mejoramiento a la resistencia al agua, hasta alcanzar el 16%, en relación a la mezcla sin GCR, pero al igual que la estabilidad seca, cuando se adicionan porcentajes superiores al 3% cae la estabilidad y los valores obtenidos estarían por fuera de la norma.

16.4 ESTABILIDAD RESIDUAL

En los valores de estabilidad residual, se ve claramente que al adicionar GCR, la mezcla presenta una disminución del 6% por cada incremento del 1%. En consecuencia, llega un valor del 3.1% a partir del cual no se cumpliría la norma que castiga esta relación entre la estabilidad seca y la de inmersión, con el 75%.

Es decir, no puede existir una diferencia entre la toma de las dos estabilidades superiores al rango del 75%.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna, la fricción interna de las partículas del agregado está relacionada con características de la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad del ligante del asfalto, que para nuestro caso es emulsión asfáltica CRL-1. Un grado propio de fricción-cohesión interna en la mezcla previene que las partículas del agregado se desplacen unas con respecto a las otras, debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. En consecuencia, se debe sacrificar la presentación uniforme de la carpeta, es por eso que esta investigación se llevó únicamente a bacheo localizado y eventualmente funcionaría en vías con bajo flujo vehicular.

Nuestra mezcla cumple las características exigidas en la norma Invías 442P-17, y en general con las especificaciones de “Evaluación de mezclas asfálticas naturales mediante la aplicación del método Marshall modificado del Instituto norteamericano del asfalto”. Sin embargo, los autores expresan que en concordancia con las investigaciones realizadas, los ensayos para este tipo de mezcla podrían complementarse con los aplicados a bases granulares estabilizadas con emulsión asfáltica o con cemento, y evaluar directamente la resistencia mediante la norma, 341, en su numeral 4.2.

La máxima estabilidad seca de la mezcla se presentó en la briqueta No. 23 alcanzando una estabilidad corregida de 1296 lb, con contenido del 3% de GCR. La máxima estabilidad inmersa corregida se presentó en la briqueta No. 19 con valor de 977.41 lb, también con contenido del 3% de GCR. En las más bajas tenemos la mínima estabilidad seca de la mezcla; se presentó en la briqueta No. 32 alcanzando una estabilidad corregida de 702.73 lb, con contenido del 5% de

GCR. La mínima estabilidad inmersa corregida se presentó en la briqueta No. 33 con valor de 977.41 lb, también con contenido del 5% de GCR.

La máxima relación entre las densidades seca e inmersa, correspondiente a la estabilidad residual, se presentó en el consolidado de la mezcla SIN ADICIÓN DE GCR, con valor de 85.4503861%. La mínima relación entre las densidades seca e inmersa, correspondiente a la estabilidad residual, se presentó en el consolidado de la mezcla CON ADICIÓN AL 5% DE GCR, con valor de 74.3612082%, teniendo una diferencia del 11.0891779%.

Los autores se permiten informar que la adición de GCR, a mezclas asfálticas naturales es una realidad. Es una opción viable y ambientalmente sustentable, pero se deben caracterizar todas las mezclas antes de la ejecución de los trabajos, ya que cada corte en las minas de MAN presenta porcentajes de asfalto diferentes. La estabilidad en una mezcla asfáltica natural se podría mejorar con la adición de cemento gris en el llenante mineral o filler, que al actuar con la emulsión asfáltica formaría una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad y durabilidad en la mezcla asfáltica. La relación polvo mineral-asfalto, en cuanto más alta es ésta, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall, son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

16.5 FLUJO

Podemos analizar que el flujo en una mezcla asfáltica es la deformación y pérdida de medida vertical en un espécimen de prueba. Según los datos arrojados en el

laboratorio, las lecturas de flujo para nuestra mezcla fueron las siguientes: La máxima lectura de flujo se obtuvo en el consolidado de la mezcla adicionada con GCR al 5%, teniendo datos superiores al 16.98%, superando los rangos exigidos en la norma “Evaluación de mezclas asfálticas naturales mediante la aplicación del método Marshall modificado del Instituto norteamericano del asfalto”, dando una explicación más clara. A medida que adicionamos caucho la mezcla presenta mayores deformaciones sin llegar a la rotura, esto se debe a que el material interno se comporta como un elemento elástico, en consecuencia, la mezcla presentará tendencia a deformaciones superficiales de tipo corrimiento lateral, pero por otra parte tendrán mejor comportamiento a la fisuración por efecto de las cargas. La lectura de flujo que está en el centro de las especificaciones es la mezcla con adición de GCR del 3% presentando lecturas de 12.98, frente al 8, en las mezclas sin adición de GCR.

A medida que se incrementa la adición de GCR en las mezclas, presentan un comportamiento demasiado plástico y flexible, lo que sacrifica la versatilidad de las mezclas asfálticas a recuperar sus deformaciones. Dentro de las pruebas realizadas en el laboratorio, curiosamente los especímenes después de someterlos a la falla, a partir del 3% de adición de GCR, no presentaban rotura ni línea de falla. Sencillamente la máquina o prensa Marshall debía ser apagada ya que corría el riesgo de romper el soporte de la prensa, esto debido a que la mezcla presenta el comportamiento de un elastómero, sumado a la buena capacidad de absorber cargas y traducirlas en deformación, pero no en falla.

Las briquetas realizadas y compactadas con nuestra mezcla presentan densidades muy bajas comparadas con las mezclas asfálticas tradicionales, con diferencias hasta del 32.12%.

Las lecturas de estabilidad y flujo cumplen las especificaciones de la norma particular INVÍAS 442p, nuestra mezcla asfáltica natural adicionada con gránulo de caucho reciclado al 3%, es la que mejor desempeño tiene estructuralmente para realizar bacheos localizados y obras simples de pavimentación con mezclas

asfálticas, pero lo más importante y para evidenciar el fin de esta investigación es que podemos convertir en un botadero de desechos de llantas usadas, todos los trabajos de reparación de pavimentos flexibles, cruces de servicios públicos domiciliarios, construcción de reductores de velocidad y bacheos localizados, nuestra mezcla es una muy buena opción para tener unos trabajos ambientalmente sostenibles y con el mínimo posible de emisión de gases contaminantes a la atmosfera, reducción de tiempos de ejecución de los trabajos y mayor inversión social en puestos de trabajo de mano de obra no calificada.

16.6 MEZCLA ÓPTIMA DEL MAN VERDE

Los resultados de nuestra investigación se evidencian en la Tabla 56.

Tabla 56. Resultados óptimos MAN VERDE

MEZCLA ÓPTIMA MAN VERDE	
PORCENTAJE DE ASFALTO	8,00%
GCR	3,00%
HUMEDAD ÓPTIMA	7,40%
CANTIDADES DE CADA UNO DE LOS MATERIALES POR M3	
DENSIDAD (MAN)	1977 kg/m3
(GCR)	59,31 kg/m3
EMULSIÓN ASFÁLTICA (CRR-1)	102,80 kg/m3
DENSIDAD MAN VERDE	2139 kg/m3

Fuente: Elaborado por el autor.

16.7 REPARCHEOS LOCALIZADOS DE PRUEBA

Dentro de nuestra investigación y desarrollo del trabajo de grado, decidimos poner a prueba de forma real los resultados obtenidos. Por iniciativa de los autores se desarrolló un reparcheo localizado en el Colegio Emilio Valenzuela, ubicado en la ciudad de Bogotá, en la Carrera 68 No 180-45. Allí realizamos todos los trabajos desde el corte, demolición, cargue y retiro de escombros, compactación de la rasante y aplicación de nuestra Mezcla Asfáltica Natural (MAN), con adición de gránulo de caucho reciclado (GCR) (Figuras 60-61-62). Para la realización de los trabajos se contó con la siguiente herramienta y recurso humano.

- Cortadora de asfalto.
- Compactador de pata tipo canguro.
- Mezclador tipo trompo.
- Vibro compactador.
- Doble troque.
- Balanza.
- Herramienta menor.
- 1 maestro de obra.
- 5 ayudantes de obra.

16.8 PROCEDIMIENTO

Figura 58. Marcado y corte del asfalto deteriorado para reparcheo con MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 59. Demolición y cargue de escombros procedentes del asfalto deteriorado.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 60. Compactación de la rasante de los bacheos localizados.



Fuente: Elaborado por el autor.

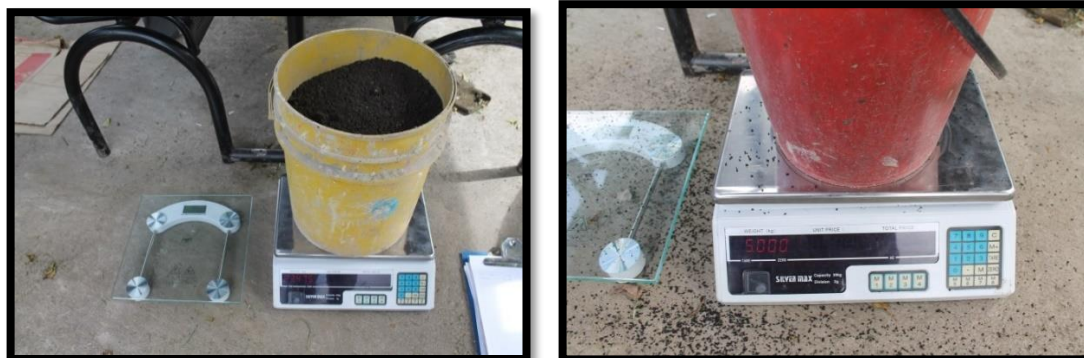
En las Figuras 61-62-63-64, podemos apreciar el procedimiento para realizar la mezcla MAN VERDE. Se descargó de a poco el material (MAN), se pesó el porcentaje de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), se alistó el imprimante en canecas de 5 galones y se mezcló todo en la mezcladora tipo trompo.

Figura 61. Imprimación de los sitios a intervenir y descargue de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 62. Dosificación de cada uno de los componentes de la mezcla MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 63. Mezcla de todos los componentes en el trompo.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 64. Extendida de la mezcla MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 65, 67. Compactación de la mezcla MAN VERDE.



Fuente: Elaborado por el autor.

Para este trabajo se realizaron 60.21 m² de reparcho localizado, con un espesor promedio de 0.10 m, en capas de 0.05 m, cada una. Los volúmenes y precios se describen en la Tabla 57.

Tabla 57. Volúmenes de material y costos aproximados, solo MAN VERDE.

REPARCHEO COLEGIO EMILIO VALENZUELA				
		MAN m3	GCR kg	CRR-1 lt
		6,021	357,1	618
PRECIO DE MAN VERDE * M3				
ITEM	UND	CANTIDAD	V/UNITARIO	V/TOTAL
MAN	M3	6,021	\$ 200.000,00	\$ 1.204.200,00
GCR	KG	357,1	\$ 1.200,00	\$ 428.520,00
CRR-1	LT	618	\$ 750,00	\$ 463.500,00
EXTENDIDA	Y			
COMPACTADA	M3	6,021	\$ 30.000,00	\$ 180.630,00
TOTALES				\$ 2.276.850,00
VALOR * M3				\$ 378.151,47

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 66, 67. A continuación, se muestra la evolución el antes y después del trabajo de reparcheo en el Colegio Emilio Valenzuela.

Figura 66. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 67. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 68,69,70. Se muestra la evolución. El antes y después del trabajo de reparcheo en el Colegio Emilio Valenzuela.

Figura 68. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 69. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.



Fuente: Elaborado por el autor.

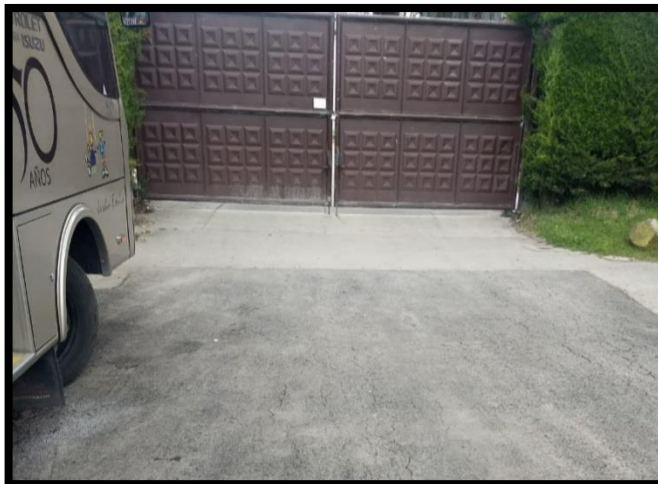
Figura 70. Trabajo finalizado 23 de junio de 2018.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 71. El segundo trabajo de reparcheo localizado con nuestro MAN VERDE, lo realizamos en el parqueadero de expreso Bolivariano en el municipio de Soacha, Cundinamarca, ubicado en la Carrera 4 No. 99. Para este trabajo se colocó una capa de 0.075 m, de espesor.

Figura 71. Fotografía tomada 22 de febrero de 2019, a 8 meses de terminación y entrega.



Fuente: Elaborado por el autor.

En las Figuras 72,73,74, se muestra la evolución. El antes y después del trabajo de reparcheo en el parqueadero de Expreso Bolivariano en el municipio de Soacha, Cundinamarca.

Figura 72 Extendida y compactado de MAN VERDE



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 73. Trabajo finalizado el 11 de julio de 2018.



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 74. Fotografía tomada 20 de febrero de 2019, a 7 meses de terminación y entrega.



Fuente: Elaborado por el autor.

Para este trabajo se realizaron 57.2 m² de reparcheo localizado, con un espesor promedio de 0.075 m, en una sola capa. Los volúmenes y precios se describen en la Tabla 58.

Tabla 58. Volúmenes de material y costos aproximados, solo MAN VERDE.

REPARCHEO PARQUEADERO EXPRESO BOLIVARIANO		
---	--	--

MAN m3	GCR kg	CRR-1 lt
4,29	254,43	441

PRECIO DE MAN VERDE * M3				
--------------------------	--	--	--	--

ITEM	UND	CANTIDAD	V/UNITARIO	V/TOTAL
MAN	M3	4,29	\$ 200.000,00	\$ 858.000,00
GCR	KG	254,43	\$ 1.200,00	\$ 305.316,00
CRR-1	LT	441	\$ 750,00	\$ 330.750,00
EXTENDIDA Y COMPACTADA	M3	4,29	\$ 30.000,00	\$ 128.700,00
TOTALES				\$ 1.622.766,00
VALOR * M3				\$ 378.151,47

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 75 se muestran experiencias en los trabajos de la calle 15 entre carreras 4 y 16 en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.

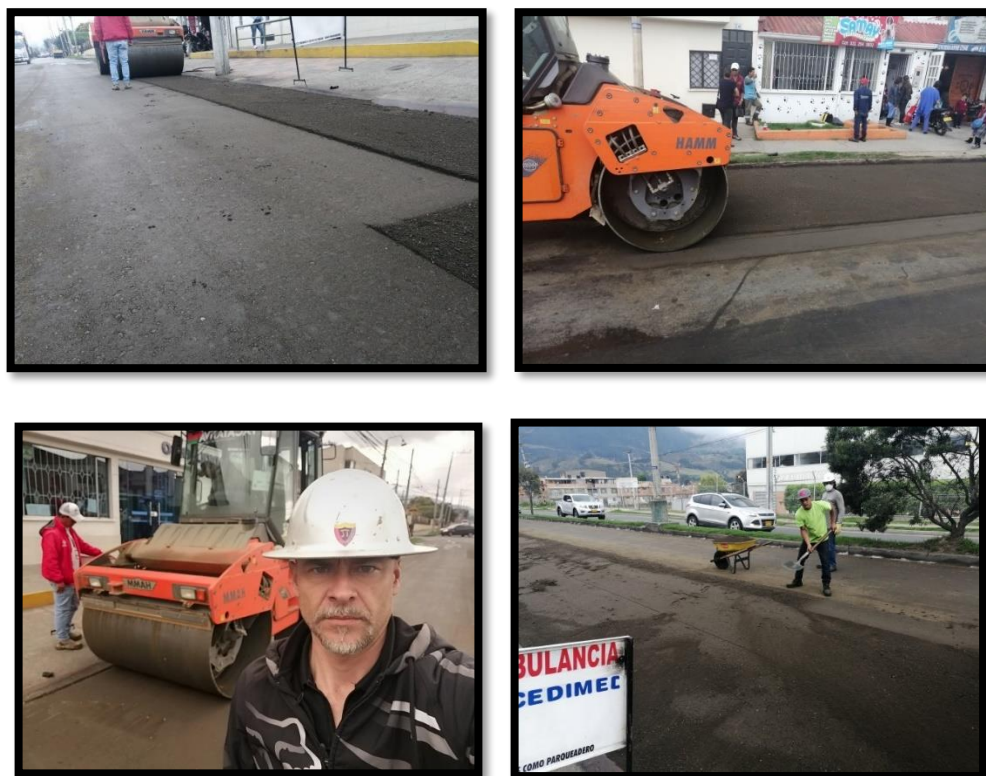
Figura 75. Extendida y compactada de 150 m³ de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

La Figura 76 muestra experiencias en los trabajos de la calle 15 entre carreras 4 y 16 en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.

Figura 76. Extendida y compactada de 150 m3 de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 77,78 evidenciamos experiencias en los trabajos de la calle 15 entre carreras 4 y 16 en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.

Figura 77. Extendida y compactada de 150 m³ de Mezcla Asfáltica Natural (MAN).



Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 78. Experiencias en los trabajos de la calle 15 entre carreras 4 y 16 en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.



Fuente: elaborado por el autor.

Nota: Vista final del tramo extendido y compacto, 200 m.l * 7.50 m de ancho, con un espesor de 0.075 m. El contrato fue realizado en conjunto con la Alcaldía de Facatativá, quien suministró la maquinaria y personal de mano de obra; el Gremio de transportadores de Ecopetrol, quienes aportaron el dinero para la compra de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN); la empresa EASY-OBRA S.A.S, que suministró la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), y los profesionales expertos en la construcción de las capas de rodadura.

17 PRESUPUESTO DE TRABAJO DE GRADO

En la Tabla 59 se plasman los costos aproximados del trabajo de investigación y puesta en marcha del reparcheo localizado.

Tabla 59. Presupuesto trabajo de grado.

VALOR TRABAJO DE GRADO INCLUYE MATERIALES Y MANO DE OBRA					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	V/UNITARIO	V/TOTAL
1	VISITA MINA DE ASFALTO NATURAL	GL	2	\$358.000,00	\$716.000,00
2	VISITA EMPRESA RECICLADORA	GL	2	\$120.000,00	\$240.000,00
3	ELABORACION DE INFORMES Y TRABAJO ESCRITO	GL	1	\$1.500.000,00	\$1.500.000,00
4	ENSAYOS DE LABORATORIO	GL	1	\$4.800.000,00	\$4.800.000,00
5	SUMINISTRO Y TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA NATURAL (MAN)	M3	15	\$245.000,00	\$3.675.000,00
6	COMPRA GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	KG	1000	\$1.200,00	\$1.200.000,00
7	COMPRA IMPRIMANTE CRL-1	LT	1000	\$750,00	\$750.000,00
8	ALQUILER MAQUINA MEZCLADORA	DIA	5	\$60.000,00	\$300.000,00
9	ALQUILER MAQUINA CORTADORA DE ASFALTO	DIA	2	\$60.000,00	\$120.000,00
10	ALQUILER COMPACTADOR DE PATA	DIA	3	\$60.000,00	\$180.000,00
11	ALQUILER MINICARGADOR	DIA	2	\$250.000,00	\$500.000,00
12	MANO DE OBRA EXCAVACION Y RETIRO DE SOBRANTES	DIA	5	\$300.000,00	\$1.500.000,00
13	SEGUIMIENTO Y CONTROL DE LOS TRABAJOS	GL	1	\$1.250.000,00	\$1.250.000,00
14	PLANOS E INFORME FOTOGRAFICO	GL	1	\$1.250.000,00	\$1.250.000,00
	VALOR TOTAL PRESUPUESTO				\$17.981.000,00

Fuente: Elaborado por el autor.

18 RECURSOS

La financiación de este proyecto de grado fue gracias a la colaboración de las empresas, Vialtech Ltda, y MW Ingeniería S.A.S, las cuales son propiedad del Ingeniero JUAN DAVID VILLEGAS CAMARGO y el Ingeniero LUIS MAURICIO WILCHEZ GÓMEZ, respectivamente. De esta forma, todos los recursos llegaron por medio de fuentes propias, en un porcentaje de 50% por cada uno de los autores. El laboratorio de calidad y asfaltos INGEOTEC N&L S.A.S, como colaboración, nos concedió un descuento del 20% en los ensayos de materiales.

El Colegio Emilio Valenzuela en su gran apoyo, nos subsidió algunos materiales para realizar el reparcheo dentro de sus instalaciones.

Se anexan las cartas de apoyo al trabajo de investigación por parte de cada una de las empresas colaboradoras.

19 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES EN MESES

En la tabla 60 se muestra la duración del trabajo de investigación mes tras mes.

Tabla 60. Presupuesto trabajo de grado.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES										
ITEM	ACTIVIDADES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8	MES 9
1	INVESTIGACION									
2	REALIZACION TRABAJO ESCRITO									
3	VISITA A MINA DE ASFALTO NATURAL									
4	VISITA A LA EMPRESA DE RECICLAJE									
5	REUNION CON TUTOR DE LA TESIS									
6	APROBACION DEL ANTEPROYECTO DE GRADO									
7	REALIZACION DE CAMBIOS Y MEJORAS AL INFORME INICIAL									
8	REALIZACION DE ENSAYOS DE LABORATORIO									
9	PREPARACION DE INFORMES									
10	TRAMO DE PRUEBA IN SITU									

Fuente: Elaborado por el autor.

20 INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Dentro de nuestro trabajo de investigación aplicada, podemos concluir que los asfaltos naturales y el gránulo de caucho reciclado, están clasificados en la resolución 10099 de 27 de diciembre de 2017, como materiales alternativos e innovadores.

De acuerdo con nuestra investigación, no se encontraron resultados similares o iguales a la utilización de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN) con adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) para reparcho localizado.

21 CONCLUSIONES

Dentro de nuestra investigación, la mezcla óptima de nuestro MAN VERDE debe tener el 8% de contenido de asfalto y el 3% de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), por peso adicionado, respecto a la mezcla que se quiera modificar.

21.1 CAMPO AMBIENTAL

Lo más importante, y para evidenciar la finalidad de nuestra investigación, se concluye que podemos utilizar los residuos de llantas usadas como modificador de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN), prolongando su vida útil, incrementando su estabilidad, mejorando la adherencia, disminuyendo el ruido y aportando materiales de construcción de vías más ecológicos y limpias; así todos los trabajos de reparcheos de pavimentos flexibles, cruces de servicios públicos domiciliarios, construcción de reductores de velocidad y bacheos localizados, serían trabajos ambientalmente sostenibles y con el mínimo posible de emisión de gases contaminantes a la atmosfera. Además, reducción de tiempos de ejecución de los trabajos y mayor inversión social en puestos de trabajo de mano de obra no calificada.

Con el uso de la Mezcla Asfáltica Natural (MAN) se reduciría la extracción de materiales pétreos de canteras y ríos, evitando el deterioro ambiental que esto genera.

El aprovechamiento de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), por cada llanta tipo de automóvil es de 3 kg. Quiere decir que por cada m³ de MAN VERDE instalado, se necesitarían 59.31 kg de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) y se reciclarían 20 llantas en promedio.

El consumo de combustible de las plantas depende mucho de la altura sobre el nivel del mar, de la humedad de los agregados y de la fórmula de la mezcla, así

como del tipo de cemento asfáltico. En general los consumos van de los 5,5 hasta los 12 litros por m³ de mezcla asfáltica en caliente y el factor de emisión de CO₂ a la atmosfera por litro de combustible Diésel es de 2.471 kgCO₂/l. Esto quiere decir que para producir un m³ de mezcla asfáltica tradicional se generarían 29.65 kgCO₂/l. Utilizando nuestro MAN VERDE evitaríamos este tipo de contaminación a la atmosfera.

La reducción de material particulado en producción de nuestra mezcla, comparada con una mezcla asfáltica tradicional, es del 48%.

La adición de gránulo de caucho reciclado a mezclas asfálticas naturales podría proveer de puestos de trabajo a 0.13 personas por m³.

Para la producción de nuestro MAN VERDE utilizado en los reparcheos localizados utilizamos aproximadamente 800 kilos de gránulo de caucho reciclado, equivalente al reciclaje de 266 llantas usadas.

Si los gobernantes de turno consideraran esta opción ambientalmente sostenible, los municipios y grandes ciudades se librarían del problema de las llantas usadas.

Vamos a patentar una mezcla prefabricada auto sostenible y ambientalmente amigable con nuestro planeta.

21.2 CAMPO TÉCNICO

Se cumplieron los objetivos generales y específicos de nuestro trabajo de grado.

La utilización de nuestro MAN VERDE, técnicamente cumple con la norma INVÍAS 442p.

La implementación de nuestro trabajo de grado cumplió las expectativas técnicas y de solución a bacheos localizados, no solamente en los estudios realizados, si no comprobados en terreno.

Se debe tener en cuenta que este tipo de mezclas asfálticas naturales presentan un comportamiento muy diferente a la mezcla asfáltica en caliente tradicional. Las resistencias alcanzadas equivalen al 41% de mezclas en caliente.

Mejoras en los asfaltos con (GCR)

- Acción de mejoramiento en procesos medio ambientales.
- Se pretende utilizar el grano de caucho proveniente del reciclado de las llantas en desuso.
- Mejora de manera significativa algunas de las propiedades de los cementos asfálticos convencionales que se manejan en nuestro mercado.
- Son menos susceptibles al fisuramiento y a las deformaciones ocasionadas por bajas temperaturas.
- Mejoramiento en el comportamiento ante el fenómeno de la fatiga.

El efecto del agua sobre este tipo de mezclas reduce su resistencia en porcentajes hasta del 22.5%, en comparación con las resistencias secas.

La adición de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), mejora la estabilidad de las mezclas asfálticas naturales.

El flujo aumenta a mayor adición de gránulo de caucho reciclado.

La resistencia conservada solo cumple para porcentajes de adición de caucho de hasta el 3%. Superando este porcentaje no cumpliría la exigencia de la norma.

Dentro de los cálculos realizados a lo largo de nuestra investigación (teniendo en cuenta que fue muy poco el volumen de MAN VERDE diseñado, las condiciones de transporte y los problemas encontrados con la maquinaria manual utilizada) el

costo aproximado de M3, sería de \$378.151 pesos, teniendo una reducción en costos frente a una mezcla asfáltica tradicional en caliente del 36.97%.

Nuestro MAN VERDE es 100% reciclable, mediante el uso de fresado.

Si lográramos patentar nuestro MAN VERDE y comercializarlo por kilos, la situación económica cambiaría de la siguiente forma: el valor por kilo rondaría los \$200, pero el bulto de 25 kilos en el mercado empacado para utilización de inmediato se comercializaría a \$25.000. Es decir, cada m3 valdría en esa presentación \$2.139.000, contra los costos reales estimados con el empaque, almacenamiento y transporte, que serían aproximadamente \$500.000, teniendo una ganancia de \$1.639.000 por m3.

Al tener el material de inmediato, todos los trabajos de reparcheo se terminarían en menos tiempo. Lo cual produciría menos incomodidades para los usuarios de las vías, traduciendo esto en menores costos finales para el contratista.

La comercialización de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) tendría un crecimiento del 50%, respecto a la de hoy en día. Este porcentaje se vería reflejado en menos llantas usadas en las calles y en mayores puestos de trabajo, tanto para recicladores como para las empresas que procesan los neumáticos.

Las mezclas asfálticas naturales están exentas de IVA.

Mediante la creación de planes piloto en los departamentos se podría dar a conocer las ventajas económicas y ambientales para la pavimentación de los 146.000 kilómetros de la red terciaria existente en Colombia.

Se mejorarían las condiciones de transporte para la recolección de productos del campo en sitios alejados de los grandes centros urbanos.

Se aprovecharían de forma inmediata los yacimientos y minas de mezclas asfálticas naturales que existen en Colombia, desarrollando e incrementando la productividad en los departamentos de Boyacá, Tolima, Caldas y Caquetá.

Dentro de la experiencia del reparcheo, se evidencia que luego de 8 meses de la construcción, nuestro MAN VERDE presenta un desempeño satisfactorio frente a la acción del tránsito y del clima. Puntualmente, en la entrada de acceso al parqueadero del Colegio Emilio Valenzuela, se evidencian algunas fisuras longitudinales, las cuales se formaron por el efecto del agua sobre la capa asfáltica natural. La vía no presenta buen bombeo ni sistemas efectivos de evacuación de las aguas procedentes de la escorrentía superficial.

La experiencia adquirida en los trabajos del municipio de Facatativá, evidencia que la utilización de las mezclas asfálticas naturales también se puede utilizar en vías con alto volumen de tránsito.

Concluimos que nuestro MAN VERDE también puede ser utilizado en vías con bajos volúmenes de tránsito.

Dentro de nuestra investigación concluimos que la Mezcla Asfáltica Natural (MAN), procedente de la mina San Pedro, en el municipio de Armero Guayabal, presenta características similares durante su extracción en cantera. Con intervalos de tres meses se tomaron caracterizaciones al material sin encontrar diferencias que alterasen los resultados.

Podemos crear una mezcla con insumos naturales y reciclados, cumpliendo con las especificaciones técnicas y dando una solución ambiental al tratamiento de residuos de llantas usadas.

Nuestro MAN VERDE presenta alta lectura de flujo, lo que finalmente se puede reflejar en ahuellamiento y en deformaciones de la superficie de rodadura, bajo altas repeticiones de carga.

La explotación de Mezclas Asfálticas Naturales (MAN) traería progreso a los municipios donde se encuentran las minas, mediante el pago de ICA.

Nuestro MAN VERDE es un producto innovador y ecológico.

Continuaremos con nuestra investigación hasta obtener una mezcla que se pueda almacenar en bolsas de 25 kg, y con fechas de expiración hasta de un año.

Para la evaluación del comportamiento de nuestra MAN VERDE, utilizado en el parqueadero de Expreso Bolivariano en el municipio de Soacha, realizamos un conteo de vehículos. Este arrojó resultados de 25 vehículos, tipo bus metropolitano por día, y una velocidad promedio de 10 km/hora, lo que la sitúa en un tipo de vía NT-1, el cual corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN, en el carril de diseño, vías con bajo volumen de tránsito. De acuerdo con la velocidad vehicular podemos afirmar que es inversamente proporcional al tiempo de aplicación de la carga sobre la superficie del pavimento. Por esta razón, los materiales de las diferentes capas de un pavimento presentan un mayor módulo de elasticidad a menor tiempo de aplicación de la carga, por lo tanto, en las vías de los parqueaderos las cargas ejercidas por los buses son más nocivas que en una vía con mayor velocidad de operación. A 8 meses de realizado el reparcheo, en promedio han circulado 6.000 vehículos tipo bus metropolitano, con peso superior a las 8 toneladas. Podemos afirmar que nuestro MAN VERDE presenta un buen comportamiento a deformaciones y falla por causa de carga y factores climáticos.

También podemos afirmar que con la aplicación de Mezcla Asfáltica Natural (MAN) en la Calle 15 del municipio de Facatativá, donde el nivel de tránsito es NT-3, que corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño, tiene un desempeño favorable. Aclaramos que esta pavimentación tiene 6 meses de construida y que, según las investigaciones hechas, los constructores realizan un riego de liga con productos emulsificantes adicionados con polímeros, lo que ayuda enormemente a la solidez de la mezcla asfáltica natural; y, obviamente, no nos compartieron los componentes de este modificador, por esta razón no podemos comparar la mezcla utilizada en Facatativá y nuestro MAN VERDE.

22 RECOMENDACIONES

Los autores de la presente investigación recomiendan realizar la caracterización de la mezcla asfáltica natural como sale de la mina, evaluar sus características granulométricas y definir si necesita o no, aporte de agregados.

Por nuestra experiencia en la utilización de Gránulo de Caucho Reciclado (GCR), se recomienda utilizar la porción comprendida entre el tamiz No. 30 y el tamiz No. 40, para obtener mejores resultados.

Los autores de esta investigación recomiendan la utilización de MAN VERDE para la construcción de ciclorutas y pistas de entrenamiento deportivo.

Se recomienda la utilización de emulsiones asfálticas certificadas por el fabricante para así garantizar que el porcentaje de asfalto residual sea el real. De lo contrario se estaría adicionando más agua y menos asfalto a la Mezcla Asfáltica Natural (MAN).

Complementando el artículo INVÍAS 442p-17 se recomienda evaluar la mezcla asfáltica natural mediante la realización de ensayos de laboratorio, siguiendo las especificaciones de mezclas asfálticas en frío, MAF.

Para la mezcla en patio se aconseja sacar el sobre tamaño de forma manual y mediante procesos visuales selectivos.

Se recomienda no sobrepasar el 3% de gránulo de caucho reciclado adicionado a mezclas asfálticas naturales.

23 DESVENTAJAS

Dentro de nuestra investigación encontramos las siguientes desventajas en la utilización de Mezcla Asfáltica Natural (MAN), adicionada con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) para bacheo localizado.

- Altos costos de transporte para obras en el interior del país.
- Necesidad de tener acopios en el sitio de las obras para poder realizar la mezcla mediante mini cargadores o retroexcavadoras.
- Para altos volúmenes de mezcla, se debe contar con los insumos de gránulo de caucho reciclado con bastante antelación.
- Se debe disponer de un sistema irrigador que adicione la emulsión asfáltica de una forma homogénea.
- Se debe disponer de un laboratorio cerca de los trabajos de pavimentación para realizar las correcciones a la mezcla inmediatamente.
- La Mezcla Asfáltica Natural (MAN), adicionada con gránulo de caucho reciclado (GCR) presenta alta lectura de flujo, lo que finalmente se podría reflejar en ahuellamiento y formación de corrimientos laterales en la carpeta de rodadura.
- Se debe contar con buenos sistemas de evacuación de aguas de escorrentía superficial en las vías construidas con Mezcla Asfáltica Natural (MAN), adicionada con Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) para bacheo localizado.
- El control de calidad es más riguroso frente a la utilización de otro tipo de mezcla asfáltica en caliente.
- Se debe contemplar la ejecución de carriles de prueba para vías terciarias.

24 BIBLIOGRAFÍA

ABRAHAM, y otros. Recent Advances in the Recycling of Rubber Waste. [aut. libro] Fainleib y Grigoryeva. *Recent Developments in Polymer Recycling*. Kerala: Transworld Research Network, 2011, pp. 47-100.

ADHIKARI, B y MAITI, S. *Reclamation and recycling of waste rubber*. 7, 2000, Progress in Polymer Science, Vol. 25, pp. 909-948. [http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700\(00\)00020-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700(00)00020-4).

ALCALDÍA MUNICIPAL DE FACATATIVÁ CUNDINAMARCA. Página de inicio. *Alcaldía Municipal de Facatativá Cundinamarca*. [En línea] s.f. [Citado el: 8 de marzo de 2019.] <http://www.facatativa-cundinamarca.gov.co/noticias/alcaldia-de-facatativa-llegara-con-todos-sus-servicios>.

AMERICAN STANDARD TEST METHODS [ASTM]. *ASTM F726 - Standard Method of Testing Sorbent Performance of Adsorbents E1*. s.l.: ASTM, 1993.

ANDERSON, M, y otros. *A Case Study of Tire Crumb Use on Playgrounds: Rise Analysis and Communication when Major Clinical Knowledge Gaps Exist*. 11, Environmental Health Perspectives, pp. 1-3.

ARBELÁES PATIÑO. *Estudio en tramos de prueba del comportamiento de mezclas de gradación densa, elaboradas en caliente con ligante asfáltico modificado con gránulo de caucho reciclado de llantas usadas. Trabajo de grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2015.

AYLÓN, E, y otros. *Enhanced heavy metals removal and recovery by mesoporous adsorbent prepared from waste rubber tire.* 2006, Fuel Processing Technology, Vol. 87, págs. 143-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.104>.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE [CONAMA]. RESOLUÇÃO 416. *Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências.* Brasília: s.n., 2009.

CÁMARA COLOMBIANA DE INFRAESTRUCTURA. Página de inicio. *Cámara Colombiana de Infraestructura.* [En línea] s.f. [Citado el: 5 de marzo de 2019.] <http://www.infraestructura.org.co/2017/>.

CARRASCO FLORES, Dean Orestes. *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias. Trabajo de grado.* Perú: Universidad de Piura, 2004.

CARVALHO, y otros. *Syntheses, spectroscopic characterization, crystal structure and natural rubber vulcanization activity of new disulfides derived from sulfonyldithiocarbimides.* s.l.: El Sevier, 2013, Vol. 1048, pp. 244-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.05.062>.

CHONG, Joanne, y otros. *Product Stewardship Schemes in Asia: China, South Korea, Japan and Taiwan. Institute for Sustainable Futures.* [En línea] University of Technology Sydney, julio de 2009. [Citado el: 5 de marzo de 2019.] <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/86ada0a0-8c0a-4ad0-b925-67b81a27463b/files/product-stewardship-asia.pdf>.

COLOMBIA. ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. DECRETO 442. *Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones.* Bogotá: s.n., 2015.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. RESOLUCIÓN 1326. *Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.* Bogotá: s.n., 2017.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. RESOLUCIÓN 1457. *Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones.* Bogotá: s.n., 2010.

DÍAZ CLAROS, César Mauricio. *Implementación del grano de caucho reciclado (gcr) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. Trabajo de grado.* Bogotá: Universidad Santo Tomas, 2017.

DUAN, Y y STAMMLER, S. *Patent No. CA2197186 A1.* Canadá: s.n., 1996.

EASY OBRAS S.A.S. Página WEB. [En línea] s.f. <https://easyobras.com/eventos/>.

EL ESPECTADOR. ¿Iglús en Colombia? Sí, pero de llantas de desecho. *Nacional*. [En línea] 27 de marzo de 2015. [Citado el: 4 de febrero de 2019.] <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/iglus-colombia-si-de-llantas-de-desecho-articulo-551771>.

EUROPEAN TIRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION [ETRMA].
Statics Booklet. Bruselas: s.n., 2014.

EUROPEAN TYRE & RUBBER MANUFACTURERS' ASSOCIATION [ETRMA].
End of Life Tyres: A Valiable Resource with Growing Potential. Bruselas: s.p.i, 2010.

FANG, Yi, ZHAN, Maosheng y WANG, Ying. *The status of recycling of waste rubber.* 2, s.l.: Science Direct, 2001, Vol. 22, pp. 123-128.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(00\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(00)00052-2).

FORREST, Martin. *Recycling and Re-use of Waste Rubber.* Shrewsbury: s.n., 2014, Smithers Rapra Technology, pp. 17-30.

GARCÍA BURGOS, Jaime Francisco. *Influencia del triturado de restos de llantas como agregados en mezclas asfálticas. Trabajo de grado.* Cartagena: Universidad de Cartagena, 2014.

INCOASFALTOS. Página de inicio. *Incoasfaltos.* [En línea] s.f. [Citado el: 17 de marzo de 2019.] <http://www.incoasfaltos.com/>.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. *IDU.* [En línea] 23 de septiembre de 2002. [Citado el: 25 de febrero de 2019.]
https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Normas Técnicas Instituto de Desarrollo Urbano Bogotá. *IDU*. [En línea] 2011. [Citado el: 14 de febrero de 2019.] <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/portafolio-inno>.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas Técnicas Instituto Nacional de Vías. [En línea] 2013. [Citado el: 5 de febrero de 2019.] <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>.

INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP. Latest World Rubber Industry Outlook now available from IRSG. [En línea] 6 de enero de 2015. [Citado el: 2 de marzo de 2019.] <http://www.rubberstudy.com/news-article.aspx?id=5081&b=earlier-news.aspx>.

LAGARINHOS, C y TENÓRIO, J. *Logística reversa dos pneus usados no brasil*. 1, Brasilia: s.n., 2013, Polímeros, Vol. 23, pp. 49-58.

MALAYSIAN RUBBER STATISTICS. *Natural rubber statistics*. Malaysia: Credible Rubber Pricing Systems, 2016.

MANUEL y DIERKES. Recycling Rubber. [aut. libro] R. Dolbey. *Rapra Technology Limited*. Shropshire: s.n., 1997, pp. 3-27.

MEDDAH, y otros. *Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement*. 1, 1 de junio de 2014, Journal of Cleaner Production, Vol. 72, pp. 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>.

MICOR RECYCLING LTD. Centro de Conocimiento. [En línea] s.f. [Citado el: 18 de febrero de 2019.] <http://www.micorrecycling.com/knowledge.php>.

MPI ESPECIALISTAS EN ASFALTO. Página de inicio. *MPI Especialistas en Asfalto.* [En línea] s.f. [Citado el: 26 de enero de 2019.] <http://www.mpi.net.co/index.html>.

NEHDI, M y KHAN, A. *Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications.* 1, s.l.: Cement, Concrete and Aggregates, 2001, Vol. 23. 0149-6123.

PELÁEZ, G, VELÁSQUEZ, S y GIRALDO, D. *Aditivos para el procesamiento del caucho natural y su aplicación en pequeñas plantaciones de caucho.* 2, 2014, Informador Técnico, Vol. 78, pp. 166-174.

PÉREZ VERDUGO, Rafael Humberto. *Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia. Trabajo de grado.* Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2014.

PORTAL DEL PETRÓLEO. Página de inicio. *Portal del Petróleo.* [En línea] s.f. [Citado el: 21 de marzo de 2019.] <http://www.portaldelpetroleo.com/>.

RAMIREZ VILLAMIZAR. *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá. Trabajo de grado.* Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2014.

RAMÍREZ, V y ANTERO, J. *Evolución de la normativa ambiental colombiana en función de las tendencias mundiales de desarrollo sostenible.* 2013, Revista NOOS, Vol. 3, pp. 34-55.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México. [En línea] 2014. [Citado el: 6 de marzo de 2019.] <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>.

SIENKIEWICZ, Maciej, y otros. *Progress in used tyres management in the European Union: A review.* 10, 2012, Waste Management, Vol. 32, pp. 1742-1751.

SPIZZUOCO, M, CALABRESE, A y SERINO, G. *Innovative low-cost recycled rubber–fiber reinforced isolator: experimental tests and finite element analyses.* 2014, Engineering Structures, Vol. 76, pp. 99-111.

TORRES OSPINA, Hermes Andrés. *valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad en concreto adicionado con residuo de llantas de caucho. Trabajo de grado.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014.

VENEGAS RAMÍREZ, Laura Carolina. *Evaluación del comportamiento de granulo de caucho de llanta reciclada en la producción de concreto para la empresa Argos. Trabajo de grado.* Bogotá: Fundación Universitaria de América, 2016.

VILLEGAS CAMARGO, Juan David. *Adición in situ de granulo de caucho reciclado a mezclas densas en caliente para reducción de residuos sólidos. Trabajo de grado.* Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares, 2011.

YUNG VARGAS, Yee Wan. *Análisis comparativo del proyecto de norma de 044-16 con la especificación IdU 560 y con el artículo Invías 467-13 y la norma inv-e-824-13 de mezclas asfálticas con grano de caucho mejorado. Trabajo de grado.* Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2016.

YUNG VARGAS, Yee Wan. *Caracterización, diseño y verificación de una mezcla asfáltica drenante en caliente modificada con grano de llanta triturado y fibra kaltex.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2013.