# INFLUENCIA DEL TRITURADO DE RESTOS DE LLANTAS COMO AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

**JAIME FRANCISCO GARCÍA BURGOS**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**
**2014**

# INFLUENCIA DEL TRITURADO DE RESTOS DE LLANTAS COMO AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS


**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: MATERIALES**

**DOCENTE INVESTIGADOR:**

**MODESTO BARRIOS FONTÁLVO**

**AUXILIAR DE LA INVESTIGACIÓN:**

**JAIME FRANCISCO GARCÍA BURGOS**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**


**2014**

## Tabla de contenido

RESUMEN ..... 11

1. INTRODUCCIÓN ..... 12

2. MARCO DE REFERENCIA ..... 21

2.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE ..... 21

2.1.1. Triturado de residuos de llantas incorporados como agregados pétreos en la producción de mezclas asfálticas. ..... 21

3. MARCO TEÓRICO ..... 30

3.1 ¿Qué es un Pavimento? ..... 30

3.1.1 Tipos de pavimentos ..... 30

3.1.1.1 Pavimento Flexible ..... 30

3.1.1.2 Pavimentos en concreto rígido: ..... 31

3.1.2 ¿Qué es una mezcla asfáltica? ..... 31

3.1.3 Composición de las mezclas asfálticas ..... 32

3.1.3.1 Ligante asfáltico: ..... 32

3.1.3.2 Propiedades principales de los cementos asfálticos ..... 34

3.1.3.3 Agregados o Materiales Pétreos ..... 36

3.1.3.4 Ensayos a los materiales pétreos: ..... 37

3.1.3.5 Llenante Mineral ..... 40

3.1.4 Llenante Mineral Objeto De Investigación ..... 41

3.1.4.1 Triturado de restos de llantas (GCR) ..... 41

3.1.5 Tipos de mezclas Asfálticas ..... 43

3.1.5.1 Mezclas Asfálticas en Frío: ..... 43

3.1.5.2 Asfálticas en Caliente ..... 43

3.2 Diseño De Mezclas Asfálticas ..... 44
3.2.6 Métodos de diseño más conocidos: ..... 44
3.2.6.1 Método Marshall: ..... 45
3.2.6.1.1 Elaboración De La Mezcla Asfáltica Metodología Marshall ..... 47
3.2.7 Propiedades Consideradas Para El Diseño De Mezclas ..... 48
3.2.7.1 Estabilidad ..... 48
3.2.7.2 Durabilidad ..... 49
3.2.7.3 Impermeabilidad ..... 49
3.2.7.4 Trabajabilidad ..... 50
3.2.7.5 Flexibilidad ..... 50
3.2.8 Características de las mezclas asfálticas ..... 51
3.2.8.1 Densidad ..... 51
3.2.8.2 Vacíos De Aire ..... 52
3.2.8.3 Vacíos En El Agregado Mineral ..... 53
3.2.9 Contenido De Asfalto En Mezclas Bituminosas ..... 53
3.2.10 Elaboración De Muestras Para Ensayos De Una Mezcla Asfáltica ..... 55
3.2.11 Pruebas A Las Mezclas Asfálticas ..... 55
3.2.11.1 Pruebas Volumétricas ..... 55
3.2.11.2 Pruebas Mecánicas ..... 56
3.2.12 Cálculo Del Porcentaje Óptimo De Llenante Mineral ..... 57
3.2.13 Estabilidad Y Flujo De Mezclas Asfálticas ..... 57
4 OBJETIVOS ..... 58
4.2 OBJETIVO GENERAL ..... 59
4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 59

5 ALCANCE ..... 59
5.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL ..... 59
5.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL ..... 60
5.3 ALCANCE DEL PROYECTO ..... 61
6 METODOLOGIA ..... 64
6.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN ..... 65
6.1.1 Recolección de Información Primaria: ..... 65
6.1.1.1 Esquema de formatos para laboratorios ..... 65
6.1.1.2 Obtención de Materias Primas ..... 66
6.1.1.3 Caracterización: ..... 68
6.1.1.4 Combinación de materiales: ..... 69
6.1.1.5 Muestra Patrón: ..... 70
6.1.1.6 Preparación de muestra Patrón y de la mezcla modificada con incorporación de GCR para el análisis de la investigación: ..... 70
6.1.1.7 Preparación De Briquetas ..... 74
6.1.1.8 Equipos Para Ensayos A Compresión ..... 75
6.1.1.9 Ensayos de Laboratorio para determinar la Estabilidad y Flujo ..... 78
6.1.1.10 Datos recogidos: ..... 78
6.1.2 Recolección secundaria: ..... 79
6.1.2.1 Documentación: ..... 79
7 RESULTADOS Y DISCUSION ..... 80
7.1 Caracterización de Materiales ..... 80
7.2 Caracterización del Ligante Asfáltico ..... 81
7.3 Caracterización De Materiales Petreos ..... 83

7.3.1 Gradación Pasa ¾” ..... 84
7.3.2 Gradación Pasa ½” ..... 85
7.3.3 Gradación Arena Palmarito ..... 86
7.3.4 Gradación Arena Lavada ..... 87
7.3.5 Gradación GCR ..... 88
7.3.6 Ensayo de Abrasión Maquina de los Ángeles (E -218, E-219) ..... 89
7.3.7 Ensayo de Masa Unitaria (E -217) ..... 90
7.3.8 Ensayo de Solidez (E-220) ..... 93
7.3.9 Ensayo de Humedad Natural (E-122) ..... 94
7.3.10 Equivalente de Arena (E -133) ..... 95
7.3.11 Gravedad Específica ..... 96
7.3.12 Partículas Planas y Alargadas ..... 98
7.3.13 Porcentaje de Caras Fracturadas ..... 100
7.3.14 Contenido de Materia Orgánica ..... 101
7.4 Combinación de Materiales ..... 102
7.5 Gradaciones Con Variación De Grano De Caucho GCR ..... 106
7.6 Densidades Bulk de las briquetas ..... 119
7.7 Ensayo Marshall a muestra patrón y muestra modificada ..... 126
7.7.1 Estabilidad y Flujo de briquetas ..... 127
7.7.2 Comparación de Resultados: ..... 130
8 CONCLUSIONES ..... 139
9 RECOMENDACIONES ..... 141
10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 142
11. ANEXOS ..... 145

# TABLA DE CONTENIDO DE GRÁFICOS

Tabla 1 Indice de calidad en un cemento asfáltico ..... 33
Tabla 2 Características de las mezclas asfálticas ..... 39
Tabla 3 Valores recomendados con uso de Miga de Caucho..... 42
Tabla 4 Valores para tránsito de diseño (N) ejes equivalentes de 80KN CON >5X10^6. .. 63
Tabla 5 Rangos granulométricos MDC-2 ..... 69
Tabla 6 DOSIFICACIÓN DE GCR DEL 1.5% AL 4.0% ..... 73
Tabla 7 Reporte ensayos de Ensayos de Laboratorio..... 82
Tabla 8 Temperaturas Ligante ..... 83
Tabla 9 Gradación Triturada Pasa ¾" Cantera Rotinet. ..... 84
Tabla 10 Gradación pasa ½" ..... 85
Tabla 11 Gradación Arena P. ..... 86
Tabla 12 Gradación de Arena Lavada..... 87
Tabla 13 Ensayo Desgaste Maquina de los Ángeles..... 90
Tabla 14Datos sobre gradación, carga abrasiva y revoluciones ..... 90
Tabla 15 Ensayo de Masa Unitaria pasa ¾". ..... 91
Tabla 16 Ensayo de Masa Unitaria pasa 1/2" ..... 91
Tabla 17 Ensayo de Masa Unitaria Arena Triturada Rotinet..... 92
Tabla 18 Ensayo de MU Arena Lavada Palmarito..... 93
Tabla 19 Ensayo de Solidez. ..... 93
Tabla 20Ensayo Humedad Natural ..... 95
Tabla 21Ensayo Equivalente de Arena. ..... 96
Tabla 22 Ensayo Equivalente de Arena ..... 96
Tabla 23 Ensayo Gravedad especifica Pasa ¾". ..... 97
Tabla 24 Ensayo Gravedad especifica Pasa 1/2" ..... 97
Tabla 25 Ensayo Gravedad especifica AP ..... 97
Tabla 26 Ensayo Gravedad especifica AZ ..... 98

Tabla 27 Ensayo Partículas Planas y Alargadas. ..... 98
Tabla 28 Ensayo Partículas Planas y Alargadas ..... 99
Tabla 29 Caras Fracturadas Alargadas..... 100
Tabla 30 Porcentaje de Caras Fracturadas. ..... 100
Tabla 31 Combinación de Materiales con GCR 1.5%. ..... 106
Tabla 32 Combinación de Materiales con GCR 2% ..... 108
Tabla 33Combinación de Materiales con GCR 2.5% ..... 110
Tabla 34 Combinación de Materiales con GCR 3.0%. ..... 112
Tabla 35 Combinación de Materiales con GCR 4.0% ..... 116
Tabla 36Densidad Bulk de briquetas. ..... 119
Tabla 37 Relación densidad con grano de caucho ..... 120
Tabla 38 Pesos específicos muestra patrón ..... 121
Tabla 39 Pesos específicos 1.5% GCR ..... 121
Tabla 40 Pesos específicos 2% GCR ..... 121
Tabla 41Pesos específicos 2.5% GCR ..... 122
Tabla 42 Pesos específicos 3% GCR ..... 122
Tabla 43 Pesos específicos 3.5% GCR ..... 122
Tabla 44 Pesos específicos 4% GCR ..... 123
Tabla 45 Pesos específicos 4% GCR ..... 123
Tabla 46 Estabilidades y flujo de mezclas con GCR y convencional ..... 127
Tabla 47ESTABILIDAD VS GCR % (2)..... 128
Tabla 48 Perdidas de resistencia a partir de la muestra patrón. ..... 133
Tabla 49 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de mezcla ..... 134
Tabla 50 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de agregagdos ..... 135
Tabla 51 Comparación de resultados con antecedentes, estabilidades. ..... 136
Tabla 52 Precio Unitario mezclas asfalticas ..... 137

# TABLA DE CONTENIDO DE IMÁGENES

Ilustración 1 Llantas usadas sobre vías principales distrito de Cartagena. ..... 16
Ilustración 2 Miga de Caucho ..... 42
Ilustración 3 Elaboración de mezclas en caliente. ..... 44
Ilustración 4 Ensayo Metodología Marshall ..... 47
Ilustración 5 . Equipos Laboratorio Universidad de Cartagena ..... 47
Ilustración 6 Elaboración de mezcla asfáltica en caliente Lab. Unicartagena. ..... 48
Ilustración 7 Ubicación geográfica de la zona de estudio ..... 60
Ilustración 8 Ubicación geográfica de la zona de estudio ..... 60
Ilustración 9 Triturado Pasa ¾" y Pasa ½" ..... 66
Ilustración 10 Arena Lavada y Arena Zarandeada ..... 67
Ilustración 11Llenante Mineral y Finca Torcoroma. ..... 67
Ilustración 12 Grano de Caucho ..... 68
Ilustración 13 Gráfica de dosificación de agregados. ..... 70
Ilustración 14 Calentamiento de Asfalto y agregados ..... 71
Ilustración 15 Preparación de briquetas y compactación. ..... 72
Ilustración 16 Briquetas compactadas. ..... 72
Ilustración 17 Equipo de ensayo a compresión método Marshall ..... 76
Ilustración 18 Curva reológica del ligante asfáltico ..... 83
Ilustración 19 Curva Logarítmica de gradación. ..... 84
Ilustración 20 Curva Logarítmica de gradación Pasa ½" ..... 85
Ilustración 21 Curva Logarítmica de gradación Arena ..... 88
Ilustración 22 Gradación GCR. ..... 88
Ilustración 23 Curva Logarítmica de Gradación GCR ..... 89
Ilustración 24 Solidez ..... 94
Ilustración 25 Contenido de Materia Orgánica. ..... 101
Ilustración 26 Cumplimiento de Norma. ..... 105

Ilustración 27 Combinación de Materiales con GCR al 1.5%. ..... 107
Ilustración 28 Combinación de Materiales con GCR 2% ..... 109
Ilustración 29 Combinación de Materiales con GCR al 2.5%. ..... 111
Ilustración 30Combinación de Materiales con GCR 3.0%. ..... 113
Ilustración 31 Combinación de Materiales con GCR 3.5%. ..... 114
Ilustración 32 Combinación de Materiales con GCR 3.5%. ..... 115
Ilustración 33Combinación de Materiales con GCR 4.0%. ..... 117
Ilustración 34 GCR VS VACIOS EN AGREGADOS ..... 124
Ilustración 35 Vacíos en la Mezcla vs %GCR ..... 125
Ilustración 36 Densidad vs % Vacios agregados ..... 125
Ilustración 37 Densidad vs Vacíos en la Mezcla ..... 126
Ilustración 38Comparacion de estabilidades con adición de GCR ..... 128
Ilustración 39 Comparación De Flujos . ..... 129
Ilustración 40 Comparación de estabilidades aceptables ..... 131
Ilustración 41 Comparación de flujos aceptables ..... 132
Ilustración 42 Perdidas de resistencia a partir de la muestra patrón. ..... 133
Ilustración 43 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de mezcla ..... 134
Ilustración 44 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de agregados. ..... 135
Ilustración 45 Comparacion de estabilidades..... 136

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal, identificar la influencia que proporciona la incorporación de los triturados de restos de llantas conocido comercialmente como GCR, como agregados en mezclas asfálticas. Consistió en un desarrollo de actividades experimentales en donde inicialmente se diseñara una dosificación analítica de materiales por medio de un tanteo indicado por la norma INVIAS 2007, para luego elaborar una serie de muestras conocidas como briquetas, preparadas en caliente a temperaturas entre los 140° y 170° C; luego de ser elaboradas se disponen a ensayar por medio de la máquina Marshall la cual arrojó datos de estabilidad y flujo, siendo estos un objetivo específico de la investigación. De esta investigación se pudo verificar que el GCR puede funcionar como agregado de las mezclas asfálticas pero con porcentajes igual o menores al 1.5% del total de la mezcla, teniendo en cuenta que a medida que se incorpora GCR disminuyen los valores de estabilidad y aumenta su flujo.

## ABSTRACT

This study's main objective is to identify the influence that provides the integration of shredded tire remains commercially known as GCR, as aggregates in asphalt mixtures. It consists of a development of experimental activities in which initially an analytical dosage of materials is designed by a score indicated by Invias standard 2007, and then develop a set of known samples as briquettes prepared hot at temperatures between 140 ° and 170 ° C; after being processed are arranged to be tested by the machine who throws Marshall stability and flow data, these being a specific target of the investigation. In this research, we found that the GCR can function as aggregate in asphalt mixes but with percentages equal to or less than 1.5% of the mixture, taking into account that as incorporated GCR values decrease and increases its stability flow.

# 1. INTRODUCCIÓN

El hombre desde el inicio de las primeras civilizaciones, se enfrentó a la necesidad de comunicarse y trasladarse de un sitio a otro para satisfacer y completar algunas de sus necesidades principales, destacándose la búsqueda de alimentos y el hallazgo de muchas fuentes de materia prima que le sirvieron para la creación de inventos. Se dice que los romanos construyeron una red de vías de comunicación, mediante caminos y calzadas que consolidaron poblaciones y permitieron su expansión territorial. Así pues, es racional deducir que la construcción de una red vial sin importar lo rústica que haya sido, fue uno de los pilares de desarrollo y colonización romana.

Es importante señalar que a pesar que han pasado muchos años desde la primera construcción de una carretera o un sistema vial, no deja de ser una necesidad principal para el crecimiento y desarrollo de una población.

En Colombia el crecimiento de infraestructura vial se ve afectado principalmente por su difícil condición económica, generando dificultades al disponer de recursos para los desembolsos que permitan el diseño, construcción, rehabilitación y mantenimiento de las vías. Si se hace un pequeño recorrido por las carreteras de nuestro país se puede ver claramente que están constituidas por capas de rodadura de tipo asfáltico (pavimento flexible), siendo esta una de las alternativas más económicas que a su vez cuentan con propiedades de elasticidad que dan confort y un mejor servicio para el tránsito de sus usuarios. Se hace necesario señalar que dicha capa de rodadura está compuesta por una combinación de agregados pétreos, un ligante asfáltico (hidráulico) que servirá de aglutinante para formar el conglomerado final y en ocasiones se da la inclusión de fuentes innovadoras como material sustituto en ciertos porcentajes de los materiales tradicionales. Este último puede ayudar a mejorar las condiciones físicas, colaborar con una posible disminución en los costos de producción para la mezcla y servir como nueva fuente de materia prima sostenible, favoreciendo la disminución en la explotación incontrolada de los recursos naturales. Por esas 3 razones

anteriormente mencionadas, se ha despertado un gran interés por parte de los investigadores en buscar alternativas de producción en mezclas asfálticas haciendo uso de la inclusión de nuevas alternativas para adicionarlos como agregados.

Al realizar una revisión bibliográfica se encontró que se está planteando el uso de triturado de restos de llantas en varias universidades y centros investigativos, el cual se ha venido estudiando desde hace más de 15 años en Norteamérica y el continente Europeo destacándose principalmente España, de igual forma en Suramérica en países como Chile, Argentina y Colombia.

En esta investigación inciden dos problemas principales que vive todo el territorio colombiano y más específicamente el Distrito de Cartagena; destacándose la necesidad en el crecimiento de infraestructura vial y el alto grado de contaminación con el que cuentan muchas de sus vías principales debido a la desordenada disposición final de las llantas usadas del parque automotor.

Por otra parte, partiendo del fácil acceso a fuente de información sobre mezclas asfálticas modificadas mediante el uso del triturado de llantas como los mencionados anteriormente y reconociendo que es una posibilidad para la mitigación en el uso incontrolado de recursos naturales, aprovechamiento de sus desechos en el desarrollo sostenible del planeta, disminución de desechos contaminantes y la posible disminución en los costos de producción de una mezcla asfáltica, se cree que es de vital importancia hacer el desarrollo de esta investigación.

Se justifica el desarrollo de este proyecto dentro las líneas de investigación de Pavimentos y Materiales que ejecuta la Universidad de Cartagena, teniendo en cuenta que la inclusión de un llenante sobre una mezcla puede traer ventajas físicas y económicas sobre las capas de rodadura en pavimentos flexibles, además beneficios ambientales que colaboren con el desarrollo sostenible de medio ambiente.

Sabiendo que la infraestructura vial ha sido considerada como uno de los indicadores principales en cuanto a desarrollo y crecimiento económico de un país, y sabiendo que en los últimos años el gobierno colombiano ha firmado una serie de acuerdos internacionales TLC (Tratado de Libre Comercio) con un gran número de países, ha surgido la necesidad de mejorar y ampliar la malla vial del territorio nacional para poder satisfacer las necesidades en el transporte de mercancías; se ha propuesto una ampliación de (6.035 a más de 10.000) kilómetros en 2014 por el gobierno nacional, lo cual equivale a un crecimiento anual superior al 15%.

Sin embargo, los retrasos en el cumplimiento de estas metas ya comienzan a evidenciarse en cuanto a red pavimentada, de los más de 1.900 kilómetros que se propuso construir el actual Gobierno, se ha tenido un avance de solo un 20,3%, según los datos presentados en el informe nacional de competitividad 2012-2013. (CONCEJO PRIVADO DE COMPETITIVIDAD (CPC), 2013)

Tomando como referencia las estadísticas mencionadas anteriormente, respecto a los avances de ejecución de las obras y conociendo de manera muy general la dificultad que tiene un país como Colombia para la disposición de recursos en la elaboración y construcción de cualquier proyecto, asimismo, siendo Cartagena una ciudad puerto con necesidades de crecimiento en infraestructura vial, surge la necesidad de buscar alternativas para disminuir su costo, entre las que figura el uso de otras fuentes de materia prima para la producción de mezclas asfálticas, que deberán cumplir de igual o mejor manera con las características de resistencia final establecidos por las normas INVIAS 2007.

En este contexto, se puede resaltar que existen distintas investigaciones sobre el posible uso de nuevas fuentes de materia prima como adición de agregados para desarrollar pavimentos económicos con respecto a los diseños tradicionales, además cumpliendo con otras dos

funcionalidades importantes, como lo son mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas y disminuir la contaminación ambiental haciendo uso de la reutilización de desechos.

Por ello, es importante señalar que otra problemática que aqueja a Colombia y a cualquier país del mundo es el alto porcentaje de contaminación que se acrecienta gracias a un notable incremento demográfico, caracterizado por el consumo–desecho que genera impactos físicos, bióticos y sociales sobre el suelo, aire, cuerpos de agua y la calidad de vida respectivamente, gracias a una serie de agentes contaminantes tóxicos que se generan como metales, nitratos, plásticos, entre otros.

Según la información publicada por la SSPD (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios), quien hizo uso de los reportes hechos al SUI (sistema único de información) por los prestadores del servicio de Aseo, las alcaldías municipales y las Corporaciones Autónomas Regionales en el año 2011; se puede identificar que en el territorio nacional se genera un promedio diario de 26.537 toneladas de residuos sólidos. En el que la composición de estos está discriminada generalmente en materia orgánica (52-82%), papel y cartón (8-18%), plástico y caucho (3-14%), vidrio y cerámica (3-8%). (MINAMBIENTE, 2011).

Un componente de los residuos que a diario se ven en las calles del distrito de Cartagena, al que se le da poca importancia en cuanto a su disposición final y que es resultado de la operación del parque automotor; son los restos de llantas. El consumo estimado a nivel nacional para el año 2008 fue de 4.493.092 llantas, discriminadas en: 1.067.072 llantas de camiones y busetas, y 3.426.020 llantas de automóviles y camionetas. Considerando un promedio de recambio de llantas de 18 meses y unos pesos promedio de llantas usadas de 7 kg para auto, de 15 kg para camioneta y de 50 kg para camión, se generan anualmente un total de 61.000 toneladas de residuos de llantas a nivel nacional (ALAMAVIVA S.A, 2010).

Con relación a los sistemas de disposición final de residuos sólidos utilizados, se determinó que el 79% de los municipios del país disponen sus residuos en sitios adecuados, tales como rellenos sanitarios y plantas integrales. Este porcentaje corresponde a la disposición de 25.091 toneladas por día, mientras que el 21% restante de los municipios continúa disponiendo 1.446 toneladas diarias en sitios de disposición inadecuados, como botaderos a cielo abierto, enterramientos, cuerpos de agua y quemas.

Además se encuentra que dentro de los departamentos en los que un mayor número de municipios utilizan sitios de disposición inadecuados, están Bolívar, Chocó, Santander, Cauca, Nariño y Magdalena y en cuanto a la cantidad de residuos sólidos dispuestos por cada departamento del país, se hace una distribución en 3 grupos, tomando como referencia rangos en toneladas dispuestas. Es así como, en el Grupo 1 se encuentran los departamentos que generan entre 0 y 200 toneladas, con respecto al grupo 2 entre 300 y 1.000 toneladas y en el grupo 3 se encuentran los departamentos que generan entre 1.000 y 7.500 toneladas de residuos diarios Es importante para esta investigación, resaltar que en el grupo 3 se encuentran los departamentos de Atlántico, Valle del Cauca, Antioquia, Cundinamarca y Bolívar, (SSPD - SIU, 2011), de esta última su capital es el Distrito de Cartagena, que genera alrededor de 750 ton/día de residuos sólidos (74% de los residuos del departamento).

**Ilustración 1 Llantas usadas sobre vías principales distrito de Cartagena.**

**FUENTE:** AUTOR 2014

Esto con el fin de tener una idea más precisa de la problemática que se genera en cada una nuestras ciudades. Los residuos de llantas son excesivamente peligrosos, teniendo en cuenta que son materiales altamente inflamables y que además conducen al estancamiento de aguas que conllevan a la reproducción de mosquitos transmisores de graves enfermedades que afectan la salud de los habitantes de sectores aledaños. Resulta preocupante, al saber todas las consecuencias que produce el mal manejo de este tipo de residuos, que en el Distrito de Cartagena actualmente no se le esté dando la importancia requerida y no se sigan las recomendaciones establecidas por el ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial, como sí se ha dado en otras ciudades, una de estas Bogotá, en donde mediante la resolución 6981 de 2011 se dictaron los lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados.

Con el fin de disminuir los costos de producción en mezclas asfálticas, mejorar las condiciones físico-mecánicas de las capas de rodadura y minimizar en gran escala el desordenado manejo y disposición final de residuos sólidos en el Distrito de Cartagena, se propondrá hacer uso del triturado de llantas, como material adicional de los agregados pétreos en ciertas proporciones para la producción de una mezcla asfáltica y además reconocer e identificar cuál de ellos es más eficiente y económico.

A partir de esto, nacen muchos interrogantes, entre los que está:

¿En qué forma las propiedades de las mezclas asfálticas serán modificadas al momento de incluir nuevas fuentes de materia prima como el triturado de los restos de llantas?

Al momento de realizar una inversión pública para cumplir con las políticas de desarrollo en Colombia, se sabe que unos de los principales requisitos para que se adjudiquen y ejecuten los proyectos, es que cumplan con una viabilidad económica, técnica y ambiental.

Por otra parte, tomando como referencia las necesidades en el fortalecimiento de la malla vial y los serios problemas de contaminación que aquejan al Distrito de Cartagena, ya expuestos con anterioridad; existe la necesidad de buscar soluciones que disminuyan estas preocupaciones.

Como respuesta a esas necesidades de incrementar la competitividad de los pavimentos, y tratando de minimizar los factores que inciden en él, es necesario mejorar las características de las mezclas asfálticas mediante una sustitución racional y técnica de nuevas fuentes de materia prima. Este proceso representa un cambio en el concepto tradicional de diseñar mezclas asfálticas que se ajusten a las características pedidas y exigidas por las normas colombianas (INVIAS 2007).

Entonces al analizar estas situaciones y al revisar que existe un campo de investigación abierto en torno al uso del triturado de llantas como fuente de materia prima para las mezclas asfálticas, es de vital importancia realizar esta investigación en el Distrito de Cartagena; para identificar las ventajas ambientales, los aportes en el comportamiento mecánico que pueden dar el triturado de los restos de llantas a una mezcla asfáltica, la estabilidad Marshall sobre cada una de las mezclas, además de que se posee una ventaja económica radicada en el ahorro al momento de eliminar los residuos del parque automotor (llantas) que suelen ser muy costosas y también un ahorro en cuanto a explotación de materia prima

Por otro lado, en cuanto al proceso experimental, es importante destacar las facilidades que tiene el trabajo con emulsiones asfálticas, entre las que se destacan: el trabajo a temperatura ambiente, que permite un ahorro de energía de producción y menores riesgos de accidente durante los procesos; la facilidad de obtener una dosificación óptima de la mezcla haciendo uso de los procedimientos de diseño Marshall, que permita obtener la mejor estabilidad de la emulsión, maximizando el contenido de los restos de llantas para disminuir el contenido de agregados pétreos, todo esto con el objetivo de minimizar los costos de producción.

Para satisfacer entonces las necesidades de sostenibilidad, mejorar las condiciones de salud pública del distrito de Cartagena, perfeccionar las condiciones de su malla vial y buscar alternativas de producción en mezclas asfálticas; se propondrá mediante esta investigación hacer uso de las cenizas de incineración de los residuos sólidos y el polvillo triturado de los restos de llantas producidos en la ciudad de Cartagena, como material de agregado fino o grueso para mejorar las características de resistencia y durabilidad de las mezclas e identificar cuál de esas emulsiones disminuirá en mayor proporción los costos de producción, además reutilizar los desechos a los cuales se les había acabado su vida útil.

Es importante resaltar que este proyecto es viable académicamente porque se han completado los conocimientos y competencias requeridas durante el periodo de estudio exigido en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, aprobando y completando con los objetivos en las áreas de geotecnia & Materiales, Vías & transporte y Saneamiento Ambiental; en donde se ha podido aprender a desarrollar y diseñar mezclas asfálticas a nivel teórico y práctico, además reconocer la importancia de darle una disposición final adecuada a los desechos producidos por el hombre, para controlar problemas de salud pública.

Además, es viable económicamente debido a que la obtención del grano de caucho o triturado de llantas tienen un costo muy económico por kilogramo en el mercado. Además para la realización de los ensayos de laboratorio establecidos por las normas INVIAS 2007 para el diseño y verificación de las mezclas asfálticas se utilizarán los laboratorios de suelos de la Universidad de Cartagena, quien también ha tenido convenios durante años con empresas que le suministran asfalto para este tipo de investigaciones.

La realización de este proyecto, será de vital importancia para el Distrito de Cartagena, teniendo en cuenta la eventualidad de disminuir los vertederos de llantas incontrolados en las calles y la posibilidad de darle un uso final a las cenizas de incineración de residuos sólidos generalmente inaprovechados, que además tienen altos costos de operación.

Para finalizar, la realización de esta investigación tendrá gran relevancia para la Universidad de Cartagena ya que en Colombia se han realizado muy pocas investigaciones sobre este tema y ya se está planteando su inclusión en la normatividad de las nuevas normas INVIAS, lo mismo para el caso de cenizas de incineración de residuos sólidos en las cuales escasean sus averiguaciones. Teniendo esto un incentivo para desarrollar muchas más investigaciones innovadoras que colaboren con el desarrollo sostenible y ayuden al crecimiento de infraestructura de todo el territorio nacional.

# 2. MARCO DE REFERENCIA

## 2.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Sabiendo que una mezcla asfáltica representa la capa de rodadura en los pavimentos flexibles, y teniendo en cuenta que es una de las alternativas más usadas para la construcción de infraestructura vial, ha surgido un gran interés en la investigación de nuevas fuentes de materia prima para su producción, que posibiliten el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas, colaboren con la disminución en el uso de las reservas fósiles y optimicen su producción; llevando a los productores de mezclas asfálticas, investigadores y administradores de la infraestructura vial a proponer la investigación y desarrollo de diseños de mezclas asfálticas con la inclusión de agregados de distintos tipos de residuos que permitan una calidad aceptable en las condiciones finales de las capas de rodadura y porque no un mejoramiento de las mismas. Al revisar distintas fuentes de información como es el caso de las bases de datos, se encontró que se está haciendo uso como nueva fuente de materia prima ,el triturado de restos de llantas, que ha despertado un interés para traerlo como alternativa de producción a la región.

Entonces al momento de tomar el triturado de restos de llantas como referencia para el desarrollo de la presente investigación, se hace necesario mencionar y adjuntar las experiencias obtenidas tanto a nivel internacional, nacional y local, si las hay.

### 2.1.1. Triturado de residuos de llantas incorporados como agregados pétreos en la producción de mezclas asfálticas

En el caso de los restos de llantas como adición en los agregados para mezclas asfálticas se encontró una mayor documentación bibliográfica, en donde se han realizado investigaciones con metodologías muy diferentes, entre las que se destaca, el uso de dichos residuos

como agregados en el diseño de mezclas asfálticas en seco y la inmersión de los mismos por vía húmeda. A causa de esto, se decidió tomar los antecedentes del método de inmersión por vía seca, al identificar la viabilidad técnica y tecnológica para su ejecución a diferencia de la otra metodología.

#### 2.1.1.1. Ámbito Internacional

- **Título: "El efecto de la miga de caucho como modificador de la resistencia de la mezcla de asfalto en la deformación plástica",**
- Autores: F. Moreno1, , M. Sol, J. Martín, M. Pérez, MC Rubio en la universidad de Granada en conjunto con LabIC Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, ET-SICCP, y C / Severo Ochoa.
- **Localización:** Granada – España
- **Periodo de Desarrollo y Publicación:** Su publicación se dio para en el año 2012
- **Objeto de estudio: C**omentan los autores que su investigación, se incentivó debido a las deformaciones plásticas causadas por las cargas de tráfico de vehículos en la superficie de los pavimentos, son uno de los problemas más comunes en el deterioro de las vías. Ellos afirman que tales deformaciones reducen la vida útil del pavimento y aumentan el costo de su rehabilitación y mantenimiento. Además que varios factores de diseño pueden ser la fuente de esa patología, tales como el esqueleto mineral, propiedades de los agregados, el contenido de carga, y la cantidad de ligante. Por esta razón, vieron la necesidad de buscar formas rentables para mitigar y prevenir las deformaciones en la superficie de los pavimentos, llegando a plantear hacer uso de polvo de neumático al final de su vida útil en mezclas bituminosas, siendo una alternativa viable para mejorar el rendimiento de la mezcla y evitar deformaciones plásticas. La adición de modificador de la miga de caucho (CRM) para las mezclas de asfalto aumenta la viscosidad y la elasticidad y al mismo tiempo, aumenta su resistencia al envejecimiento. Por otra parte, el reciclaje de polvo de neumático contribuye al desarrollo sostenible ( es decir, reducción de residuos problemáticos que es difícil de eliminar de forma lim-

pia , revalorización de los neumáticos fuera de uso , la conservación de los recursos naturales , etc.)

En este estudio obtuvieron unas posibles proporciones muy importantes para continuar con el desarrollo de estas investigaciones, en donde se evalúo el efecto de proceso en seco, así como el proceso en húmedo en la resistencia de mezclas de asfalto a las deformaciones plásticas. El estudio del proceso en seco implicó el uso de la mezcla de asfalto convencional con la adición de diferentes porcentajes de polvo de neumático (0,5 %, 1,0 % y 1,5 % del peso total de la mezcla). En cuanto al estudio del proceso húmedo utilizaron dos aglutinantes con diferentes cantidades de polvo de neumático: ( i ) la mejora de BC 50/70 de betún con caucho ( 8,0 % polvo de neumático del peso total aglutinante ) , (ii ) de alta viscosidad modificada con caucho ( con el 20,0 % de caucho miga del peso total del aglutinante ) .

Para determinar los rendimientos de los posibles pavimentos, se realizaron los estudios correspondientes, teniendo en cuenta las normas españolas (PG- 3), como lo es el caso de la prueba de la rueda de seguimiento (UNE -EN 12697-22), para comprobar el comportamiento mecánico de mezclas de asfalto en el pavimento superficial. La segunda prueba utilizada fue la prueba triaxial (UNE -EN 12697-25, Método B).

Afirman los autores que su análisis se centró en el comportamiento mecánico de mezclas con diferentes porcentajes de los procesos en seco y húmedo. Estas mezclas se sometieron a la prueba de la rueda de seguimiento, la prueba triaxial, y la prueba de resistencia a la tracción indirecta a diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos para las mezclas de CRM se compararon con los obtenidos para una mezcla de las mismas características que habían sido fabricados con polímero de alto rendimiento para modificar la emulsión asfáltica.

Los resultados de las deformaciones plásticas obtenidas en el seguimiento de la rueda y los ensayos triaxiales cíclicos mostraron la misma tendencia cuando se aumentó la dosis de CRM.

En ambos casos, la adición de CRM mejoró la resistencia de la mezcla a deformaciones plásticas. Por lo tanto, los valores de deformación permanente menores se registraron en las mezclas con porcentajes más altos de polvo de neumático, independientemente de si la goma se añadió por el proceso seco (1,5 % del peso de la mezcla) o el proceso húmedo (20,0 % polvo de neumático del total el peso de ligante).

En ambos tipos de mezcla con CRM, presentaron un módulo de fluencia similar o incluso mejor que los valores de la mezcla fabricada con emulsión de alto rendimiento (uso de polímeros).

Se encontró que la adición de CRM por el proceso seco, fue más eficaz que por el proceso húmedo. Esto se vio reflejado en el ensayo de la rueda de seguimiento, así como en el ensayo triaxial cíclico. De hecho, el proceso de mezcla en seco con 1,5% de polvo de neumático tenía valores de deformación permanente inferior que la mezcla de referencia hecho con betún modificado con polímero.

También se obtuvo que la mezcla CRM en el proceso en seco dio un mayor módulo de rigidez que las mezclas en el proceso húmedo. Por otra parte, los valores del módulo de rigidez de las mezclas con más polvo de neumático eran más altos que los de la mezcla de referencia hecho con el betún de alto rendimiento. Es importante resaltar que, el contenido de asfalto óptima y agregados para cada mezcla se basó en los resultados obtenidos en el ensayo Marshall (NLT 159/00) de la normatividad española. (F. Moreno1, M. Sol, , J. Martín, & M. Pérez,, 2009))

- **Limitaciones promotoras de más investigaciones:**

Al realizar esa investigación, les surgió una leve incertidumbre en cuanto a la susceptibilidad térmica de las mezclas, dependiendo del proceso utilizado para añadir el polvo de neumático. En el caso del proceso en seco de la mezcla de CRM, la susceptibilidad

térmica de la mezcla aumentó ligeramente a medida que aumentó el contenido en polvo de neumático. En contraste, la susceptibilidad térmica de la mezcla del proceso en húmedo se redujo con la adición de más uso de CRM. Esto indicó que la adición de polvo de neumático por el proceso húmedo tiene un mayor impacto en la respuesta del aglutinante a la variación de temperatura ya que el aglutinante es el componente de la mezcla que es más sensible a este fenómeno. Gracias a esto, es importante seguir realizando investigaciones para determinar cuál sería la proporción ideal para evitar afectaciones finales sobre las capas de rodadura, teniendo en cuenta las condiciones de temperatura de la región en la cual se pretenderá utilizar.

#### 2.1.1.2. Ámbito Nacional:

Para contextualizar estas investigaciones a nivel nacional, es necesario referirse a una indagación realizada por las universidades Católica de Colombia, Javeriana y la Salle en conjunto, para revisar el estado del conocimiento en cuanto al uso de restos de llantas como material de adición en las mezclas asfálticas. Esto se puede ver en el artículo siguiente:

- **Título: "Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia"**
- **Periodo de Desarrollo y Publicación:** publicado en Octubre del 2007.
- **Localización:** En la ciudad de Bogotá D.C – Colombia.
- **Objeto de estudio:** Afirman los autores que "En Colombia, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología".

En total fueron consultados en las distintas entidades 40 documentos como tesis de pregrado, tesis de posgrado, Simposios y Jornadas del asfalto y de pavimentos. Estos documentos pertenecen a un período comprendido entre 1979 y 2005.

las que más han realizado investigación en el área de los asfaltos modificados son la Pontificia Universidad Javeriana, Universidad Industrial de Santander, Universidad del Cauca, Universidad de los Andes, Universidad Militar y la Universidad Católica de Colombia.

Los siguientes ensayos de laboratorio realizados sobre mezclas asfálticas dependen de los objetivos del proyecto y del tipo de mezcla que se esté trabajando:
Ensayo Marshall, Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo Cántabro, Ensayo de permeabilidad, Módulo dinámico, Deformación permanente Ahuellamiento, Fatiga, Adherencia.

El ensayo Marshall es el más utilizado para investigar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas.

- **Limitaciones promotoras de más investigaciones:**
  Dentro de las limitaciones se encuentra que los ensayos para medir comportamiento dinámico o de envejecimiento no son tan utilizados puesto que no en todas las instituciones se cuenta con los equipos para medir estas propiedades. En el ensayo de estabilidad Marshall la literatura al realizar esas indagaciones no es muy clara, reportando que el efecto que tiene el caucho molido en la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas desciende hasta un 13% cuando se adiciona polvo de llanta y de 23% cuando se adiciona fibras de llanta. Esto al incorporar caucho como material granular fino a una mezcla, la deformación permanente de las mezclas modificadas es mayor en comparación con la convencional. Cuando la adición del caucho al asfalto se realiza por vía seca, se observa en mezclas un incremento de la deformación permanente.
  Esas pruebas fueron realizadas en el “Carrusel de Fatiga” de la Universidad de Los Andes, donde se comparó el comportamiento de una mezcla asfáltica con y sin caucho

molido, se pudo observar que la estructura de pavimento que más se deformó fue aquella que no empleó caucho como aditivo (es decir, la mezcla convencional).

Teniendo en cuenta estos resultados y comparándolos con muchas investigaciones realizadas a nivel internacional se comienza a tener una incertidumbre de si estos resultados son aislados o de verdad al hacer uso de restos de llantas se disminuye la calidad mezclas finales, lo que lleva a seguir investigando y realizando ensayos con este tipo de mezclas para encontrar las proporciones óptimas que permitan su uso. Otro incentivo para investigar respecto a este tema es que al momento de realizar dichos estudios, se hacía uso de las normas vigentes, encontrándose que un proyecto desarrollado en el año de 1985 se basaba en las especificaciones del MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transporte), mientras que un proyecto de investigación realizado en el año 2003 se encuentra basado en las especificaciones del INVIAS (2002) y sabiendo que actualmente en Colombia la norma a usar es la INVIAS 2007.

Un estudio mucho más reciente fue el realizado por Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el año 2012, "Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas".

***Autores:*** Hugo A. Rondón-Quintana, Yennifer Molano-Mora, Angélica M. Tenjo-Lancheros.

En ese estudio usaron restos de llantas como modificadores de las mezclas asfálticas, obteniendo buenos resultados para las mejoras en las condiciones de las posibles capas de rodadura con esa composición de materiales. Pero es importante señalar que esta investigación fue realizada por la metodología de inmersión húmeda, de la cual se había hablado con anterioridad en el estudio realizado por los españoles, quienes obtuvieron resultados de mejor calidad en el método de inmersión por vía seca.

Se evaluó el cambio que experimenta la resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas en caliente modificadas con Gcr, bajo diferentes temperaturas de compactación. Lo anterior debido a que en la ciudad de Bogotá D.C. se han reportado en obra

disminución de la temperatura de las mezclas, desde su fabricación en la planta de asfaltos hasta su extensión y compactación, de hasta 30°C. Las mezclas que se estudiaron, fueron fabricadas modificando por vía húmeda los dos cementos asfálticos que se producen en Colombia (CA 60-70 y CA 80-100). Se emplearon dos granulometrías y fueron compactadas bajo temperaturas de 120, 130, 140 y 150°C, siendo esta última la temperatura de compactación inicial o de referencia de las mezclas. Las granulometrías analizadas, son dos de las tres que se especifican en la Resolución No. 3841 del 5 de septiembre de 2011 del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2011). Los ensayos cumplen con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2007) y del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU (2005), para fabricar mezclas de concreto asfáltico.

A los cementos asfálticos CA 60-70 y CA 80-100, se les realizaron los ensayos que exige la especificación INVIAS (2007) e IDU (2005) para caracterizarlos.

Este material presenta partículas de coloración negra que pasan el tamiz No. 40 en un ensayo de granulometría por tamizado. Se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 5,0; 5,5; 6,0 y 6,5%, con el fin de realizar el diseño Marshall. La temperatura de mezcla y compactación de las briquetas fue de 150°C y 140°C respectivamente. Una vez se obtuvo el porcentaje óptimo de CA, se adicionó a este por vía húmeda el Gcr en porcentajes de 13% y 15% con respecto al peso total de los asfaltos CA 60-70 y CA 80-100 respectivamente. Por vía húmeda se entiende que el aditivo (el Gcr en este caso), se adiciona a alta temperatura al CA y no al agregado pétreo, como se pretende realizar en mi investigación. Estos porcentajes fueron escogidos con base en los estudios reportados por el IDU y la Universidad de Los Andes (2002, 2005), en donde se modificaron y caracterizaron, desde el punto de vista físico, químico y reológico, los asfaltos mencionados por vía húmeda. Es importante resaltar que estos estudios fueron la base sobre la cual fue redactada la Resolución No. 3841 del IDU (2011). Según los autores, en el laboratorio se evaluó, la influencia que tiene la disminución de la temperatura de compactación sobre la resistencia mecánica bajo carga monotónica, de mezclas de concreto asfáltico convencionales

(sin modificador) y modificadas por vía húmeda con grano de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (Gcr). Para el caso de las mezclas convencionales, se observa una disminución notable de dicha propiedad (entre 20% y 34%) cuando disminuye la temperatura de compactación en 30ºC, con respecto a la de referencia (óptima obtenida del ensayo de viscosidad). Para el caso de las mezclas modificadas, en tres (MAC-1AM, MAC-2AM y MAC-2BM) de las cuatro mezclas analizadas en el presente estudio, la disminución promedio fue de tan solo 10%, reportándose en una de ellas (MAC-1BM) incluso un ligero incremento de 6,7%. Se observa un incremento en la resistencia bajo carga Monotónica de las mezclas modificadas entre 17% y 30%, cuando disminuye en 10ºC la temperatura de compactación "Las conclusiones reportadas en el presente estudio son derivadas de estudios ejecutados en el laboratorio, por lo anterior se hace necesaria una futura investigación que evalúe y correlacione este estudio con mediciones obtenidas en campo. Así mismo, se prevé una futura fase experimental para evaluar en laboratorio, propiedades mecánicas bajo carga cíclica como módulo resiliente, leyes de fatiga y resistencia a la deformación permanente".

#### 2.1.1.3. Ámbito Local:

En el Distrito de Cartagena, actualmente no se tienen ningún antecedente en el uso de restos de llantas GCR como uso de llenante mineral en el diseño de mezclas asfálticas.

Al encontrar estas investigaciones como base de referencia en cuanto a la temática a estudiar, se hace necesario incentivar y promover el desarrollo de este tipo de investigaciones en la ciudad de Cartagena, en la cual todavía no se tienen referencias para estos temas y además a nivel nacional no se ha realizado ningún estudio haciendo uso de la metodología de inmersión por vía seca haciendo uso de la norma vigente INVIAS 2007.

# 3. MARCO TEÓRICO

## 3.1 ¿Qué es un Pavimento?

Es una estructura generalmente integrada por la sub-base, base y capa de rodadura, construida sobre un terreno debidamente compactado, para poder soportar las cargas de tránsito de acuerdo al diseño, pero al mismo tiempo, deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos y la compresión de los elementos que se apoyan en él.

### 3.1.1 Tipos de pavimentos

#### 3.1.1.1 Pavimento Flexible

Es una estructura que soporta las cargas debidas al tránsito y las distribuye uniformemente a la sub-rasante; las características de cada una de las capas del pavimento flexible son las siguientes:

La sub-base es una capa de materiales seleccionados, comprendida entre la subrasante y la base, que tienen como funciones transmitir en forma adecuada a la subrasante los esfuerzos que el tránsito le impone a través de la base, la función principal es formar una transición entre los materiales finos de la subrasante y los gruesos de la base de modo que evite la contaminación e interpenetación de ellos; también disminuye los efectos perjudiciales producidos por los cambios volumétricos de los suelos de subrasante, contribuye en ocasiones al drenaje y ayuda a reducir el costo del pavimento.

La base es una capa de materiales pétreos seleccionados, que se construye generalmente sobre la su-base y eventualmente sobre la subrasante. Esta capa se encuentra limitada es su parte superior por una carpeta ásfaltica y tiene como función primordial soportar adecua-

damente las cargas que los vehículos le transmiten a través de dicha carpeta y distribuir los esfuerzos recibidos en magnitudes adecuadas a las capas inferiores, a fin de evitar que se produzcan deformaciones perjudiciales.

La carpeta asfáltica, constituye la capa superior y está generalmente compuesta por una mezcla de materiales pétreos seleccionados y un producto bituminoso. Tiene como función proporcionar a los vehículos que circulen sobre ella una superficie estable, impermeable, uniforme y de textura adecuada. (SABOGAL, 1984)

#### 3.1.1.2 Pavimentos en concreto rígido:

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas. Las losas en el pavimento rígido componen el elemento estructural más importante de un pavimento rígido y tiene como función principal proporcionar al tránsito una superficie estable, impermeable, uniforme que además soporte las cargas de los vehículos y absorba la mayor parte de los esfuerzos y transmitirlos a la base y sub-base en magnitudes acorde a su resistencia.

### 3.1.2 ¿Qué es una mezcla asfáltica?

Las mezclas asfálticas o mezclas bituminosas se definen como una combinación de unos áridos minerales y un ligante bituminoso (asfalto), de manera que cada una de las partículas del árido quede cubierta de forma homogénea por una película del ligante. Después de compactado el conjunto, los áridos pueden conformar un esqueleto mineral resistente y la película del ligante darle una cohesión a la mezcla. Se emplean en la construcción de carreteras, con la función principal de proporcionar una superficie de rodadura cómoda, segura

y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de vehículos y soportar las cargas debidas a dicho tráfico. (BERNAL, BORIS MARRUGO, & GABRIEL SUAREZ, 1999,)

### 3.1.3 Composición de las mezclas asfálticas

#### 3.1.3.1 Ligante asfáltico:

El asfalto es un material para la pavimentación, de color negro, de consistencia semisólida a temperatura ambiente, líquido a temperatura de elaboración de mezclas asfálticas (entre 100°C y 160°C) en el que el principal componente es el bitumen que se obtiene como residuo de la refinación del petróleo Crudo. (ECOPETROL BARRANCABERMEJA, 2014)

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Como aplicación de estas propiedades el asfalto puede cumplir, en la construcción de pavimentos, las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.

- Proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su espesor

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar

asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales el material se encuentra prácticamente libre de materia extrañas, mientras que en otros está mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias.

a. Origen y Producción del asfalto

En el año 300 A.C, el asfalto se emplea exactamente en Egipto en los embalsamientos. Luego en 1802 D.C en Francia se emplea la roca asfáltica para la pavimentación de suelos, puentes y aceras.

Después en 1876 se construyó el primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D.C, con asfalto de lago importado. Hasta el año 1900, la mayoría del asfalto usado procedía de depósitos naturales. Por esa misma época se encontró que posteriormente del proceso de la refinación de algunos petróleos crudos, en las torres de destilación quedaba un residuo negro, pegajoso, semejante, al asfalto natural.

Se encontró que una sustancia era excelente conglomerante, y como su precio era menor que el asfalto natural, gradualmente llego a ser de uso general. Ya para el año 1912, la cantidad de asfalto de petróleo utilizado, fue igual a la del asfalto natural. Actualmente, cerca del noventa y cinco por ciento (95%) de todo el asfalto procede de la refinación del petróleo.

b. Índice de calidad de los ligantes asfálticos

Para identificar los indicadores de calidad del asfalto exigidos por el INVIAS 2007, es necesario anexar la tabla 1.

**Tabla 1 Indice de calidad en un cemento asfáltico**

| **CARACTERISTICA** | **NORMA DE ENSAYO INV** | **60-70** | | **80-100** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **MIN** | **MAX** | **MIN** | **MAX** |
| PENETRACIÓN (25°C, 100 g, 5s) 0.1mm | E-706 | 60 | 70 | 80 | 00 |
| INDICE DE PENETRACIÓN | E-724 | -1 | +1 | -1 | +1 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PERDIDA POR CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA (163°C, 5 h) % | E-721 | - | 1.0 | - | 1.0 |
| DUCTILIDAD (25°C, 5 cm/min) cm. | E-702 | 100 | - | 100 | - |
| PENETRACIÓN DEL RESIDUO LUEGO DE LA PERDIDA POR CALENTAMIENTO, EN % DE LA PENETRACIÓN ORIGINAL % | | 75 | - | 75 | - |
| SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO % | E-713 | 99 | - | 99 | - |
| CONTENIDO DE AGUA % | E-714 | - | 0.2 | - | 0.2 |

**Fuente IDU, INVIAS 2007**

### 3.1.3.2 Propiedades principales de los cementos asfálticos

A. Durabilidad (INV-720): Indica que tanto permanecen en un cemento asfáltico sus características cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

B. Adhesión y Cohesión: Es la capacidad del cemento asfáltico para adherirseal agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento de terminado.

C. Índice de Penetración (INV 724): Proporciona un criterio de medida de suceptibilidad del cemento asfaltico a los cambios de temperatura. Se mide indirectamente y más comúnmente como un resultado de cálculo especial que se hace con los resultados de penetración y el punto de ablandamiento.

D. Penetración (INV 706): Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto. la penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga,

tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25° C (77° F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g, aunque se pueden emplear otras condiciones previamente definidas.

E. Viscosidad (INV - 716): Este método describe el procedimiento para determinar la viscosidad del asfalto (bitumen), con viscosímetros capilares de vacío a 60º C (140º F). Se aplica a materiales que tengan viscosidades en el rango de .0036 a 20000 Pa·s (0.036 a 200000 Poises). Se mide el tiempo necesario, para inducir por medio del vacío, un volumen fijo de líquido a través de un tubo capilar, bajo condiciones estrechamente controladas de vacío y temperatura. La viscosidad en Poises, se calcula, multiplicando el tiempo de flujo, en segundos, por el factor de calibración del viscosímetro.

F. Punto de Ablandamiento: Como los ceméntenos asfálticos no tienen un nto de fusión definido, por ser materiales termoplásticos, se ha definido un punto de ablandamiento convencional, determinando por la temperatura a la que alcanza un determinado estado a la fluidez a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero dentro de un anillo, por lo que la prueba también se denomina de anillo y bola.

G. Ductilidad de los materiales asfalticos (INV- 702): Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida.

   El procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura. Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de 50 ± 2.5 mm por minuto y la temperatura de

25 ± 0.5°C (77 ± 1.0°F); aunque se puede realizar en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

### 3.1.3.3 Agregados o materiales pétreos

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

**Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a la norma INVIAS 2007**

Requerimiento de la norma INVIAS para los agregados:

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa del material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción el agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adhesividad.

**A.1** Para el objeto de las especificaciones del Capítulo 4 (INVIAS 2007), se denominará agregado grueso la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No.4); agregado fino la porción comprendida entre los tamices de 4.75 mm y 75 mm (No.4 y No.200) y llenante mineral la que pase el tamiz de 75 mm (No.200).

El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en la Tabla 2.

**A.2** El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última dentro del conjunto se encuentra definida en la respectiva especificación. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad.

### 3.1.3.4 Ensayos a los materiales pétreos:

Para verificar con el cumplimiento de las normas internacionales y nacionales, a los agregados se les debe realizar una serie de ensayos de laboratorio, los cuales son:

- **Equivalente de Arena (E-133):** Sirve para determinar la proporción de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz No.4. Es una relación entre la arcilla y arena determinadas en una probeta.

- **Desgaste en la máquina de los ángeles ( E-218, E-219**): Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agrega dos gruesos hasta de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles. El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva. Para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos, de tamaños mayores de 19 mm (3/4"), por medio de la máquina de Los Ángeles, deberá utilizarse la norma INV E – 219.

  Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.

Los límites de las especificaciones deben ser asignados con extrema precaución, considerando los tipos de agregados disponibles y su comportamiento histórico en aplicaciones finales específicas.

- **Solidez (E-220):** 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, 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.

**Tabla 2 Características de las mezclas asfálticas**

| TIPO DE TTO. O MEZCLA | PART. FRAC. MEC. (Agre. Grueso) | DESGASTE LOS ANGELES | PERD. EN ENSAYO DE SOLIDEZ | | ADHESIVIDAD | | | | | INDICES DE APLAN. Y ALARG. | COEFICIENTE. PULIMENTO ACELERADO | I. P. | EQUIV. DE ARENA | CONTENIDO DE IMPUREZAS (Ag. Grueso) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Sulf. de sodio | Sulf. de magne. | Riedel Webber | Stripping | Bandeja | Resisten-cia. Cons.Inm-comp. | Pérdidas Cántabro tras inmersión | | | | | |
| Norma INV | E-227 | E-218, E-219 | E-220 | E-220 | E-774 | E-737 | E-740 | E-738 | E-760 | E-230 | E-232 | E-125 E-126 | E-133 | E-237 |
| SELLO DE ARENA ASFALTO | | | 12 % máx. | 18 % máx. | 4 mín. | | | | | | | N.P. | 50 % mín. | |
| LECHADA ASFALTICA | | 25 % máx. | 12 % máx. | 18 % máx. | 4 mín. | | | | | | | N.P. | 50 % mín. | |
| -Gradación Combina-da | | | | | | | | 75 % mín. | | | | N.P. | 50 % mín.. | |
| MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE | 75 % mín. | 35 % máx. | 12 % máx. | 18 % máx. | | 95 % mín. | | | | 35 % máx. | | | | 0.5 % máx. |
| MEZCLA DENSA EN CALIENTE<br>-Agregado Grueso<br>-Agregado Fino<br>-Gradación Combina-da | 75 % mín. | 35 % máx. (base)<br>25 % máx. (rodadura) | <br>12 % máx.<br>12 % máx. | <br>18 % máx.<br>18 % máx. | | | | <br><br>75 % mín. | | 30 % máx. | 0.45 mín. | <br><br>N.P. | <br><br>50 % mín. | 0.5 % máx. |
| MEZCLA DISCON-TINUA EN CALIENTE | 75 % mín. | 25 % máx. | 12 % máx. | 18 % máx. | | | | 75 % mín (tipo F) | 25 % máx. (tipo M) | 25 % máx. | 0.45 mín. | N.P. | 50 % mín. | 0.5 % máx. |
| MEZCLA DRE-NANTE | 75 % mín. | 25 % máx. | 12 % máx. | 18 % máx. | | | | | 40 % máx. | 25 % máx. | 0.45 mín. | N.P. | 50 % mín | 0.5 % máx. |
| RECICLADO DEL PAVIMENTO | 75 % mín. (caliente) | 40 % máx. (frío)<br>25 % máx. (caliente) | 12 % máx. | 18 % máx. | | | | 75 % mín. (mezcla) | | 30 % máx. | 0.45 mín (caliente) | N.P. | 30 % mín. (frío)<br>50 % mín. (caliente) | 0.5 % máx. (caliente) |
| EXISTENTE (Material de adición) | | | | | | | | 75 % mín. | | | | N.P. | 50 % mín. | |

**Fuente: IU, INVIAS 2007**

Este método es un procedimiento para hacer un estimativo preliminar de la sanidad de los agregados a ser usados en concretos y otros propósitos. Los valores obtenidos pueden ser comparados con especificaciones que se han diseñado para indicar la posibilidad de usar el agregado propuesto. Dado que la precisión de este método es baja, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes, no puede darse sin confirmar con los resultados de otros ensayos mejor relacionados con el uso que se le va a dar al material.

- **Índice de aplanamiento y de alargamiento (E-230):** Esta norma describe el procedimiento que se deben seguir, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras. Esta norma se aplica a los agregados de origen natural o artificial, incluyendo los agregados ligeros y no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3mm (¼") o mayores de 63 (2 ½").

- **Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (E-227): Esta** norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos. Caras Fracturadas n – Una superficie angular, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración por medios artificiales o por la naturaleza.

### 3.1.3.5 Llenante mineral

Es un material fino que se adiciona preferiblemente a mezclas asfálticas en caliente. Este puede ser de orígenes diversos y de una naturaleza, tal que su afinidad al agua sea muy variable. Existen funciones principales de los llenantes que pueden favorecer a las propiedades finales de la mezcla. Dentro de estas ayudas se tiene:

- Proporcionar estabilidad frente a los agentes exteriores principalmente a la acción nociva del agua, debido a la reducción parcial de la porosidad lo cual impermeabiliza las mezclas impidiendo el paso del aire y del agua.

- Algunos mejoran la afinidad con el Ligante asfáltico, atenuando la acción de desplazamiento del agua sobre el betún.
- Otros llenantes pueden atenuar la reacción de oxidación inerte al envejecimiento del asfalto.

Una adición apropiada del llenante adecuado, contribuye a aumentar la consistencia del asfalto, lo cual se traduce en un aumento de las propiedades cohesivas y de resistencia a las mezclas, modificando la naturaleza viscosa del ligante. (DIEGO ALVAREZ HERNADEZ & ARROYO ORTIZ, 2008).

**a. Mecanismo de Promoción de la Inclusión de Llenantes Minerales**

El mecanismo mediante el cual el llenante mineral mejora la adhesión del sistema árido – Ligante es influida por la viscosidad del asfalto. Este es un fenómeno de orden mecánico. Se sabe que a mayor viscosidad del Ligante puede reducir su capacidad de cubrimiento a los áridos, pero también se sabe que una vez que se logre un buen cubrimiento, la posibilidad de que el Ligante sea desprendido por efecto del agua se ve disminuida con este incremento de la viscosidad. La introducción del llenante mineral forma lo que se denomina mastic, cuya viscosidad es obviamente mayor que la del Ligante original, siendo esta la influencia geológica del llenante en la adhesión.

### 3.1.4 Llenante Mineral Objeto De Investigación

#### 3.1.4.1 Triturado de restos de llantas (GCR)

El grano de caucho reciclado (GCR) obtenido de llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Los ligantes y mezclas con asfalto caucho se postulan como una excelente alternativa ambiental en la disposición de desechos de llantas, el efecto de la miga de goma en el rendimiento de la mezcla era claramente beneficioso ya que las mezclas con los más altos porcentajes de goma de miga tenían la mayor resistencia a las deformaciones plásticas

La miga de caucho se puede incorporar en mezclas bituminosas en una de dos maneras; mediante el proceso seco o el proceso húmedo: En el proceso seco, se añade el polvo de neumático para el mezclador de planta de asfalto como si se tratara de otro tipo de agregado, por lo tanto modificar directamente las propiedades de la mezcla. Por el contrario, en el proceso húmedo, se añade el polvo de neumático para el aglutinante de betún. De esta manera, en primer lugar, modifica las propiedades del betún, y cuando se añade este aglomerante modifica a la mezcla La principal diferencia entre estas dos técnicas es que el método húmedo modifica más eficazmente las propiedades del aglutinante ya que las partículas de caucho miga interactúan directamente con él. (LIZCANO & FIGUEROA INFANTE,, 2008.)

**Ilustración 2 Miga de Caucho**

**Fuente: IDU**

**Tabla 3 Valores recomendados con uso de Miga de Caucho**

| Variables | Unidad | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|
| Cantidad GCR | % sobre el peso del ligante | 10 | 20 |
| Tiempo de Reacción | min | 55 | 75 |
| Velocidad de agitación en Laboratorio | min | 100 | 750 |
| Temperatura de Mezclado | °C | 155 | 170 |

**Fuente: (IDU, 2009)**

### 3.1.5 Tipos de mezclas Asfálticas

#### 3.1.5.1 Mezclas Asfálticas en Frío:

El Ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión Mezclas. (BOTASSO, OSCAR REBOLLO, ADRIÁN CUATTROCCHIO, & CECILIA SOENGAS, Julio 2008)

#### 3.1.5.2 Mezclas Asfálticas en Caliente

Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. **Co**nstituye el tipo más generalizado de mez-

cla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados.

**Ilustración 3 Elaboración de mezclas en caliente.**

**Fuente: Autor (Lab. Unicartagena) 2012**

## 3.2 Diseño De Mezclas Asfálticas

### 3.2.6 Métodos de diseño más conocidos:

- Método Marshall (1930´s): Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40´s.
- Método SUPERPAVE (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE: que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico

de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiado a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

- Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. W AASHTO (1984): Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las ruedas.

### 3.2.6.1 Método Marshall:

El ensayo Marshall es la metodología tradicionalmente adoptada para la dosificación, evaluación y control de calidad de mezclas asfálticas en Colombia y otros países del mundo. Si bien el ensayo de estabilidad y flujo no valora ninguna propiedad fundamental de las mezclas asfálticas, es un ensayo simple y expeditivo que requiere un equipamiento básico al alcance de cualquier laboratorio de obra. Sin embargo, la existencia de una amplia variedad de equipos de ensayo así como su uso rutinario y generalizado ha mostrado que en algunos casos, no se respeta estrictamente la metodología normalizada particularmente en lo que se refiere a las características de la prensa, las mordazas y la velocidad de aplicación de las cargas. Este trabajo tiene por objeto estudiar la influencia de determinados factores en los resultados de estabilidad y fluencia que se obtienen en el ensayo Marshall. En particular, los factores o variables analizadas son la velocidad de aplicación de las cargas, las dimensiones y forma de las mordazas y el método de medición de las fuerzas aplicadas y las deformaciones resultantes.

El ensayo Marshall es la metodología tradicionalmente adoptada para la dosificación, evaluación y control de calidad de mezclas asfálticas en nuestro país y otros países del

mundo. Si bien el ensayo de estabilidad y fluencia no valora ninguna propiedad fundamental de las mezclas asfálticas, es un ensayo que requiere un equipamiento básico al alcance de cualquier laboratorio de obra.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU (USCOE) comenzó a evaluar diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente para su uso en el diseño de pavimentos de aeropuertos.

La motivación provino de la carga de las ruedas cada vez mayor y la presión de los neumáticos producidos por los aviones militares de mayor porte. Los primeros trabajos del Ejército de los EE.UU en 1943 tenían como objetivo el desarrollo de "*un aparato simple para el diseño y control de mezclas asfálticas de pavimentación*". El método más prometedor finalmente resultó ser la Estabilidad Marshall desarrollado por Bruce G. Marshall en el Departamento de Carreteras de Mississippi en 1939. A la original Prueba de Estabilidad Marshall se le añadió posteriormente una medida de la deformación para ayudar en la detección de contenidos de asfaltos excesivamente altos. Esta prueba adjunta se recomendó finalmente para su aprobación por el Ejército de los EE.UU debido a que:

- Permite valorar la totalidad de la muestra en lugar de sólo una parte de ella.
- Es una prueba rápida
- El equipamiento es compacto, ligero y portátil.
- El método de compactación produce densidades razonablemente cerca de
- Las densidades de campo.

**Ilustración 4 Ensayo Metodología Marshall**

**Fuente: Autor**

**Ilustración 5 . Equipos Laboratorio Universidad de Cartagena**

**Fuente: Autor 2014**

### 3.2.6.2 Elaboración de la mezcla asfáltica metodología marshall

Después de haber realizado las pruebas correspondientes al material granular y verificar que cumple con las especificaciones mínimas se procede a encontrar una dosificación de estos materiales que cumpla con los parámetros establecidos por las norma INVIAS 2007, teniendo en cuenta que la mezcla objeto del proyecto es una Mezcla Densa en Caliente tipo 2 (MDC-2).

**Ilustración 6 Elaboración de mezcla asfáltica en caliente Lab. Unicartagena.**

**Fuente: Autor 2012**

### 3.2.7 Propiedades Consideradas Para El Diseño De Mezclas

Las mezclas asfálticas en caliente trabajan de una mejor manera debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

#### 3.2.7.1 Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

#### 3.2.7.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

#### 3.2.7.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

### 3.2.7.4 Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

### 3.2.7.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una caracte-

rística deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos

### 3.2.8 Características de las mezclas asfálticas

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

#### 3.2.8.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multi-

plicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m3). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

### 3.2.8.2 Vacíos De Aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional.. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras
de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

#### 3.2.8.3 Vacíos En El Agregado Mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanta más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

### 3.2.9 Contenido De Asfalto En Mezclas Bituminosas

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a

través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará.

En vez de hacer ajuste arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas propiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

### 3.2.10 Elaboración de muestras para ensayos de una mezcla asfáltica

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

### 3.2.11 Pruebas a las mezclas asfálticas

Las pruebas a las probetas de mezcla asfáltica pueden ser de dos tipo, la primera, con el fin de evaluar características volumétricas debidas a los diferentes equipos de compactación utilizados; en la segunda, se valorarán los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante diferentes pruebas mecánicas con el fin de calificar la influencia de la compactación, bajo diferentes condiciones de falla. (DIEGO ALVAREZ HERNADEZ & ARROYO ORTIZ, 2008)

#### 3.2.11.1 Pruebas Volumétricas

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se describen las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría y los parámetros a evaluar en el estudio.

- **Gravedad especifica de los agregados (Gagr):** Este método de prueba se usa para determinar la densidad de la proporción esencialmente sólida de cantidad de partículas de agregado y provee un valor promedio representativo de la muestra, se evalúa según norma E-222 y E-223.

- **Gravedad especifica de la mezcla compacta (Gmb):** Esta prueba se realiza para estimar el grado de densificación que tendrá la mezcla asfáltica colocada en la estructura del pavimento. Debe tenerse en cuenta que esta densificación es el valor estimado que tendrá la mezcla asfáltica después de un tiempo de hacerse colocado en el pavimento. Esto debido a que el pavimento después de ser colocado, sigue sufriendo densificación debido al paso de los vehículos. Norma INVIAS E-711.
- **Gravedad teórica máxima de la mezcla (Gmm):** La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el Gmb y el Gmm, se obtiene según el método INVIAS E-735. Esta figura se debe efectuar con un aparato que extraiga todos los vacíos de la mezcla succionándolos con una bomba de vacío.

#### 3.2.11.2 Pruebas Mecánicas

Estas pruebas dan una indicación acerca de cómo se comportará estructuralmente la mezcla, teniendo en cuenta correlaciones dadas por el INVIAS. Estas pruebas se describen a continuación. (DIEGO ALVAREZ HERNADEZ & ARROYO ORTIZ, 2008)

- **Prueba de estabilidad y flujo Marshall:** Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm/min. Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño maría a una temperatura de 60°C de 30 a 40 minutos, para después ensayarla en la maquina Marshall: los valores obtenidos se utilizan para la determinar el contenido óptimo de asfalto, este método se describe en la norma INVIAS E-748.

- **Escogencia de la dosificación óptima de asfalto:** Se escoge la granulometría óptima de la mezcla que presente una curva equidistante a las dos curvas de límites superior e inferior. A esta se le adiciona una cantidad de asfalto tal que lleve a la mezcla a tener la mejor calidad posible.

### 3.2.12 Cálculo del porcentaje óptimo de llenante mineral

Un diseño de mezcla asfáltica se compone de una serie de ensayos de prueba y error donde por medio de tanteos se asume una cantidad específica de materiales pétreos y se le adicionan diferentes porcentajes asfalto para calcular su contenido óptimo. De esta misma forma hay que asumir una proporción de llenante mineral deseable para poder calcular la cantidad total en una mezcla.

El objetivo es alcanzar una estabilidad de 23mm libras al ensayar las briquetas en la prensa Marshall, teniendo en cuenta que el 85% de esta son 1950 libras que es la estabilidad mínima que permite la norma para tráfico pesado y el 85% es la tolerancia máxima exigida al ensayar muestras individuales de la mezcla. Así se garantiza un rango de seguridad bastante alto durante la etapa de producción de la mezcla en planta. (DIEGO ALVAREZ HERNADEZ & ARROYO ORTIZ, 2008)

### 3.2.13 Estabilidad Y Flujo De Mezclas Asfálticas

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

**A. Estabilidad:**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para

acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

Como 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. (UDEP, 2008)

**B. Flujo:**

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. 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. (UDEP, 2008)

# 4 OBJETIVOS

## 4.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de la incorporación del triturado de los residuos de llantas, sobre las propiedades físicas de mezclas asfálticas, mediante la metodología Marshall, para establecer su uso en el diseño y la construcción de pavimentos flexibles.

## 4.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los agregados y materiales.

- Desarrollar un procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en seco para el material de diseño grano de caucho molido como adición de los agregados pétreos.

- Obtener el porcentaje y dosificación óptima del triturado de resto de llanta como llenante mineral haciendo uso de la metodología Marshall.

- Determinar la estabilidad y flujo Marshall en las mezclas asfálticas preparadas con la adición de restos de llantas desmigajados para ser comparada con la muestra patrón.

- Identificar la influencia del uso esta nueva fuente de materia prima en la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica, respecto a una mezcla patrón.

- Identificar cuál de las dos alternativas es más económica para la producción de una mezcla asfáltica a gran escala.

# 5 ALCANCE

## 5.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

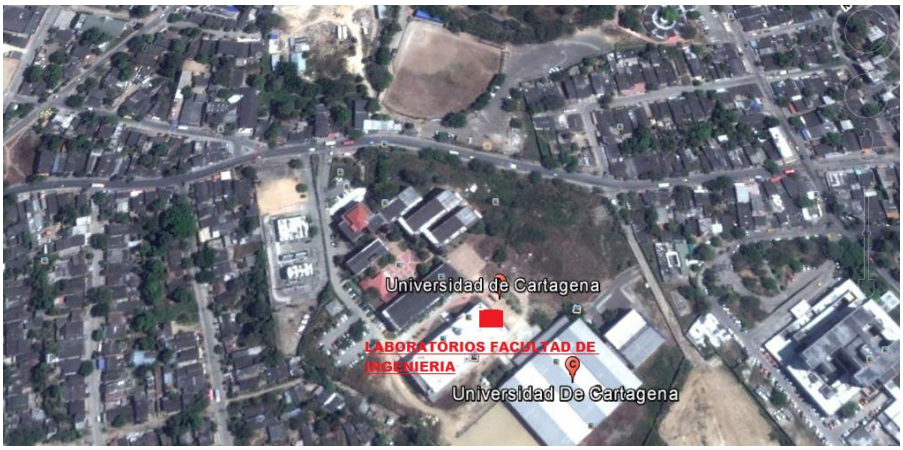
Este trabajo de investigación se realizó en el departamento de Bolívar, en la jurisdicción del municipio de Cartagena, cuyas coordenadas geográficas son $10^{O}24'$

30'' Latitud Norte, 75$^{O}$ 30' 25'' Longitud Oeste. Esta ciudad posee una superficie de 709.1 Km$^{2}$, con una población de 944.250 habitantes.

**Ilustración 7 Ubicación geográfica de la zona de estudio**

**Fuente: Google Earth 2013.**

**Ilustración 8 Ubicación geográfica de la zona donde se realizó la investigación**




Fuente: Google Earth 2013.

## 5.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

El proyecto de investigación se desarrolló durante el segundo semestre del año 2013 y el primer semestre del año 2014. La duración de éste, se describió y justificó en el cronograma planeado en la propuesta realizada durante el segundo semestre del año 2013.

## 5.3 ALCANCE DEL PROYECTO

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles en la ciudad de Cartagena, está estrictamente ligado al uso de materiales pétreos como materia prima, ignorando la posibilidad de usar otros componentes que puedan ayudar a mejorar la calidad y reducir los costos de producción.

Por lo tanto, teniendo en cuenta investigaciones realizadas concernientes al uso de restos de llantas como uso de sus agregados o llenante mineral, esta investigación buscará obtener la mezcla asfáltica optima e identificara la incidencia de este llenante mineral sobre el comportamiento final en cada mezcla, que permita mejorar las propiedades de resistencia y deformación sobre una capa de rodadura final, y así mismo determinar las ventajas para su producción. Todo esto realizando ensayos de laboratorio y procedimientos de diseño estandarizados por las normas INVIAS 2007 y siendo comparados con una muestra patrón; como lo es el caso del método Marshall, siendo este quien permitirá identificar las mejores combinaciones de materiales para el diseño de mezcla. Contribuyendo además con una mejor disposición y al aprovechamiento y reutilización de restos de llantas fruto de los desperdicios del parque automotor de la ciudad.

- En esta investigación se buscará obtener resultados iguales o superiores a los mínimos establecidos por la vigente norma INVIAS 2007.

  En lo correspondiente a los agregados pétreos y el llenante mineral para la elaboración de mezclas densas en caliente (concreto asfáltico) deberán satisfacer los requisitos de calidad impuestos para ellos en el aparte 400.2.1 del Artículo 400 de dicha norma. En donde los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que presumiblemente puedan darse en la zona de empleo. Además el

agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder del quince por ciento (15 %) de la masa total del agregado combinado.

El diseño para las mezclas asfálticas obtenidas se realizaran bajo los criterios establecidos para soportar cargas cuando el tránsito de diseño sea superior a cinco millones ( $> 5*10^6$) con los ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.

Aparte de eso, para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la especificación mencionada, el material deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

Se usara como base de diseño  la gradación MDC-2, teniendo en cuenta que el resultado pretendido de las mezclas asfálticas será para capas de rodadura de pavimentos flexibles superiores a 3cm.

Además al revisar la norma y al ver que para espesores mayores de cinco centímetros  (5 cm) sobre la capa de rodadura se puede usar la gradación MDC-1, es necesario aclarar que podrá emplearse también para ejecutar esta investigación.

Se prepararán por lo menos tres briquetas para cada combinación de agregados con cemento asfáltico y llenante mineral para cada una de las mezclas modificadas, de igual manera, por lo menos tres briquetas para las distintas combinaciones en la mezcla patrón. Una vez frías las briquetas y extraídas del molde se espera obtener la altura de las briquetas menor a  2.5” o si no se le debe hacer su respectiva corrección, especificada en el procedimiento de diseño.  (INVIAS, 2007)

- En la siguiente tabla se mostrarán los rangos de valores requeridos por la norma y que serán fuente de referencia para obtener los resultados adecuados y aceptables para el cumplimiento de los objetivos planteados y correspondientes al producto a mostrar.

**Tabla 4 Valores para tránsito de diseño (N) ejes equivalentes de 80KN CON >5X10^6.**

| CARACTERISTICAS | TRÁNSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80kN |
|---|---|
| | >5X10^6 |
| Compactación, golpes/cara | 75 |
| Esatbilidad Mínima (kg) | 900 |
| Flujo (mm) | 2 a 3.5 |
| Vacios con aire | |
| Capa de Rodadura % | 4 a 6 |
| Base Asfáltica % | 4 a 8 |
| | |
| Vacíos Minimos en agregados minerales | |
| Gradación MDC-0 % | 14 |
| Gradación MDC-1 % | 14 |
| Gradación MDC-2 % | 15 |
| Gradación MDC-3 % | 16 |
| | |
| Vacíos llenos de Asfalto | 65 a 75 |

**FUENTE: (INVIAS,2007)**

- Para identificar el cumplimiento de los objetivos planteados por esta investigación, se mostraran las gráficas de las combinaciones correspondientes por las gradaciones, los cálculos, descripciones y análisis correspondientes para cada una de las densidades, gravedades específicas, porcentajes de vacío, porcentajes óptimo de asfalto y llenante mineral, estabilidades y flujos para cada una de las mezclas (con restos de llantas, y mezcla patrón); ayudando entonces a reconocer si la incorporación de los llenantes minerales planteados servirán como fuente de materia prima para la producción de mezclas asfálticas a gran escala. Si al establecer y cumplir con todas las características y

propiedades de las mezclas planteadas se podrá tener esta investigación como base fundamental para estudios complementarios en los que se verificarán las condiciones dinámicas para mezclas de este tipo, además abriendo campo para otras áreas de investigación que permitan establecer las propiedades químicas que reflejan y colaboran con los resultados obtenidos para este tipo de mezclas.

- Es de suma importancia aclarar que en el desarrollo y como resultado de esta investigación no se presentaran ensayos dinámicos para ninguna de las tres mezclas a elaborar.

# 6 METODOLOGIA

La presente tesis de grado está enmarcada dentro del de tipo de investigación experimental. Un estudio comprendido por un análisis comparativo entre una mezcla asfáltica convencional usada por la empresa Promotora Montecarlo y otra con una incorporación del

triturado de restos de llantas, que fue la materia prima propuesta para el desarrollo de esta investigación. Es importante señalar que para el cumplimiento de todos los objetivos de tipo experimental, los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad de Cartagena y la Finca Torcoroma (Planta de producción de Promotora Montecarlo), durante el primer semestre académico del año 2014 con una duración aproximada de 4 meses y medio.

La etapa experimental consistió en la determinación de un número de variables que fueron comparadas y examinadas con relación al aumento o disminución de datos obtenidos por actividades metódicas, mediante técnicas seleccionadas y enfatizadas sobre las normas IN-VIAS 2007, que establece y acepta el uso de la metodología Marshall.

Con este tipo de investigación, se recopilaron datos de laboratorio que permitieron realizar un análisis de factibilidad técnica y además reconocer la importancia de este tipo de investigación al comprobar una hipótesis planteada con anticipación sobre la influencia obtenida al incorporar granos del triturado de restos de llantas como fuente de materia prima para la elaboración de mezclas asfálticas. Dicha influencia se identificó al obtener valores de la estabilidad y flujo Marshall sobre las mezclas modificadas al ser comparadas con la mezcla patrón. Además se obtuvo una dosificación óptima para la mezcla con GCR, haciendo uso de la metodología Marshall como se mencionó con anterioridad.

## 6.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

### 6.1.1 Recolección de información primaria:

**6.1.1.1 Esquema de formatos para laboratorios**: Se buscaron y organizaron los formatos más adecuados para la obtención y digitalización de datos que generalmente se usan

los laboratorios convencionales para registrar los ensayos, además se elaboraron las hojas de cálculo para proceder al diseño de mezclas y su análisis posterior.

**6.1.1.2 Obtención de materias primas**: Para la obtención de los materiales usados como materia prima en la producción de las mezclas asfálticas, es importante enunciar que los agregados pétreos fueron suministrados por la empresa Promotora Montecarlo y en lo correspondiente al GCR fue comprado a la empresa Green Tire.

- Agregados Pétreos:

Fueron proporcionados como agregado grueso Triturado pasa ¾" y pasa ½", producto de la trituración de piedra de la cantera Rotinet.

**Ilustración 9 Triturado Pasa ¾" y Pasa ½"**

**Fuente: Autor 2014**

En lo referente a los agregados finos, se obtuvo arena lavada de Palmarito, arena triturada y un llenante mineral (campusano).

**Ilustración 10 Arena Lavada y Arena Zarandeada**

**Fuente: Autor**

**Ilustración 11Llenante Mineral y Finca Torcoroma.**

**Fuente: Autor**

- Se obtuvo el material de llanta reciclada en grano molido conocido comercialmente como GCR en un bulto de 40 Kg. Es importante mencionar que este material fue comprado por la dificultad de realizar los procesos de separación de partículas que componen la llanta y los neumáticos, en los laboratorios de la Universidad de Cartagena. Pero es importante resaltar brevemente el proceso de trituración, para que sea tenido en cuenta en pro de futuras investigaciones.

  El proceso es enteramente mecánico, inicialmente se hace el destalonado, que extrae el anillo de alambres de acero encontrados en el interior de la llanta. Luego se da un proceso de

Lavado y desinfección, en este proceso se limpia las llantas con una mezcla jabonosa, para después ser limpiadas y puestas a secar. Posteriormente se hace un almacenamiento, para llevar a cabo un triturado Primario, donde se utiliza la trituradora primaria que como su nombre lo indica realiza la primera trituración, esta máquina cuenta con dos ejes con cuchillas de corte rotantes que reducen la llanta a pedazos de aproximadamente 300mm. Continuando con el Triturado Secundario en donde reduce trozos de 300mm a 50mm a través de una acción análoga a la anterior, esta trituradora cuenta con una parrilla metálica para la calibración del tamaño del material en la salida. Para ir obteniendo los tamaños que comercialemnte se están usando, se lleva a cabo después el proceso de Granulado, llegando a reducir los pedazos provenientes de la trituradora secundaria a un tamaño de 16mm. Además de estas trituraciones se continúa con el Desmetalizado que consiste en la separación magnética, contando con un imán a través del cual se recoge cualquier material ferroso presente, esa operación separa el acero presente en las llantas. Luego una criba o cernidor rotativo también llamado tamiz se encarga de separar la fibra de nylon de los granos de caucho, para poder pulverizar el caucho si se hace necesario ya sin presencia de acero, y fibra de nylon, llegando hasta un grano de 0.5mm. **(Green Tire, 2014)**

**Ilustración 12 Grano de Caucho**

**Fuente: Autor 2014**

**6.1.1.3 Caracterización:** Se procedió a un análisis detallado para obtener una caracterización de cada uno de los elementos que conformaron los 2 tipos de mezclas a estudiar (mezcla patrón y mezcla con incorporación del triturado de restos de llantas), como es el caso

de los agregados, el modificador y del ligante asfáltico (dado por Ecopetrol). Todo ese análisis fue posible, haciendo uso de las normas y ensayos de laboratorio establecidos por INVIAS 2007:

Los ensayos usados en una mezcla convencional que se realizaron son los siguientes: Humedad Natural (E-122), gravedad específica (E-222, E-223), equivalente de arena (E133), peso unitario (E-217), desgaste en la máquina de los ángeles (E-218, E-219), solidez de sulfatos (E-220), partículas planas y alargadas, contenido de materia orgánica y gradación. En donde en esta última se buscó la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, comprobando los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 µm (No.200).

Es importante señalar que para el material conocido como GCR a incorporar en la mezcla modificada se le realizó una gradación como a cualquier otro agregado, teniendo en cuenta que este fue su uso dentro de la mezcla.

**6.1.1.4 Combinación de materiales:** Después de haber obtenido una caracterización totalmente aceptable de cada uno de los materiales, se obtuvo el aval para poder realizar una mezcla asfáltica con ese tipo de agregados pétreos. Entonces fue posible iniciar con el proceso de combinación de agregados preestablecido por la Promotora Montecarlo, haciendo uso de las exigencias granulométricas de la norma INVIAS, la cual establece un rango de valores que se pueden observar en la siguiente tabla.

**Tabla 5 Rangos granulométricos MDC-2**

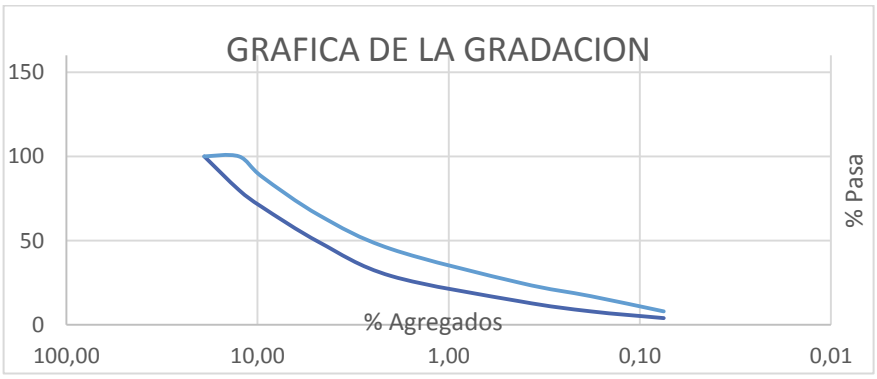
| Tamiz | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|
| 3/4" | 100 | |
| 1/2" | 80 | 95 |
| 3/8" | 70 | 88 |
| No.4 | 49 | 65 |
| No.10 | 29 | 45 |
| No.40 | 14 | 25 |
| No.80 | 8 | 17 |

| | | |
|---|---|---|
| No.200 | 4 | 8 |

Fuente: INVIAS 2007

El cual está representado en dos franjas límites, estructurado de la siguiente manera.

**Ilustración 13 Gráfica de dosificación de agregados.**




Fuente: Empresa Promotora Montecarlo 2014

**6.1.1.5 Muestra Patrón:** Teniendo en cuenta que los materiales pétreos fueron suministrados por la Promotora Montecarlo y al cumplir con el primer objetivo de esta investigación, como lo es realizar el análisis y caracterización de cada uno de los agregados, se decidió coincidir con su porcentaje óptimo del 5.5 % de asfalto para la elaboración de la mezcla asfáltica patrón, para de esta manera tomar como referencia un diseño utilizado en las carretas de la región y así obtener resultados muchos más reales y confiables. Es importante señalar que para la obtención de ese porcentaje, se elaboraron los 3 especímenes correspondientes para cada porcentaje estimado de asfalto variando desde un 4.5% hasta un 6.5%( 15 briquetas), a los cuales se les realizó los cálculos propios de % de vacío, estabilidad, flujo y peso específico para ser analizados contra el % de asfalto correspondiente y obtener el resultado óptimo final.

**6.1.1.6 Preparación de muestra Patrón y de la mezcla modificada con incorporación de GCR para el análisis de la investigación:**

Inicialmente se prepararon las 3 briquetas correspondientes a la muestra patrón con el porcentaje de 5.5% pre-establecido por iniciativa de la Promotora Montecarlo. El procedimiento consistió en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en la norma INV 748, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. Luego para conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinaron previamente las gravedades específicas de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas mostradas anteriormente.
(INVIAS, 2007)

Las muestras fueron preparadas de la siguiente manera:

A. Inicialmente se realizó un procedimiento para dosificación de agregados que se utilizó en el método de diseño que recomienda la norma AASHTO T 245, que es la que rige el procedimiento de elaboración de las briquetas por el Método Marshall, para luego ser ensayadas para la Resistencia a la Estabilidad y Flujo, el ensayo recomienda, que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones. (RAFAEL ALEXANDER CRESPIN MOLINA, ISMAEL ERNESTO STA CRUZ JEVEL, , & PABLO ALBERTO TORRES, 2012)

B. Luego el asfalto y el agregado se calentaron completamente hasta que todas las partículas del agregado estuvieran revestidas. Esto simuló los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

**Ilustración 14 Calentamiento de Asfalto y agregados.**

**Fuente: El autor 2014**

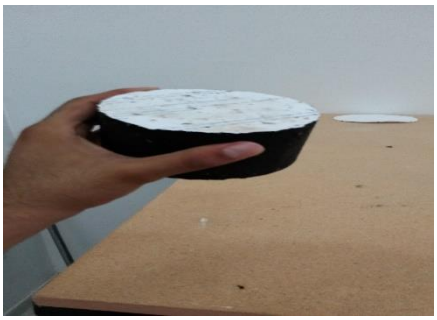
C. Posteriormente, las mezclas asfálticas calientes se colocaron en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usó el martillo Marshall de compactación, el cual también fué calentado para que no se enfriara la superficie de la mezcla al golpearla.

D. Las briquetas se compactaron mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes fue de 75 por cada cara de la briqueta, recibiendo un total de 150 golpes.

**Ilustración 15 Preparación de briquetas y compactación.**

**Fuente: El autor 2014**

**Ilustración 16 Briquetas compactadas.**



**Fuente: Autor 2014**

Por otra parte, para la preparación de las briquetas con incorporación de GCR se realizó un procedimiento semejante, elaborando 3 briquetas para cada variación del % con contenido de GCR. Los valores porcentuales de GCR establecidos para esta investigación fueron de 1.5%, 2%, 2.5%, 3.0%, 3.5% y 4.0%, para un total de 18 briquetas con GCR.

Es importante mencionar que al momento de adicionar el grano de caucho fue necesario establecer el peso correspondiente en gr de GCR para cada uno de los porcentajes de variación; advirtiendo que fue analizada la dosificación y diseño de mezcla en la curva establecida por la Norma Invias 2007 como se pudo observar en la ilustración 13.

La base para la preparación de las briquetas fue un peso total de mezcla de 1200gr para cada una, como se puede ver a continuación:

**Tabla 6 DOSIFICACIÓN DE GCR DEL 1.5% AL 4.0%**

| GCR Diseño | 1.50% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 3.50% | 42 | gr |
| GRC | 1.50% | 18 | gr |

| GCR Diseño | 2.00% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 3.00% | 36 | gr |
| GRC | 2.00% | 24 | gr |

| GCR Diseño | 2.50% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 2.50% | 30 | gr |
| GRC | 2.50% | 30 | gr |

| GCR Diseño | 3.00% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 2.00% | 24 | gr |
| GRC | 3.00% | 36 | gr |

| GCR Diseño | 3.50% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 1.50% | 18 | gr |
| GRC | 3.50% | 42 | gr |

| GCR Diseño | 4.00% | | |
|---|---|---|---|
| | % de Diseño | Peso (gr) | |
| Peso Mezcla | 100% | 1200 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 20% | 240 | gr |
| Triturado Pasa 3/4" | 35% | 420 | gr |
| Arena Lavada | 20% | 240 | gr |
| Arena Triturada | 20% | 240 | gr |
| Llenante | 1.00% | 12 | gr |
| GRC | 4.00% | 48 | gr |

Fuente: Autor 2014

Al momento de realizar las combinaciones de agregados, para poder mezclar el GCR con los demás materiales debía ser calentado previamente por dos minutos a una temperatura de 150° para obtener un aumento de temperatura y así encontrarse con valores muy cercanos a la de los demás materiales, que al final serían un solo conjunto. Es importante señalar que para cada una de las 18 briquetas modificadas con GCR, también se les aplicó la carga en la Maquina Marshall para determinar sus respectivos valores de estabilidad, flujo y peso específico y proceder a su análisis.

### 6.1.1.7 Preparación De Briquetas

6.1.1.7.1 **Equipo y Materiales necesarios**: Para obtener una preparación y constitución de las muestras de mezcla asfáltica fue indispensable hacer uso de los siguientes elementos de laboratorio:

- Tamices: Los necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida por la especificación a los agregados para la mezcla que se va a diseñar.
  Dispositivo para moldear probetas: Se utilizó un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde posee un diámetro interior de 101.6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76.2 mm (3");
- Extractor de Probetas: Elemento de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de extensión.

- Martillo de Compactación: Es un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8”) de diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06”).
- Pedestal de Compactación: SE utilizó una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203.2 mm de lado y 457.2 mm de altura (8" x 8" x 18") y provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado x 25.4 mm de espesor (12" x 12" x 1").
- Sujetador para el molde: Es un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

#### 6.1.1.8 Equipos para ensayos a compresión

- Mordazas y medidor de deformación: Las mordazas consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") maquinado con exactitud. El medidor de deformación consiste en un deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0.25 mm (0.01”).
- Prensa: Para la rotura de las probetas se empló una prensa mecánica o hidráulica capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50.8 mm por minuto (2”/min.). su capacidad de carga mínima deberá ser de 40 kN.

  Medidor de la estabilidad: La resistencia de la probeta en el ensayo se medió con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22.2 kN (2265 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 44.5 N (4.54 kgf) hasta 4.45 kN (454 kgf) y 111.2 N (11.4 kgf) hasta 22.2 kN (2265 kgf). Las deformaciones del anillo se medió con un deformímetro graduado en 0.0025 mm (0.0001”).
- Elementos de calefacción: Para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra, se empleó un, provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 2.8° C (5° F).

- Balanzas: Una de cinco (5) kg de capacidad, sensible a un (1) g para pesar agregados y asfalto; otra de dos (2) kg de capacidad, sensible a 0.1 g para las probetas compactadas. (INVIAS, 2007)

**Ilustración 17 Equipo de ensayo a compresión método Marshall**

**Fuente: Autor 2014**

Para la realización de los ensayos de Laboratorio y su posterior análisis fué obligatorio el uso del siguiente listado de ecuaciones.

- Para la densidad del agregado fino se usara:

$$d = \frac{masa\ del\ material}{volumen\ ocupado} \quad (1)$$

- Densidad agregado grueso:
  A: Peso seco

  B: Peso muestra saturada sumergida

  C: Peso muestra saturada y superficialmente Seca

$$Dg = \frac{A}{C - B} \quad (2)$$

- Densidad especifica:

$$G\ Bulk\ agregados = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3}} \quad (3)$$

Donde P1, P2 son los porcentajes en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

G1, G2,G3, es el peso especifico de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

- Para el calculo de la gravedad especifica máxima teórcia de la muestra para cada uno de los porcentajes de asfalto.

$$Gmas\ agregados = \frac{100}{\frac{\%agregados}{Gagregados} + \frac{\%asfalto}{Gasfalto}} \quad (4)$$

Dónde: % agregados = 100- % asfalto

- Luego la gravedad especifica efectiva:

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (5)$$

- Porcentaje de asfalto absorbido:

$$Pba = \frac{Gb\ (Gse - Gsb)}{Gsb * Gse} * 100 \quad (6)$$

- Volumen de briquetas:

$$volumen = Peso\ superf.seco - peso\ sumergido \quad (7)$$

Porcentaje de asfalto efectivo:

$$Pbe = Pb - \frac{Pba * Ps}{100} \quad (8)$$

- Porcentaje de vacíos: $VAM = 100 - \frac{Gmb*Ps}{Gsb}$ (9)

Donde Ps: porcentaje de agregado respecto al peso de toda la mezcla.

- Porcentaje de vacíos de aire:

$$Va = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (10)$$

- Porcentaje de vacíos lleno de ligante asfáltico:

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} * 100 \quad (11)$$

#### 6.1.1.9 Ensayos de laboratorio para determinar la estabilidad y flujo

Se colocaron las probetas en un baño de agua durante 30 minutos, manteniendo el baño o el horno a 60° ± 1° C (140° ± 1.8° F).

Se retiraba la respectiva probeta del baño de agua y se colocaba centrada en la mordaza inferior; luego se montaba la mordaza superior con el medidor de deformación.

Se aplicó posteriormente, la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que ocurría la falla, es decir cuando se alcanzó la máxima carga.

Se anotó el valor máximo de carga registrado en la máquina de ensayo en Kgf y el valor del flujo para cada una de las briquetas ensayadas en unidades de 0.001", llevadas posteriormente a mm. El valor total en kgf que se necesitó para producir la falla de cada muestra se registró como su valor de Estabilidad Marshall.

Se anotó cada lectura en el medidor de flujo en el instante de alcanzar la carga máxima. Ese el valor del "flujo" para la probeta, expresado en mm, que indica la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. El procedimiento completo, a partir de la sacada de la probeta del baño de agua, se debía completar en un período no mayor de 30 segundos. (INVIAS, 2007)

#### 6.1.1.10 Datos recogidos:

Para analizar los valores de Datos de Estabilidad y Flujo fue necesario hacer la recolección de los siguientes datos, para poder realizar un análisis más completo y sin dejar al lado ningún tipo de variables.

- Tipo de muestra ensayada (Muestra de laboratorio).

- Valor promedio de la máxima carga en Newtons (Lbf) de tres especímenes para cada porcentaje de GCR establecidos en el rango de diseño de 1.5 a 4% con una variación de 0.5% como tamaño de paso.
- Valor promedio del flujo, en 0.25 mm (0.001") de tres especímenes para cada % de GCR.
- Temperatura del Ensayo (INVIAS, 2007)

A. Después de haber realizado los ensayos Marshall en laboratorio se continuó con proceso necesario de realizar el tercer procedimiento contemplado en el método Marshall, el cual consiste en:
   - Cálculo de la densidad medida en kg/$m^3$, contenido de vacíos en porcentaje (%) y estabilidad en las briquetas en Kg/mm; para obtener los valores y posteriormente elaborar los gráficos con los que se pudo obtener el contenido óptimo de asfalto en la muestra patrón diseñada por la Promotora Montecarlo y el % GCR buscado en esta investigación (RAFAEL ALEXANDER CRESPIN MOLINA, ISMAEL ERNESTO STA CRUZ JEVEL, , & PABLO ALBERTO TORRES, 2012)
   - "Los valores fueron establecidos y anexados en unidades del SI como los establece la norma INV 748".

### 6.1.2 Recolección secundaria:

**6.1.2.1** Documentación: Se procedió a la recolección de información acerca de mezclas asfálticas producidas en caliente con incorporación de nuevas fuentes de materia para el mejoramiento de las condiciones finales; esta información fue revisada en artículos científicos, informes, libros y diferentes fuentes teóricas referentes a dicha investigación. Cabe destacar que una de las principales fuentes de información fueron las bases de datos proporcionadas por la Universidad de Cartagena, además algunas tesis presentadas para obtener el título de pregrado en Ingeniería Civil y Postgrado en Vías Terrestres.

Por otro lado, al momento de caracterizar el ligante asfáltico, se tuvo en cuenta los datos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio realizados por la empresa productora ECOPETROL S.A. Estos ensayos fueron (ANA SOFIA FIGUEROA INFANTE & MONTEALEGRE, 2007):

- Ensayo de penetración. (ASTM D5-97)
- Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D36-95)
- Viscosidad. (ASTM D2170-95)
- Punto de ignición y de llama (ASTM D3143-98)
- Ensayo de ductilidad. (ASTM D113-99)

Una vez concluida la búsqueda de bibliografía primaria, se realizó una recopilación de normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), con el fin de determinar y realizar cada uno de los procedimientos y establecidos por la norma vigente para la elaboración y producción de una mezclas asfáltica; obtenida la información fue ordenada y utilizada directamente para la organización del plan de trabajo del proyecto de investigación.

# 7 RESULTADOS Y DISCUSION

## 7.1 Caracterización de materiales

Con el fin de identificar la calidad de cada uno de los elementos que conformaron las mezclas estudiadas y prever el buen comportamiento del producto final, fue necesario realizar un análisis estricto y minucioso recomendado por la Norma Invias 2007, al momento de plantear un diseño de mezcla asfáltica tipo MDC-2 para capas de rodadura de altos volúmenes de tránsito. Encontrando los siguientes resultados:

### 7.2 Caracterización del ligante asfáltico

Tomando los datos referentes de los laboratorios para el control de calidad de ECOPETROL Barrancabermeja, fue posible conocer las características principales aceptables por la Norma INVIAS 2007 que presenta el asfalto 60/70 con el cual se trabajó en esta investigación. Esto se puede ver a continuación:

- Nombre Químico o Familia: Asfalto de Penetración 60/70

- Propiedades Físicas y Químicas:

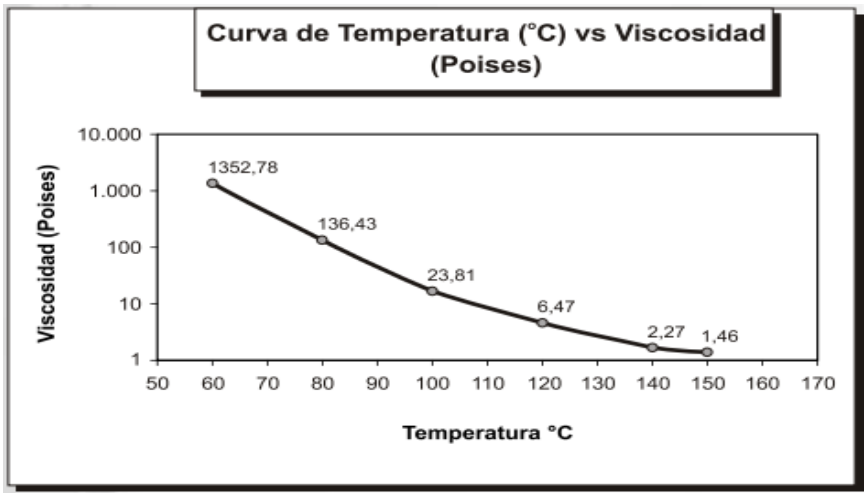
  - ✓ Apariencia: Líquido negro y brillante que fluye fácilmente a las temperaturas de aplicación. A temperatura ambiente es semisólido.
  - ✓ Olor: A altas temperaturas tiene olor característico a asfalto. A temperatura ambiente es inodoro.
  - ✓ Gravedad Específica (60° F/60°F): 1.0
  - ✓ Punto de Ablandamiento (°C): Varía entre 40 y 60 °C, según el tipo de asfalto.
  - ✓ Penetración (mm/10): Varía entre 50 y 220 mm/10 @ 25 °C, 100g, 5s, según el tipo de asfalto.
  - ✓ PH del producto sin diluir: N. A.
  - ✓ VOC (compuestos orgánicos Volátiles): No contiene.
  - ✓ Densidad del vapor (aire = 1): No determinada
  - ✓ Solubilidad en agua: Insoluble
  - ✓ Presión de Vapor**:** No aplicable a temperatura ambiente. No determinada a temperatura de aplicación

**Tabla 7 Reporte ensayos de Ensayos de Laboratorio**

| ANALISIS | UNIDAD | RESULTADO | ESPECIFICACIÓN | MÉTODO |
|---|---|---|---|---|
| **Viscosidad a 60°C** | cP | 196000 | REPORTAR | ASTM D 4402 |
| **Viscosidad a 80°C** | cP | 19150 | REPORTAR | ASTM 4402 |
| **Viscosidad a 100°C** | cP | 3200 | REPORTAR | ASTM D 4402 |
| **Viscosidad a 135°C** | cP | 345 | REPORTAR | ASTM D 4402 |
| **Viscosidad a 150°C** | cP | 172.5 | REPORTAR | ASTM D 4402 |
| **Ductilidad** | cm | 140 | 100 MINIMO | ASTM D 113 D |
| **Gravedad API/Gravedad especi-fica en crudos** | | | | |
| **Gravedad API** | Grados API. | 7 | REPORTAR | ASTM D 4052 |
| **Densidad a 15 °C** | Kg/m3 | 1021 | REPORTAR | ASTM D 4052 |
| **Índice de Penetración Calculado** | | | | |
| **Penetración a 25°C (77F)** | mm/10 | 64 | 60 MIN - 70 MAX | ASTM D 5 |
| **Indicie de Penetración** | N/A | -1.2 | REPORTAR | ASTM D 5 |
| **Pérdida de Masa (RTFOT)** | g/100g | 0.28 | 1.0 MAX. | ASTM D 2872 |
| **Punto de Ablandamiento** | °C | 47.8 | 45 MAX - 55 MIN | ASTM D 36 |
| **Punto de Inflamación** | % | 296 | 232 MIN | ASTM D 92 |
| **Solubilidad en Tricloroetileno** | | 99.9 | 99.0 MAX. | ASTM D 2042 |
| **Visto bueno Tanques** | | | | |
| **VoBo** | N/A | SI | REPORTAR | VISTO BUENO |
| **Comentario** | N/A | NINGUNO | REPORTAR | VISTO BUENO |

**Fuente: Gerencia Refinería Barranca Bermeja Ecopetrol – Promotora Montecarlo 2014**

**Ilustración 18 Curva reológica del ligante asfáltico**




**Fuente: Manufacturas y procesos industriales, Ecopetrol. 2014**

**Tabla 8 Temperaturas Ligante**

| | MIN | MAX |
|---|---|---|
| Temperatura de mezclado °C | 145 | 149 |
| Temperatura de Compactación | 135 | 1399 |

**Fuente: Manufacturas y procesos industriales, Ecopetrol. 2014**

## 7.3 Caracterización de materiales pétreos

Cumpliendo con uno de los pasos iniciales en el desarrollo de una mezcla asfáltica, se realizó el análisis granulométrico, para cada uno de los materiales propuestos para el desarrollo de esta investigación, como se puede ver a continuación:

### 7.3.1 Gradación Pasa ¾”

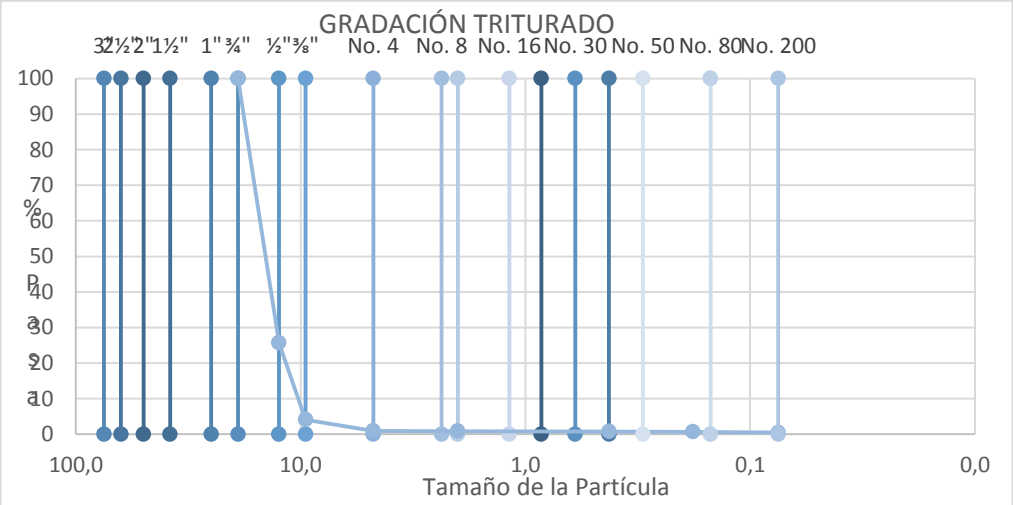
Se puede observar que el mayor porcentaje retenido de agregados está en el tamiz ½”, con un total de 74.4% de agregados y pasando un 100% por el tamiz de ¾”, motivo por el cual se le llama agregado pasa ¾”.

**Tabla 9 Gradación Triturada Pasa ¾” Cantera Rotinet.**

| CANTERA ROTINET | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| NORMA DE ENSAYO E-213 | | | | | |
| **TAMIZ** | | **PESO RETENIDO** | **% RETENIDO** | | **% PASA** |
| mm. | No. | | TOTAL | ACUMULADO | |
| 25 | 1" | 0.0 | 0 | 0 | 100 |
| 19 | 3/4" | 0.0 | 0 | 0 | 100 |
| 12.5 | 1/2" | 1742.0 | 74.4 | 74.4 | 25.6 |
| 9.5 | 3/8" | 506.0 | 21.5 | 95.9 | 4.1 |
| 4.8 | No.4 | 74.0 | 3.2 | 99.1 | 0.9 |
| 2 | No.10 | 1.8 | 0.1 | 99.1 | 0.9 |
| 0.43 | No.40 | 1.9 | 0.1 | 99.2 | 0.8 |
| 0.18 | No.80 | 1.9 | 0.1 | 99.3 | 0.7 |
| 0.075 | No.200 | 6.2 | 0.3 | 99.6 | 0.4 |
| | FONDO | 10.0 | 0.4 | 100 | 0 |
| Peso Muestra Seca | | | | **2,344** | |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 19 Curva Logarítmica de gradación.**




**Fuente: Autor 2014**

### 7.3.2 Gradación Pasa ½”

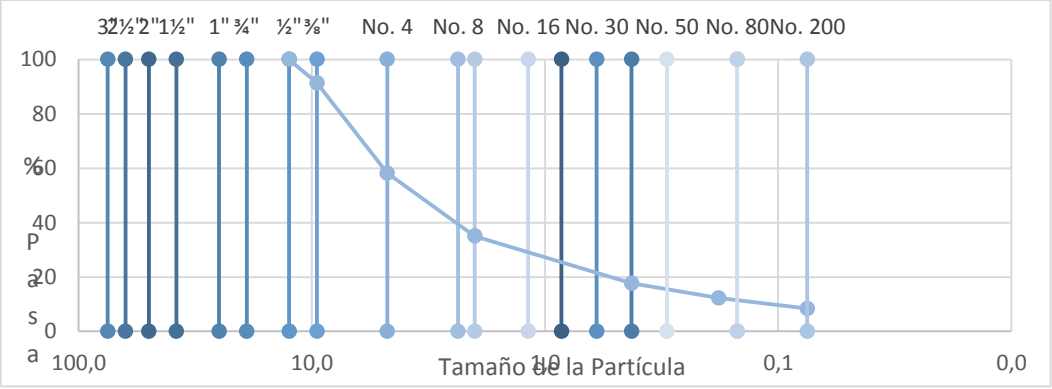
Para este caso el mayor porcentaje retenido de agregados está en el tamiz No. 4, Con un total de 33.2% y un 23.1% de agregados sobre el tamiz No. 10, además pasando un 100% por el tamiz de ½”, lo cual hace llamar: agregado pasa ½”.

**Tabla 10 Gradación pasa ½”**

| Cantera RotineT | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMIZ | PESO RETENI-DO | % RETENIDO | | % PASA |
| mm. | No. | | TOTAL | ACUMULADO | |
| 25.0 | 1" | | | | |
| 19.0 | 3/4" | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 12.5 | 1/2" | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 9.5 | 3/8" | 155.7 | 8.7 | 8.7 | 91.3 |
| 4.8 | No.4 | 597.3 | 33.2 | 41.9 | 58.1 |
| 2.0 | No.10 | 415.6 | 23.1 | 65.0 | 35.0 |
| 0.4 | No.40 | 311.6 | 17.3 | 82.3 | 17.7 |
| 0.2 | No.80 | 97.4 | 5.4 | 87.7 | 12.3 |
| 0.1 | No.200 | 70.1 | 3.9 | 91.6 | 8.4 |
| | FONDO | 151.0 | 8.4 | 100.0 | |
| | | | | | |
| | | | | 1,799.0 | |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 20 Curva Logarítmica de gradación Pasa ½”**




**Fuente: Autor 2014**

### 7.3.3 Gradación Arena Palmarito

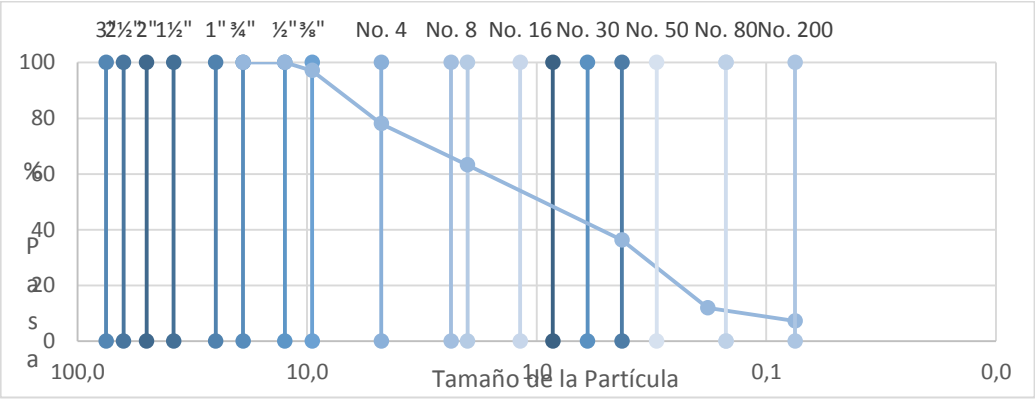
8 Según la gradación de la Arena palmarito, la muestra más representativa se encuentra en los tamices No.10, No.40 y No.80 distribuyéndose en porcentajes de 15.3%, 26.8% y 24.2% respectivamente. Observándose lo establecido por la Norma Invias 2007 en donde las arenas están entre 4.76 mm y 0.074 mm.

**Tabla 11 Gradación Arena P.**

| Arena Palmarito Triturada | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | | PESO RETENIDO | % RETENIDO | | % PASA |
| mm. | No. | | TOTAL | ACUMULADO | |
| 25 | 1" | 0.0 | 0 | 0 | **100** |
| 19 | 3/4" | 0.0 | 0 | 0 | **100** |
| 12.5 | 1/2" | 0.0 | 0 | 0 | **100** |
| 9.5 | 3/8" | 48.6 | 3 | 3 | **97** |
| 4.8 | No.4 | 321.2 | 19 | 22 | **78** |
| 2 | No.10 | 249.6 | 15.3 | 37.3 | **62.7** |
| 0.43 | No.40 | 453.1 | 26.8 | 64.1 | **35.9** |
| 0.18 | No.80 | 409.8 | 24.2 | 88.4 | **11.6** |
| 0.075 | No.200 | 78.6 | 4.4 | 92.8 | **7.2** |
| | FONDO | 122.0 | 7.2 | 100 | **0** |
| PESO MUESTRA SECA(GRS) | | | | | 1,683 |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 21 Curva Logarítmica de gradación Arena P**




**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.1 Gradación Arena Lavada

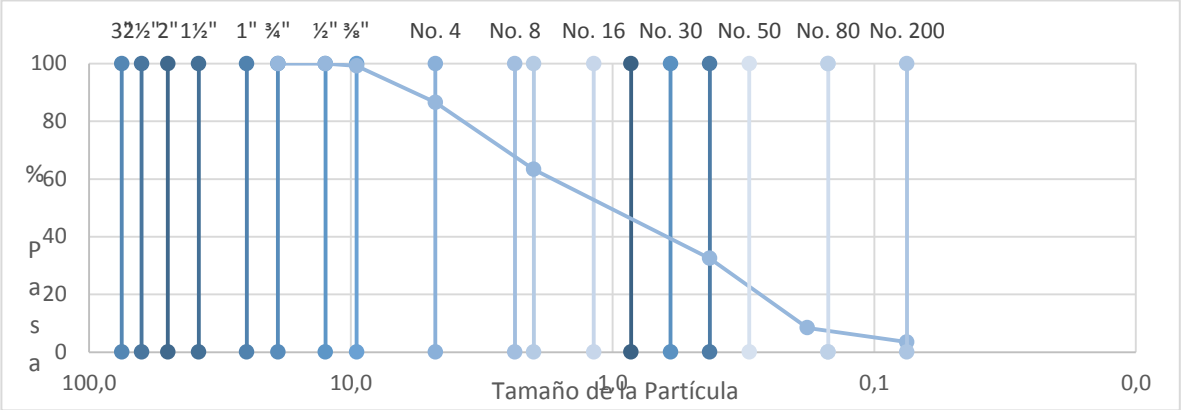
Teniendo en cuenta que también es una arena, se puede ver según la curva logarítmica la semejanza en la distribución granulométrica con respecto a la arena triturada mostrada anteriormente, distribuyendo sus tamaños más representativos sobre los tamices No10, No 40, No 80, con 23.22%, 30.8%, 24.1% respectivamente.

**Tabla 12 Gradación de Arena Lavada**

| Arena Lavada | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | | PESO RETENIDO | % RETENIDO | | % PASA |
| mm. | No. | | TOTAL | ACUMULADO | |
| 25 | 1" | - | - | - | **100.00** |
| 19 | 3/4" | - | - | - | **100.00** |
| 12.5 | 1/2" | - | - | - | **100.00** |
| 9.5 | 3/8" | 16.00 | 0.79 | 0.79 | **99.21** |
| 4.8 | No.4 | 257.60 | 12.67 | 13.46 | **86.54** |
| 2 | No.10 | 472.10 | 23.22 | 36.68 | **63.32** |
| 0.43 | No.40 | 626.20 | 30.80 | 67.48 | **32.52** |
| 0.18 | No.80 | 490.10 | 24.11 | 91.59 | **8.41** |
| 0.075 | No.200 | 100.00 | 4.92 | 96.51 | **3.49** |
| | FONDO | 71.00 | 3.49 | 100.00 | - |
| PESO MUESTRA SECA(GRS) | | | | | 2,033 |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 21 Curva Logarítmica de gradación Arena**




**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.2 Gradación GCR

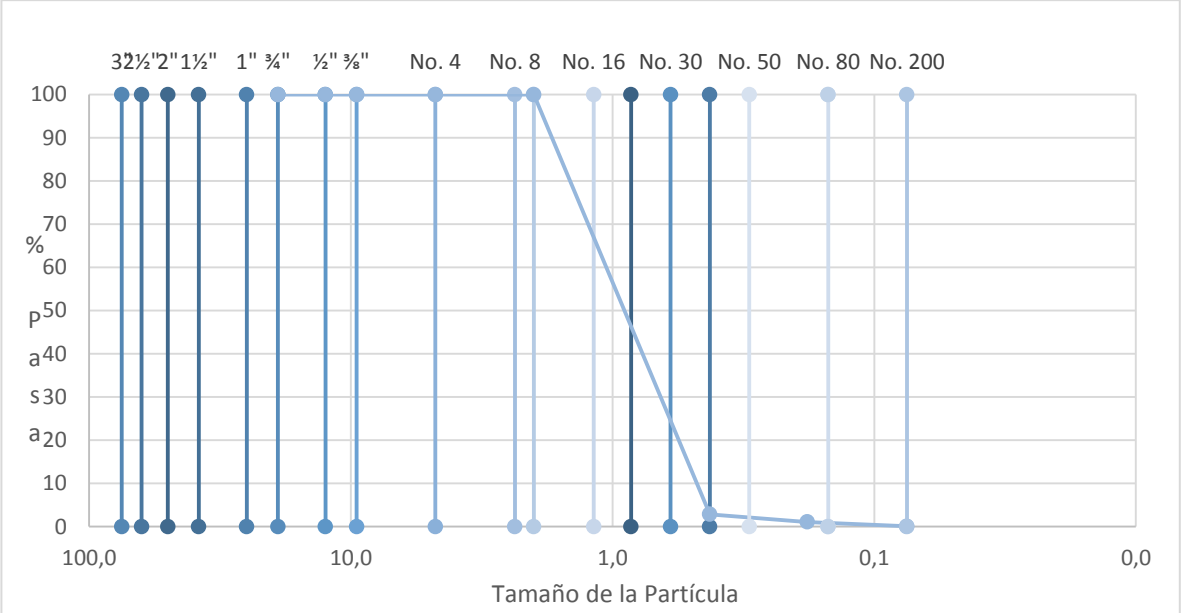
Este material tuvo una distribución de sus tamaños más representativos sobre el Tamiz, No 40, logrando demostrar que en cuanto a tamaño de partícula, podría comportarse perfectamente como una arena.

**Ilustración 22 Gradación GCR.**

| GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | | PESO RE-TENIDO | % RETENIDO | | % PASA |
| mm. | No. | | TOTAL | ACUMULADO | |
| 25 | 1" | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 19 | 3/4" | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 12.5 | 1/2" | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 9.5 | 3/8" | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 4.8 | No.4 | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 2 | No.10 | 0 | 0 | 0 | **100** |
| 0.43 | No.40 | 194.4 | 97.2 | 97.2 | **2.8** |
| 0.18 | No.80 | 3.5 | 1.7 | 98.9 | **1.1** |
| 0.075 | No.200 | 2 | 1 | 99.9 | **0.1** |
| | FONDO | 0.2 | 0.1 | 100 | **0** |
| **PESO MUESTRA(GRS)** | | | | **200** | |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 23 Curva Logarítmica de Gradación GCR**




**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.3 Ensayo de Abrasión Maquina de los Ángeles (E -218, E-219)

Al realizar el análisis de resistencia por medio de la máquina de los ángeles al agregado grueso, se obtuvo un resultado satisfactorio al obtener un valor de 22.80% de desgaste, el cual está dentro del rango de valores permitidos por la norma, estableciendo un máximo de 25%. Lo cual llevó a tener certeza de que el material pasa ¾" cumpliría con un buen comportamiento dentro del conjunto de materiales de la mezcla asfáltica y ayudaría en el aporte de sus propiedades mecánicas y de resistencia, para continuar con la investigación.

**Tabla 13 Ensayo Desgaste Maquina de los Ángeles**

| | |
|---|---|
| **DESCRIPCION:** | **TRITURADO PASA ¾"** |
| **LOCALIZACION:** | Rotinet |
| **GRADACION:** | "B" |
| **P1 =** | 5000 |
| **P2 =** | 3860 |
| **% DESGASTE** | 22.80% |
| **NORMA : < 25%** | CUMPLE |

**Fuente: Autor 2014**

**Tabla 14Datos sobre gradación, carga abrasiva y revoluciones**

| PASA | RETENIDO | 500 REVOLUCIONES | | | | 1000 REVOLUCIONES | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ No. | SOBRE TAMIZ No: | | | | | | | |
| | | GRADACION TIPO: | | | | GRADACION TIPO: | | |
| | | 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 |

**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.4 Ensayo de Masa Unitaria (E -217)

Este ensayo de caracterización se realizó para reconocer principalmente las proporciones adecuadas en el diseño de mezclas, ya que para su elaboración es indispensable conocer el contenido de vacíos que presenta un lote de material; el cual se puede conocer con los va-

lores de masa unitaria obtenidos en este ensayo. Además es importante identificar que dichos vacíos pueden afectar directamente la resistencia de la mezcla si se excede en su porcentaje de

Proporción, también es necesario aclarar que el contenido de vacíos no tiene tolerancias debido a que los valores de densidad bulk y de contenido de vacíos se pueden definir únicamente en términos de un método de prueba. (INVIAS 2007). Los datos obtenidos de masa unitaria se pueden observar en las siguientes tablas, discriminando los valores correspondientes de su peso en éso de muestra suelta y peso de muestra compacta.

**Tabla 15 Ensayo de Masa Unitaria pasa ¾".**

| TRITURADO PASA 3/4" | | | |
|---|---|---|---|
| Peso Material Suelto | | Peso Material Compacto | |
| | | | |
| 1 | 6302.8 | 1 | 6715.3 |
| 2 | 6299.6 | 2 | 6716.3 |
| 3 | 6304.5 | 3 | 6712.5 |
| 4 | 6308.6 | 4 | 6713.6 |
| 5 | 6310.3 | 5 | 6714.6 |
| Peso total | 31525.8 | Peso total | 33572.3 |
| Promedio | 6305.16 | Promedio | 6714.46 |
| Peso tanque | 2545.3 | Peso tanque | 2545.3 |
| volumen | 2831.7 | volumen | 2831.7 |
| Peso neto | 3759.86 | Peso neto | 6702.46 |
| **P. M. S.** | **1.328 Kg/M3** | **P. M. C.** | **2.367 kg/M3** |

**Fuente: Autor 2014**

**Tabla 16 Ensayo de Masa Unitaria pasa 1/2"**

| TRITURADO PASA 1/2" | | | |
|---|---|---|---|
| PESO MATERIAL SUELTO: | | PESO MATERIAL COMPACTADO: | |
| 1 | 7093.7 | 1 | 7737.8 |
| 2 | 7088.3 | 2 | 7718.5 |
| 3 | 7077 | 3 | 7710.8 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4 | 7097.8 | 4 | 7723.7 |
| 5 | 7091.7 | 5 | 7731 |
| Peso total | 35448.5 | Peso total | 38621.8 |
| Promedio | 7089.7 | Promedio | 7724.36 |
| Peso tanque | 2545.3 | Peso tanque | 2545.3 |
| volumen | 2831.7 | volumen | 2831.7 |
| Peso neto | 4544.4 | Peso neto | 6179.06 |
| **P. M. S.** | **1.605** | **P. M. C.** | **2.30** |

**Fuente: Autor 2014**

**Tabla 17 Ensayo de Masa Unitaria Arena Triturada Rotinet**

| **Arena Sarandeada M #3** | | | |
|---|---|---|---|
| PESO MATERIAL SUELTO: | | PESO MATERIAL COMPACTADO: | |
| 1 | 7223.5 | 1 | 7611.4 |
| 2 | 7240 | 2 | 7607 |
| 3 | 7230.6 | 3 | 7594 |
| 4 | 7225 | 4 | 7597 |
| 5 | 7219 | 5 | 7603.5 |
| Peso total | 36138.1 | Peso total | 38012.9 |
| Promedio | 7227.62 | Promedio | 7602.58 |
| Peso tanque | 2545.3 | Peso tanque | 2545.3 |
| volumen | 2831.7 | Volumen | 2831.7 |
| Peso neto | 4682.32 | Peso neto | 5057.28 |
| **P. M. S.** | **1.654** | **P. M. C.** | **1.786** |

**Fuente: Autor 2014**

**Tabla 18 Ensayo de MU Arena Lavada Palmarito.**

| ARENA PALMARITO LAVADA M# 4 | | | |
|---|---|---|---|
| Peso Material Suelto | | Peso Material Compactado | |
| 1 | 7140.4 | 1 | 7491.3 |
| 2 | 7144 | 2 | 7480.7 |
| 3 | 7129.3 | 3 | 7457.5 |
| 4 | 7137.4 | 4 | 7465.7 |
| 5 | 7135.8 | 5 | 7472.5 |
| Peso total | 35686.9 | Peso total | 37367.7 |
| Promedio | 7137.38 | Promedio | 7473.54 |
| Peso tanque | 2545.3 | Peso tanque | 2545.3 |
| volumen | 2831.7 | volumen | 2831.7 |
| Peso neto | 4592.08 | Peso neto | 4928.24 |
| **P. M. S.** | **1.6217 Kg/M3** | **P. M. C.** | **1.74** |

**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.5 Ensayo de Solidez (E-220)

Fue necesario realizar este ensayo para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, para así comprobar la calidad de los agregados que serán sometidos a la acción de los agentes atmosféricos y por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, gracias al contacto directo con la intemperie de las vías terrestres.

**Tabla 19 Ensayo de Solidez.**

| I.N.V.E 220 | | |
|---|---|---|
| **FECHA:** | | **MAYO DE 2014** |
| **TIPO SULFATO:** | | **SULFATO DE MAGNESIO** |
| **DESCRIP-CRIP-CION** | | **TRITURADO PASA 3/4" MUESTRA # 1** |

| FRACCION | | GRADACION ORIGINAL % RETENIDO | PESO FRACCION ANTES DEL ENSAYO (GR) | Nº PARTICULAS ANTES DEL ENSAYO | PESO RETENIDO DESPUES DEL ENSAYO | PORCENTAJE DE PERDIDA TOTAL | PORCENTAJE DE PERDIDA CORREGIDA | Nº PARTICULAS EN BUEN ESTADO DESPUES DEL ENSAYO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PASA | RETENIDO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 3/4" | 1/2" | 46.6 | 670 | 117.0 | 652.4 | **2.63** | **1.22** | 112.0 |
| 1/2" | 3/8" | 34.5 | 330 | 159.0 | 318.50 | **3.48** | **1.20** | 155 |
| 3/8" | # 4 | 17.36 | 300 | 592.0 | 268 | **10.67** | **1.85** | 584 |
| TOTALES: | | 98.46 | 1300.0 | | 1238.9 | **16.78** | **4.278** | |

**Fuente: Autor 2014**

Se puede observar que el resultado obtenido por perdida en la acción de los sulfatos de magnesio fue de 4.278%, siendo este un valor conveniente para los pasa 3/4" y pasa ½" como agregados a utilizar en la mezcla patrón y la mezcla con inclusión de GCR; teniendo en cuenta que lo máximo exigido por la norma E-220 es el 12%.

**Ilustración 24 Solidez**

**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.6 Ensayo de Humedad Natural (E-122)

Este método fue usado para determinar el contenido de agua de cada uno de los materiales que se usaron en las dos mezclas asfálticas. Sabiendo que los requerimientos que exige la

norma son de establecer el contenido de agua en materiales que contengan materias extrañas (tales como cemento, o algo semejante) y además deben requerir un tratamiento especial o una definición calificada de ese contenido; entonces fue tenido en cuenta para obtener mayor confiabilidad en el compacto de la mezcla asfáltica final y evitar usar materiales que ejercieran efectos negativos en el cumplimiento de su resistencia.

M1: Triturado pasa ¾", M2: Triturado pasa ½", M3: Arena Palmarito, M4: Arena Zarandeada

**Tabla 20Ensayo Humedad Natural**

| No. Ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Recipiente No. | 7 | 12 | 32 | 14 |
| Peso Suelo Húmedo + Recipiente (gr.) | 533.7 | 535.7 | 535.8 | 536.5 |
| Peso Suelo Seco + Recipiente (gr.) | 527.3 | 527.2 | 526.7 | 524.8 |
| Peso recipiente (gr.) | 39.7 | 35.7 | 35.8 | 36.5 |
| Peso Suelo Seco (gr.) | 487.6 | 491.5 | 490.9 | 488.3 |
| Peso Agua (gr.) | 6.4 | 8.5 | 9.1 | 11.7 |
| Contenido de Humedad (%) | **1.3** | **1.7** | **1.9** | **2.4** |

**Fuente: Autor 2014**

Al observar los resultados anexados en la tabla anterior, se puede interpretar que el contenido de agua de los materiales usados para las mezclas es aceptable teniendo en cuenta que este ensayo es una relación entre el peso seco y peso húmedo de las muestras, el cual arroja para estos casos contenidos de humedad relativamente bajos. Para identificar la importancia de esta propiedad es importante señalar que por investigaciones realizadas se ha llegado a conclusiones que materiales con altos contenidos de humedad dificultan la adherencia entre el bitumen asfáltico y los agregados; todo esto obstruyendo y desmejorando las propiedades mecánicas del pavimento.

### 8.1.7 Equivalente de Arena (E -133)

Sabiendo que por la norma vigente es un mínimo del 50% de equivalente de arena para mezclas densas, se puede reconocer que los resultados obtenidos para la arena de palmarito

y para la arena zarandeada, se ajustan a los requerimientos establecidos, lo que ayuda a obtener mejores resultados en la resistencia de los pavimentos al poseer muy poco porcentaje de finos indeseables quienes disminuyen también la adherencia entre el asfalto y los agregados como en el caso anterior.

**Descripción**: Arena palmarito muestra # 3

**Tabla 21Ensayo Equivalente de Arena.**

| ENSAYO No. | 1 | 2 |
|---|---|---|
| LECTURA DE ARENA | 3 | 3.2 |
| LECTURA DE ARCILLA | 4.6 | 4.7 |
| EQUIVALENTE DE ARENA | 65.2 | 68.1 |
| **PROMEDIO=** | 66.70% | |

**Fuente: Autor 2014**

**Descripción:** Arena Zarandeada Muestra # 4

**Tabla 22 Ensayo Equivalente de Arena**

| ENSAYO No. | 1 | 2 |
|---|---|---|
| LECTURA DE ARENA | 3.5 | 3.4 |
| LECTURA DE ARCILLA | 4.1 | 3.9 |
| EQUIVALENTE DE ARENA | 85.4 | 87.2 |
| **PROMEDIO** | 86.30% | |

**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.8 Gravedad Específica

Esta propiedad de los agregados tiene que ver con el contenido de vacíos, fue importante realizar esta prueba para obtener una indicación del paso potencial de aire y agua que podría traer la mezcla asfáltica después de fabricada; al obtener los resultados que se anexaran en las siguientes tablas, se adquirió la plena confiabilidad de que los agregados utilizados sirvieron como elementos aptos para ser combinados.

Muestra 1: Pasa ¾”

**Tabla 23 Ensayo Gravedad especifica Pasa ¾”.**

| AGREGADO GRUESO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A | PESO EN EL AIRE MUESTRA SECA | | **2289.3** | Gms |
| B | PESO EN EL AIRE MUESTRA S.S.S. | | **2353.5** | Gms |
| C | PESO EN EL AGUA, MUESTRA SATURADA | | **1455.6** | Gms |
| GRAVEDAD ESPECIFICA BULK = | | A/(B-C) | **2.55** | $Gms/Cms^3$ |
| GRAVEDAD ESPECIFICA BULK S.S.S = | | B/(B-C) | **2.62** | $Gms/Cms^4$ |
| GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE]= | | A/(A-C) | **2.75** | $Gms/Cms^5$ |
| ABSORCION % = | | (B-A)/A*100 | **2.80** | % |

**Fuente: Autor 2014**

Muestra 2: Pasa ½”

**Tabla 24 Ensayo Gravedad especifica Pasa 1/2"**

| A | PESO EN EL AIRE MUESTRA SECA | | **2453.1** | Gms |
|---|---|---|---|---|
| B | PESO EN EL AIRE MUESTRA S.S.S. | | **2529.3** | Gms |
| C | PESO EN EL AGUA, MUESTRA SATURADA | | **1549.5** | Gms |
| GRAVEDAD ESPECIFICA BULK = | | A/(B-C) | **2.50** | $Gms/Cms^3$ |
| GRAVEDAD ESPECIFICA BULK S.S.S = | | B/(B-C) | **2.58** | $Gms/Cms^4$ |
| GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE]= | | A/(A-C) | **2.71** | $Gms/Cms^5$ |
| ABSORCION % = | | (B-A)/A*100 | **3.11** | % |

**Fuente: Autor 2014**

Muestras 3 Arena lavada Palmarito

**Tabla 25 Ensayo Gravedad especifica AP**

| GRAVEDAD ESPECIFICA | | |
|---|---|---|
| Muestra | M# 3 | M # 4 |
| PESO MUESTRA SECA (gr) = | 492.7 | 493.6 |
| PESO PICNOMETRO (gr) = | 172.2 | 172.1 |
| PESO PICNOMETRO + AGUA (gr) = | 715.7 | 715.7 |
| PESO PICNOMATRO + MATERIAL + AGUA (gr) = | 1023.4 | 1021.5 |
| ABSORCION | 1.48 | 1.30 |
| GS = | 2.696 | 2.71 |

**Fuente: Autor 2014**

Muestra 4 Arena Zarandeada

**Tabla 26 Ensayo Gravedad especifica AZ**

| GRAVEDAD ESPECIFICA | | |
|---|---|---|
| Muestra | M# 3 | M # 4 |
| PESO MUESTRA SECA (gr) = | 492.7 | 493.6 |
| PESO PICNOMETRO (gr) = | 172.2 | 172.1 |
| PESO PICNOMETRO + AGUA (gr) = | 715.7 | 715.7 |
| PESO PICNOMATRO + MATERIAL + AGUA (gr) = | 1023.4 | 1021.5 |
| ABSORCION | 1.48 | 1.30 |
| GS = | 2.66 | 2.63 |

**Fuente: Autor 2014**

### 8.1.9 Partículas Planas y Alargadas

Se hizo un análisis e inspección visual inicialmente para escoger un selecto grupo de material para realizar el estudio de alargamiento del agregado grueso pasa ¾". Todo esto con el fin de verificar la geometría de las partículas para obtener una mejor compactación y no dificultar la colocación del material.

**Tabla 27 Ensayo Partículas Planas y Alargadas.**

| E – 230 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fracción** | **Peso Inicial Fracción** | **Peso que Pasa** | **Porcentaje Retenido** | **Promedio de Aplanamiento** | |
| | A | B | Gradación Original | B*C | |
| | Grs | Grs | C (%) | % | |
| | | | | | |
| **2 1/2" - 2"** | | | | | |
| **2" - 1 1/2"** | | | | | |
| **1 1/2" - 3/4"** | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **3/4" - 1/2"** | 756 | 123 | 13.7 | 222.9 | |
| **1/2" - 3/8"** | 520 | 60 | 8.7 | 100.4 | |
| **3/8" - No.4** | 335 | 138 | 17.9 | 737.4 | |
| | 1611 | 321 | 40.3 | 1060.7 | |
| | | Porcentaje de Aplanamiento | | | 26 |
| | | Valor Especificado | | | <30 % |

**Fuente: Promotora Montecarlo 2014**

**Tabla 28 Ensayo Partículas Planas y Alargadas**

| E – 230 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fracción** | **Peso Inicial Fracción** | **Peso que Pasa** | **Porcentaje Rete-nido** | **Promedio de Aplanamiento** | |
| | A | B | Gradación Original | B*C | |
| | Grs | Grs | C (%) | % | |
| | | | | | |
| **2 1/2" - 2"** | | | | | |
| **2" - 1 1/2"** | | | | | |
| **1 1/2" - 3/4"** | | | | | |
| **3/4" - 1/2"** | 756 | 123 | 13.7 | 239.2 | |
| **1/2" - 3/8"** | 520 | 102 | 8.7 | 170.7 | |
| **3/8" - No.4** | 335 | 108 | 17.9 | 577.1 | |
| | 1611 | 342 | 40.3 | 986.9 | |
| | | Porcentaje de Alargamiento | | | 24 |
| | | Valor Especificado | | | <30 % |

**Fuente: Promotora Montecarlo**

Al revisar los resultados obtenidos, se puede reconocer que están en el rango establecido por la norma E-230, además se puede decir que la geometría y forma de las partículas usadas como agregado grueso era la adecuada. Estos resultados se pueden ver en las tablas a.18

### 8.1.10 Porcentaje de Caras Fracturadas

Sabiendo que para obtener una mezcla homogénea y compacta es necesario tener una fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas, el valor que exige la norma en cuanto a caras fracturadas con la E-227 debe ser mayor al 85%; y observando el valor de la tabla siguiente, se puede ver que se encontró con un 92% para el agregado usado en la investigación, se llega a la conclusión que la mezcla asfáltica maneja buenos comportamientos de cohesión y compactación interna.

**Tabla 29 Caras Fracturadas Alargadas.**

| E - 227 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tamaño Agregado | | Peso Muestra | Peso Material Caras Fracturadas | % Caras Fracturadas | % Retenido Gradación Original | Promedio Caras Fracturadas |
| Pasa Tamiz | Retenido en Tamiz | | | | | |
| | | A | B | c= 100*(B/A) | D | E = (C*D) |
| | | Grs | Grs | Grs | % | Grs |
| 1 1/2" | 1" | | | | | |
| 1" | 3/4" | | | | | |
| 3/4" | 1/2" | 845.3 | 802.9 | 95 | 13.7 | 1301.3 |
| 1/2" | 3/8" | 633.5 | 553.5 | 87.4 | 8.7 | 760.1 |
| total | 1478.8 | 1356.4 | 182.4 | 182.4 | 22.4 | 2061.4 |

**Fuente: Promotora M.**

**Tabla 30 Porcentaje de Caras Fracturadas.**

| | |
|---|---|
| PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS = (TOTAL E / TOTALD) | 92 |
| VALOR ESPECIFICADO | >85 % |
| Cumplimiento de Norma | SI |

**Fuente: Promotora Montecarlo**

### 8.1.11 Contenido de Materia Orgánica

**Ilustración 25 Contenido de Materia Orgánica.**

| CmV INGENIEROS CONSTRUCTORES | CONTENIDO APROXIMADO DE MATERIA ORGÁNICA | Código: | FLS-025 |
|---|---|---|---|
| | | Versión: | 1 |
| | | Fecha: | 05-feb-08 |

EMPRESA: CONSTRUCTORA MONTECARLO VIAS S.A
OBRA: INFORME No
DESCRIPCIÓN: ARENAS MEZCLA M.D.C 2 MUESTRA No
FUENTE: STOCKS PLANTA SOLICITUD No
FECHA DE ENSAYO: febrero 15/2014
LOCALIZACIÓN: PLANTA DE ASFALTO TORCOROMA-BAYUNCA

NORMA DEL ENSAYO: E-212

SOLUCIÓN USADA: HIDROXIDO DE SODIO
TIEMPO DE REPOSO: 24 HORAS

RESULTADO: CUMPLE

| COLOR OBTENIDO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|

NORMA: <3 CUMPLE / NO CUMPLE
OBSERVACIONES:
ESPECIFICACIONES
ENSAYOS ASOCIADOS:
RESPONSABLE DE ENSAYOS:

Nombre y Firma
LABORATORISTA

Nombre y Firma
INGENIERO

**Fuente: Promotora Montecarlo**

Al no contar con los equipos y materiales necesarios para su ejecución, mediante la empresa Promotora Montecarlo, quien sería el suministrador de los materiales, proporcionó los datos de materia orgánica que presentan las arenas utilizadas para la investigación. Viéndose que cumplen los requisitos establecidos por la E – 212 haciendo uso de hidróxido de sodio en el periodo de tiempo de 24 horas. Al ver este resultado se puede identificar que los materiales están libres de impurezas que afecten la mezcla en su combinación interna.

## 8.2 Combinación de Materiales

Al cumplir con cada uno de los ensayos planteados para asimilar e identificar las características de los materiales, se pudo continuar con el proceso y ejecución del proyecto de investigación, en donde se trabajó con una mezcla patrón establecida por la promotora Montecarlo quien estableció un porcentaje de asfalto óptimo de 5.5%. La siguiente combinación de materiales fue la utilizada como base en esta investigación para ser modificada con porcentaje de GCR entre 1.5 y 4 % con una variación de 0.5%.

| TIPO DE MATERIAL | % A UTILI-ZAR | 1" | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No. 4 | No. 8 | No. 10 | No. 40 | No. 80 | No. 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Triturado Pasa 3/4" | | 100.00 | 100.00 | 25.7 | 4.1 | 0.9 | | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.4 |
| Producto de Trituracion Roti-net | | 100.00 | 100.00 | 100.0 | 91.3 | 58.1 | | 35.1 | 17.7 | 12.3 | 8.4 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | | 100.00 | 100.00 | 100.0 | 99.2 | 86.5 | | 63.3 | 32.5 | 8.4 | 3.5 |
| Arena Zarandeada Palmarito | | 100.00 | 100.00 | 100.0 | 97.1 | 78.0 | | 63.2 | 36.3 | 11.9 | 7.2 |
| Llenante arena 0-6 m.m. | | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 98.3 | | 72.6 | 37.6 | 26.3 | 17.6 |

| TIPO DE MATERIAL | % A UTILI-ZAR | 1" | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No. 4 | No. 8 | No. 10 | No. 40 | No. 80 | No. 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.14 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Roti-net | 35.00% | 30.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.20 | 4.31 | 2.94 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.30 | | 12.66 | 6.50 | 1.68 | 0.70 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.42 | 15.60 | | 12.64 | 7.26 | 2.38 | 1.44 |
| Llenante campusano | 5.00% | 10.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 4.92 | | 3.63 | 1.88 | 1.32 | 0.88 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.3** | | **41.4** | **22.0** | **9.8** | **6.0** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**A.18 Dosificación Analitica Alargadas. Fuente: Promotora Montecarlo 2014**

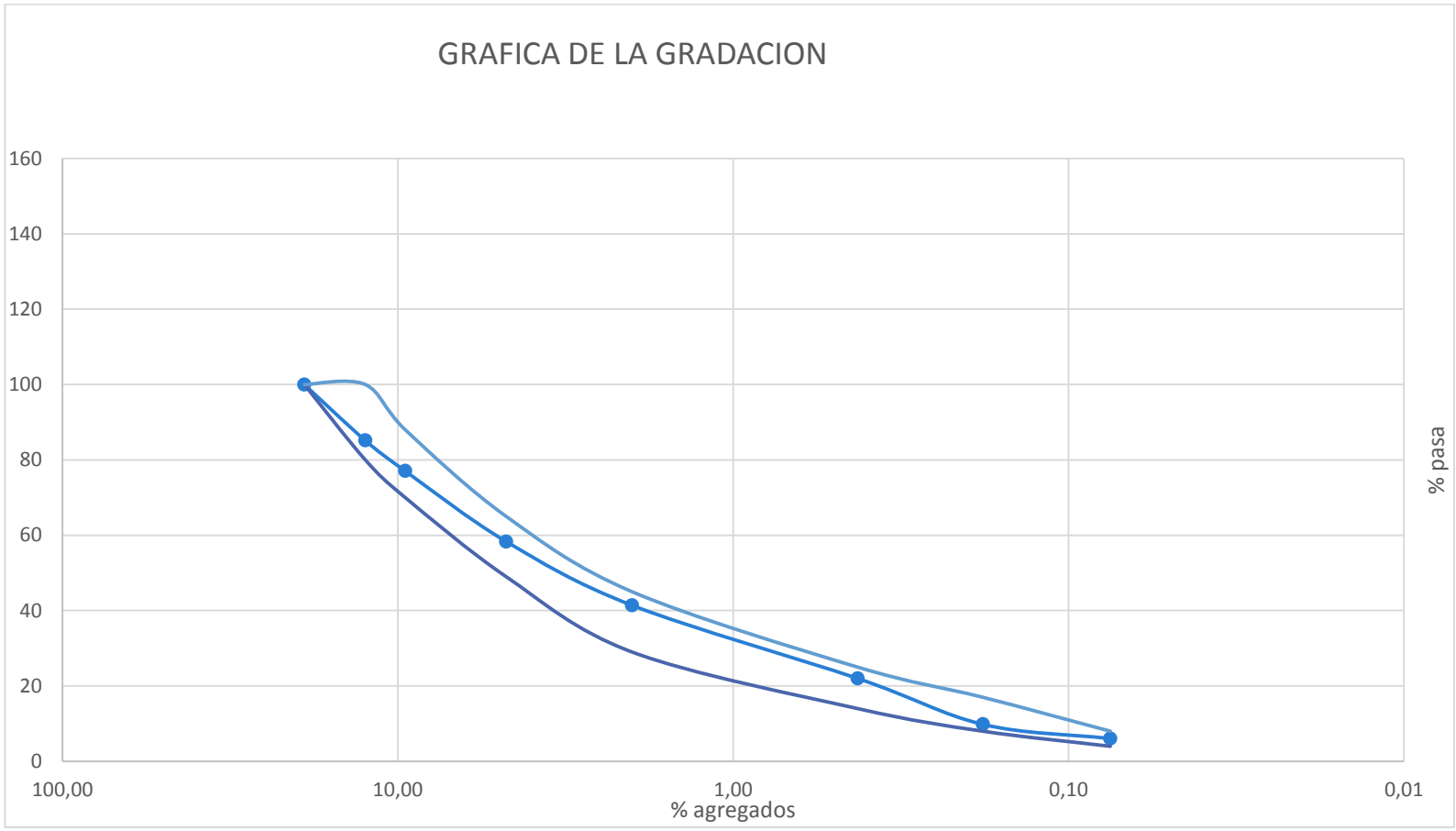
La Combinación de la muestra patrón está dada 20% del Material pasa ¾", 35% del triturado pasa ½", 20% de la arena triturada de palmarito, otro 20% de la arena zarandeada y un 5.0% del llenante mineral campusano, que cumplen con las especificaciones indicadas por el INVIAS para diseño de mezclas asfálticas que se encuentran en la Norma E748-07.

Se utilizó un total de 1200 gr para la combinación de agregados al momento de elaborar cada briqueta, como se había mencionado con anterioridad. Cabe resaltar que esta es una dosificación conocida como analisis por tanteo, en donde se busca que la curva resultante este dentro de las franjas granulométricas, como se puede ver de la siguiente manera:

**A.29 Gradación: Promotora Montecarlo Fuente: Promotora Montecarlo**

| GRADACION | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Peso No.1:** | | | **Peso No. 2:** | | | |
| **Tamiz** | | **Peso** | **Porcentaje (%)** | **Porcentaje (%)** | **Porcentaje (%) pasa** | |
| **Alterno** | **Normal** | **Retenido** | **Retenido** | **Pasa** | **Norma MDC-2** | |
| 3" | 75.00 | | | | | |
| 2 1/2" | 63.00 | | | | | |
| 2" | 50.00 | | | | | |
| 1 1/2" | 37.50 | | | | | |
| 1" | 25.00 | | | | | |
| 3/4" | 19.00 | | | **100.0** | 100.0 | 100.0 |
| 1/2" | 12.50 | | | **85.1** | 80.0 | 100.0 |
| 3/8" | 9.50 | | | **77.0** | 70.0 | 88.0 |
| # 4 | 4.75 | | | **58.3** | 49.0 | 65.0 |
| # 10 | 2.00 | | | **41.4** | 29.0 | 45.0 |
| # 40 | 0.425 | | | **22.0** | 14.0 | 25.0 |
| # 80 | 0.180 | | | **9.8** | 8.0 | 17.0 |
| # 200 | 0.075 | | | **6.0** | 4.0 | 8.0 |
| Fondo | | | | | | |

**Ilustración 26 Cumplimiento de Norma.**




**Fuente: Promotora Montecarlo 2014**

## 8.3 Gradaciones Con Variación De Grano De Caucho GCR

Teniendo como base la combinación de materiales de la muestra patrón, se dio inicio a la elaboración de la mezcla modificada con las incorporaciones de GCR. Para evitar cambios bruscos en el comportamiento granulométrico de la combinación inicial, se procedió a disminuir inicialmente el porcentaje de llenante mineral el cual tiene un valor preliminar de 5.0%; Todo esto se puede ver a continuación:

- GCR 1.5%

Se realizó una disminución del llenante mineral campusano a un 70% de su valor establecido en la muestra patrón, quedando entonces con solo un 3.5% de la composición total de la mezcla de agregados.

**Tabla 31 Combinación de Materiales con GCR 1.5%.**

| | | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTI-LIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| | Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.14 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| | Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.20 | 4.31 | 2.94 |
| | Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.30 | | 12.66 | 6.50 | 1.68 | 0.70 |
| | Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.42 | 15.60 | | 12.64 | 7.26 | 2.38 | 1.44 |
| | Llenante campusano | 3.50% | 0.00 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.44 | | 2.54 | 1.32 | 0.92 | 0.62 |
| | GCR | 1.50% | 3.00 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | | 1.50 | 0.04 | 0.02 | 0.00 |
| | | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.4** | | **41.8** | **21.5** | **9.4** | **5.8** |
| | NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente: Autor**

Al cambiar el porcentaje de 5.0% por un 3.5% de llenante mineral e incorporar un 1.5% de GCR, se puede observar en la curva granulométrica que hubo una leve modificación en la curva central, quien es la que representa el comportamiento

granulométrico de la combinación de materiales; esta modificación se dio con un movimiento hacia la franja superior de la gráfica, demostrando que el nuevo material posee un grano de tamaño mayor retenido en el tamiz No. 30

**Ilustración 27 Combinación de Materiales con GCR al 1.5%.**

**Fuente: Autor**

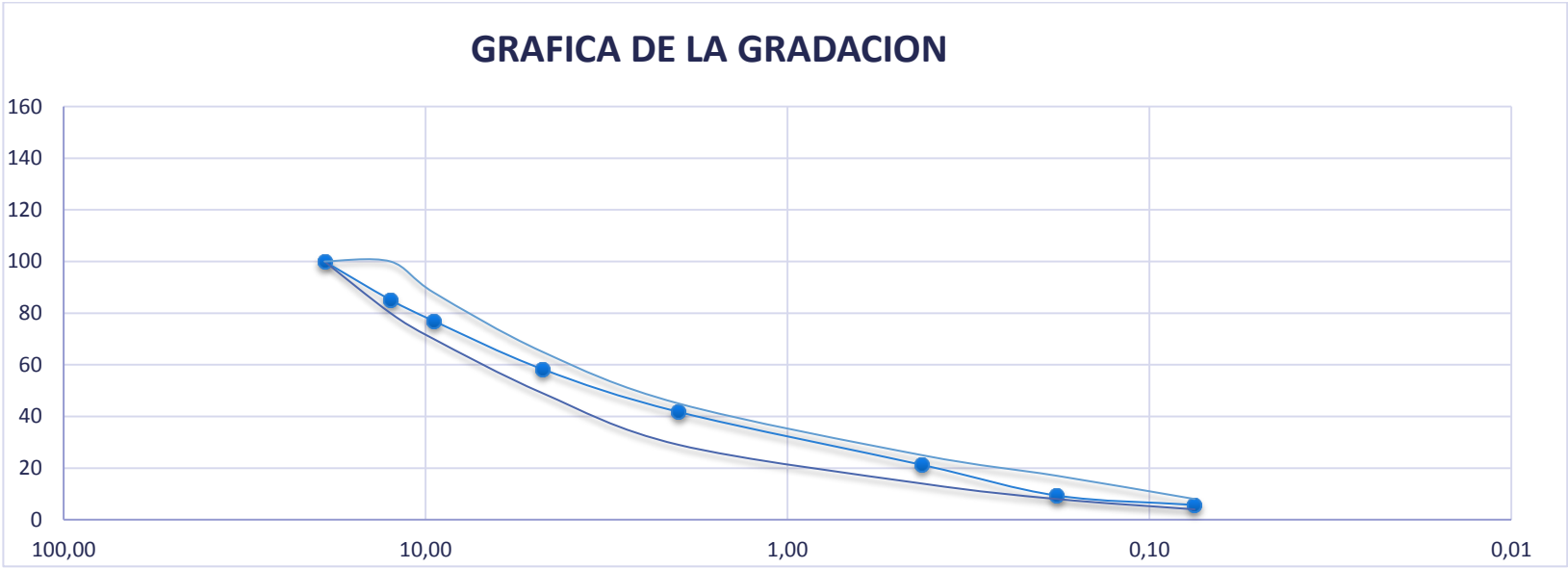
- GCR 2%

**Tabla 32 Combinación de Materiales con GCR 2%**

| | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTILIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.12 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.23 | 4.38 | 2.98 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.24 | | 12.58 | 6.48 | 1.68 | 0.68 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.38 | 15.58 | | 12.52 | 7.18 | 2.34 | 1.44 |
| Llenante campusano | 3.00% | 0.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 2.95 | | 2.18 | 1.13 | 0.79 | 0.53 |
| GCR | 2.00% | 3.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | | 2.00 | 0.06 | 0.02 | 0.00 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.3** | | **41.7** | **21.2** | **9.3** | **5.7** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente: Autor**

**Ilustración 28 Combinación de Materiales con GCR 2%**




**Autor 2014**

De la misma manera para un aumento del 2.0% en la incorporación de GCR se da el desplazamiento de la curva hacia la franja superior, lo cual empieza a ser una constante a medida que se adiciona GCR en la combinación de materiales y se disminuye el porcentaje de llenante.

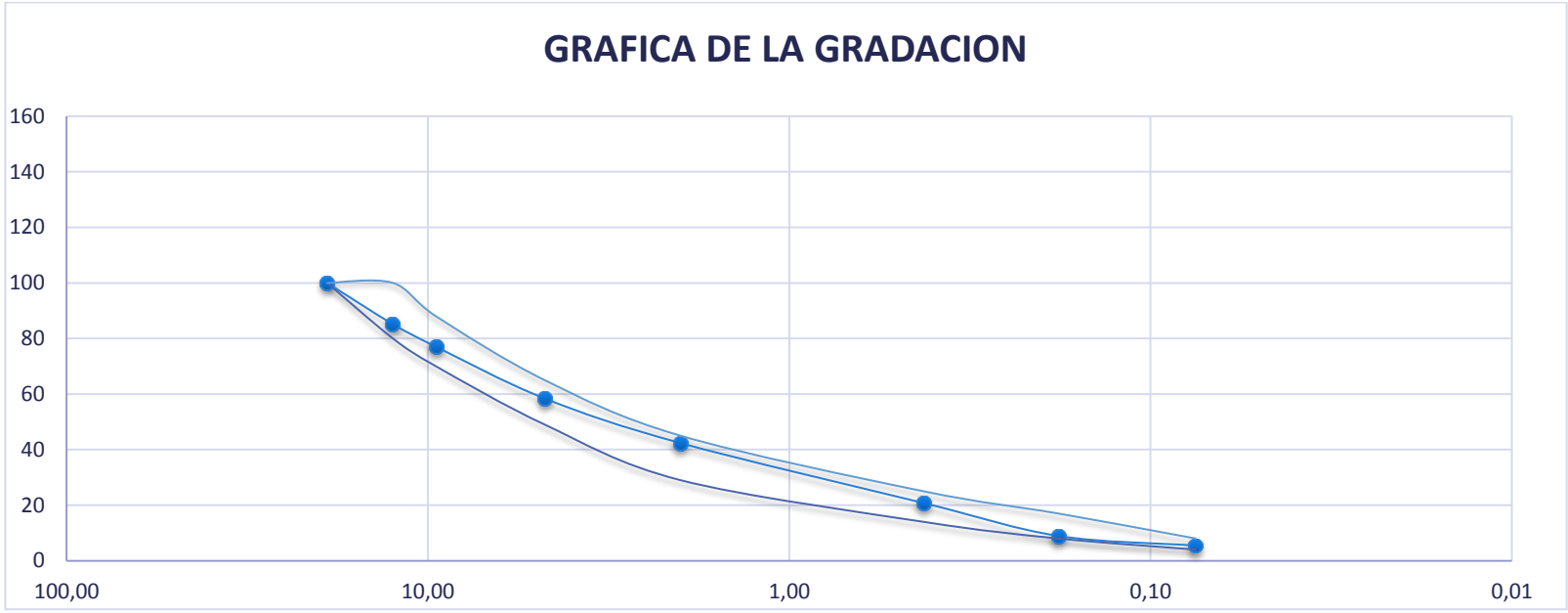
- GCR 2.5%

**Tabla 33Combinación de Materiales con GCR 2.5%**

| | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTILIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.14 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.20 | 4.31 | 2.94 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.30 | | 12.66 | 6.50 | 1.68 | 0.70 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.42 | 15.60 | | 12.64 | 7.26 | 2.38 | 1.44 |
| Llenante campusano | 2.50% | 0.00 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.46 | | 1.82 | 0.94 | 0.66 | 0.44 |
| GCR | 2.50% | 3.00 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | | 2.50 | 0.07 | 0.03 | 0.00 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.4** | | **42.1** | **21.1** | **9.2** | **5.6** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 29 Combinación de Materiales con GCR al 2.5%.**




**Autor 2014**

Al ver este resultado se confirma la premisa que con el aumento del GCR como uso de agregado en la combinación de materiales va acercando la curva óptima de dosificación hacia los limites superiores de la franja establecida por el INVIAS 2007, quien establece que al acercarse a la franja superior y en el caso de sobrepasarla, la mezcla de agregados podría llevar a una pérdida de estabilidad del producto final.

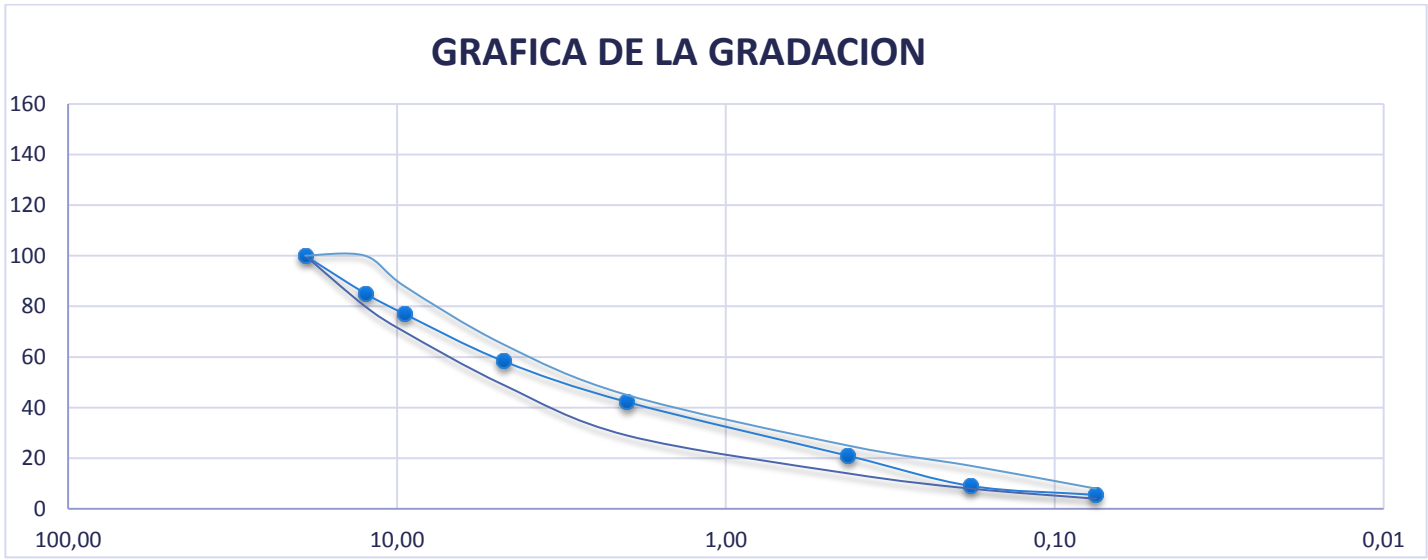
- GCR 3.0%

**Tabla 34 Combinación de Materiales con GCR 3.0%.**

| | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTILIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.14 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.20 | 4.31 | 2.94 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.30 | | 12.66 | 6.50 | 1.68 | 0.70 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.42 | 15.60 | | 12.64 | 7.26 | 2.38 | 1.44 |
| Llenante campusano | 2.00% | 0.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 1.97 | | 1.45 | 0.75 | 0.53 | 0.35 |
| GCR | 3.00% | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | | 3.00 | 0.08 | 0.03 | 0.00 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.4** | | **42.2** | **21.0** | **9.1** | **5.5** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 30Combinación de Materiales con GCR 3.0%.**




**Autor 2014**

Al hacer uso de un 3.0 % de GCR, en la gráfica se puede observar que con un % que pasa entre el 45% y un 25% la cercanía con la franja superior es muy alta, y se empezó a pensar que sería un límite en la incorporación de este nuevo material.

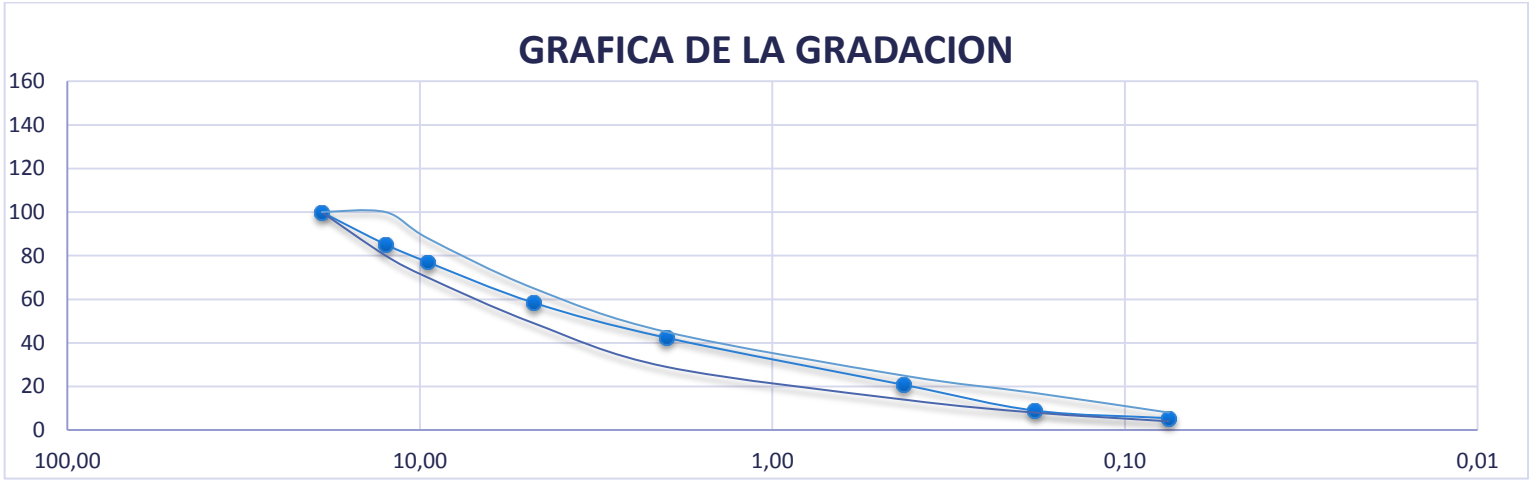
- GCR 3.5%

**Ilustración 31 Combinación de Materiales con GCR 3.5%.**

| | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTILIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.14 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.20 | 4.31 | 2.94 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.30 | | 12.66 | 6.50 | 1.68 | 0.70 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.42 | 15.60 | | 12.64 | 7.26 | 2.38 | 1.44 |
| Llenante campusano | 1.50% | 0.00 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.47 | | 1.09 | 0.56 | 0.39 | 0.26 |
| GCR | 3.50% | 3.00 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | | 3.50 | 0.10 | 0.04 | 0.00 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.4** | | **42.4** | **20.8** | **8.9** | **5.4** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente: Autor 2014**

**Ilustración 32 Combinación de Materiales con GCR 3.5%.**




**Fuente: Autor 2014**

Al ver que la constante de la curva se mantenía, solamente se siguió con la incorporación de este material con un aumento de 0.5% para analizar los resultados finales de resistencia al calcular sus respectivas estabilidades, ya que se tenía planteado como máximo valor un 4.0% de GCR.

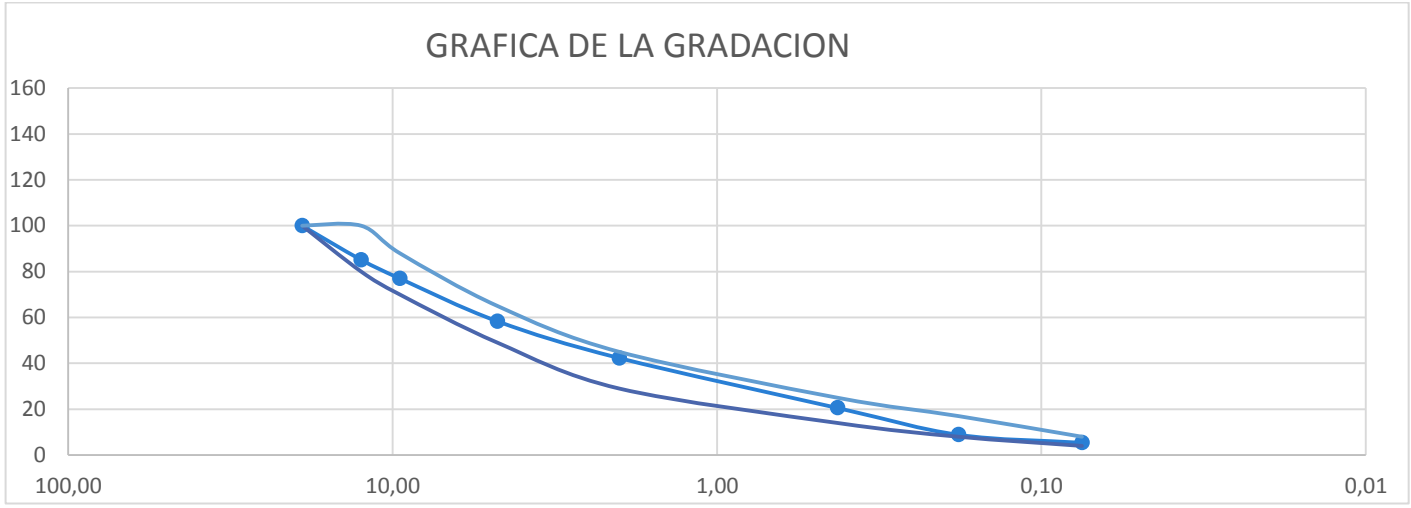
- GCR 4.0%

**Tabla 35 Combinación de Materiales con GCR 4.0%**

| | | % pasa | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPO DE MATERIAL** | **% A UTILIZAR** | **1"** | **3/4"** | **1/2"** | **3/8"** | **No. 4** | **No. 8** | **No. 10** | **No. 40** | **No. 80** | **No. 200** |
| Triturado Pasa 3/4" | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 5.12 | 0.82 | 0.18 | | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.08 |
| Producto de Trituracion Rotinet | 35.00% | 37.00 | 35.00 | 35.00 | 31.96 | 20.34 | | 12.29 | 6.23 | 4.38 | 2.98 |
| Arena triturada Palmarito Lav. | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.84 | 17.24 | | 12.58 | 6.48 | 1.68 | 0.68 |
| Arena Zarandeada Palmarito | 20.00% | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 19.38 | 15.58 | | 12.52 | 7.18 | 2.34 | 1.44 |
| Llenante campusano | 1.00% | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | | 0.73 | 0.38 | 0.26 | 0.18 |
| GCR | 4.00% | 3.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | | 4.00 | 0.11 | 0.04 | 0.00 |
| | 100.00% | **100.00** | **100.00** | **85.1** | **77.0** | **58.3** | | **42.3** | **20.5** | **8.8** | **5.4** |
| NORMA INV. MDC-2 | | | 100-100 | 80-100 | 70-88 | 49-65 | | 29-45 | 14-25 | 8-17 | 4-8 |

**Fuente:Autor**

**Ilustración 33Combinación de Materiales con GCR 4.0%.**




**Autor 2014**

Cuando se obtuvo esta última grafica de la dosificación de materiales, se pudo ver a simple vista que la granulometría proporcionada por el GCR provoca un cambio en el comportamiento de la combinación por tanteo de los materiales pétreos para la elaboración de la mezcla asfáltica, a medida que se incorpora un porcentaje mayor de GCR con respecto al llenante mineral reemplazado.

## 8.4 Densidades bulk de las briquetas

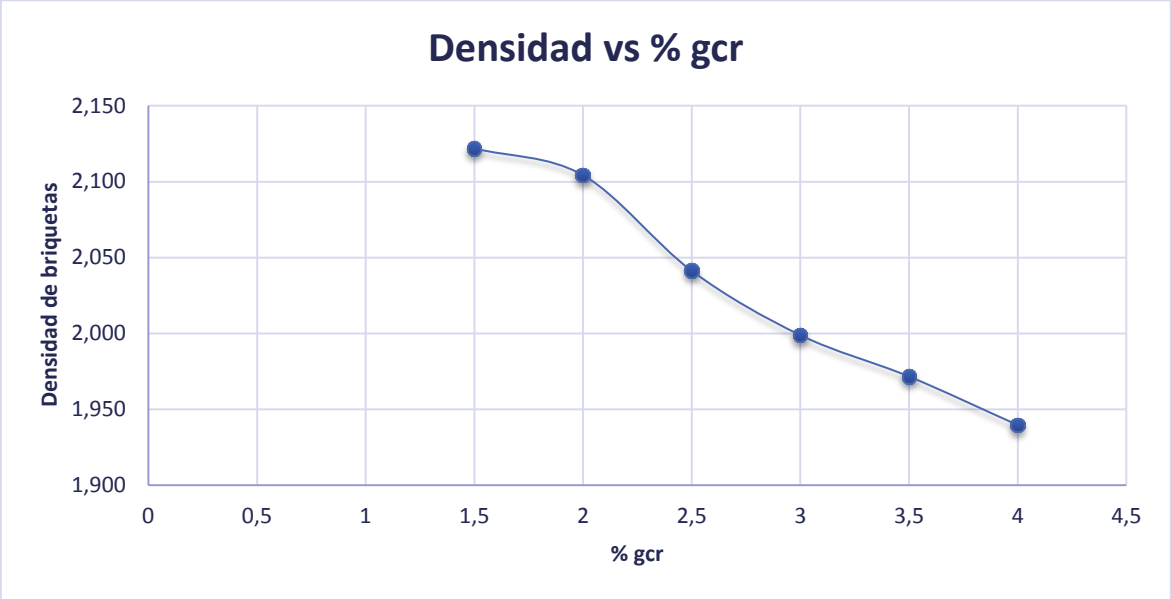
Después de haber obtenido por tanteo la dosificación de las mezclas modificadas con la incorporación de GCR, sobre las franjas granulométricas exigidas por el INVIAS, Para poder determinar el % de vacíos y así comenzar con la obtención de datos para realizar el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas con la incorporación de GCR, fue necesario realizar un procedimiento de laboratorio para encontrar los pesos en distintas condiciones de las briquetas elaboradas, como lo es el peso seco, pesos superficialmente seco, más el peso sumergido al ser introducidas en agua; y de esa manera encontrar la densidad bulk que es la relación entre la masa (peso en el aire) del volumen de cada briqueta con una temperatura de 25°C y la masa de un volumen igual de agua destilada (E – 733).

**Tabla 36Densidad Bulk de briquetas.**

| % de GCR | Numero Briqueta | Pesos de briquetas | | | Volumen | Densidad Bulk | Densidad Bulk Promedio Gmb g/cm3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | seco | superficialmente seco | sumergido | | **Gmb** | |
| 1.5 | 4 | 1195.2 | 1196.2 | 625.1 | 571.1 | **2.093** | |
| | 5 | 1215.3 | 1217.2 | 684.2 | 533 | **2.280** | |
| | 6 | 1205.8 | 1206.3 | 695.3 | 511 | **2.360** | 2.244 |
| 2 | 7 | 1230.7 | 1231.9 | 647 | 584.9 | **2.104** | |
| | 8 | 1193.4 | 1194.7 | 628.2 | 566.5 | **2.107** | |
| | 9 | 1205.6 | 1208.4 | 634.8 | 573.6 | **2.102** | 2.104 |
| 2.5 | 10 | 1214 | 1223.6 | 626.2 | 597.4 | **2.032** | |
| | 11 | 1203.2 | 1219.6 | 629.7 | 589.9 | **2.040** | |
| | 12 | 1219.5 | 1222.4 | 627.9 | 594.5 | **2.051** | 2.041 |
| 3 | 13 | 1202.5 | 1206 | 617.9 | 588.1 | **2.045** | |
| | 14 | 1211.5 | 1213 | 606 | 607 | **1.996** | |
| | 15 | 1255.8 | 1260.7 | 654.8 | 605.9 | **2.073** | 2.038 |
| 3.5 | 16 | 1216.2 | 1224.6 | 614.3 | 610.3 | **1.993** | |
| | 17 | 1214.6 | 1227.4 | 610.3 | 617.1 | **1.968** | |
| | 18 | 1201.9 | 1219 | 603.8 | 615.2 | **1.954** | 1.972 |
| 4 | 19 | 1204.7 | 1217.2 | 583 | 634.2 | **1.900** | |
| | 20 | 1225 | 1231.7 | 610.6 | 621.1 | **1.972** | |
| | 21 | 1194 | 1209.4 | 596.1 | 613.3 | **1.947** | 1.940 |
| MUESTRA PATRÓN | | | | | | | |
| 5.5% ASFALTO | 1 | 1100.1 | 1100.7 | 624.3 | 476.4 | **2.16** | |
| | 2 | 1224.8 | 1225.9 | 696.3 | 529.6 | **2.09** | |
| | 3 | 1250.1 | 1250.6 | 700.2 | 550.4 | **2.27** | 2.173 |

**Fuente: Autor**

**Tabla 37 Relación densidad con grano de caucho**




**Fuente: Autor 2014**

Con la ayuda de este gráfico, se puede analizar fácilmente que a medida que se aumenta el porcentaje de grano de caucho, se producía una leve caída en los valores de densidad, teniendo en cuenta el aumento de volumen que proporciona la adición del caucho, siendo este un material de menor densidad a los agregados.

Al momento de realizar ese procedimiento, como su metodología lo indica; podía verse a simple vista la absorción de agua a medida que aumentaba el porcentaje de incorporación del grano de caucho y además su aumento de volumen.

El primer paso fue encontrar los pesos específicos o densidades Bulk promedio de cada material como se pudo ver en la tabla 36.

Luego se procedió a obtener valores de gravedad específica para llegar a obtener los vacíos que se encuentran sobre la mezcla y sus agregados.

**Tabla 38 Pesos específicos muestra patrón.**

| MUESTRA PATRÓN | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 2.06 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 5 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 0 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 39 Pesos específicos 1.5% GCR**

| Muestra modificada 1 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 2.03 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 3.5 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 1.5 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 40 Pesos específicos 2% GCR**

| Muestra modificada 2 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 2.02 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 3 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 2 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 41Pesos específicos 2.5% GCR**

| Muestra modificada 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 2.01 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 2.5 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 2.5 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 42 Pesos específicos 3% GCR**

| Muestra modificada 4 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 2.00 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 2 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 3 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 43 Pesos específicos 3.5% GCR**

| Muestra modificada 5 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 1.99 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 1.5 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 3.5 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

**Tabla 44 Pesos específicos 4% GCR**

| Muestra modificada 6 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MATERIAL | Porcentaje en Mezcla | | Pesos especifico | | Gsb |
| Triturado Pasa 3/4" | 20 | % | 2.367 | gr/cm3 | 1.98 gr/cm3 |
| Triturado Pasa 1/2" | 35 | % | 2.3 | gr/cm3 | |
| Arena Plamarito Lav | 20 | % | 1.786 | gr/cm3 | |
| Arena Zarandeada | 20 | % | 1.74 | gr/cm3 | |
| Llenante Mineral | 1 | % | 2.32 | gr/cm3 | |
| GCR | 4 | % | 1.109 | gr/cm3 | |

**Fuente: Autor**

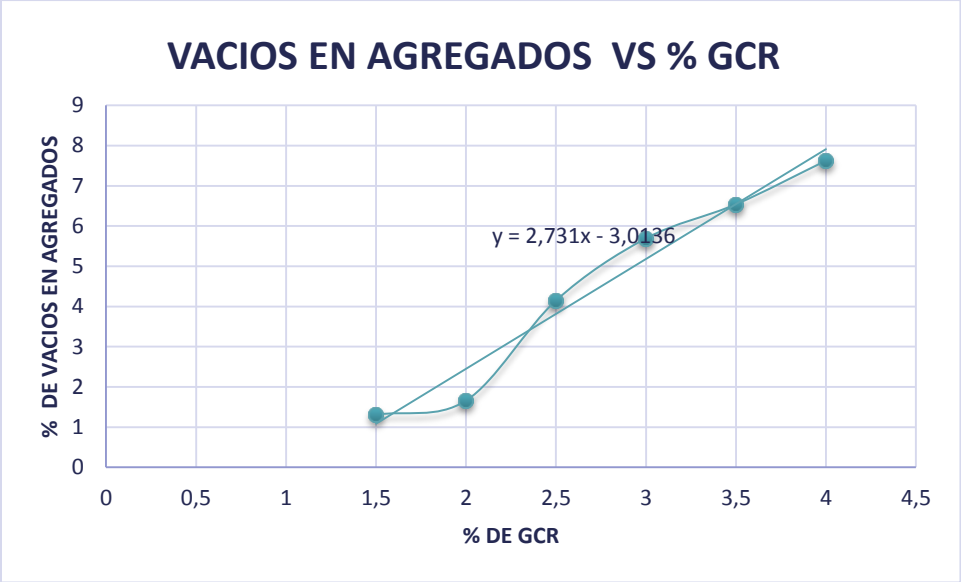
Además para realizar el análisis correspondiente en una mezcla asfáltica y sabiendo que se le asignó un material completamente diferente en cuanto a su textura y propiedades mecánicas a un agregado pétreo, fue necesario tener en cuenta los vacíos que proporciono la incorporación del grano de caucho, estos vacíos se creen que pueden darse por la adherencia entre el caucho y el Ligante asfáltico, de la cual no se tiene certeza si a las condiciones de mezclado a 140° es la mejor, lo cual abre una gran incógnita para futuras investigaciones.

**Tabla 45 Pesos específicos 4% GCR**

| % gcr | % Asfalto | %agregados | Gravedad E. Máxima Teórica | Gravedad E. Efectiva | Porcentaje asfalto absorbido | Porcentaje de vacío entre las partículas del agregado mineral | Vacíos de aire en la MAC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Pb** | | **Gmm gr/cm3** | **Gse gr/cm3** | **Pba %** | **VAM %** | **Va %** |
| 0 | **5.5** | 94.5 | **1.997** | **2.061** | 0 | 0.36083974 | 8.834 |
| 1.5 | **5.5** | 94.5 | **1.971** | **2.032** | 0 | 2.12717554 | 13.880 |
| 2 | **5.5** | 94.5 | **1.962** | **2.022** | 0 | 1.65921395 | 7.243 |
| 2.5 | **5.5** | 94.5 | **1.954** | **2.012** | 0 | 4.15654548 | 4.479 |
| 3 | **5.5** | 94.5 | **1.945** | **2.003** | 0 | 3.85816186 | 4.763 |
| 3.5 | **5.5** | 94.5 | **1.937** | **1.994** | 0 | 6.54176614 | 1.799 |
| 4 | **5.5** | 94.5 | **1.928** | **1.984** | -7.3E-15 | 7.62718289 | 0.579 |

**Fuente: Autor**

**Ilustración 34 GCR VS VACIOS EN AGREGADOS**

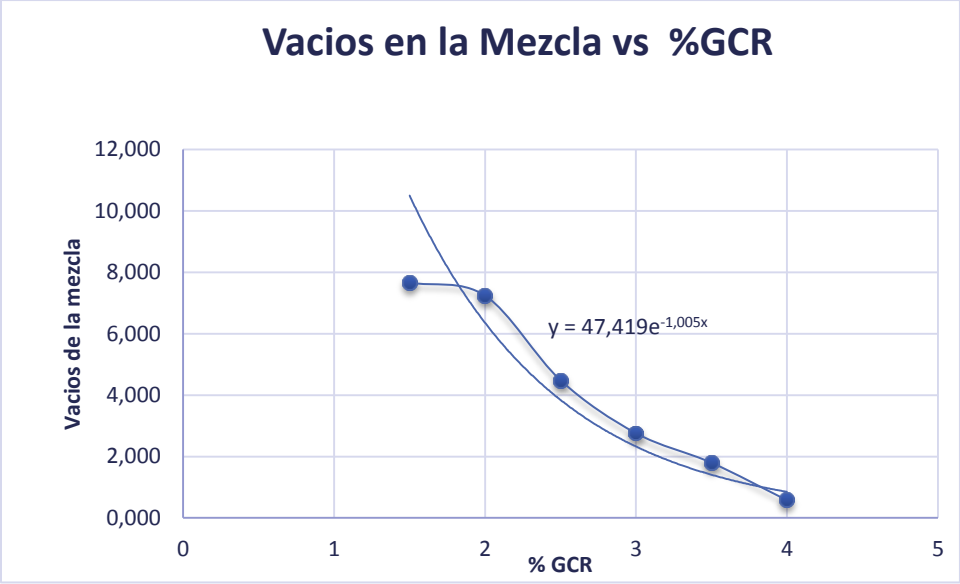



AUTOR

Obteniendo entonces, resultados que eran esperados por parte de la investigación, ya que mostraban sus características finales de manera muy marcada al momento de realizar los procedimientos aceptados por la metodología Marshall.

De estos resultados esperados, se tiene que a medida que se aumentaba el porcentaje de GCR el aumento de volumen sería inminente para cada probeta y por esta razón se produjo mayores cantidades de vacíos dentro de los agregados pétreos y una disminución para la mezcla en la cual serían ocupados por la hinchazón a altas temperaturas del GCR teniendo en cuentas sus propiedades de flexibilidad.

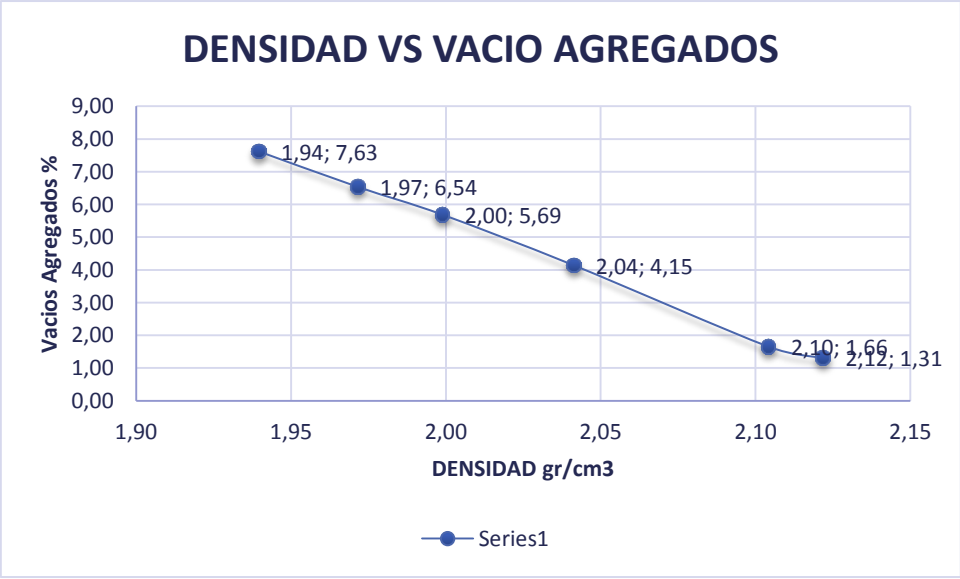
**Ilustración 35 Vacíos en la Mezcla vs %GCR**




. AUTOR

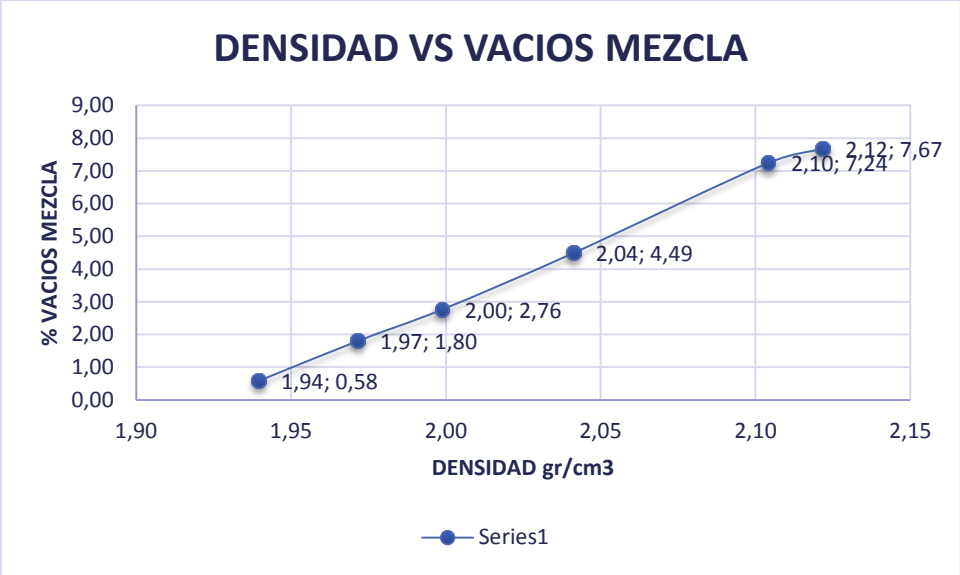
Es importante para obtener un análisis más completo identificar la relación entre los vacíos que existen sobre los agregados y la mezcla con relación a su densidad y todo esto después de saber la relación que existe entre el porcentaje incorporado de GCR con dependencia de la densidad.

**Ilustración 36 Densidad vs % Vacios agregados**



Se puede ver según los resultados obtenidos que se dio un crecimiento inversamente proporcional con respecto al aumento de la densidad y la relación del porcentaje de vacíos.

**Ilustración 37 Densidad vs Vacíos en la Mezcla**




Todo lo contrario con relación a los vacíos de la mezcla en donde se da una relación de crecimiento directamente proporcional, aumentando sus valores entre sí.

A medida que aumentan las densidades de las mezclas,

## 8.5 Ensayo Marshall a muestra patrón y muestra modificada

Se realizó el ensayo Marshall a cada grupo de estudio definido por variaciones en el porcentaje de GCR, haciendo uso de la maquina Marshall, encontrando los datos más relevantes para el análisis final de la investigación

### 8.5.1 Estabilidad y Flujo de briquetas

**Tabla 46 Estabilidades y flujo de mezclas con GCR y convencional .**

| % de GCR | Numero Briqueta | 0.254 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ESTABILIDAD (kg) | FLUJO 0.001" | FLUJO mm |
| 1.5 | 1 | 1025.2 | 14 | 3.556 |
| | 2 | 1125.5 | 12 | 3.048 |
| | 3 | 980.3 | 13 | 3.302 |
| 2 | 4 | 982.6 | 13 | 3.302 |
| | 5 | 925.3 | 14 | 3.556 |
| | 6 | 825.6 | 13 | 3.302 |
| 2.5 | 7 | 599.3 | 18 | 4.572 |
| | 8 | 605.3 | 16 | 4.064 |
| | 9 | 606.8 | 17 | 4.318 |
| 3 | 10 | 145.86 | 21 | 5.334 |
| | 11 | 150.2 | 22 | 5.588 |
| | 12 | 123.5 | 24 | 6.096 |
| 3.5 | 13 | 46.2 | 22 | 5.588 |
| | 14 | 33.3 | 22 | 5.588 |
| | 15 | 0.28 | 23 | 5.842 |
| 4 | 16 | 0.15 | 26 | 6.604 |
| | 17 | 0.0 | 0.0 | 7.112 |
| | 18 | 0.045 | 27 | 6.85 |
| MUESTRA PATRÓN | | | | |
| 5.5 % ASFAL-TO | 1 | 1100.1 | 12 | 3.048 |
| | 2 | 1224.8 | 12.5 | 3.175 |
| | 3 | 1250.1 | 12.7 | 3.22 |

**Fuente: Autor**

Es importante resaltar que después de someter las briquetas a las cargas proporcionadas por la maquina Marshall, los únicos valores que estuvieron por encima en cuanto a resistencia exigida por la norma INVIAS E-748 fueron la mezcla asfáltica con incorporación de 1.5%

y con 2.0% de GCR, donde la norma exige que los valores de estabilidad deben estar superando los 900kg. Para visualizar los resultados más claramente se pueden observar en las siguientes gráficas

**Tabla 47ESTABILIDAD VS GCR % (2)**

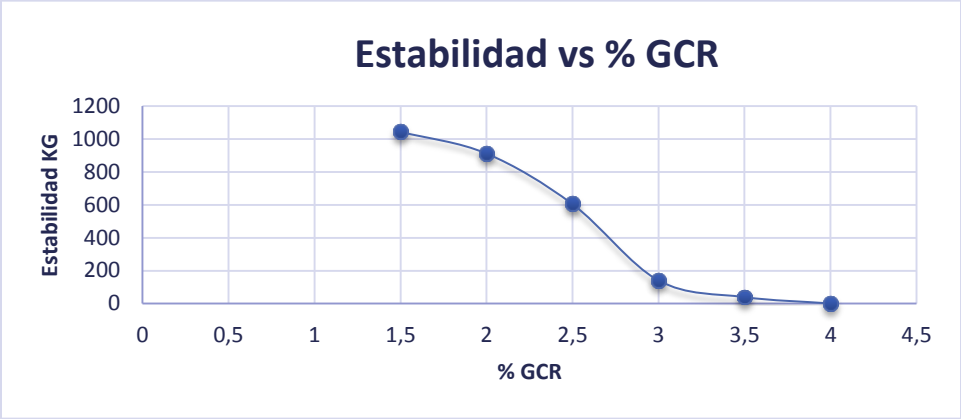
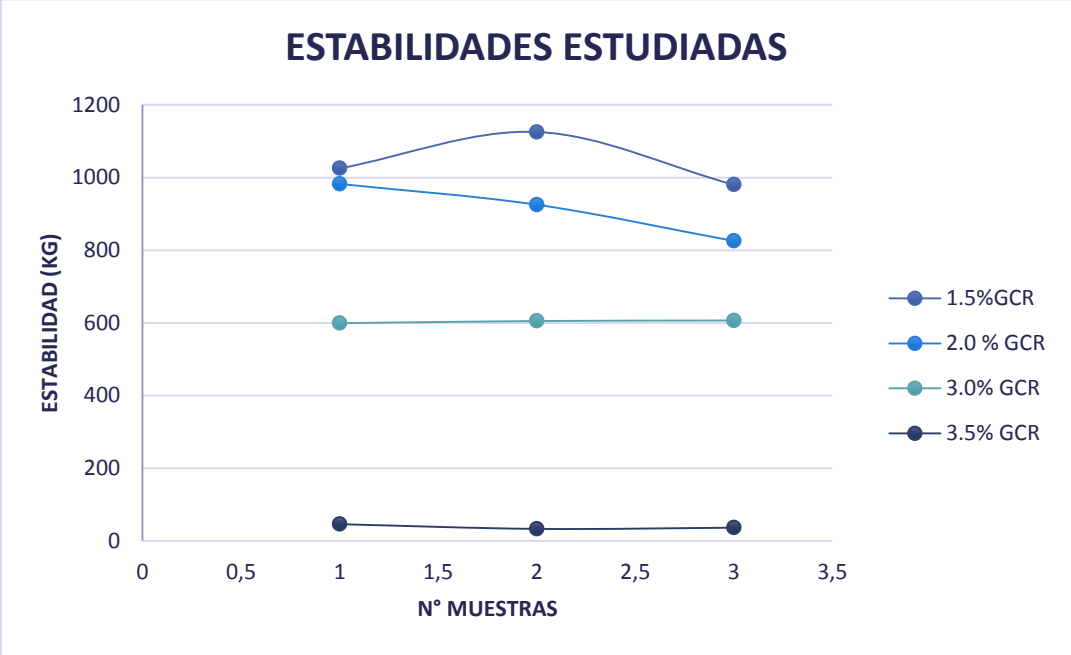
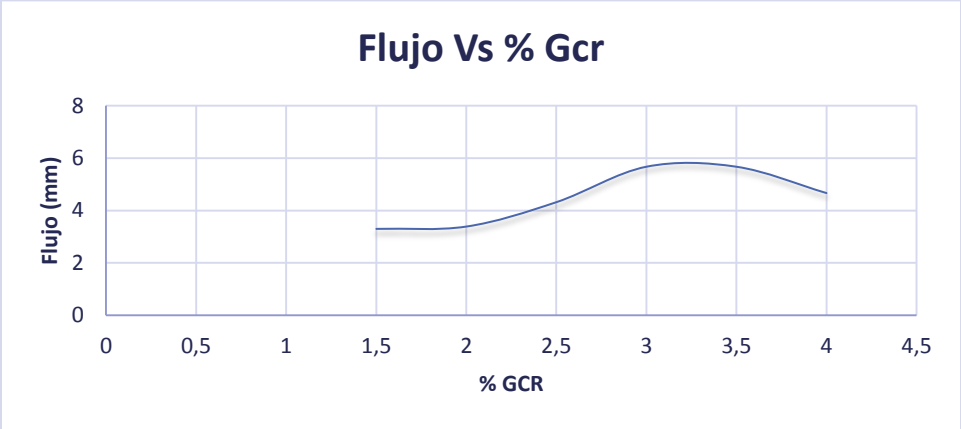



**Ilustración 38Comparacion de estabilidades con adición de GCR**

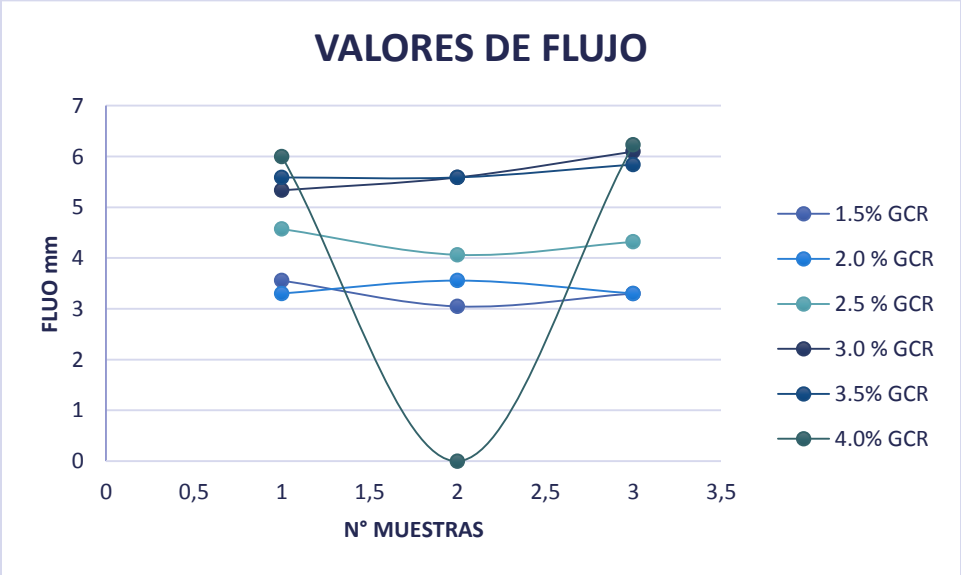



**Fuente: Autor**




**FLUJO VS GCR %. AUTOR**

**Ilustración 39 Comparación De Flujos .**




**Fuente: Autor**

En cuanto al flujo también se identifica un crecimiento del flujo de la mezcla asfáltica al incorporarse el GCR, siendo esto algo negativo para el comportamiento y buen funcionamiento de los pavimentos flexibles.

En la gráfica se puede ver un descenso altísimo en los valores de flujo, este corresponde a una de las muestras que antes de ser ensayada en la maquina Marshall se desintegró por efectos de la temperatura, por tal razón se anexó el valor del flujo como nulo.

Entonces al revisar los valores aceptables por la norma vigente INVIAS E-748, se puede ver claramente que solamente cumplieron los requisitos mínimos las mezclas asfálticas con incorporación de GCR entre el 1.5 y 2.0%, además de la muestra patrón. Es importante recalcar que tanto la muestra patrón como las modificadas con GCR fueron fabricadas con los mismos materiales e igual porcentaje de asfalto.

Esos valores mínimos son una estabilidad de 900kg y un flujo entre 2 y 3.5mm

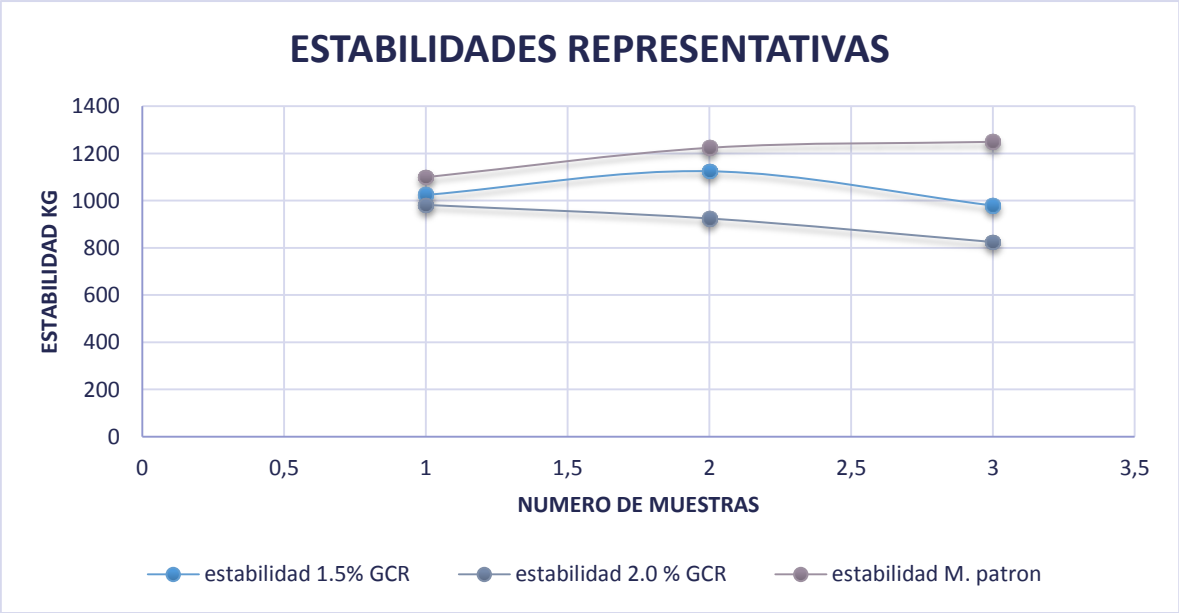
Es importante mencionar que al momento de realizar los ensayos de estabilidad y flujo se presentó una novedad, la cual fue el deterioro por completo de una de las briquetas antes de ser ensayadas, demostrando así la baja resistencia a altas temperaturas que puede soportar un pavimento. Esto se dio al momento de ser sumergida por 30 minutos a la temperatura de 60° C en baño María.

### 8.5.2 Comparación de Resultados:

- Con el fin de analizar y comparar resultados de un producto que se maneja en las carreteras de la región y el modificado para esta investigación como se había expresado con anterioridad; al tomar la mezcla patrón diseñada por la promotora Montecarlo con un 5.5 % de asfalto óptimo, se realizó una comparación con los valores más representativos para las estabilidades y flujos obtenidos para ambos casos, resaltando los resultados obtenidos para las mezclas con incorporación de GCR en un 1.5% y 2.0% los cuales fueron los únicos satisfactorios. Todo esto con el fin de identificar las variaciones de estabilidad entre diferentes proporciones y dosificaciones de los agregados con respecto a la muestra patrón. En este caso solo se toma-

ron los dos primeros porcentajes de mezcla modificada porque los valores superiores a 2.0% en la incorporación de GCR presentan altos rangos en la perdida de la estabilidad. (PALMA, 2006)

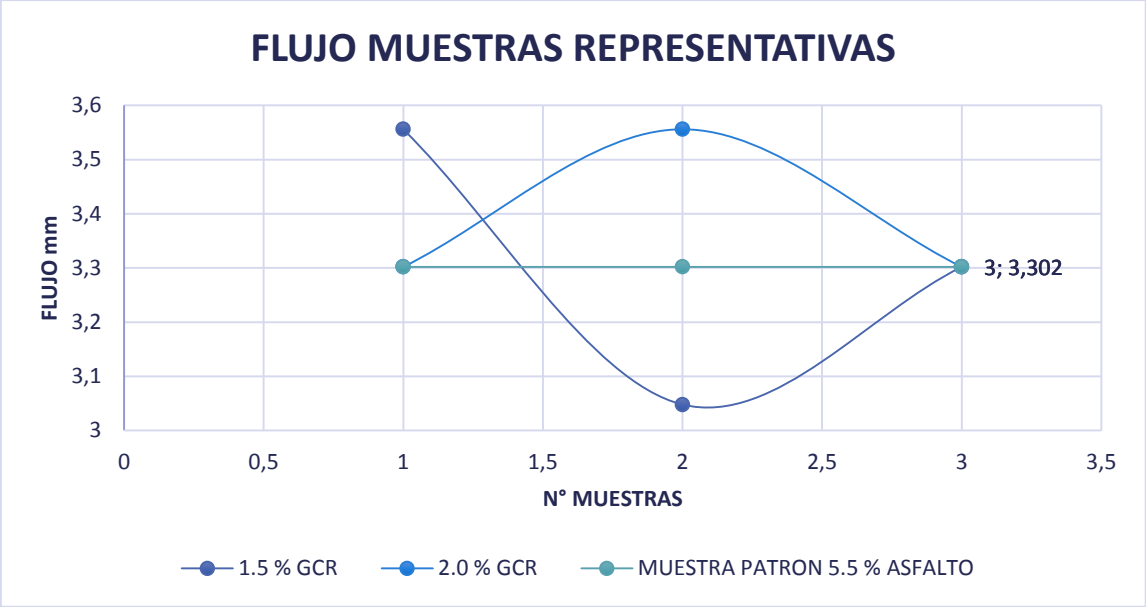
**Ilustración 40 Comparación de estabilidades aceptables**




**Fuente: Autor**

Es posible ver que la adición de grano de caucho a medida que se aumenta su contenido se va ejerciendo una pérdida de estabilidad sobre la mezcla asfáltica. Para definir cuál de los valores de estabilidad fue el óptima se tomó como referencia simplemente la ecuación de correlación de ambas graficaciones; obteniendo mejores resultados con relación al porcentaje de incorporación de GCR del 1.5%

**Ilustración 41 Comparación de flujos aceptables .**




**Fuente: Autor**

En lo correspondiente al flujo se ve una variabilidad entre una misma muestra, aunque cabe resaltar que esta variabilidad no es sobre rangos muy altos y además se encuentran dentro de los valores permitidos por la INVIAS 748. Es importante resaltar sobre esta gráfica los valores obtenidos en cuanto al flujo de la muestra patrón, el cual se mantuvo constante a diferencia de las mezclas con incorporación de GCR, pudiendo ser esto por el contenido de caucho quien no proporcionaría siempre una adhesión y compactación proporcional sobre su espécimen.

Al mirar los valores de flujo de las muestras modificadas el valor más constante es el presentado por el ensayo con incorporación de 2.0% de GCR, lo cual podría ser una preferencia al momento de tener la posibilidad de escoger entre los dos diferentes procedimientos de diseño.

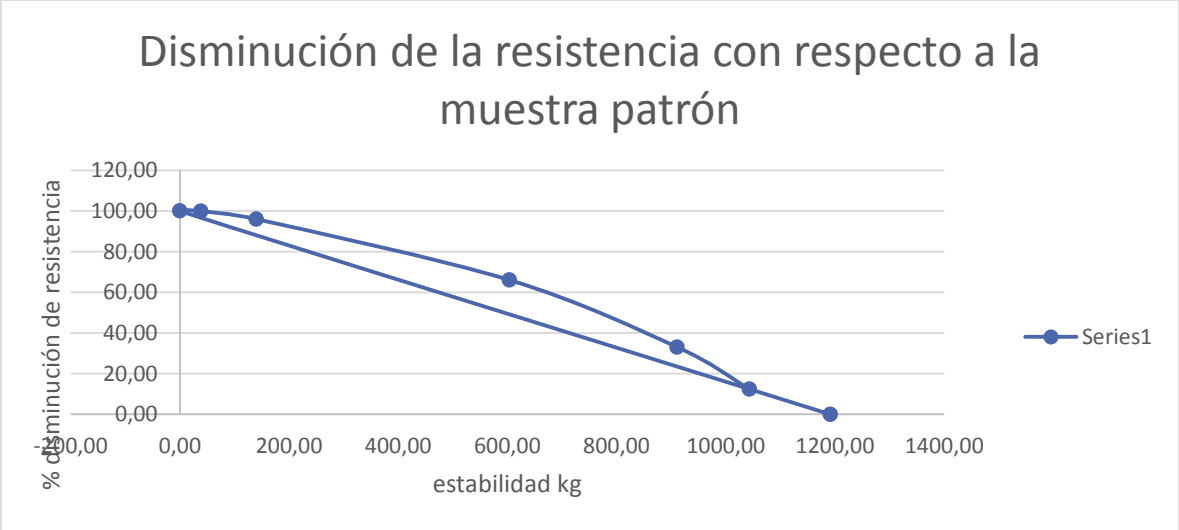
Por otra parte para tener una relación en cuanto a la disminución de la resistencia con el aumento de GCR, es importante anexar la siguiente gráfica para tener una idea más clara.

**Tabla 48 Perdidas de resistencia a partir de la muestra patrón.**

| % GCR | ESTABILIDAD KG | FLUJO mm | DISMINUCIÓN RESISTENCIA | |
|---|---|---|---|---|
| 1.5 | 1043.67 | 3.30 | 12.42 | % |
| 2 | 911.17 | 3.39 | 33.03 | % |
| 2.5 | 603.80 | 4.32 | 66.07 | % |
| 3 | 139.85 | 5.67 | 96.02 | % |
| 3.5 | 38.67 | 5.67 | 99.87 | % |
| 4 | 0.07 | 6.12 | 100.00 | % |
| M PATRON | 1191.67 | 3.30 | 0.00 | |

**Fuente: Autor**

**Ilustración 42 Perdidas de resistencia a partir de la muestra patrón.**




**Fuente: Autor**

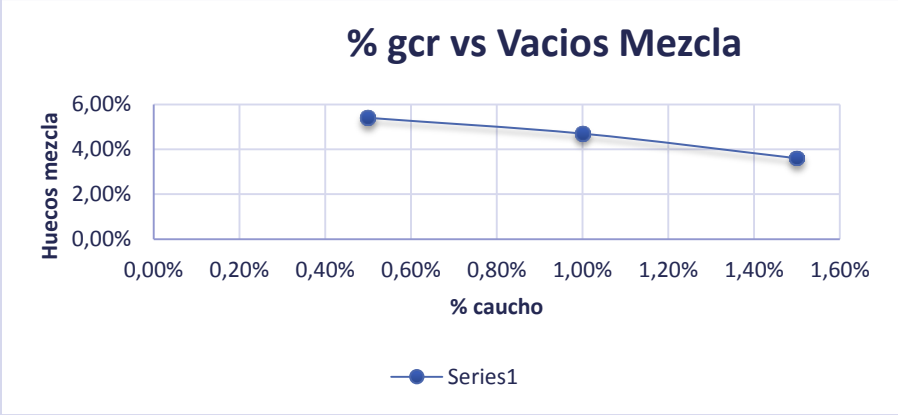
En donde la línea recta equivale al 100% de la resistencia con respecto un poco más de los 1200 kg de estabilidad. El cuál es la base para analizar la otra curva, en la que se puede ver la disminución de la disminución de la resistencia con respecto al 100% de la muestra patrón.

Por otra parte, al revisar los antecedentes bibliográficos se pudo dar fe que los resultados obtenidos son aceptables y valederos, al conocer que las tendencias de los resultados de esta investigación llevan el mismo camino, teniendo de todos modos algunas diferencias las cuales serán mostradas a continuación.

**Tabla 49 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de mezcla**

| ASFALTO 5.5% | |
|---|---|
| Porcentaje GCR | Huecos en la mezcla |
| 0.50% | 5.40% |
| 1% | 4.70% |
| 1.50% | 3.60% |

**Ilustración 43 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de mezcla**



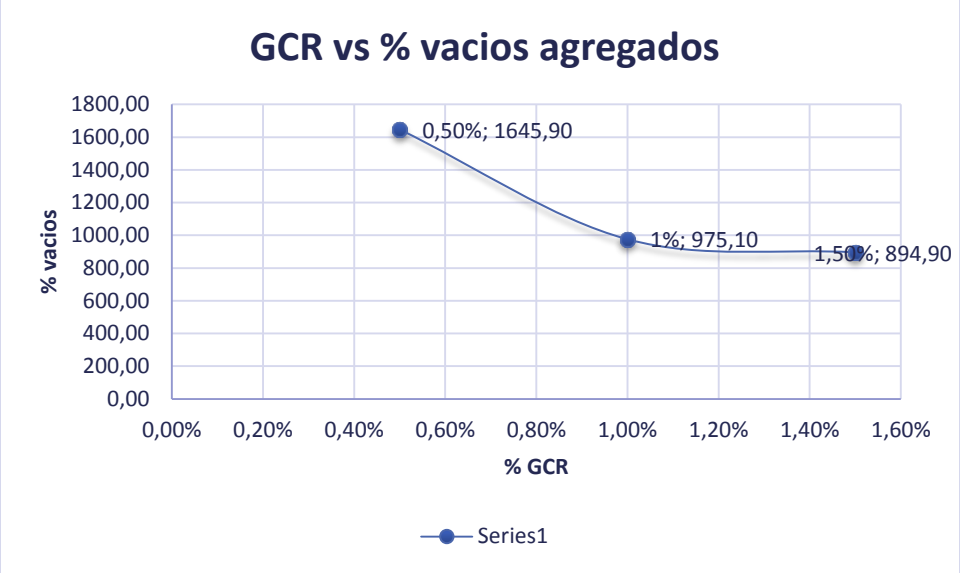

Al graficar los valores observados en la investigación, nos podemos dar cuenta que para ellos también con un aumento de los porcentajes de GCR se da una disminución de los huecos de la mezcla, lo cual se había planteado anteriormente en lo correspondiente a nuestra investigación

Otra comparación que podemos hacer es la relación entre los vacíos de los agregados y el aumento de incorporación de GCR.

**Tabla 50 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de agregagdos. AUTOR**

| ASFALTO 5.5% | |
|---|---|
| Porcentaje GCR | Huecos en la mezcla |
| 0.50% | 17.80% |
| 1% | 17.20% |
| 1.50% | 18.70% |

**Ilustración 44 Comparación de resultados con antecedentes % vacíos de agregados.**




**AUTOR**

Al ver grafica se ve claramente el aumento de los vacíos después del 1.0% de incorporación de GCR, el cual nos sirvió más como guía para el desarrollo y punto de partida para los rangos de los estudios a realizar.

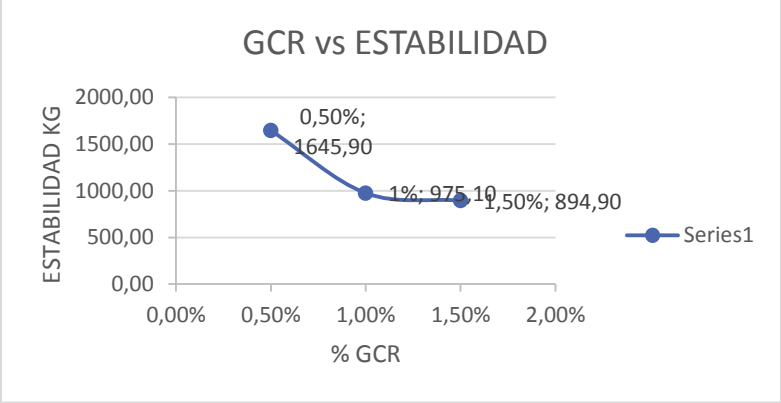
En lo correspondiente a la estabilidad si hay una gran diferencia en donde ellos afirman que el resultado obtenido para el 1.5% no alcanzo a llegar a los 900 kg establecidos por norma, a los cuales en nuestra investigación inicialmente no se obtenían estos resultados pero al realizar diferentes investigaciones para poder mejorar aumentar el % de GCR el mezclado y las temperaturas de fabricación de la mezcla deben ser los más adecuados.

**Tabla 51 Comparación de resultados con antecedentes, estabilidades.**

| ASFALTO 5.5% | | |
|---|---|---|
| Porcentaje GCR | Huecos en la mezcla | |
| 0.50% | 1645.90 | kg |
| 1% | 975.10 | kg |
| 1.50% | 894.90 | kg |

**Fuente: Estudio de la utilización de caucho de mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco**

**Ilustración 45 Comparacion de estabilidades**




**Fuente: Autor**

- La similitud entre nuestra investigación y esta en cuanto a los datos de la estabilidad es la notable disminución de estabilidad a medida que se aumenta el GCR a una mezcla convencional, se cree que otra diferencia entre los resultados obtenidos para este caso pueda ser en los materiales en la proveniencia de los agregados pétreos utilizados. (PALMA, 2006)

### 8.5.3 Costo De Mezclas Asfálticas

Con el fin de analizar el incremento costos de producción de las mezclas con la incorporación de GCR, se realizó el siguiente análisis de precios unitarios para la muestra patrón y la respectiva mezcla de estudio escogida como óptima en cuanto a los resultados de estabilidad y flujo.

**Tabla 52 Precio Unitario mezclas asfálticas**

| I- EQUIPO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Tipo** | **Tarifa / Hora** | **Rendiiento** | **Vr. Unitario** |
| Cargador de llantas | 950 Serie II | 173.519,28 $ | 60 | 2.891,99 $ |
| Planta asfalto CMI | UDM -70 | 1.024.058,16 $ | 60 | 17.067,64 $ |
| Planta eléctrica | 200 Kw | 108.638,28 $ | 60 | 1.810,64 $ |
| | | | **Sub - Total** | **21.770,26 $** |

| II- MATERIALES EN OBRA | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Unidad** | **V. Unitario** | **Cantidad** | **Vr. Unitario** |
| Triturado pasa 3/4" | M3 | 71.812,44 $ | 0,2 | 14.362,49 $ |
| Triturado Pasa 1/2" | M3 | 62.931,60 $ | 0,35 | 22.026,06 $ |
| Arena Lavada | M3 | 39.636,00 $ | 0,2 | 7.927,20 $ |
| Arena Triturada Palarito | M3 | 41.796,00 $ | 0,2 | 8.359,20 $ |
| Llenante Mineral Capusano | M3 | 27.000,00 $ | 0,05 | 1.350,00 $ |
| Asfalto 60/70 | kg | 1.401,74 $ | 100 | 140.174,00 $ |
| Agua Antipolución | Lts | 5,00 $ | 50 | 250,00 $ |
| Aceite | Gal | 2.700,00 $ | 5 | 13.500,00 $ |
| Gas Natural | M3 | 1.620,00 $ | 1,5 | 2.430,00 $ |
| | | | **Sub - Total** | 210.378,95 $ |

| III- MANO DE OBRA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Jornal** | **Prestaciones** | **Jornal Total** | **Rendimiento** | **V. Unitario** |
| Operador | 45000 | 36.000,00 $ | 81.000,00 $ | 60 | 1.350,00 $ |
| Ayudantes (4) | 100000 | 80.000,00 $ | 180.000,00 $ | 60 | 3.000,00 $ |
| Laboratorista | 50000 | 40.000,00 $ | 90.000,00 $ | 60 | 1.500,00 $ |
| Ayudanate Laboratorio | 25000 | 20.000,00 $ | 45.000,00 $ | 60 | 750,00 $ |
| | | | | Sub - Total | 6.600,00 $ |
| | | | | **Total Costo Direto** | **238.749,21 $** |

**Tabla 53 APU Con Incorporación GCR. AUTOR**

| I- EQUIPO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Tipo** | **Tarifa / Hora** | **Rendiiento** | **Vr. Unitario** |
| Cargador de llantas | 950 Serie II | 173.519,28 $ | 60 | 2.891,99 $ |
| Planta asfalto CMI | UDM -70 | 1.024.058,16 $ | 60 | 17.067,64 $ |
| Planta eléctrica | 200 Kw | 108.638,28 $ | 60 | 1.810,64 $ |
| | | | **Sub - Total** | **21.770,26 $** |

| II- MATERIALES EN OBRA | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Unidad** | **V. Unitario** | **Cantidad** | **Vr. Unitario** |
| Triturado pasa 3/4" | M3 | 71.812,44 $ | 0,2 | 14.362,49 $ |
| Triturado Pasa 1/2" | M3 | 62.931,60 $ | 0,35 | 22.026,06 $ |
| Arena Lavada | M3 | 39.636,00 $ | 0,2 | 7.927,20 $ |
| Arena Triturada Palarito | M3 | 41.796,00 $ | 0,2 | 8.359,20 $ |
| Llenante Mineral Capusano | M3 | 27.000,00 $ | 0,035 | 945,00 $ |
| GCR | KG | 600,00 $ | 0,015 | 9,00 $ |
| Asfalto 60/70 | kg | 1.401,74 $ | 100 | 140.174,00 $ |
| Agua Antipolución | Lts | 5,00 $ | 50 | 250,00 $ |
| Aceite | Gal | 2.700,00 $ | 5 | 13.500,00 $ |
| Gas Natural | M3 | 1.620,00 $ | 1,5 | 2.430,00 $ |
| | | | **Sub - Total** | 209.982,95 $ |

| III- MANO DE OBRA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Descripcón** | **Jornal** | **Prestaciones** | **Jornal Total** | **Rendimiento** | **V. Unitario** |
| Operador | 45000 | 36.000,00 $ | 81.000,00 $ | 60 | 1.350,00 $ |
| Ayudantes (4) | 100000 | 80.000,00 $ | 180.000,00 $ | 60 | 3.000,00 $ |
| Laboratorista | 50000 | 40.000,00 $ | 90.000,00 $ | 60 | 1.500,00 $ |
| Ayudanate Laboratorio | 25000 | 20.000,00 $ | 45.000,00 $ | 60 | 750,00 $ |
| | | | | Sub - Total | 6.600,00 $ |
| | | | | **Total Costo Direto** | **238.353,21 $** |

# 9 CONCLUSIONES

- A partir del desarrollo y ejecución de un gran número de ensayos de laboratorio a agregados pétreos y briquetas de mezclas asfálticas se pudo desarrollar este proceso de investigación para poder obtener todas las variables e hipótesis planteadas en un inicio.
- Se logró identificar la influencia que trae la incorporación del uso de del triturado de llantas como un agregado de la mezcla asfáltica con un porcentaje de 5.5 % de asfalto y una dosificación preestablecida por la empresa Promotora Montecarlo.
- Uno de las principales cambios que trajo a la mezcla asfáltica convencional la incorporación de grano de caucho es el aumento en su volumen a medida que se introduce este nuevo material, proporcionando un incremento en los vacíos de los agregados y además volviendo por lo tanto un pavimento mucho más poroso, todo esto gracias a la mezcla con el ligante asfáltico y absorbiendo gran parte de este material dejando ver que se necesitaría un poco de más asfalto para cumplir con recubrimiento total de cada uno de los materiales que conforman la mezcla.

- Se pudo realizar una caracterización detallada y confiable para cada uno de los agregados suministrados, obteniendo resultados satisfactorios que demuestran el gran potencial que tienen en propiedades mecánicas que poseen las carreteras de la región.

- Fue establecido un procedimiento de diseño con el uso de un 5.5% de asfalto con el uso de los materiales pétreos que también establecen también una óptima dosificación analítica de un 20% de agregado pasa 3/4”, 35% triturado pasa ½”de la cantera rotinet, 20% de arena lavada zarandeada Palmarito, otro

20% en arena triturada, 3.5 % de llenante mineral campusano y un 1.5 % de GCR escogido como porcentaje óptimo de asfalto, al cumplir con los valores de estabilidad y flujo establecidos por la norma INVIAS 2007.

- Se pudo hacer la comparación entre las estabilidades y flujo de las mezclas modificadas con la mezcla patrón, en donde se pudo identificar que solo con el 1.5% y 2.0% cumplieron con los valores superiores de 900kg de estabilidad y de 2 a 3.5 de flujo.
- La influencia directa que trajo el uso de GCR (grano de caucho reciclado) sobre sobre la estabilidad fue la disminución de su valor a medida que se iba agregando desde 1.5% hasta 4.0%. Pasando en una disminución de 88% con respecto a la muestra patrón con tan solo un 1.5% y de 66% con un 2% de incorporación de GCR.
- Al revisar precios unitarios en cuanto al costo de materiales para mezclas asfálticas se logró identificar que la mezcla con adición de GCR no representa un incremento significativo en su elaboración, obteniendo entonces una viabilidad económica para su uso y además cabe resaltar que se planteó su estudio inicialmente para mitigar y reducir daños ambientales causados con el desperdicio indiscriminado que se encuentra de estos materiales en las principales fuentes hídricas y las vías de la ciudad de Cartagena.

- En cuanto a la comparación con los antecedentes tomados para la realización de esta investigación se identificó que se coincidió con las disminuciones de estabilidad y los altos flujos presentados en la mezclas con incorporación de GCR.
- Uno de los resultados inesperados al momento de realizar los ensayos de estabilidad fue que gracias a las altas temperaturas una de las briquetas a ensayar se desintegro en el baño María, no lográndose aplicar la carga en la máquina

Marshall, lo cual lleva a pensar que puede ser posible realizar este mismo diseño de mezcla asfáltica pero para ser experimentado a bajas temperaturas.

## 10 RECOMENDACIONES

Se presentó una limitación con algunas briquetas, que al parecer no fueron compactadas lo suficientemente, ocasionando un deterioro inmediato después de ser compactadas, gracias a la consistencia y propiedad elástica que le proporciono el GCR, por lo que se hizo necesario ser repetidas.

Una de las recomendaciones para el completo cumplimiento de los objetivos y evitar inconvenientes en el desarrollo posterior de la investigación, es el de realizar la compactación de cada una de las briquetas de la manera más perfecta posible, teniendo en cuenta que el GCR es un material mucho más flexible que los demás agregados y proporciona un mayor volumen a la briqueta ocasionando una permeabilidad más temprana al momento de ser sumergidas en el baño María para luego ensayarlas en la maquina Marshall.
Otra recomendación muy importante es la del mezclado de los materiales después de ser incorporado el GCR, el cual absorbe en alguna medida el Ligante asfáltico y deja sin un total recubrimiento a algunos agregados. Se debe mezclar hasta que se tenga la certeza que todos los agregados pétreos estén completamente recubiertos por el asfalto.

# 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA SOFIA FIGUEROA INFANTE, T. A, *"El efecto de la miga de caucho como modificador de la resistencia de la mezcla de asfalto en la deformación plástica"* . (2009). Granada - España: universidad de Granada en conjunto con LabIC Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, ETSICCP, y C / Severo O.

A, Y. X., HAOBO HOU A, SHUJING A, & JIN ZHA C. (2008). *"Utilización de cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos como sustituto parcial del agregado fino o carga mineral en mezclas asfálti-cas fundidas.".* Hubei: Scholl of Resource Proteccion Co. Ltd y School of Material Science and Engineering.

ALAMAVIVA S.A. (2010). *BOLETÍN JURÍDICO NO. 2010 – 085.* BOGOTÁ.

ANA SOFIA FIGUEROA INFANTE, & MONTEALEGRE, T. (2007). *Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia.* Bogotá D.C: Universidad Javeriana.

BERNAL, G., BORIS MARRUGO, & GABRIEL SUAREZ. (1999,). *análisis comparativo entre el diseño de pavimentos flexibles con emulsiones asfálticas y mezclas en caliente, utilizando materiales propios de la región.* Cartagena – Bolívar.: Universidad de Cartagena.

BOTASSO, G., OSCAR REBOLLO, ADRIÁN CUATTROCCHIO, & CECILIA SOENGAS. (Julio 2008). *Utilización de Caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura.* La Plata - Argentina: LEMAC Universidad Tecnológica Facultad Regional La Plata.

CONCEJO PRIVADO DE COMPETITIVIDAD (CPC). (2013). *Informe Nacional de Competitividad 2012-2013.* Bogotá.

DIEGO ALVAREZ HERNADEZ, & ARROYO ORTIZ, A. (2008). *Influencia del uso de llenantes minerales en el mejoramiento de la calidad de mezclas asfálticas producidas pro la ciudad de Cartagena.* Cartagena: Universidad de Cratagena.

F. Moreno1, M. Sol, , J. Martín, & M. Pérez,. (2009)). *"El efecto de la miga de caucho como modificador de la resistencia de la mezcla de asfalto en la deformación plástica".* Granada: Universidad de Granada, LaIC laboratorio de ingenieria de la Cosntrucción, ETSICCP, Severo Ochoa Granada.

IDU, I. (2009). *Aplicación del grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas en caliente.* Bogotá.

INVIAS. (2007). *Resistencia De Mezclas Asfálticas En Caliente Empleando El Aparato Marshall.* Bogotá - Colombia.

LIZCANO, F. A., & FIGUEROA INFANTE,, A. (2008.). *Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas.* Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana,.

MINAMBIENTE. (2011). *Guía Para Selección De Tecnologías De Manejo Integral De Residuos Sólidos. Minambiente.* Bogotá.

RAFAEL ALEXANDER CRESPIN MOLINA, ISMAEL ERNESTO STA CRUZ JEVEL, , & PABLO ALBERTO TORRES. (2012). *APLIC ACION DEL METODO M ARSHALL Y GRANULOMETRIA SUPERPAVE EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE CON ASFALTO CLASIFICACION GRADO DE DESEMPEÑO.* San Salvador.

SABOGAL, F. S. (1984). *Pavimento Tomo I.* Bogotá: Universidad la Gran Colombia.

SANCHEZ, A., & F. BELMONTE. (2009). *Analisis de la reutilización de residuos procedentes de la industria del Silestone en la fabricación de mezclas asfálticas.* Granada - España: Universidad de Granada.

SSPD - SIU. (2011). *Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia.* Bogotá: Imprenta Nacional.

SSPD. (2009). *Situacion De La Disposicion Final De Residuos Sólidos.* Bogotá.

UDEP, B. (2008). *Diseño de Mezclas Asfálticas.* Biblioteca Udep.

(ECOPETROL BARRANCABERMEJA, 2014)

- WAN-FA YANG A, HWONG-WEN MA A, YII-REN SONG B The potential of recycling and reusing municipal solid waste incinerator ash in Taiwan Chin-Ming Huang.a National Taiwan University, Graduate Institute of Environmental Engineering, 71, Chou-Shan Road, Taipei, 106, Taiwan, Republic of China, b Environ-

mental Protection Administration, Department of Waste Management, 41, Jhong-Hua Road, Sec. 1, Taipei, 100, Taiwan, Republic of China Accepted 15 September 2005Available online 16 November 2005 Abstract

- CHIN-MING HUANGA, CHUI-TE CHIU B,∗, KUNG-CHEH LI A, WAN-FA YANG B a *Graduate Institute of Environmental Engineering, National Taiwan University, Taiwan* b *Chung Hua University, Department of Civil Engineering, No. 707 Sec. 2, WuFu Rd., Hsin Chu 300, Taiwan* Received 21 February 2006; received in revised form 3 May 2006; accepted 5 May 2006 Available online 12 May 2006. Propiedades físicas y ambientales de las mezclas asfálticas que contienen las cenizas de fondo incinerador.

- YONGJIE XUE A,B,*, HAOBO HOU A, SHUJING ZHU A, JIN ZHA C, utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: pavement performance and environmental impact, School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Hubei Wuhan, PR Chinab Wuhan Kaidi Electric Power Environmental Protection Co. Ltd., Hubei Wuhan, PR China, School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, PR China.
- Norma INVIAS 2007, Bogotá- Colombia.
- PALMA, N. I. (2006). Estudio de la Utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Santiago de Chile .

# 11. ANEXOS

**Preparación de mezcla asfáltica. Fuente Autor 2014**

**Compactación de briquetas. Fuente Autor 2014**

**Briquetas compactadas** **Fuente Autor 2014**

**Briquetas ensayadas** **Fuente Autor 2014**