

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**INFLUENCIA DE LA INCORPORACION DE PARTICULAS DE
CAUCHO RECICLADO COMO AGREGADOS EN EL DISEÑO DE
MEZCLA ASFALTICA**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO Y DESARROLLO DE
MATERIALES**

AUTORES:

BR. ALVAREZ BRICEÑO LUIS ALBERTO

BR. CARRERA SANCHEZ EVER TONY

ASESOR:

ING. VERTIZ MALABRIGO MANUEL

TRUJILLO – PERU

2017

ACREDITACIONES

TITULO: INFLUENCIA DE LA INCORPORACION DE PARTICULAS DE CAUCHO RECICLADO COMO AGREGADOS EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

ELABORADO POR:

Br Alvarez Briceño Luis Alberto

Br Carrera Sánchez Ever Tony

APROBADO POR:

Ing. Manuel Antonio Villalobos Vargas
PRESIDENTE
CIP: 7156

Ing. Jorge Antonio Vega Benites
SECRETARIO
CIP: 78666

Ing. Carmen Lucia Geldres Sánchez
VOCAL
CIP: 80599

Ing. Manuel Vertiz Malabrigo
ASESOR
CIP:71188

PRESENTACION

Señores miembros del jurado

De conformidad y con el cumplimiento de los requisitos estipulados en el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el reglamento interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Civil para obtener el título profesional de ingeniero civil, proponemos a vuestra disposición el presente trabajo de tesis titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCORPORACION DE PARTICULAS DE CAUCHO RECICLADO COMO AGREGADOS EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA”** a fin de ser evaluado.

Este trabajo es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional de la Universidad, aplicados para solucionar las problemáticas de contaminación ambiental por el caucho y desarrollo de la infraestructura vial observada en la ciudad de Trujillo.

Confiamos que el presente trabajo logre cumplir las expectativas que tiene al respecto, excusándonos anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo

Trujillo, noviembre de 2017

Br ALVAREZ BRICEÑO LUIS ALBERTO

Br CARRERA SANCHEZ EVER TONY

DEDICATORIA 1

Con todo el aprecio y cariño para todas las persona allegadas a mí, que quien con su impulso supieron como ayudarme en cada momento, y también a cada persona que contribuyó con esta investigación y con la formación académica profesional que recibí en el trayecto de la misma

En esfuerzo y sacrificio a mi dios y a mi familia quienes me formaron y encaminaron, sabiéndome entender todos los errores que cometí

Br ALVAREZ BRICEÑO LUIS ALBERTO

DEDICATORIA 2

Dedico este trabajo a mis padres por depositar su confianza en mí para poder cumplir con este objetivo y por saber comprender en los errores que comento como hijo y alumno siempre exigiéndome a ser el mejor y seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mis familiares más allegados que contribuyeron con sus consejos para poder ser un mejor estudiante y por cada momento compartido con ellos

Br CARRERA SANCHEZ EVER TONY

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios el cual nos dio la vida y queremos retribuir con un pequeño aporte a la investigación

Agradecemos a nuestro asesor de tesis y amigo el Ing. Vertiz Malabrigo Manuel por su apoyo metodológico, profesional, y moral para la orientación en el desarrollo de nuestra tesis.

A la Universidad Privada Antenor Orrego, Facultad de Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por el apoyo brindado en la etapa de nuestra titulación.

A nuestros docentes y padres quienes con paciencia y dedicación supieron encaminarnos en el trayecto de nuestra carrera

LOS AUTORES

INDICE

RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
I. ASPECTOS DE LA INVESTIGACION.....	17
1. Título.....	17
1. Equipo investigador	17
2. Asesor	17
3. Tipo de Investigación	17
4. Tipo de Investigación	17
5. Régimen de la Investigación	17
6. Línea de Investigación.....	17
7. Institución a la que pertenece el proyecto	17
8. Unidad Académica	17
9. Lugar de desarrollo del proyecto	17
10. Duración de la ejecución del proyecto.....	17
11. Cronograma de actividades	18
12. Recursos	18
12.1 Personal	18
12.2 Bienes	18
12.3 Servicios.....	18
13. Presupuesto	19
14. Financiamiento	19
14.1 Con recursos propios	19
II. PROBLEMA DE INVESTIGACION	20
2. El Problema.....	20
2.1 Planteamiento del problema	20
A. Realidad problemática	20
B. Características de la realidad	21
2.2 Formulación del problema.....	24

2.3	Objetivos	24
•	Objetivos generales	24
•	Objetivos específicos	24
2.4	Justificación de la investigación	25
2.4.1	Importancia de la investigación	25
2.4.2	Viabilidad de la investigación	27
A.	Alcances de la investigación.....	27
2.5	Limitaciones del estudio	32
III.	MARCO TEORICO.....	34
3.1	Antecedentes de la Investigación	34
3.1.1	Triturado de residuos de llantas incorporados como agregados pétreos en la producción de mezclas asfálticas	35
3.2.	Fundamentación teórica de la investigación.....	37
3.2.1	Que es un Pavimento.....	37
3.2.2	Tipos de Pavimentos.....	37
•	Pavimento Flexible.....	37
•	Pavimento Rígido.....	38
3.2.3	Definición de asfalto	38
3.2.4	Composición de las mezclas asfálticas.....	42
A.	Origen y Producción del asfalto	43
B.	Índice de calidad de los cementos asfálticos.....	43
3.2.5	Propiedades principales de los cementos asfálticos.....	44
A.	Durabilidad	44
B.	Adhesión y Cohesión	44
C.	Índice de Penetración.....	44
D.	Penetración.....	44
E.	Viscosidad.....	45
F.	Punto de Ablandamiento.....	45
G.	Ductilidad de los materiales asfálticos	45

3.2.6	Agregados o materiales pétreos.....	46
3.2.6.1	Clasificación del agregado pétreo	46
3.2.7	Ensayos a los materiales pétreos	47
3.2.8	Llenante mineral.....	49
3.2.9	Triturado de restos de llantas (GCR)	50
3.2.10	Tipos de mezclas Asfálticas	51
3.2.10.1	Mezclas Asfálticas en Frío	51
3.2.10.2	Mezclas Asfálticas en Caliente	52
3.2.11	Diseño De Mezclas Asfálticas	53
3.2.11.1	Métodos de diseño más conocidos.....	53
3.2.11.2	Método Marshall	54
3.2.11.3	Elaboración de la mezcla asfáltica metodología Marshall.....	55
3.2.11.4	Propiedades Consideradas Para El Diseño De Mezclas.....	55
3.2.12	Características de las mezclas asfálticas	59
3.2.12.1	Densidad	59
3.2.12.2	Vacíos De Aire	60
3.2.12.3	Vacíos En El Agregado Mineral.....	61
3.2.13	Contenido De Asfalto En Mezclas Bituminosas.....	61
3.2.14	Elaboración de muestras para ensayos de una mezcla asfáltica	63
3.2.15	Pruebas a las mezclas asfálticas	63
3.2.15.1	Pruebas Volumétricas	63
3.2.15.2	Pruebas Mecánicas	64
3.2.16	Cálculo del porcentaje óptimo de llenante mineral.....	65
3.2.17	Estabilidad Y Flujo De Mezclas Asfálticas	66
3.2.18	Definición de polímero	67

3.2.19 Modificación del asfalto.....	71
A. Estructura de los Asfaltos Modificados	76
B. Compatibilidad de los Polímeros	77
3.3 Definición de términos básicos.....	79
3.4 Hipótesis.....	78
3.5 Variables y definición operacional	78
IV. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	81
4.1 METODOLOGIA	81
4.2 Técnicas de recolección de información.....	81
4.2.1.1 Esquema de formatos para laboratorios.....	81
4.2.1.2 Obtención de materias primas	82
4.2.1.3 Caracterización	83
4.2.1.4 Combinación de materiales	84
4.2.1.5 Muestra Patrón	85
4.2.1.6 Preparación de muestra Patrón y de la mezcla modificada con incorporación de GCR para el análisis de la investigación.....	85
4.2.1.7 Preparación De Briquetas	88
4.2.1.8 Equipos para ensayos a compresión.....	88
4.2.1.9 Ensayos de laboratorio para determinar la estabilidad y flujo	91
4.2.2 Recolección secundaria.....	92
4.2.2.1 Documentación.....	92

V. RESULTADOS	94
5.1 Caracterización de materiales	94
5.2 Caracterización del ligante asfáltico	94
5.3 Caracterización de materiales pétreos	95
5.3.1 Gradación Pasa ¾”	95
5.3.2 Gradación Pasa ½”	97
5.3.3 Gradación Arena	98
5.3.4 Gradación Arena Lavada	99
5.3.5 Gradación GCR	100
5.3.6 Ensayo de Abrasión Maquina de los Ángeles (MTC E 207)	100
5.3.7 Ensayo de Masa Unitaria	102
5.3.8 Ensayo de durabilidad (MTC E 209)	104
5.3.9 Ensayo de Humedad Natural (MTC E-108)	105
5.3.10 Equivalente de Arena MTC E-114	106
5.3.11 Gravedad Específica (MTC E-113)	106
5.3.12 Partículas Planas y Alargadas (MTC E 223)	108
5.3.13 Porcentaje de Caras Fracturadas (MTC E-210)	108
5.4 Combinación de Materiales	109
5.5 Densidades bulk de las briquetas	118
5.6 Ensayo Marshall a muestra patrón y muestra modificada	124
5.7 Comparación de Resultados	127
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	131
1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	131
2. CONCLUSIONES	132
3. RECOMENDACIONES	132
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
5. ANEXOS	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores para tránsito de diseño (N) ejes equivalentes de 80KN CON $>5 \times 10^6$...	28
Tabla 2. Características del cemento asfáltico clasificado por penetración.....	44
Tabla 3: Valores recomendados con uso de gramo de caucho reciclado.....	51
Tabla 4. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento.....	57
Tabla 5: Rangos Granulométricos MAC- 1.....	84
Tabla 6: dosificación de gramo de caucho del 1.5% al 4%.....	87
Tabla 7: Especificaciones técnicas del asfalto 60/70.....	94
Tabla 8: Análisis Granulométrico pasa $\frac{3}{4}$".....	96
Tabla 9: Análisis Granulométrico pasa $\frac{1}{2}$".....	97
Tabla 10: Análisis Granulométrico arena.....	98
Tabla. 11: Análisis Granulométrica arena lavada.....	99
Tabla 12: Curva Granulométrica GCR.....	100
Tabla 13: Tipos de Gradación según masa de carga.....	101
Tabla 14: Cantidad de material según tamiz.....	101
Tabla 15: Resultado Final de Abrasión.....	101
Tabla 16: Ensayo de Peso Unitaria $\frac{3}{4}$".....	102
Tabla 17: Ensayo de Peso Unitaria $\frac{1}{2}$".....	103
Tabla 18: Ensayo de Peso Unitaria Arena.....	103
Tabla 19: Ensayo de Peso Unitaria Arena Lavada.....	103
Tabla 20: Ensayo de durabilidad.....	104
Tabla 21: Ensayo de Humedad Natural.....	105
Tabla 22: Equivalente de Arena.....	106
Tabla 23: Gravedad Específica pasa $\frac{3}{4}$".....	107
Tabla 24: Gravedad Específica pasa $\frac{1}{2}$".....	107
Tabla 25: Gravedad Específica arena lavada.....	107
Tabla 26: Gravedad Específica arena triturada.....	107
Tabla 27: Partículas Planas y Alargadas.....	108
Tabla 28: Porcentaje de Caras Fracturadas.....	109
Tabla 29: Combinación de Materiales.....	109
Tabla 30: Porcentajes de Materiales.....	110

Tabla 31: Gradaciones con Variación de GCR al 1.5%.....	112
Tabla 32: Gradaciones con Variación de GCR al 2%.....	113
Tabla 33: Gradaciones con Variación de GCR al 2.5%.....	114
Tabla 34: Gradaciones con Variación de GCR al 3%.....	115
Tabla 35: Gradaciones con Variación de GCR al 3.5%.....	116
Tabla 36: Gradaciones con Variación de GCR al 4%.....	117
Tabla 37: Densidades bulk de las briquetas.....	118
Tabla 38: Gravedad Específica Muestra Patrón.....	119
Tabla 39: Gravedad Específica Muestra Modificada 1.....	120
Tabla 40: Gravedad Específica Muestra Modificada 2.....	120
Tabla 41: Gravedad Específica Muestra Modificada 3.....	120
Tabla 42: Gravedad Específica Muestra Modificada 4.....	120
Tabla 43: Gravedad Específica Muestra Modificada 5.....	121
Tabla 44: Gravedad Específica Muestra Modificada 6.....	121
Tabla 45: Porcentajes de Vacíos en briquetas.....	122
Tabla 46: Estabilidad y Flujo de briquetas.....	124
Tabla 47: Disminución de la resistencia de las muestras con diferente % de GCR.....	129

INDICE DE FIGURAS

Fig 1: Filtración del agua de lluvia.....	39
Fig. 2: Morfología de los ligantes modificados con sbs.....	40
Fig. 3: Gramo de caucho reciclado.....	51
Fig. 4: Microfotografías (Emulsiones Asfálticas, Gustavo Rivera E).....	78
Fig. 5: Grafica de dosificación de agregados MAC- 1.....	85
Fig 6: Curva reológica del cemento asfaltico.....	95
Fig 7: Curva Granulométrica pasa ¾”.....	96
Fig. 8: Curva Granulométrica pasa ½”.....	97
Fig. 9: Curva Granulométrica arena.....	98
Fig. 10: Curva Granulométrica arena lavada.....	99
Fig. 11: Curva Granulométrica GCR.....	100
Fig. 12: Ensayo de durabilidad.....	104
Fig. 13: Curva granulométrica Combinación de Materiales en %.....	111
Fig. 14: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 1.5%.....	112
Fig. 15: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 2%.....	113
Fig. 16: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 2.5%.....	114
Fig. 17: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 3%.....	115
Fig. 18: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 3.5%.....	116
Fig. 19: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 4%.....	117
Fig. 20: grafica de Densidades bulk de las briquetas con respecto al % de GCR.....	119
Fig. 21: grafica de % de vacíos con respecto al % de GCR.....	122
Fig. 22: grafica de Vacíos en la mezcla con respecto al % de GCR.....	123
Fig. 23: Grafica de densidad con respecto a los vacíos de la mezcla.....	123
Fig. 24: Grafica de la estabilidad con respecto al % de GCR.....	125
Fig. 25: Grafica de la estabildades estudiadas.....	125
Fig. 26: Grafica de flujo con respecto al % de GCR.....	126
Fig. 27: Valores de Flujo estudiados.....	126
Fig. 28: Estabildades de muestra patrón y de muestras con % de GCR correspondientes al 1.5 y al 2%.....	128
Fig. 29: Flujos de muestra patrón y de muestras con % de GCR correspondientes al 1.5 y al 2%.....	128
Fig. 30: Grafica de la disminución de la resistencia con respecto a la muestra patrón.....	130

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 MTC, 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 MTP 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.

CAPITULO I

I. ASPECTOS INFORMATIVOS

1. Título:

INFLUENCIA DE LA INCORPORACION DE PARTICULAS DE CAUCHO
RECICLADO COMO AGREGADOS EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA

2. Equipo investigador :

Br. Luis Alberto Alvarez Briceño.

Br. Ever Tony Carrera Sanchez.

3. Asesor:

Ing. Vertiz Malabrigo Manuel.

4. Tipo de Investigación:

Por su finalidad: Aplicada.

5. Régimen de la Investigación:

Régimen libre.

6. Línea de Investigación:

Diseño y Desarrollo de Materiales.

7. Institución a la que pertenece el proyecto:

Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de ingeniería de la
Universidad Privada Antenor Orrego.

8. Unidad Académica:

9. Lugar de desarrollo del proyecto:

Provincia de Trujillo, distrito de Trujillo, departamento de La Libertad.

10. Duración de la ejecución del proyecto (meses):

4 meses.

11. Cronograma de actividades (Hacer un diagrama de Gant)

Actividades	MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				N° HRS/SEM
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	
1. Planificación	■	■															100 hrs.
2. Organización		■	■														90 hrs.
3. Recolección de muestras				■	■	■											135 hrs.
4. Analisis de las muestras					■	■	■	■	■	■	■	■					360 hrs.
5. Redacción del informe											■	■	■				95 hrs.
6. Presentación del Informe													■	■	■	■	180 hrs.

12. Recursos:

12.1 Personal.

- Br. Luis Alberto Alvarez Briceño
- Br. Ever Tony Carrera Sanchez
- Asesor, Ing. Vertiz Malabrigo Manuel

12.2 Bienes.

- Laptop Toshiba Qosmio y Sony Vaio
- Plotter HP1200
- impresora Edson serie 350 T
- Software Microsoft Excel y Microsoft Word
- AutoCAD 2016
- calculadora HP 50G

12.3 Servicios.

- Asesoría
- Servicio de computo
- Biblioteca UPAO
- Laboratorios UPAO
- Movilidad y viáticos

13. Presupuesto:

NATURALEZA DEL GASTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO (S/.)
13.1 Bienes			
	Papel Bond A4	1 Millar	15.00
	Lapicero	15 unidades	20.00
	Resaltadores	6 unidades	12.00
	Correctores	4 unidades	4.00
	Plumones acrílicos	4 unidades	8.00
	USB	2 unidades	40.00
	Tinta de impresora	2 unidades	120.00
	Total Bienes		219.00
13.2 Servicios			
	Internet	200 hrs	200.00
	Movilidad	60 pasajes	250
	Fotocopias	1 Millar	100
	Otros servicios a terceros	_____	1200.00
Total Servicios			
	Total Servicios		1750.00
	PRESUPUESTO TOTAL		1969.00

14. Financiamiento

14.1 Con recursos propios:

Recursos Propios 100 %

CAPITULO II

II. PROBLEMA DE INVESTIGACION

2. EL PROBLEMA

2.1. Planteamiento del Problema

A. Realidad Problemática

Trujillo es una de las principales ciudades de la región la libertad y del Perú, con una población de 788236 habitantes y una cantidad de vehículos de 479280, que a diario transitan por sus vías, es imperdonable que sus arterias vitales se encuentren en mal estado.

Nada fuera de la realidad es que sus principales vías presentan muchos desperfectos, las cuales necesitan una atención inmediata para resolverlos.

Pero no solo avenidas tomamos en cuenta, si no también calles y vías de acceso a cada punto de nuestra ciudad de Trujillo, las cuales se encuentran desde hace muchos años en mal estado, el deterioro de estas vías resulta catastrófico. Esta situación perjudica tanto a los vehículos de transporte público y taxis como a autos particulares y peatones. El mal estado de la pista genera que las unidades se deterioren, generando mayores costos en el mantenimiento general de las unidades y en algunas circunstancias, hasta ocasiona accidentes.

A este inconveniente se le suma el obsoleto sistema de alcantarillado, que por más de sus 40 años de antigüedad provoca filtraciones en los pavimentos, logrando debilitarlos, ocasionando hundimientos de los vehículos que circulan por la zona afectada. No dejando de lado también el mal control de su construcción, las irregularidades en los manejos de fondos, los cambios climáticos y los materiales que se está utilizando en la ejecución de las obras de pavimentos.

B. Características De La Realidad

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 Perú 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 trujillano; 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.

El estudio de las deformaciones permanentes en la sub rasante a través de las propiedades reológicas de los asfaltos es reciente y no existen metodología que se valga de ellas a la hora de diseñar las mezclas y predecir su desempeño. Por su parte la utilización del ensayo de rueda cargada no es generalizada a la hora de diseñar una mezcla asfáltica al igual que no se consideran las condiciones de carga y temperaturas a las que se verá expuesta la mezcla en el pavimento.

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original (las cuales dependen de su contenido de asfáltenos, resinas y aceites), mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica

La profundización en el estudio de los mecanismos y variables que inciden sobre las deformaciones permanentes permitirá proponer criterios límites de la LSV para una posible especificación relacionada con la resistencia frente a las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas, debida al ligante.

Los estudios de desempeño a diferentes temperaturas y niveles de cargas sobre diferentes tipos de mezcla proveen una base de análisis para tener en cuenta, dentro del diseño, mayores volúmenes de tránsito y posibles sobrecargas que pueda sufrir el pavimento

Finalmente se relacionaron las diferentes variables (LSV, viscosidad y carga) en conjunto con las medidas de deformaciones permanentes en mezclas. De esta manera se obtendrá un modelo para caracterizar el desempeño al ahuellamiento que tiene en cuenta las características del ligante así como la sensibilidad frente a

cambios de temperatura y carga de cada tipo de mezcla

2.2 Formulación del Problema

¿De qué manera influye el uso de las partículas de llanta reciclada como agregado para el diseño de mezcla asfáltica?

2.3 Objetivos

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.

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.

2.4 Justificación de la investigación

2.4.1. Importancia de la investigación

La durabilidad o vida útil de los pavimentos ha sido un tema de preocupación nacional debido al alto porcentaje de deterioro que tienen las vías. La mezcla asfáltica constituye un elemento de gran importancia por conformar la capa expuesta a mayor detrimento, por esto, ha estado sujeta a un gran número de investigaciones en busca de métodos para modificarla y así lograr mejoras en sus características.

Buscando soluciones a los requerimientos de la mezcla asfáltica, con los factores de temperatura y viscosidad se ha encontrado la posibilidad de emplear modificadores que hacen parte de los desechos no biodegradables, que mejorarán las condiciones de la mezcla en servicio frente a factores ambientales y climatológicos, y al mismo tiempo reducirán el impacto ambiental de estos desperdicios.

Se justifica el desarrollo de este proyecto dentro las líneas de investigación de Pavimentos y Materiales que se ejecutara, 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.

Asfaltos modificados, se estudió el efecto de incorporar aditivos químicos en estos ligantes y el comportamiento de las mezclas tibias fabricadas con ellos. En estudios anteriores se concluye que los ensayos de adherencia son los más adecuados para caracterizar la calidad de las mezclas asfálticas fabricadas a temperaturas reducidas.

Es por ello que se evalúan también los resultados de los ensayos Hamburgo Wheel

Tracking de las mezclas con los ligantes en estudio. Los estudios realizados forman parte de los trabajos publicados en la Revista Construcción and Building Materials y en las memorias del 5° Eurasphalt and Eurobitume Congress.

Evaluación de residuos de procesos productivos y su potencial valorización en mezclas asfálticas: Las crecientes presiones gubernamentales para la disposición de residuos industriales especiales en rellenos de seguridad, sus costos y la limitación del espacio físico disponible contribuyeron a generar proyectos de investigación que evalúen la posibilidad de incorporar estos residuos de un proceso como materia prima para otros, valorizando de esta forma el residuo. Dentro de las alternativas que ofrece la ingeniería civil está la incorporación de diferentes residuos en mezclas asfálticas en caliente. Durante los años 2012 y 2013 se continuó con lo iniciado en agosto de 2007 respecto del programa experimental que evalúa los efectos mecánicos y medioambientales de la incorporación de residuos en mezclas asfálticas en caliente. Se llevaron a cabo los compromisos asumidos en el PICTO CIN (Resolución 331/11, Código del proyecto PICTO 2010-0004) que reúne a los integrantes del grupo de trabajo creado durante estos años. Los estudios realizados al respecto formarán parte del informe correspondiente a dicho Proyecto. Por el momento, se ha realizado en este período la publicación de un trabajo en la XXXVII° Reunión del Asfalto - XV° Congreso Argentino de la Vialidad y el Tránsito.

Evaluación de agregados reciclados de hormigón: Formulario Informe Científico-Tecnológico 2 Se ha completado la evaluación técnica de la incorporación de hormigón producto de la trituración de losas de pavimentos como agregado reciclado de uso vial. El desarrollo del trabajo comprende el estudio de factibilidad técnica de la valorización de estos materiales en mezclas asfálticas para carpeta y

base y estabilizados granulométricos para bases y sub bases (*Tesis del Ing. Gino Flor para optar por su título de Magister Vial de la Escuela de Posgrado y Educación Continua de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, 2012*). En 2013 fue publicada una síntesis de este trabajo en el XVII° Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto.

Modificación de los cementos asfálticos con diferentes polímeros La mezcla asfáltica es un material compuesto en el cual el esqueleto pétreo es cementado por un ligante bituminoso. El comportamiento del material es fuertemente dependiente del tipo de cemento que se utilice. El trabajo iniciado en el mes de Octubre de 2011 se ha desarrollado con el estudio de modificadores del tipo SBS y caucho de neumáticos fuera de uso. Se analizaron las energías de deformación requeridas para la rotura por tracción del cemento asfáltico. El estudio hasta aquí realizado forma parte de un trabajo presentado en el XVII° Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto.

2.4.2 Viabilidad de la investigación

A. Alcance del Proyecto.

El proyecto de investigación está basado solo netamente al diseño de mezcla asfáltica la cual nos permitirá mejorar las propiedades físicas debido a la implementación de materiales como partículas de llantas recicladas.

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles en la ciudad de Trujillo, 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 óptima e identificar 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 AASHTO-ASTM-MTC 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. 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 realizarán bajo los criterios establecidos para soportar cargas cuando el tránsito de diseño sea superior a cinco millones

($> 5 \cdot 10^6$) 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 usará como base de diseño la gradación MAC-1, 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.

- 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 1 Valores para tránsito de diseño (N) ejes equivalentes de 80KN CON

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

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2010

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.

- ¿Puede llevarse a cabo esta investigación?

El proyecto de investigación busca como fin la implementación de partículas de llantas recicladas como agregado de mezcla asfáltica, los equipos a utilizar para las mediciones experimentales correspondientes, son equipos que se encuentran al alcance de los interesados, los modelos matemáticos aplicativos para este proyecto, están basado en modelos ya existente las cuales nos permitirán dar como fin el objetivo principal del proyecto.

Por consiguiente el proyecto de investigación puede llevarse a cabo ya que se cumplen con todos los requerimiento necesarios para la misma.

- ¿Cuánto tiempo llevara realizarlo?

Partiendo de una organización de proyecto se estipulo el tiempo necesario para la realización de la investigación, la cual se ha tomado un periodo considerable de 4 meses, sin embargo; el tiempo de duración es solo una referencia lo cual nos permitirá ver el avance del proyecto y no poder tener retrasos.

El tiempo de elaboración del proyecto puede variar pero no tan significativamente, por esta razón se ha propuesto realizarlo dentro de los 4 meses estipulados pudiendo terminar antes del plazo pactado sin alterar la credibilidad y la factibilidad de la investigación.

2.5 Limitaciones del estudio

Durante el desarrollo del proyecto de investigación se utilizara varios instrumentos de medición que nos proporcionaran información adecuada satisfaciendo al procesos de ejecución del proyecto, pero uno de los principales limitaciones que se han visto es que para alcanzar con el logro de la investigación hemos de requerir un instrumento del cual la Universidad Privada Antenor Orrego no las tiene.

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, la susceptibilidad térmica de la mezcla aumentó ligeramente a medida que aumentó el contenido en polvo de neumático. 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

El presupuesto en comparación a otras tesis o proyectos similares de diseño de mezcla asfáltica con polímeros o partículas de llanta resultan ser muy caros debido a que la finalidad era la reconstrucción o construcción con el material modificado en una determinada zona la cual resultaba desfavorable en con respecto a los costos, sin embargo en el presente tema de tesis no se abarco ese objetivo por la cual resulta más económico por lo que su fin es de un conocimiento nuevo debido a un análisis experimental.

En la mediciones que corresponden a la toma y recolección de datos experimentales resulta tener un pequeño margen de error que se da normalmente en cualquier

experimento, sin embargo esto no afecta a los objetivos del proyecto, ya que los interesados, estamos aptos para el tipo de análisis a ejecutar debido a la ardua investigación para desarrollar el proyecto con facilidad.

CAPITULO III

III. MARCO TEORICO

3.1 Antecedentes de la Investigación

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.

Marín Hernández, Alberto. (2008) con la tesis titulada: “Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos”, para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, en la ciudad de Lima – Perú, concluye lo siguiente: “Aquí, se dieron a conocer los materiales que se pueden usar, para modificar los asfaltos convencionales. Como se hizo notar, estos materiales nombrados, logran un cambio significativo en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. El uso de cualquiera de estos depende en gran medida del juicio del proyectista, el cual debe basarse en un criterio objetivo, desde la perspectiva

técnica.

Rodríguez Valdivia, Fernando Andrés. (2010) con la tesis titulada: “Análisis de pavimento asfáltico modificado”, para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Austral de Chile, en la ciudad de Valdivia – Chile, concluye lo siguiente: “Al analizar los resultados obtenidos de estabilidad y fluencia queda demostrado que las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados posee un mejor comportamiento que las mezclas elaboradas con asfalto convencional, tal como se esperaba, ya que la finalidad de modificar los asfalto es mejorar sus propiedades.

3.1.1 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. Víctor Hugo González Cáceres, *Estudio De Los Asfaltos Modificados Con Polímeros*.- Entre los Objetivos específicos del proyecto están:

Verificación de la calidad del Cemento Asfáltico Convencional. Verificación de los cambios que sufre el Cemento Asfáltico con la incorporación de polímeros del tipo: SBS. Sanchez, A., & F. BelmontE. (2009). *Análisis de la reutilización de residuos procedentes de la industria del Silestone en la fabricación de*

mezclas asfálticas. Granada - España: Universidad de Granada

Verificación y comparación de resultados de las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto convencional y modificado con polímeros. Conclusiones, las Pruebas realizadas al Asfalto adicionado con 6% de polímeros del tipo SBS, aumenta su consistencia en la prueba de penetración. También en las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto convencional y modificado se ve cierta mayor estabilidad.

Maila Paucar Manuel Elías, *Comportamiento De Una Mezcla Asfáltica Modificada Con Polímero Etileno Vinil Acetato (Eva)*.- Objetivos, Mejorar las características físico-mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, utilizando el polímero EVA.

Determinar el porcentaje de polímero EVA para obtener la mezcla modificada óptima. Evaluar los cambios en las propiedades físico- mecánicas de la mezcla convencional frente a la mezcla modificada.

Realizar un análisis económico comparativo, entre la mezcla convencional y la mezcla modificada, para su producción en planta. Conclusiones, De acuerdo a los ensayos realizados en pruebas de laboratorio se determinó que se tiene una notable mejora en las propiedades mecánicas tales como módulo dinámico elástico, resistencia a la tensión indirecta, resistencia a la pérdida por desgaste, estabilidad, flujo y susceptibilidad térmica de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional, por lo que se puede asegurar que los daños viales van a disminuir con la utilización de esta mezcla.

3.2 Fundamentación teórica de la investigación

3.2.1 ¿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.

3.2.2 Tipos de pavimentos

- **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 interpenetración 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 en su parte superior por una carpeta asfáltica y tiene como función primordial soportar adecuadamente 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)

- **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.

3.2.3 Definición de asfalto.

El asfalto. Es un material bituminoso, que en la naturaleza puede encontrarse puro o mezclado con otros elementos, y en estados sólido, semisólido o líquido. Éste puede obtenerse en yacimientos naturales o a partir de la destilación del petróleo.

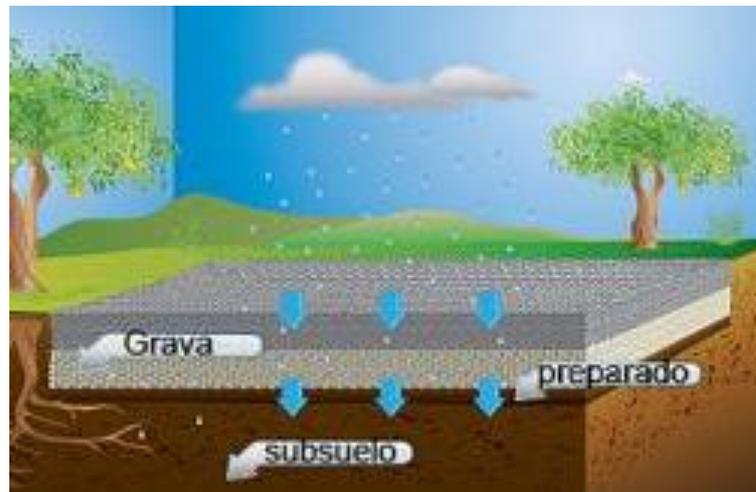
Las características de esta sustancia varían según la fuente de donde se extrae, ya que la base bituminosa no es la misma, ni se encuentra en las mismas proporciones en cada pozo. Esta última condición hace necesario clasificar el asfalto según el contenido de betún en asfaltos pesados (nafténicos) o asfaltos livianos

(parafínicos). El petróleo crudo es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y kerosén de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. El asfalto de petróleo tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

El asfalto es un material aglutinante altamente adhesivo, resistente a la acción de cargas dinámicas, y que fluye bajo la acción del calor o de las cargas permanentes.

Al mezclarse con áridos forma las mezclas asfálticas utilizadas para la pavimentación de carreteras. Cuando se utiliza el asfalto en carreteras, una de sus funciones es impedir el paso del agua proveniente de las lluvias a las capas subyacentes del pavimento haciéndolo poco susceptible a la humedad; es decir cumple la función de un impermeabilizante.

Fig 1: Filtración del agua de lluvia



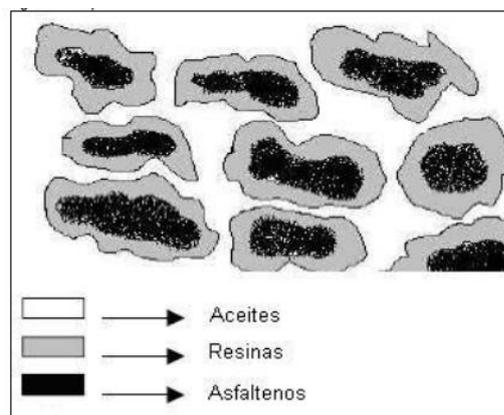
Fuente: internet 2013

El asfalto que se utiliza para la pavimentación de vías, a temperaturas ambiente tiene un comportamiento semisólido y debe ser calentado hasta el punto en que

pueda fluir, para ser mezclado con los áridos. Sin embargo hay unos ligantes que son en exceso blandos a los que se les llama “asfaltos líquidos” que se clasifican en asfaltos de curado rápido, curado medio y curado lento. El asfalto no solamente es utilizado para la construcción de carreteras, también puede utilizarse como impermeabilizante y curado de fisuras. Estos tipos de asfaltos son llamados Asfaltos Oxidados y se obtienen sometiendo el asfalto natural a procesos de deshidrogenación a determinadas temperaturas.

Composición del asfalto. Al observar el asfalto, es muy fácil suponer que su composición es muy básica, pues a simple vista se percibe como un material homogéneo en cuanto a su color, textura y apariencia general, pero aunque los componentes son pocos, las proporciones de éstos pueden variar debido a su origen, produciendo cambios significativos en sus características. El modelo que mejor describe la configuración del asfalto es el modelo micelar, que presenta dos fases: una discontinua (aromática) formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. Los máltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites (Fig. 2).

Fig. 2 Morfología de los ligantes modificados con sbs



Fuente: Reología de los asfaltos 2014

Asfáltenos: sólidos amorfos que presentan una alta polaridad y materiales aromáticos complejos. Este compuesto da al asfalto dureza a medida que su

presencia es mayor dentro de éste, además dentro de su funcionalidad está concentrar los materiales que contaminan los asfaltos. Estas partículas tienen la característica de ser muy adherentes, pero al estar rodeadas de resinas, esta adherencia no interviene en la liga con los materiales pétreos.

Altos contenidos de asfáltenos le dan al asfalto mayor rigidez y afectan directamente sus propiedades reológicas, ya que aumenta la viscosidad y reduce los índices de penetración, es decir, los hace más rígidos.

Maltemos: actúan como dispersante y son la fracción soluble, tienen un punto de ebullición bajo, y son los que le dan la calidad al asfalto, ya que se encargan de regular sus características químicas.

Resinas: partículas adhesivas; dentro de su función está estabilizar los asfáltenos; además al aumentar su presencia en el asfalto disminuye la penetración y viscosidad del mismo.

Aceites: su presencia dentro del asfalto varía entre 5% y 20% del total del material, cuando hay gran cantidad de aceite en el asfalto los máltenos pierden capacidad de interacción con los asfáltenos, permitiendo la aglomeración de éstos; los aceites son los responsables de las deformaciones del asfalto y hacen posible su manipulación.

Según el grado de concentración de los asfáltenos, hay dos tipos de asfaltos que son: los asfaltos tipo sol y los asfaltos tipo gel. Los tipo sol son asfaltos con bajas concentraciones de asfáltenos, lo que permite un libre movimiento entre ellas; este tipo de asfaltos son susceptibles a los cambios de temperatura y tienen una alta ductilidad. Los asfaltos tipo gel se caracterizan porque las micelas se atraen mutuamente formando estructuras muy concentradas; este tipo de asfalto se caracteriza por ser poco susceptible a los cambios térmicos y por tener una baja ductilidad.

3.2.4 Composición de las mezclas asfálticas

- **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 llegó 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 MTC 2007, es necesario anexar la tabla 2.

Tabla 2. Características del cemento asfáltico clasificado por penetración

○ **Cemento Asfáltico 60/70**

Tipo	AASHTO(M20)			ASTM (D946)			MTC			NTP (321.051)		
	Método	Min.	Máx.	Método	Min.	Máx.	Método	Min.	Máx.	Método	Min.	Máx.
CARACTERÍSTICAS												
Penetración												
a 25° C, 100 gr, 5 seg, 0.1 mm	T-49	60	70	D-5	60	70	MTC-E304	60	70	321.033	60	70
Punto de inflamación												
(Copa abierta Cleveland, °C)	T-48	232	–	D-92	232	–	MTC-E312	232	–	16:05-013	232	–
Ductibilidad												
a 25° C, 5cm/min, cm	T-51	100	–	D-113	100	–	MTC-E306	100	–	16:05-009	100	–
Solubilidad												
en Tridorcetileno, % masa	T-44	99.0	–	D-2042	99.0	–	MTC-E302	99.0	–	16:05-012	99.0	–
Ensayos en el Residuo obtenido de película fina	T-179			D-1754			MTC-E316			D-1754		
3.2 mm, 163° C, 5 hrs.												
Penetración												
en residuo, % del original	T-49	54	–	D-5	52+	–	MTC-E304	52	–	321.033	52+	–
Ductibilidad												
a 25° C, 5 cm/min, cm	T-51	50	–	D-113	50	–	MTC-E306	50	–	16:05-009	50	–
Pérdida por calentamiento												
% masa	–	–	0.8				–	–	0.8			
Índice de susceptibilidad térmica												
							–	-1.0	+1.0			
Ensayo de la Mancha												
(opcional)	T-102	Negativo					MTC-E314	Negativo				

Fuentes: (Repsol) 2017

3.2.5 Propiedades principales de los cementos asfálticos

A. Durabilidad

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 adherirse al 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:

Proporciona un criterio de medida de susceptibilidad del cemento asfáltico 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:

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:

Este método describe el procedimiento para determinar la viscosidad del asfalto (bitumen), con viscosímetros capilares de vacío a 60° C (140° 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 cementos asfálticos no tienen un punto 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 asfálticos:

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 $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.0^{\circ}\text{F}$); aunque se puede realizar en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

3.2.6. 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.

3.2.6.1 Clasificación del agregado pétreo

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.

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.

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.

3.2.7 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 (ASTM D-2419 AASHTO T176-00):**

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 (MTC E 207 ASTM C 131 AASHTO T96)**

Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1½") por medio de la

máquina de Los Ángeles. 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 MTC E 207. 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.

- **Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio (MTC E 209 ASTM C88 AASTHO T 104)**

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.

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 (MTC E221 ASTM D 4791-99 AASHTO M 147-65)**

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 (MTC E-210 ASTM D 5821)**

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.

3.2.8 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.

3.2.9 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.

Fig. 3: Gramo de caucho reciclado



Fuente: Propia

Tabla 3: Valores recomendados con uso de gramo de caucho reciclado

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 2010

3.2.10 Tipos de mezclas Asfálticas

3.2.10.1 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)

3.2.10.2 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. Constituye el tipo más generalizado de mezcla 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.

3.2.11 Diseño De Mezclas Asfálticas

3.2.11.1 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.

3.2.11.2 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.

3.2.11.3 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 la norma AASTHO-ASTM-MTC, teniendo en cuenta que la mezcla objeto del proyecto es una Mezcla Densa en Caliente.

3.2.11.4 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.

- 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.

Tabla 4. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: MTC 2017

- **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.
- **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.

INFLUENCIA DEL TRITURADO

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.

- **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.
- **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 característica 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

3.2.12 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.

3.2.12.1 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 multiplicar 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.

3.2.12.2 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.

3.2.12.3 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 cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla.

3.2.13 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 (N° 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 apropiadas 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 a 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.

3.2.14 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.

3.2.15 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)

3.2.15.1 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.

- Gravedad específica de los agregados (G_{agr}): 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 (ASTM D1188 AASHTO T 85)

- Gravedad específica 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.
- 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. Esta figura se debe efectuar con un aparato que extraiga todos los vacíos de la mezcla succionándolos con una bomba de vacío.

3.2.15.2 Pruebas Mecánicas

Estas pruebas dan una indicación acerca de cómo se comportará estructuralmente la mezcla, teniendo en cuenta correlaciones dadas por la norma. 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 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 AASHTO T-245 ASTM D-1559
- 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.

3.2.16 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.

3.2.17 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)

3.2.18 Definición de polímero.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas. Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

- Homopolímeros: Que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad.

A. ¿Qué es un asfalto modificado?

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o

incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo.

B. Principales modificadores utilizados en el Asfalto.

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

- **POLÍMERO TIPO I:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno- Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno- Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimento Con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **POLÍMERO TIPO II:** Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **POLÍMERO TIPO III:** Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **HULE MOLIDO DE NEUMÁTICOS:** Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas,

Reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

El ligante asfáltico y las propiedades de la mezcla pueden ser diseñadas eligiendo el polímero correcto para determinada aplicación, y asegurándose que es compatible con el asfalto base. En general, se eligen elastómeros para proporcionar una mayor resiliencia, y flexibilidad al pavimento, mientras que los resultados con los elastómeros generan una mezcla de alta estabilidad y rigidez. Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del polímero, así como, de la fuente del crudo, del proceso de refinación y del grado del asfalto que se utiliza.

C. ¿Por qué se modifican los asfaltos?

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo en la actualidad los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular aunado al exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y figuraciones dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo estos problemas son causados además por la selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Por ejemplo con asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta. Además con asfaltos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Una solución evidente fue mejorar las características de los asfaltos para mejorar su comportamiento en los pavimentos; ello dio origen a nuevos asfaltos que fueron denominados “Asfaltos Modificados”.

3.2.19 Modificación del asfalto

La modificación del asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías carreteras. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (roderas), de las mezclas que componen las capas o superficie de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

La modificación del asfalto es un procedimiento que se utiliza para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los ligantes en la construcción de carreteras. Este proceso se hace con la adición de polímeros que sean compatibles con el asfalto y que mejoren la resistencia a la deformación y al deterioro producido por las cargas

vehiculares y los factores ambientales.

En general, al agregar modificantes poliméricos al asfalto, se obtienen ligantes mucho más viscosos y rígidos que los convencionales, capaces de disminuir el ahuellamiento cuando las mezclas están colocadas en lugares de altas temperaturas; y por otro lado, disminuir la fisuración y la fatiga de las mezclas, haciéndolas más elásticas cuando se encuentran en servicio a bajas temperaturas.

Polímeros. Moléculas conformadas por unidades más simples llamadas monómeros. Las propiedades físicas y mecánicas de un polímero dependen de la distribución espacial de las cadenas monoméricas que lo componen, pudiendo presentarse como elementos rígidos o elásticos. Su adición al asfalto depende del grado de compatibilidad con éste, y tiene el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles en diferentes condiciones de servicio, buscando economía y durabilidad en las carreteras. Cuando se incorporan materiales poliméricos al asfalto, éste forma cadenas tridimensionales o lineales y hace que la mezcla asfáltica adopte elásticos o rígidos, según la cadena polimérica que se adicione.

Clases de polímeros. Según la disposición de su estructura los polímeros se clasifican en:

Elastómeros: cadenas lineales carentes de forma definida. Al ser sometidos a procesos de vulcanización su estructura se modifica tornándose reticular, con comportamiento elástico. Al adicionar este tipo de polímero a una mezcla asfáltica “se observó un incremento en la resistencia a la deformación, se disminuyó el módulo de rigidez, aumentó la durabilidad de la mezcla y se incrementó la flexibilidad del asfalto”.

Plastómeros: este tipo de polímero es más duro que un elastómero, hace posible “el

aumento de la resistencia a la deformación y evita la disminución de la adherencia aumentando la durabilidad” cuando se adiciona a una mezcla asfáltica. El efecto en la flexibilidad del asfalto no es considerable, lo que lo hace poco recomendable en temperaturas elevadas.

Poliestireno. Plástico obtenido a través de la unión de monómeros por medio de un proceso térmico denominado polimerización, con el fin de conformar moléculas de mayor tamaño. El monómero base es el estireno, que se obtiene calentando el metilbenceno en presencia de un catalizador.

El resultado de la polimerización pura del estireno es el poliestireno cristal, que es transparente, frágil y de baja resistencia. Con la adición de caucho aumenta la resistencia de éste material, pero su cualidad traslúcida disminuye a medida que aumenta el contenido de goma. Se utiliza generalmente para la fabricación de estuches y envases desechables.

Otro tipo de poliestireno es el poliestireno expandido que “consiste en 95% de poliestireno y 5% de un gas que forma burbujas que reducen la densidad del material” . Su color característico es el blanco debido a la refracción de la luz; además, presenta excelentes capacidades de aislamiento térmico, por lo que es ampliamente utilizado en la construcción y en el transporte de alimentos perecederos.

A partir de la fundición del poliestireno cristal y con la inyección de gas se obtiene el poliestireno extruido, que posee también características aislantes, pero tiene un mejor comportamiento frente a la humedad, razón por la cual es utilizado en la construcción de cubiertas.

Caucho vulcanizado. Es el resultado de combinar caucho natural con azufre a elevadas temperaturas, para mejorar su elasticidad y resistencia. Éstas últimas

condiciones se mantienen incluso a bajas temperaturas, a diferencia del caucho natural, que tiende a rigidizarse y quebrarse. Por otro lado, después del proceso de vulcanización el caucho se vuelve resistente a los solventes convencionales y soporta temperaturas por encima del punto de carbonización de la materia orgánica. Dada su alta resistencia a la abrasión y al calor, el caucho vulcanizado se utiliza en la fabricación de llantas para vehículos automotores; además, por ser impermeable y flexible se utiliza en la fabricación de mangueras para la conducción de sustancias agresivas.

Reología del asfalto. “Hace referencia a la variación de las propiedades de flujo a través del tiempo de aplicación de una carga, e incluye una propiedad muy importante como lo es la viscosidad”. Cuando el asfalto es sometido a altas temperaturas llega a comportarse como un fluido viscoso, mientras que a las temperaturas de servicio éste se comporta como un sólido. El flujo de viscosidad en cualquier líquido puede considerarse como un proceso térmico, en el cual las moléculas tienen que sobrepasar una barrera de energía para desplazarse a un sitio adyacente. Algunas fallas en los pavimentos están directamente relacionadas con las características reológicas de los ligantes utilizados; por ejemplo, cuando una mezcla tiene problemas de adherencia ligante – agregado, se debe a que el asfalto utilizado tiene viscosidades muy bajas. Cuando hay un aumento de la viscosidad y de la consistencia del ligante, se pueden presentar fisuras en los pavimentos a causa del incremento de la rigidez.

Mezcla asfáltica. Es aquella constituida por ligante asfáltico y agregado pétreo con una gradación definida y constante; en la que las proporciones de cada componente definen las características físicas de la mezcla en sí. Se utilizan principalmente en la construcción y mantenimiento de vías como carpeta de rodadura o como bases

subyacentes a ésta. Los agregados pétreos son los materiales granulares que se utilizan en la fabricación de mezclas asfálticas y son los que resisten las cargas del tránsito sobre éstas.

El desempeño de los pavimentos se debe necesariamente a las propiedades de los agregados utilizados en las mezclas. Las características más relevantes de los pétreos son:

Tamaño: el tamaño del agregado define la clase de mezcla y el tipo de superficie que tendrá el pavimento. Los grandes tamaños del agregado (75mm) pueden utilizarse como subcarpetas portantes bajo mezclas superficiales más finas (9.5 a 19mm).

Forma: la forma de las partículas del agregado tiene gran influencia en el entrapado de las mismas; por ejemplo, la fricción entre ellas aumenta cuando las partículas tienen formas angulares, lo que en la mezcla se refleja en un aumento de la resistencia a la deformación.

Textura: esta condición le da al agregado la capacidad de entrar más en contacto con el ligante asfáltico, aumentando la adherencia entre partículas. **Dureza:** de esta propiedad depende la resistencia del agregado a la abrasión de los agentes ambientales y de las cargas del tránsito.

Método Marshall. El método Marshall es netamente empírico y se basa en el principio de “ensayo y error”; fue formulado en 1943 por Bruce Marshall, del Departamento de Autopistas del Estado de Mississippi y mejorado luego de una extensiva investigación por parte del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos.

Aunque el método originalmente fue diseñado para mezclas con agregados pétreos de tamaño máximo 25mm (1”), fue modificado y desarrollado para agregados con tamaños máximos superiores a 35mm (1.5”).

Este método se emplea para dosificar mezclas en caliente de agregados pétreos y ligante asfáltico. Permite el diseño de mezclas en laboratorio, y el control de éstas en campo, para poder verificar las correctas proporciones de ligante y agregado.

Los aspectos que evalúa el método son:

- La estabilidad para garantizar la respuesta de la mezcla asfáltica a las exigencias del tránsito cuando se encuentra puesta en servicio.
- La cantidad de asfalto presente en la mezcla para asegurar el recubrimiento y la adherencia entre los agregados y la perfecta impermeabilización de las capas subyacentes de los pavimentos.
- Control de los vacíos con aire presentes en la mezcla después de haber sido compactada, como una reserva para las deformaciones producidas por las cargas del tránsito.

Los ensayos de la metodología Marshall se hacen con moldes de prueba de 4" de diámetro y 2 1/2" de alto, que sirven para formar muestras de la mezcla asfáltica que se compacta en caliente dentro de los moldes. El principal fin de la realización de estas muestras es analizar densidad, vacíos, estabilidad y flujo. La estabilidad es la máxima resistencia a la carga que puede soportar la mezcla; mientras que el flujo es la deformación total que se produce en la mezcla desde la carga inicial hasta la carga máxima

A. Estructura de los Asfaltos Modificados.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la

proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad

– temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

B. Compatibilidad de los Polímeros.

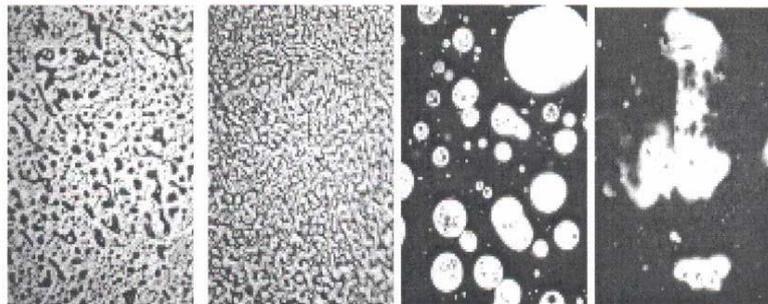
Para que los asfaltos modificados con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sea compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta el polímero sólo actúa como un filler (mineral como: cemento, cal, talco, sílice, etc.); y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, las propiedades físicas de los productos finales, pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

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

En las microfotografías mostradas en la figura 3, nos muestran polímeros tipo SB o SBS en diferentes asfaltos (lo blanco es polímero y lo negro es asfalto). Las dos primeras presentan una red continua de polímero, teniendo una estructura estable que no se separa, tomando ventaja de las propiedades elásticas del polímero. Las dos siguientes no están en red, separadas durante el almacenaje, y por tanto, no tendrán el mismo incremento benéfico sobre las distintas propiedades.

Fig. 4: Microfotografías (Emulsiones Asfálticas, Gustavo Rivera E).



AC-20 Madero Con Reacción	AC-20 Tula Con Reacción	AC-20 Tula Sin Reacción	AC-20 Salamanca Sin Reacción
------------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------------

Fuente: estudio de la reología del asfalto 2010

Algunos productores de asfalto polimerizado utilizan procesos especiales para lograr compatibilidad entre el polímero y el asfalto. Cuando la tecnología es apropiada, las propiedades del ligante pueden reducir el efecto de las roderas, el

desprendimiento de pétreos el agrietamiento térmico o fluencia de la mezcla, así como el incremento en la vida útil del pavimento, debido a una mayor estabilidad y resistencia a la fatiga.

3.3 Definición de términos básicos (Glosario)

- **Reología:** Parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos
- **Agregado:** El término agregado se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub-bases y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para bases, sub-bases, superficies de desgaste y estructuras de drenaje.
- **Ligante:** Sustancia química que se aplica a un sustrato adecuado para crear una capa entre éste y el subsiguiente, o entre la superficie y el yeso que se le aplica. También llamado material ligante.
- **Temperatura:** La Temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee
- **Fatiga:** La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones
- **Rigidez:** Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie

- Fisuramiento: Abertura alargada y con muy poca separación entre sus bordes, que se hace en un cuerpo sólido, especialmente un hueso o un mineral.
- Maltenos: Los maltenos son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas.
- Asfaltenos: Los asfaltenos son una familia de compuestos químicos orgánicos del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.
- GCR: Gramo de Caucho Reciclado

3.4 Hipótesis

El uso de partículas de caucho reciclado en proporciones de 1.5 %, 2%, 2.5%, 3%, 3.5% Y 4%, puede funcionar como agregado en el diseño de mezcla asfáltica

3.5 Variables y definición operacional

Variable Independiente: Asfalto modificado con partículas de caucho reciclado como agregado; se efectuara con ensayos de análisis de agregados normados por el MTC

Variable Dependiente: diseño de mezcla asfáltica; se efectuara mediante el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall

CAPITULO IV

IV. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1 Metodología

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 y otra con una incorporación del triturado de restos de llantas, que fue la materia prima propuesta para el desarrollo de esta investigación. 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 peruanas, 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.

4.2 Técnicas de recolección de información

4.2.1 Recolección de información primaria

4.2.1.1 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.

4.2.1.2 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 Areneras Jaén SAC. y en lo correspondiente al GCR fue comprado a la empresa Stargrass SAC.

- Agregados Pétreos: Fueron proporcionados como agregado grueso Triturado pasa $\frac{3}{4}$ " y pasa $\frac{1}{2}$ ", producto de la trituración de piedra de Areneras Jaén SAC.
- 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. 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 comercialmente 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)

4.2.1.3 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. Todo ese análisis fue posible, haciendo uso de las normas y ensayos de laboratorio establecidos por ASTM MTC Y AASHTO

Los ensayos usados en una mezcla convencional que se realizaron son los siguientes: Humedad Natural, gravedad específica, equivalente de arena, peso unitario, desgaste en la máquina de los ángeles, solidez de sulfatos, partículas planas y alargadas, porcentaje de caras fracturadas 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.

4.2.1.4 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, haciendo uso de las exigencias granulométricas de la norma MTC, la cual establece un rango de valores que se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 5: Rangos Granulométricos MAC- 1

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100	-	-
19,0 mm (3/4")	80 -100	100	-
12,5 mm (1/2")	67- 85	80 - 100	-
9,5 mm (3/8")	60 - 77	70 - 88	100
4,75 mm (N° 4)	43 - 54	51 - 68	65 - 87
2,00 mm (N° 10)	29 - 45	38 - 52	43 - 61
425 μm (N° 40)	14 - 25	17- 28	16 - 29
180 μm (N° 80)	8 -17	8 -17	9 -19
75 μm (N° 200)	04 - 8	04 - 8	05 - 10

Fuente: MTC 2017

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

Fig. 5: Grafica de dosificación de agregados MAC- 1



Fuente: Propia

4.2.1.5 Muestra Patrón:

Teniendo en cuenta que los materiales pétreos fueron suministrados por Arenera Jaén SAC 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 % 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 espécimen correspondientes para cada porcentaje de partículas de caucho reciclado

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

Inicialmente se prepararon las briquetas correspondientes a la muestra patrón con el porcentaje de 5% pre-establecido. 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 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.

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.

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.

C. Posteriormente, las mezclas asfálticas calientes se colocaron en los moldes precalentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usó el martillo Marshall de compactación, el cual también fue 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.

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; advirtiéndose que fue analizada la dosificación y diseño de mezcla en la curva establecida por la Normas peruana como se pudo observar en la imagen anteriores. 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 gramo de caucho del 1.5% al 4%

GCR DISEÑO	1.50%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	3.5%	42	gr
GCR	1.5%	18	gr

GCR DISEÑO	2.00%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	3.0%	36	gr
GCR	2.0%	24	gr

GCR DISEÑO	2.50%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	2.5%	30	gr
GCR	2.5%	30	gr

GCR DISEÑO	3.00%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	2.0%	24	gr
GCR	3.0%	36	gr

GCR DISEÑO	3.50%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	1.5%	18	gr
GCR	3.5%	42	gr

GCR DISEÑO	4.00%		
	% DE DISEÑO	PESO (gr)	
PESO DE MEZCLA	100%	1200	gr
Triturado pasa 3/4"	20%	240	gr
Triturado pasa 1/2"	35%	420	gr
Arena triturada	20%	240	gr
Arena lavada	20%	240	gr
Llenante	1.0%	12	gr
GCR	4.0%	48	gr

Fuente: Propia

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 Máquina Marshall para determinar sus respectivos valores de estabilidad, flujo y peso específico y proceder a su análisis.

4.2.1.7 Preparación De Briquetas

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.

4.2.1.8 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 empleó 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 midió 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 midió 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 una estufa
- 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.

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

- Para la densidad del agregado fino se usara:

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

- Densidad agregado grueso:

$$A: \text{Peso seco} \quad Dg = \frac{A}{C-B} \quad (2)$$

B: Peso muestra saturada sumergida

C: Peso muestra saturada y superficialmente Seca

- Densidad específica:

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

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 específico de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

- Para el cálculo de la gravedad específica máxima teórica de la muestra para cada uno de los porcentajes de asfalto.

$$Gmas \text{ Agragados} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{G_{agregados}} + \frac{\% \text{ asfalto}}{g_{asfalto}}} \quad (4)$$

Dónde: % agregados = 100- % asfalto

- Luego la gravedad específica efectiva:

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

- Porcentaje de asfalto absorbido:

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

- Volumen de briquetas:

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

- Porcentaje de asfalto efectivo:

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

- Porcentaje de vacíos:

$$VAM = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (9)$$

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:

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

4.2.1.9 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 $60^\circ \pm 1^\circ \text{ C}$ ($140^\circ \pm 1.8^\circ \text{ F}$). 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 carga 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.

4.2.2 Recolección secundaria:

4.2.2.1 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, además algunas tesis presentadas para obtener el título de pregrado en Ingeniería Civil.

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 de asfalto.

- 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, 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.

CAPITULO V

V. RESULTADOS

5.1 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 Normas Peruanas, al momento de plantear un diseño de mezcla asfáltica para capas de rodadura de altos volúmenes de tránsito. Encontrando los siguientes resultados:

5.2 Caracterización del ligante asfáltico

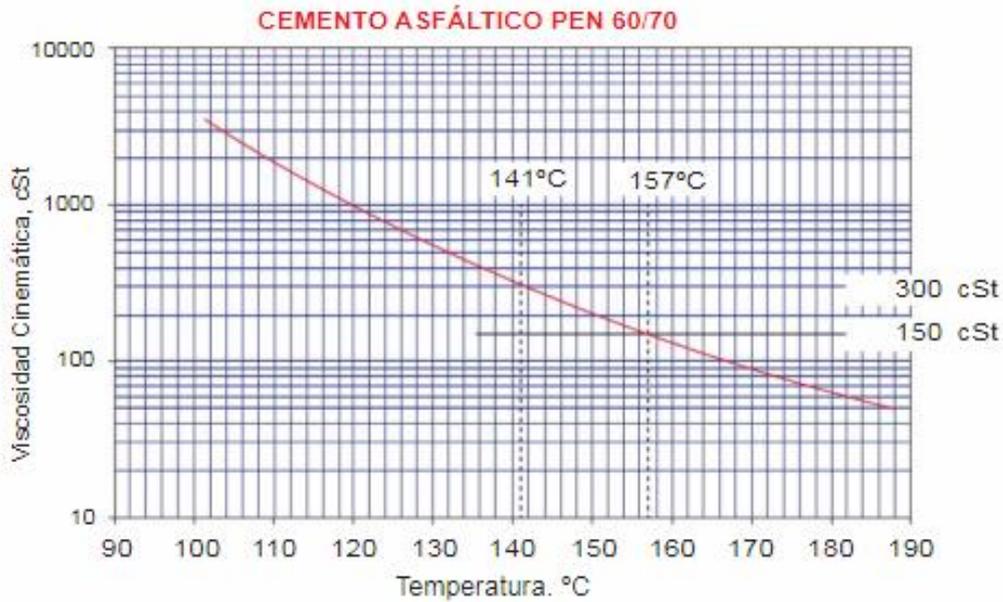
Tomando los datos referentes de los laboratorios para el control de calidad de PETROPERU, fue posible conocer las características principales aceptables por la Normas ASTM y ASSHTO que presenta el asfalto 60/70 con el cual se trabajó en esta investigación. Esto se puede ver a continuación:

Tabla 7: Especificaciones técnicas del asfalto 60/70

CLASE DE PRODUCTO		ASFALTO SÓLIDO		Fecha efectiva: Enero 2014	
TIPO DE PRODUCTO		CEMENTO ASFÁLTICO		Reemplaza edición de: Noviembre 2007	
NOMBRE DE PRODUCTO					
ASFALTO SÓLIDO 60/70 PEN					
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO		
	MIN.	MAX.	ASTM	AASHTO	
PENETRACIÓN a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1mm	60	70	D-5	T-49	
VOLATILIDAD					
Punto de inflamación Cleveland, copa abierta, °C	232		D-92	T-48	
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	Reportar		D-70	T-228	
DUCTILIDAD a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51	
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, % masa	99,0		D-2042	T-44	
SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA					
Prueba de calentamiento sobre película fina, 3.2 mm, 163°C, 5 horas:			D-1754	T-179	
Pérdida por calentamiento, % masa		0,8			
Penetración retenida, % del original	52+		D-5	T-49	
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	50		D-113	T-51	
Índice de susceptibilidad térmica	-1.0	+1.0			Francés RLB
FLUIDEZ					
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	Reportar				
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	200		D-2170	T-201	
REQUERIMIENTO GENERAL:	El cemento asfáltico deberá ser homogéneo, libre de agua, y no deberá formar espuma al ser calentado a 175°C.				
OBSERVACIONES:					
(a) En concordancia con a Norma Técnica Peruana NTP 321.051 y con los estándares ASTM D 946 y AASHTO M-20.					

Fuente: Repsol 2017

Fig 6: Curva reológica del cemento asfáltico



	MIN	MAX
Temperatura de mezclado °C	141	157
Temperatura de compactación	135	139

Fuente: Repsol 2017

5.3 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:

5.3.1 Gradación Pasa ¾"

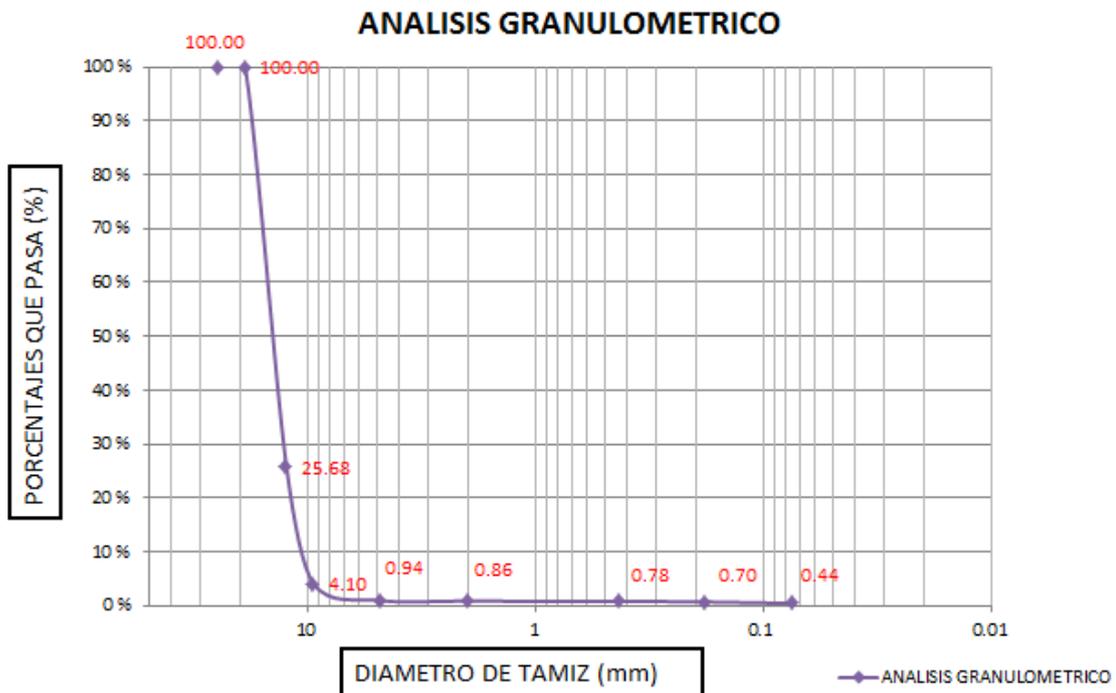
Se puede observar que el mayor porcentaje retenido de agregados está en el tamiz ½", con un total de 74.3% de agregados y pasando un 100% por el tamiz de ¾", motivo por el cual se le llama agregado pasa ¾"

Tabla 8: Análisis Granulométrico pasa ¾"

PROVEEDOR: Arenera Jaen SAC.					
NORMA DE ENSAYO: NTP 400.012					
TAMIZ (mm)		PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		% PASA
(mm)	n°		TOTAL	ACUMULADO	
25	1"	0	0.0	0.0	100.00
19	¾"	0	0.0	0.0	100.00
12.5	½"	1742.0	74.3	74.3	25.68
9.5	⅜"	506.0	21.6	95.9	4.10
4.8	N° 4	74.0	3.2	99.1	0.94
2	N° 10	1.8	0.1	99.1	0.86
0.43	N° 40	1.9	0.1	99.2	0.78
0.18	N° 80	1.9	0.1	99.3	0.70
0.075	N° 200	6.2	0.3	99.6	0.44
	FONDO	10.0	0.4	100.0	0.01
PESO MUESTRA SECO				2,344	

Fuente: Propia

Fig 7: Curva Granulométrica pasa ¾"



Fuente: Propia

5.3.2 Gradación Pasa ½”

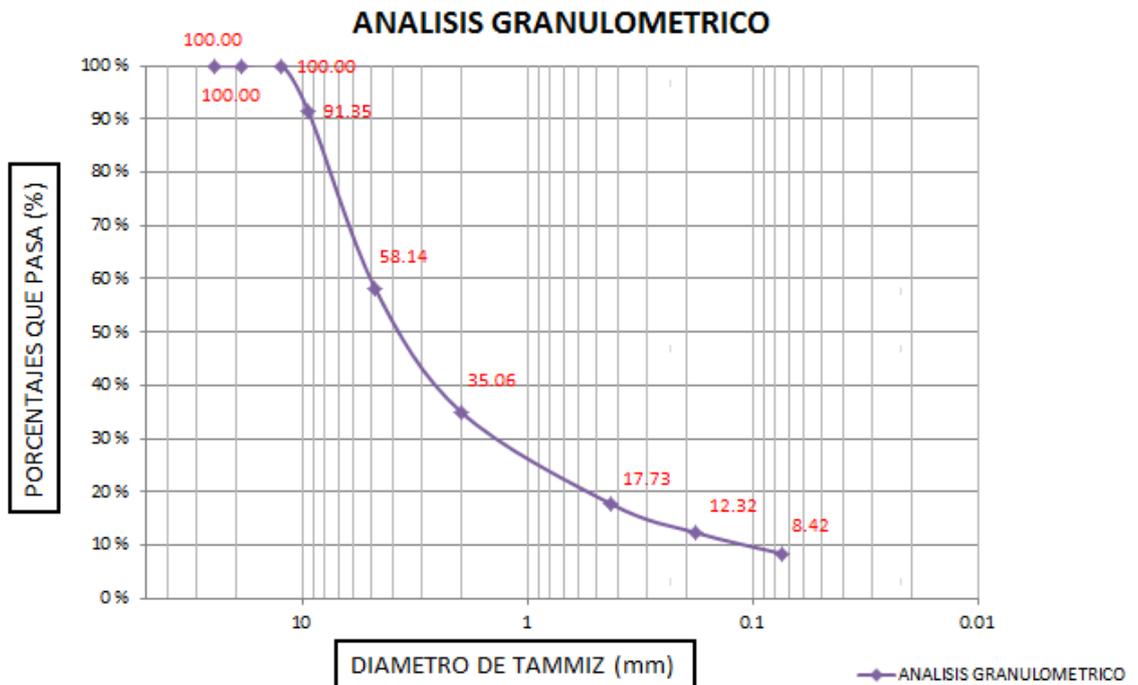
Para este caso el mayor porcentaje retenido de agregados está en el tamiz No. 4, Con un total de 33.2% y un 23.1% de agregados sobre el tamiz No. 10, además pasando un 100% por el tamiz de ½”, lo cual hace llamar: agregado pasa ½”.

Tabla 9: Análisis Granulométrico pasa ½”

PROVEEDOR: Arenera Jaen SAC.					
NORMA DE ENSAYO: NTP 400.012					
TAMIZ (mm)		PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		% PASA
(mm)	n°		TOTAL	ACUMULADO	
25	1"	0	0.0	0.0	100.00
19	3/4"	0	0.0	0.0	100.00
12.5	1/2"	0.0	0.0	0.0	100.00
9.5	3/8"	155.7	8.7	8.7	91.35
4.8	N° 4	597.3	33.2	41.9	58.14
2.0	N° 10	415.4	23.1	64.9	35.06
0.43	N° 40	311.6	17.3	82.3	17.73
0.18	N° 80	97.4	5.4	87.7	12.32
0.075	N° 200	70.1	3.9	91.6	8.42
	FONDO	151.0	8.4	100.0	0.03
PESO MUESTRA SECO					1799.00

Fuente: Propia

Fig. 8: Curva Granulométrica pasa ½”



Fuente: Propia

5.3.3 Gradación Arena

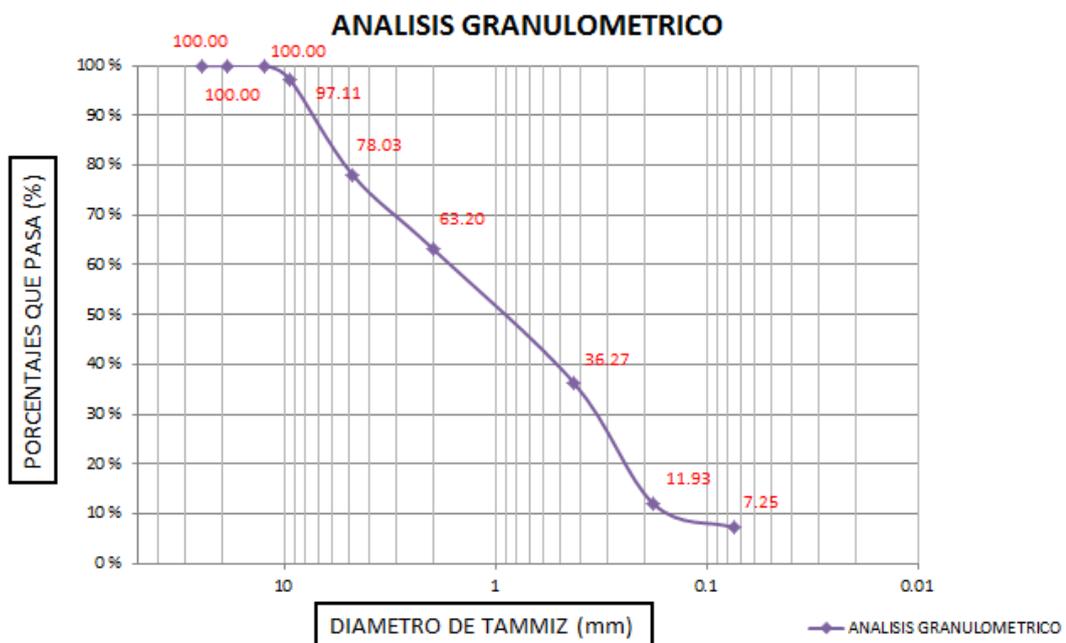
Según la gradación de la Arena, la muestra más representativa se encuentra en los tamices No.10, No.40 y No.80 distribuyéndose en porcentajes de 14.8%, 26.9% y 24.3% respectivamente. Observándose lo establecido por la Norma en donde las arenas están entre 4.76 mm y 0.074 mm.

Tabla 10: Análisis Granulométrico arena

PROVEEDOR: Arenera Jaen SAC.					
NORMA DE ENSAYO: NTP 400.012					
TAMIZ (mm)		PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		% PASA
(mm)	n°		TOTAL	ACUMULADO	
25	1"	0	0.0	0.0	100.00
19	3/4"	0	0.0	0.0	100.00
12.5	1/2"	0.0	0.0	0.0	100.00
9.5	3/8"	48.6	2.9	2.9	97.11
4.8	N° 4	321.2	19.1	22.0	78.03
2	N° 10	249.6	14.8	36.8	63.20
0.43	N° 40	453.1	26.9	63.7	36.27
0.18	N° 80	409.8	24.3	88.1	11.93
0.075	N° 200	78.6	4.7	92.7	7.25
	FONDO	122.0	7.2	100.0	0.01
PESO MUESTRA SECO				1,683	

Fuente: Propia

Fig. 9: Curva Granulométrica arena



Fuente: Propia

5.3.4 Gradación Arena Lavada

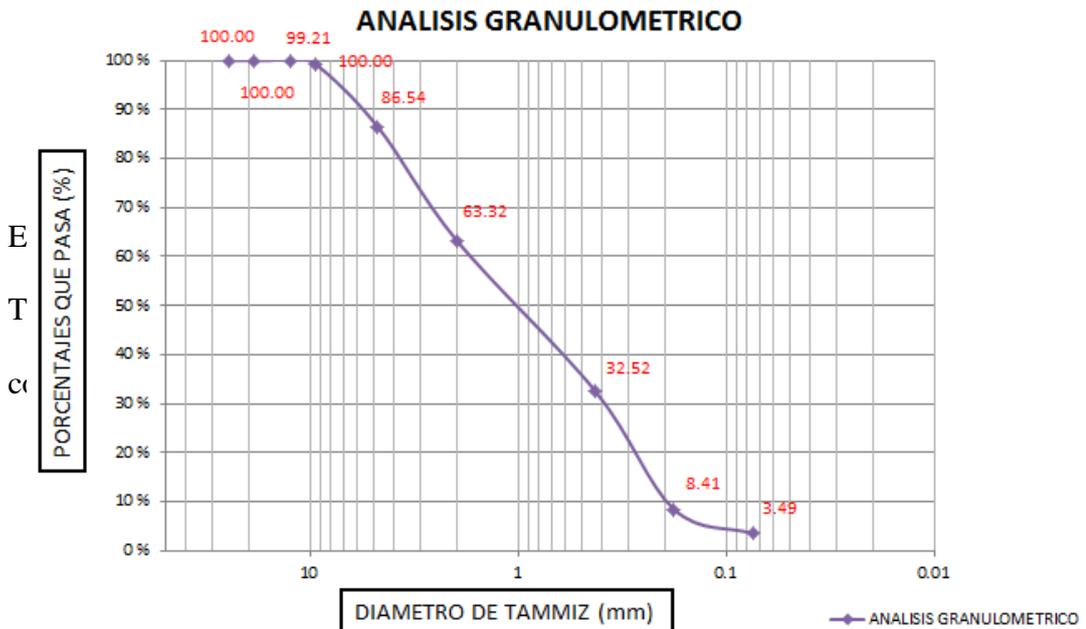
Teniendo en cuenta que también es una arena, se puede ver según la curva logarítmica la semejanza en la distribución granulométrica con respecto a la arena triturada mostrada anteriormente, distribuyendo sus tamaños más representativos sobre los tamices No 10, No 40, No 80, con 23.22%, 30.8%, 24.1% respectivamente.

Tabla. 11: Análisis Granulométrica arena lavada

PROVEEDOR: Arenera Jaen SAC.					
NORMA DE ENSAYO: NTP 400.012					
TAMIZ (mm)		PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		% PASA
(mm)	n°		TOTAL	ACUMULADO	
25	1"	0.00	0.0	0.0	100.00
19	3/4"	0.00	0.0	0.0	100.00
12.5	1/2"	0.00	0.0	0.0	100.00
9.5	3/8"	16.00	0.8	0.8	99.21
4.8	N° 4	257.60	12.7	13.5	86.54
2	N° 10	472.10	23.2	36.7	63.32
0.43	N° 40	626.20	30.8	67.5	32.52
0.18	N° 80	490.10	24.1	91.6	8.41
0.075	N° 200	100.00	4.9	96.5	3.49
FONDO		71.00	3.5	100.0	0.00
PESO MUESTRA SECO					2,033

Fuente: Propia

Fig. 10: Curva Granulométrica arena lavada



Fuente: Propia

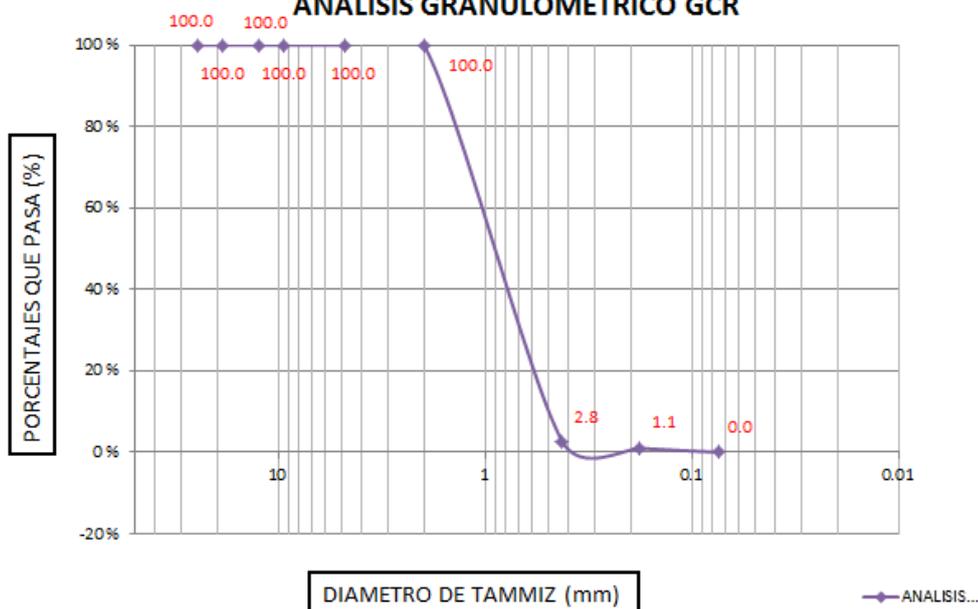
5.3.5 Gradación GCR

Tabla 12: Curva Granulométrica GCR

GCR (Grano de Caucho Reciclado)					
TAMIZ (mm)		PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO		% PASA
(mm)	n°		TOTAL	ACUMULADO	
25	1"	0.00	0.0	0	100.0
19	3/4"	0.00	0.0	0	100.0
12.5	1/2"	0.00	0.0	0	100.0
9.5	3/8"	0.00	0.0	0	100.0
4.8	N° 4	0.00	0.0	0	100.0
2	N° 10	0.00	0.0	0	100.0
0.43	N° 40	194.40	97.2	97	2.8
0.18	N° 80	3.50	1.8	99	1.1
0.075	N° 200	2.00	1.0	100	0.0
	FONDO	0.20	0.1	100	0.0
PESO MUESTRA SECO				200	

Fuente: Propia

Fig. 11: Curva Granulométrica GCR
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO GCR



Fuente: Propia

5.3.6 Ensayo de Abrasión Máquina de los Ángeles (MTC E 207)

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: Tipos de Gradación según masa de carga

Gradación	Número de Esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

Fuente: MTC 2017

Tabla 14: Cantidad de material según tamiz

Medida del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 ½")	25,0 mm (1")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
25,0 mm (1")	19,0 mm (¾")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
19,0 mm (¾")	12,5 mm (½")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
12,5 mm (½")	9,5 mm (⅜")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
9,5 mm (⅜")	6,3 mm (¼")	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
6,3 mm (¼")	4,75 mm (Nº 4)	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	-.-	-.-		5 000
TOTAL		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Fuente: MTC 2017

Tabla 15: Resultado Final de Abrasión

DESCRIPCION	TRITURADO PASA ¾"
FUENTE	TRUJILLO
GRADACION	B
P1=	5000
P2=	3965.32
% DE DESGASTE	20.6936
NORMA < 25%	CUMPLE

Fuente: Propia

5.3.7 Ensayo de Peso Unitaria (NTP 400.017)

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 valores 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. Los datos obtenidos de masa unitaria se pueden observar en las siguientes tablas, discriminando los valores correspondientes de su peso de muestra suelta y peso de muestra compacta.

Tabla 16: Ensayo de Peso Unitaria ¾"

TRITURADO PASA 3/4"			
PESO MATERIAL SUELTO		PESO MATERIAL COMPACTADO	
1	6453.6	1	6785.6
2	6365.7	2	6753.9
3	6487.4	3	6765.6
4	6456.1	4	6788.5
5	6498.3	5	6734.7
PESO TOTAL	32261.1	PESO TOTAL	33828.3
PESO PROMEDIO	6452.22	PESO PROMEDIO	6765.66
PESO DEL TANQUE	2545.3	PESO DEL TANQUE	2545.3
VOLUMEN	2831.7	VOLUMEN	2831.7
PESO NETO	3906.92	PESO NETO	4220.36
MS Kg/m3	1.380	MC Kg/m3	1.490

Fuente: Propia

Tabla 17: Ensayo de Peso Unitaria ½”

TRITURADO PASA 1/2"			
PESO MATERIAL SUELTO		PESO MATERIAL COMPACTADO	
1	7077.6	1	7743.6
2	7086.5	2	7738.6
3	7068.9	3	7742.7
4	7092.6	4	7734.8
5	7075.7	5	7746.4
PESO TOTAL	35401.3	PESO TOTAL	38706.1
PESO PROMEDIO	7080.26	PESO PROMEDIO	7741.22
PESO DEL TANQUE	2545.3	PESO DEL TANQUE	2545.3
VOLUMEN	2831.7	VOLUMEN	2831.7
PESO NETO	4534.96	PESO NETO	5195.92
MS Kg/m3	1.601	MC Kg/m3	1.835

Fuente: Propia

Tabla 18: Ensayo de Peso Unitaria Arena

ARENA SARANDEADA			
PESO MATERIAL SUELTO		PESO MATERIAL COMPACTADO	
1	7354.6	1	7734.5
2	7366.5	2	7765.5
3	7356.3	3	7755.7
4	7387.6	4	7754.6
5	7362.4	5	7748.3
PESO TOTAL	36827.4	PESO TOTAL	38758.6
PESO PROMEDIO	7365.48	PESO PROMEDIO	7751.72
PESO DEL TANQUE	2545.3	PESO DEL TANQUE	2545.3
VOLUMEN	2831.7	VOLUMEN	2831.7
PESO NETO	4820.18	PESO NETO	5206.42
MS Kg/m3	1.702	MC Kg/m3	1.839

Fuente: Propia

Tabla 19: Ensayo de Peso Unitaria Arena Lavada

ARENA LAVADA			
PESO MATERIAL SUELTO		PESO MATERIAL COMPACTADO	
1	7137.5	1	7492.4
2	7142.8	2	7488.7
3	7143.4	3	7475.4
4	7139.6	4	7481.5
5	7144.3	5	7495.3
PESO TOTAL	35707.6	PESO TOTAL	37433.3
PESO PROMEDIO	7141.52	PESO PROMEDIO	7486.66
PESO DEL TANQUE	2545.3	PESO DEL TANQUE	2545.3
VOLUMEN	2831.7	VOLUMEN	2831.7
PESO NETO	4596.22	PESO NETO	4941.36
MS Kg/m3	1.623	MC Kg/m3	1.745

Fuente: Propia

5.3.8 Ensayo de durabilidad (MTC E 209)

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 20: Ensayo de durabilidad

ENSAYO DE DURABILIDAD (MTC E 209)								
TIPO DE SULFATO: SULFATO DE SODIO								
DESCRIPCION		TRITURADO PASA 3/4"						
PASA	RETENIDO	GRADACION ORIGINAL (% RETENIDO)	PESO EN FRACCION ANTES DEL ENSAYO (gr)	# DE PARTICULAS ANTES DEL ENSAYO	PESO RETENIDO DESPUES DEL ENSAYO	% DE PERDIDA TOTAL	% DE PERDIDA CORREGIDA	# DE PARTICULAS EN BUEN ESTADO DESPUES DEL ENSAYO
3/4"	1/2"	48.97%	587.65	108.0	569.95	3.01%	4.63%	103.0
1/2"	3/8"	26.15%	313.75	134.0	301.75	3.82%	2.99%	130
3/8"	#4	24.88%	298.6	574.0	266.6	10.72%	1.39%	566.0
TOTALES		100.00%	1200		1138.3	17.55%	9.01%	

Fuente: Propia

Se puede observar que el resultado obtenido por perdida en la acción de los sulfatos de sodio fue de 9.01%, siendo este un valor conveniente para los pasa 3/4" y pasa 1/2" 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 MTC E 209 es el 12%.

Fig. 12: Ensayo de durabilidad



Fuente: Propia

5.3.9 Ensayo de Humedad Natural (MTC E-108)

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 $\frac{3}{4}$ ", M2: Triturado pasa $\frac{1}{2}$ ", M3: Arena, M4: Arena Zarandeada

Tabla 21: Ensayo de Humedad Natural

NUMERO DE ENSAYO	1	2	3	4
RECIPIENTE N°	5	9	15	20
PESO MUESTRA HUMEDA MAS RECIPIENTE (gr)	488.5	488.7	486.2	487.2
PESO MUESTRA SECO MAS RECIPIENTE (gr)	482.7	480.4	477.8	475.6
PESO RECIPIENTE (gr)	34.5	34.5	34.5	34.5
PESO MUESTRA SECA (gr)	448.2	445.9	443.3	441.1
PESO AGUA (gr)	5.8	8.3	8.4	11.6
CONTENIDO DE HUMEDAD	1.29%	1.86%	1.89%	2.63%

Fuente: Propia

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.

5.3.10 Equivalente de Arena (MTC E-114)

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 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.

Tabla 22: Equivalente de Arena

EQUIVALEMTE DE ARENA MTC E-114		
ARENA TRITURADA		
ENSAYO #	1	2
LECTURA DE ARENA	4.5	4.3
LECTURA DE ARCILLA	6.2	6.5
EQUIVALENTE DE ARENA	73%	66%
PROMEDIO	69%	
EQUIVALEMTE DE ARENA MTC E-114		
ARENA LAVADA		
ENSAYO #	1	2
LECTURA DE ARENA	4.2	4.4
LECTURA DE ARCILLA	5.9	5.7
EQUIVALENTE DE ARENA	71%	77%
PROMEDIO	74%	

Fuente: Propia

5.3.11 Gravedad Específica (MTC E-113)

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.

Tabla 23: Gravedad Específica pasa 3/4”

AGREGADO PASA 3/4"			
A	PESO EN EL AIRE MUESTRA SECA	1754.2	Gms
B	PESO EN EL AIRE MUESTRA S.S.S.	1817.5	Gms
C	PESO EN EL AGUA, MUESTRA SATURADA	1130.2	Gms
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK =		$A/(B-C)$	2.55 Gms/Cms3
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK S.S.S =		$B/(B-C)$	2.64 Gms/Cms4
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE]=		$A/(A-C)$	2.81 Gms/Cms5
ABSORCION % =		$(B-A)/A*100$	3.61 %

Fuente: Propia

Tabla 24: Gravedad Específica pasa 1/2”

AGREGADO PASA 1/2"			
A	PESO EN EL AIRE MUESTRA SECA	1870.2	Gms
B	PESO EN EL AIRE MUESTRA S.S.S.	1954.6	Gms
C	PESO EN EL AGUA, MUESTRA SATURADA	1387.5	Gms
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK =		$A/(B-C)$	3.30 Gms/Cms3
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK S.S.S =		$B/(B-C)$	3.45 Gms/Cms4
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE]=		$A/(A-C)$	3.87 Gms/Cms5
ABSORCION % =		$(B-A)/A*100$	4.51 %

Fuente: Propia

Tabla 25: Gravedad Específica arena lavada

ARENA LAVADA		
MUESTRA	#1	#2
PESO MUESTRA SECA (gr) =	492.7	493.6
PESO PICNOMETRO (gr) =	172.2	172.1
PESO PICNOMETRO + AGUA (gr) =	715.7	715.7
PESO PICNOMETRO + MATERIAL + AGUA (gr) =	1023.4	1021.5
ABSORCION	1.48	1.3
GS =	2.696	2.71

Fuente: Propia

Tabla 26: Gravedad Específica arena triturada

ARENA TRITURADA		
MUESTRA	#1	#2
PESO MUESTRA SECA (gr) =	492.7	493.6
PESO PICNOMETRO (gr) =	172.2	172.1
PESO PICNOMETRO + AGUA (gr) =	715.7	715.7
PESO PICNOMETRO + MATERIAL + AGUA (gr) =	1023.4	1021.5
ABSORCION	1.48	1.30
GS =	2.66	2.63

Fuente: Propia

5.3.12 Partículas Planas y Alargadas (MTC E 223)

Las partículas chatas o alargadas pueden interferir con la consolidación y dificultar la colocación de los materiales. Este método provee el medio para verificar si se cumple con las especificaciones que limitan tales partículas o, para determinar la forma característica del agregado grueso.

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 $\frac{3}{4}$ ". 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: Partículas Planas y Alargadas

PARTICULAS PLANAS YA ALARGADAS					
FRACCION	PESO INICIAL DE FRACCION	PESO DE MATERIAL PLANO	PESO DE MATERIAL ALARGADO	PORCENTAJE DE MATERIAL PLANO	PORCENTAJE DE MATERIAL ALARGADO
	A	B	C		
2 1/2" - 2"					
2" - 1 1/2"					
1 1/2" - 3/4"					
3/4" - 1/2"	745.6	124.3	145.6	16.7%	20%
1/2" - 3/8"	521.3	56.3	78.6	10.8%	15%
3/8" - No.4	321.1	61.48	45.2	19.1%	14%
TOTAL	1588		PROMEDIO	15.5%	16.2%

Fuente: Propia

Al revisar los resultados obtenidos, se puede reconocer que están en el rango establecido por la norma que es menor al 30%, además se puede decir que la geometría y forma de las partículas usadas como agregado grueso era la adecuada.

5.3.13 Porcentaje de Caras Fracturadas (MTC E-210)

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 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 28: Porcentaje de Caras Fracturadas

PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS				
TAMAÑO AGREGADO		PESO DE LA MUESTRA	PESO MATERIAL CARAS FRACTURADAS	% CARAS FRACTURAS
PASA	RETENIDO			
1 1/2"	1"			
1"	3/4"			
3/4"	1/2"	875.6	824.9	94.2%
1/2"	3/8"	657.5	568.3	86.4%
TOTAL		1533.1	1393.2	
PORCENTAJE TOTAL DE LA MUESTRA				90.3%
VALOR ESPECIFICADO				>85%

Fuente: Propia

5.4 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 de 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%.

Tabla 29: Combinación de Materiales

TAMIZ		TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA				
(mm)	Nº	AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENATE DE ARENA 0.6 (mm)
25	1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100
19	3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100
12.5	1/2"	25.68	100.00	100.00	100.00	100
9.5	3/8"	4.10	91.35	97.11	99.21	100
4.8	Nº 4	0.94	58.14	78.03	86.54	98.3
2	Nº 10	0.86	35.06	63.20	63.32	72.6
0.43	Nº 40	0.78	17.73	36.27	32.52	37.6
0.18	Nº 80	0.70	12.32	11.93	8.41	26.3
0.075	Nº 200	0.44	8.42	7.25	3.49	17.6

Fuente: Propia

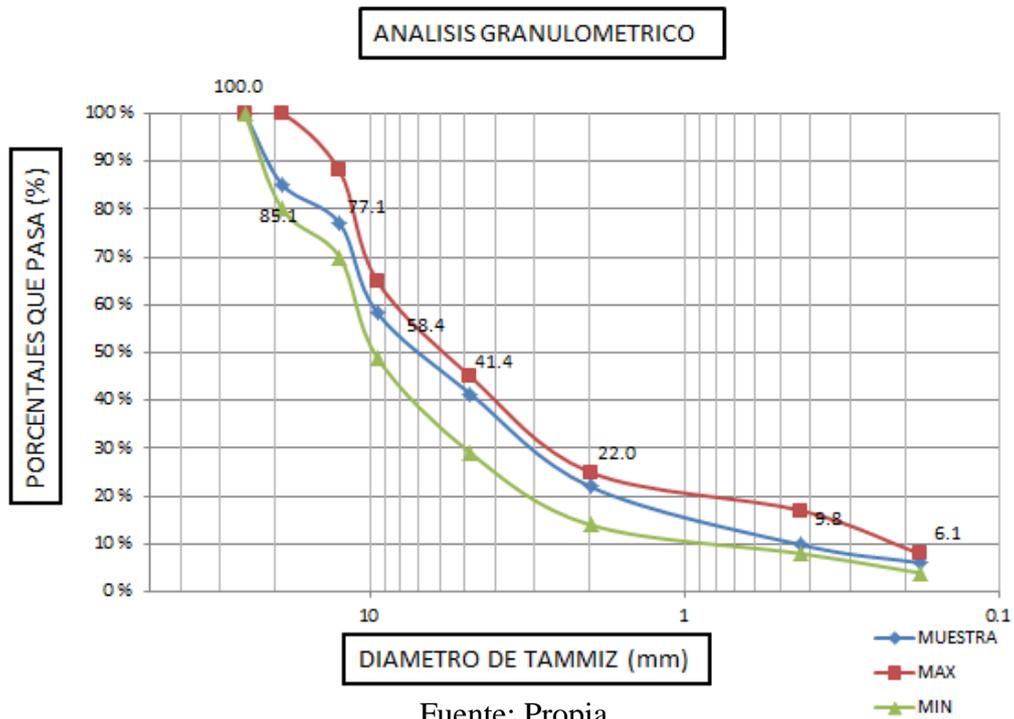
La Combinación de la muestra patrón está dada 20% del Material pasa ¾", 35% del triturado pasa ½", 20% de la arena triturada, otro 20% de la arena zarandeada y un 5.0% del llenante mineral campusano, que cumplen con las especificaciones indicadas por el MTC para diseño de mezclas asfálticas que se encuentran en la Norma. 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 análisis por tanteo, en donde se busca que la curva resultante este dentro de las franjas granulométricas, como se puede ver de la siguiente manera

Tabla 30: Porcentajes de Materiales

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR					TOTAL	NORMATIVO MTC E 204	
		20%	35%	20%	20%	5%	100%		
(mm)	Nº	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA							
		AGREGADO ¾"	AGREGADO ½"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENANTE DE ARENA 0.6 (mm)			
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	5.00	100.0	MAX	MIN
19	¾"	20.00	35.00	20.00	20.00	5.00	100.0	100.0	100.0
12.5	½"	5.14	35.00	20.00	20.00	5.00	85.1	100.0	80.0
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	5.00	77.1	88.0	70.0
4.8	Nº 4	0.19	20.35	15.61	17.31	4.92	58.4	65.0	49.0
2	Nº 10	0.17	12.27	12.64	12.66	3.63	41.4	45.0	29.0
0.43	Nº 40	0.16	6.21	7.25	6.50	1.88	22.0	25.0	14.0
0.18	Nº 80	0.14	4.31	2.39	1.68	1.32	9.8	17.0	8.0
0.075	Nº 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.88	6.1	8.0	4.0

Fuente: Propia

Fig. 13: Curva granulométrica Combinación de Materiales en %



5.5 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.

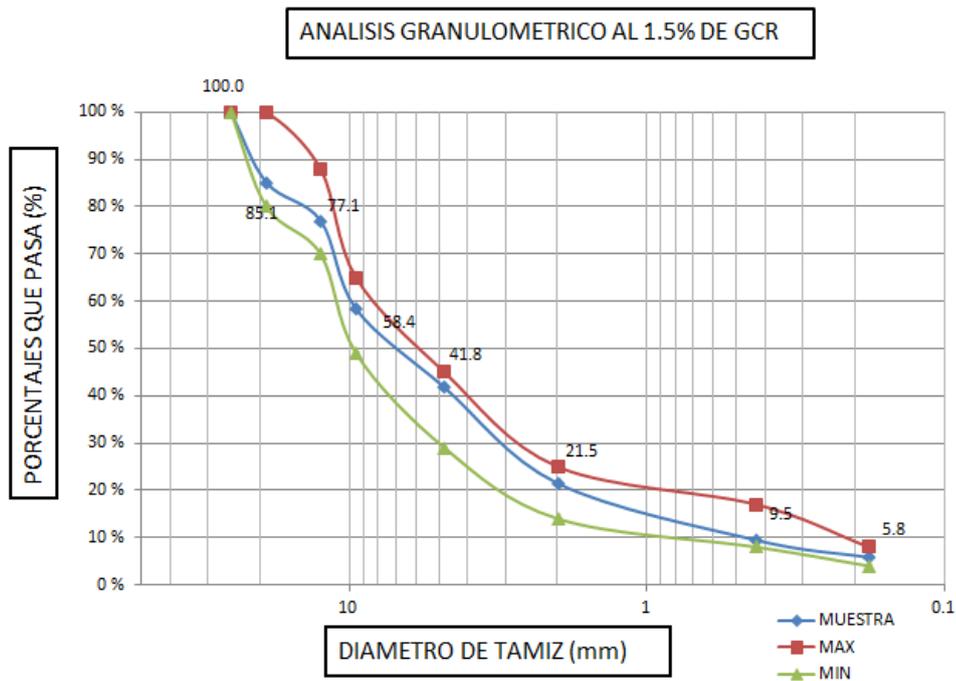
Tabla 31: Gradaciones con Variación de GCR al 1.5%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204	
		20%	35%	20%	20%	3.5%	1.5%	100%		
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA								
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENANTE DE RENA 0.6 (mm)	GCR %			
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	3.50	1.50	100.0	MAX	MIN
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	3.50	1.50	100.0	100.0	100.0
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	3.50	1.50	85.1	100.0	80.0
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	3.50	1.50	77.1	88.0	70.0
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	3.44	1.50	58.4	65.0	49.0
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	2.54	1.50	41.8	45.0	29.0
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	1.32	0.04	21.5	25.0	14.0
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.92	0.02	9.5	17.0	8.0
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.62	0.00	5.8	8.0	4.0

Fuente: Propia

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

Fig. 14: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 1.5%



Fuente: Propia

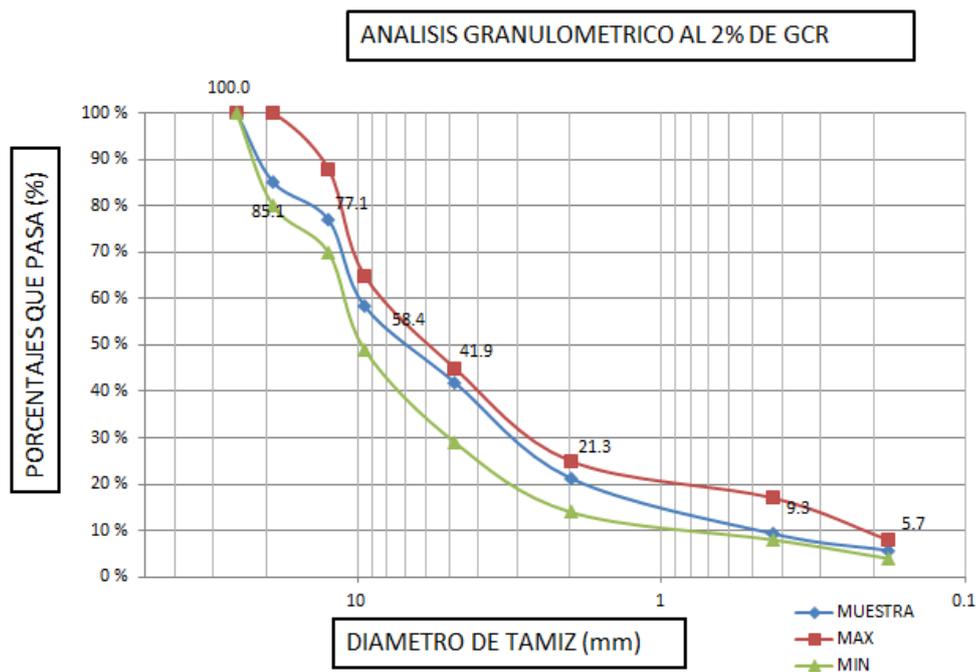
- GCR 2%

Tabla 32: Gradaciones con Variación de GCR al 2%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204		
		20%	35%	20%	20%	3.0%	2.0%	100%			
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA									
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENANTE DE RENA 0.6 (mm)	GCR %				
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	3.00	2.00	100.0	MAX	MIN	
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	3.00	2.00	100.0	100.0	100.0	
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	3.00	2.00	85.1	100.0	80.0	
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	3.00	2.00	77.1	88.0	70.0	
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	2.95	2.00	58.4	65.0	49.0	
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	2.18	2.00	41.9	45.0	29.0	
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	1.13	0.06	21.3	25.0	14.0	
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.79	0.02	9.3	17.0	8.0	
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.53	0.00	5.7	8.0	4.0	

Fuente: Propia

Fig. 15: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 2%



Fuente: Propia

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.

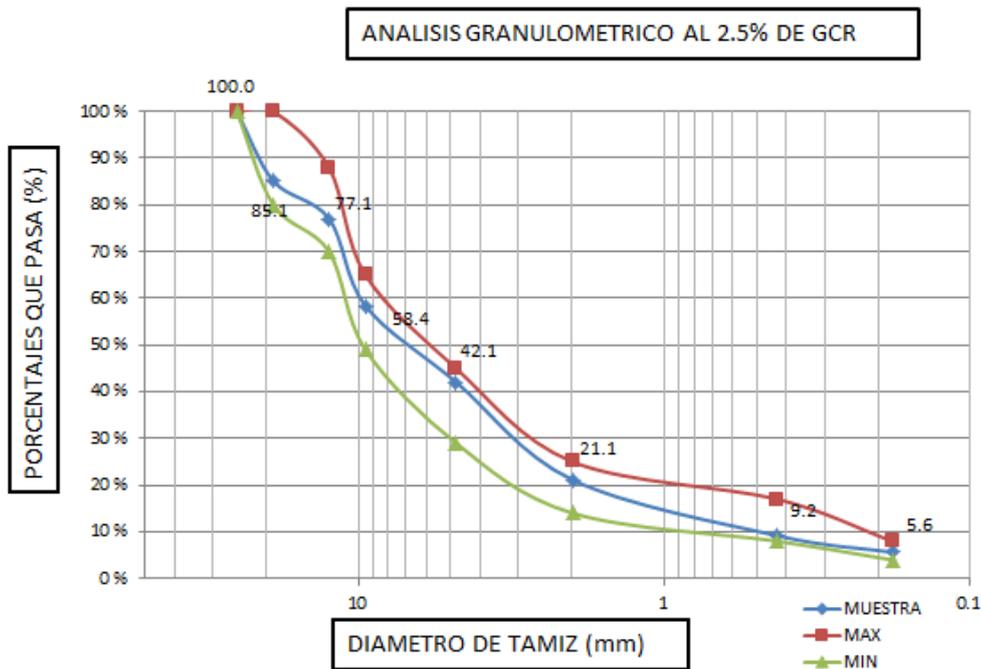
- GCR 2.5%

Tabla 33: Gradaciones con Variación de GCR al 2.5%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204	
		20%	35%	20%	20%	2.5%	2.5%			
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA								
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENATE DE RENA 0.6 (mm)	GCR %			
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	2.50	2.50	100.0	MAX	MIN
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	2.50	2.50	100.0	100.0	100.0
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	2.50	2.50	85.1	100.0	80.0
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	2.50	2.50	77.1	88.0	70.0
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	2.46	2.50	58.4	65.0	49.0
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	1.82	2.50	42.1	45.0	29.0
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	0.94	0.07	21.1	25.0	14.0
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.66	0.03	9.2	17.0	8.0
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.44	0.00	5.6	8.0	4.0

Fuente: Propia

Fig. 16: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 2.5%



Fuente: Propia

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 límites superiores de la franja establecida por el MTP, 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.

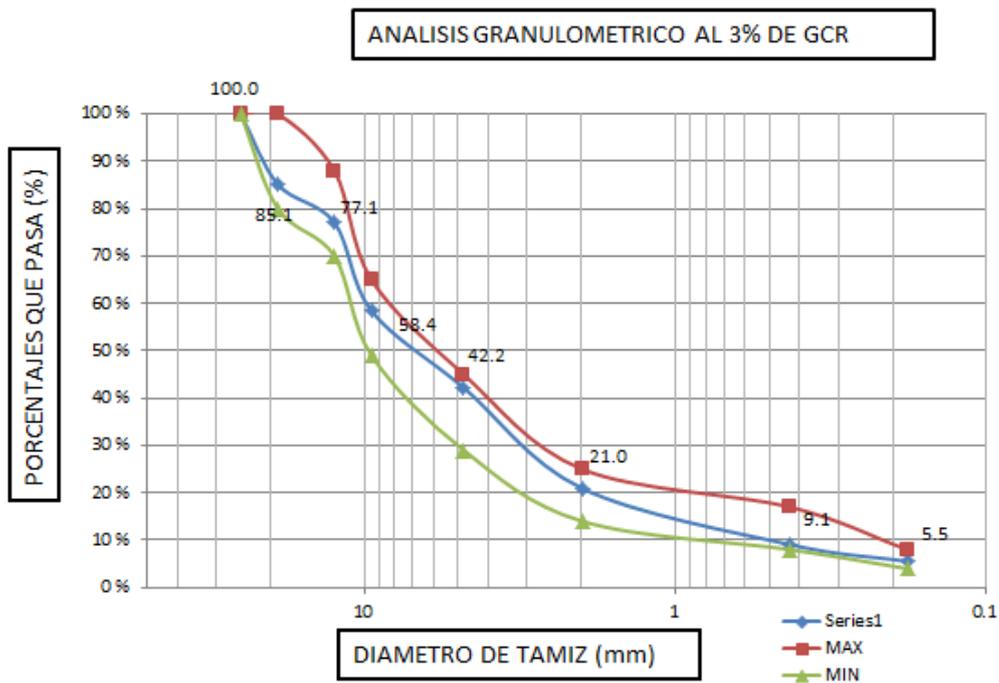
- GCR 3.0%

Tabla 34: Gradaciones con Variación de GCR al 3%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204	
		20%	35%	20%	20%	2.0%	3.0%			
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA								
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENATE DE RENA 0.6 (mm)	GCR %			
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	2.00	3.00	100.0	MAX	MIN
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	2.00	3.00	100.0	100.0	100.0
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	2.00	3.00	85.1	100.0	80.0
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	2.00	3.00	77.1	88.0	70.0
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	1.97	3.00	58.4	65.0	49.0
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	1.45	3.00	42.2	45.0	29.0
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	0.75	0.08	21.0	25.0	14.0
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.53	0.03	9.1	17.0	8.0
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.35	0.00	5.5	8.0	4.0

Fuente: Propia

Fig. 17: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 3%



Fuente: Propia

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.

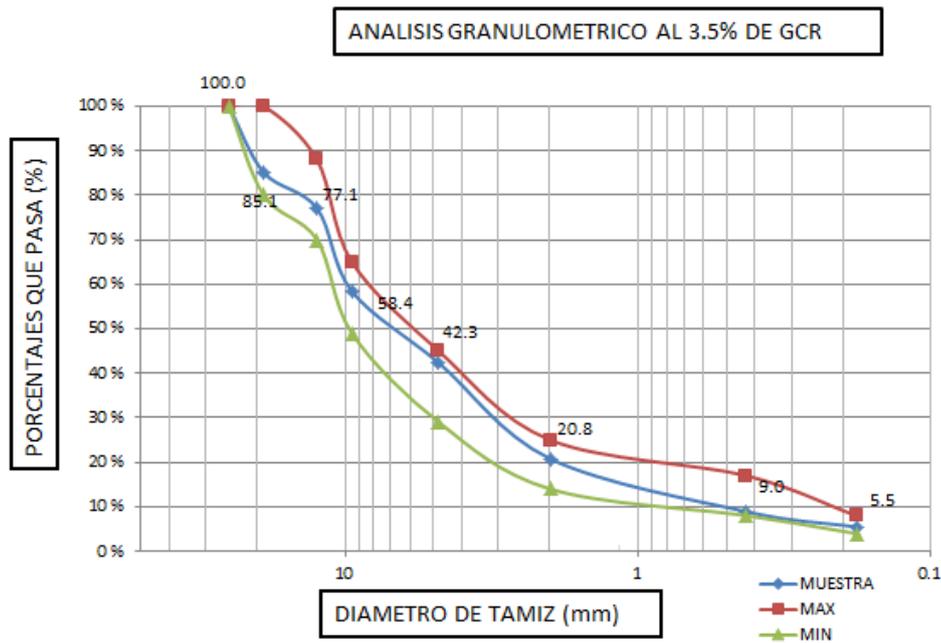
- GCR 3.5%

Tabla 35: Gradaciones con Variación de GCR al 3.5%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204	
		20%	35%	20%	20%	1.5%	3.5%	100%		
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA								
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENATE DE RENA 0.6 (mm)	GCR %			
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	1.50	3.50	100.0	MAX	MIN
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	1.50	3.50	100.0	100.0	100.0
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	1.50	3.50	85.1	100.0	80.0
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	1.50	3.50	77.1	88.0	70.0
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	1.47	3.50	58.4	65.0	49.0
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	1.09	3.50	42.3	45.0	29.0
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	0.56	0.10	20.8	25.0	14.0
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.39	0.04	9.0	17.0	8.0
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.26	0.00	5.5	8.0	4.0

Fuente: Propia

Fig. 18: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 3.5%



Fuente: Propia

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.

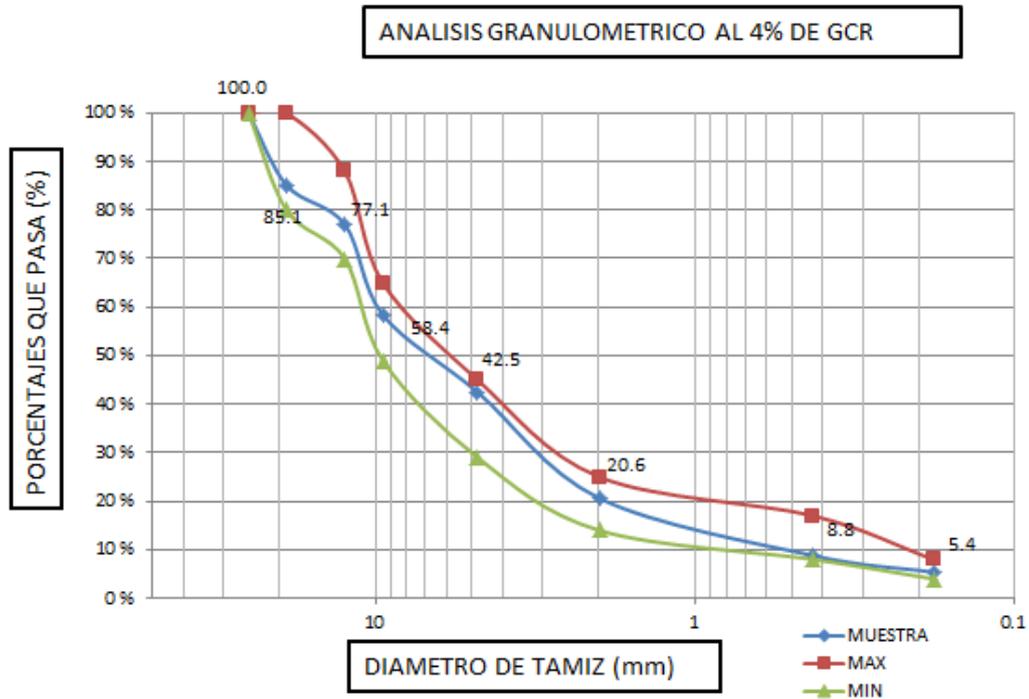
- GCR 4.0%

Tabla 36: Gradaciones con Variación de GCR al 4%

TAMIZ		PORCENTAJE A UTILIZAR						TOTAL	NORMATIVO MTC E 204		
		20%	35%	20%	20%	1.0%	4.0%				
(mm)	N°	TIPO DE MATERIAL EN % QUE PASA						GCR %			
		AGREGADO 3/4"	AGREGADO 1/2"	ARENA TRITURADA	ARENA LAVADA	LLENATE DE RENA 0.6 (mm)					
25	1"	20.00	35.00	20.00	20.00	1.00	4.00	100.0	MAX	MIN	
19	3/4"	20.00	35.00	20.00	20.00	1.00	4.00	100.0	100.0	100.0	
12.5	1/2"	5.14	35.00	20.00	20.00	1.00	4.00	85.1	100.0	80.0	
9.5	3/8"	0.82	31.97	19.42	19.84	1.00	4.00	77.1	88.0	70.0	
4.8	N° 4	0.19	20.35	15.61	17.31	0.98	4.00	58.4	65.0	49.0	
2	N° 10	0.17	12.27	12.64	12.66	0.73	4.00	42.5	45.0	29.0	
0.43	N° 40	0.16	6.21	7.25	6.50	0.38	0.11	20.6	25.0	14.0	
0.18	N° 80	0.14	4.31	2.39	1.68	0.26	0.04	8.8	17.0	8.0	
0.075	N° 200	0.09	2.95	1.45	0.70	0.18	0.00	5.4	8.0	4.0	

Fuente: Propia

Fig. 19: Curva granulométrica de Gradaciones con Variación de GCR al 4%



Fuente: Propia

Cuando se obtuvo esta última gráfica 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.

5.5 Densidades bulk de las briquetas

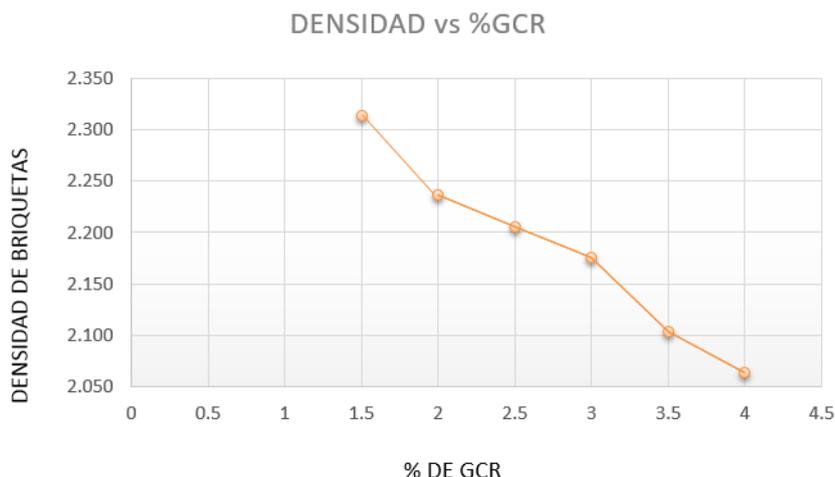
Después de haber obtenido por tanteo la dosificación de las mezclas modificadas con la incorporación de GCR, sobre las franjas granulométricas exigidas por el MTC, Para poder determinar el % de vacíos y así comenzar con la obtención de datos para realizar el análisis del comportamiento de las mezclas 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 briketa con una temperatura de 25°C y la masa de un volumen igual de agua destilada.

Tabla 37: Densidades bulk de las briquetas

DENSIDAD DE BULK BRIQUETAS							
% DE GCR	NUMERO DE BRIQUETAS	PESO DE BRIQUETAS			VOLUMEN	DENSIDAD DE BULK Gmb	DENSIDAD DE BULK PROMEDIO Gmb g/cm3
		SECO	SUPERFICIALMENTE SECO	SUMERGIDO			
MUESTRA PATRON							
0	1	1205.3	1206.2	687.5	517.8	2.328	2.313
	2	1214.6	1215.7	685.2	529.4	2.294	
	3	1207.2	1208.4	686.4	520.8	2.318	
MODIFICADO CON GCR							
1.5	4	1201	1203.2	657.6	543.4	2.210	2.237
	5	1212.3	1214.2	684.2	528.1	2.296	
	6	1206.2	1207.6	659.2	547	2.205	
2	7	1211.2	1213.1	685.7	525.5	2.305	2.206
	8	1197.5	1198.5	654.3	543.2	2.205	
	9	1209.3	1210.6	635.8	573.5	2.109	
2.5	10	1205.6	1207.2	654.2	551.4	2.186	2.175
	11	1208.2	1208.9	658.5	549.7	2.198	
	12	1214.6	1215.6	647.5	567.1	2.142	
3	13	1211.3	1213.5	638.6	572.7	2.115	2.104
	14	1205.6	1208.1	624.1	581.5	2.073	
	15	1213.2	1214.1	641.6	571.6	2.122	
3.5	16	1207.5	1208.2	610.1	597.4	2.021	2.064
	17	1209.5	1210.6	631.5	578	2.093	
	18	1200.4	1203.5	622.5	577.9	2.077	
4	19	1202.1	1208.3	612.6	589.5	2.039	1.937
	20	1165	1212.2	545.9	619.1	1.882	
	21	1153	1157.5	542.6	610.4	1.889	

Fuente: Propia

Fig. 20: grafica de Densidades bulk de las briquetas con respecto al % de GCR



Fuente: Propia

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. 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: Gravedad Específica Muestra Patrón

MUESTRA PATRON			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	2.06 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	5%	2.32	
GRC	0%	1.109	

Fuente: Propia

Tabla 39: Gravedad Específica Muestra Modificada 1

MUESTRA MODIFICADA 1			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	2.03 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	3.5%	2.32	
GRC	1.5%	1.109	

Fuente: Propia

Tabla 40: Gravedad Específica Muestra Modificada 2

MUESTRA MODIFICADA 2			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	2.02 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	3%	2.32	
GRC	2%	1.109	

Fuente: Propia

Tabla 41: Gravedad Específica Muestra Modificada 3

MUESTRA MODIFICADA 3			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	2.01 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	2.5%	2.32	
GRC	2.5%	1.109	

Fuente: Propia

Tabla 42: Gravedad Específica Muestra Modificada 4

MUESTRA MODIFICADA 4			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	2.00 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	2%	2.32	
GRC	3%	1.109	

Fuente: Propia

Fuente: Propia

Tabla 43: Gravedad Específica Muestra Modificada 5

MUESTRA MODIFICADA 5			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	1.99 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	1.5%	2.32	
GRC	3.5%	1.109	

Fuente: Propia

Tabla 44: Gravedad Específica Muestra Modificada 6

MUESTRA MODIFICADA 6			
MATERIAL	PORCENTAJE DE MEZCLA	PESO ESPECIFICO (gr/m3)	Gsb
Triturado Pasa 3/4"	20%	2.367	1.98 gr/cm3
Triturado Pasa 1/2"	35%	2.3	
Arena lavada	20%	1.786	
Arena Zarandeada	20%	1.74	
Llenante Mineral	1%	2.32	
GRC	4%	1.109	

Fuente: Propia

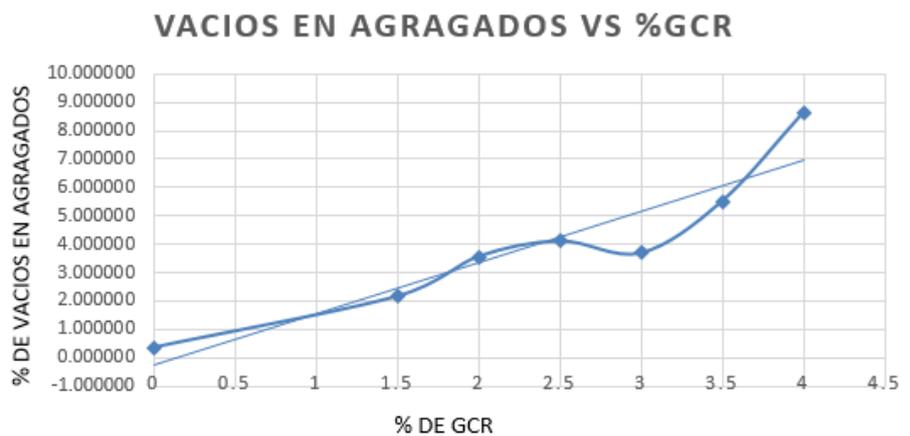
Además para realizar el análisis correspondiente en una mezcla asfáltica y sabiendo que se le asignó un material completamente diferente en cuanto a su textura y propiedades mecánicas a un agregado pétreo, fue necesario tener en cuenta los vacíos que proporciono la incorporación del grano de caucho, 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: Porcentajes de Vacíos en briquetas

% GRC	% ASFALTO	% AGREGADO	GRAVEDAD E. MAXIMA TEORICA	GRAVEDAD E. EFECTIVA	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO	PORCENTAJE DE VACIOS ENTRE LAS PARTICULAS DE AGRGADO MINERAL	VACIOS DE AIRE
	Pb		Gmm gr/cm3	Gse gr/cm3	Pba%	VAM %	Va %
0	5	95	2.071	2.195	0	0.351651	8.54654
1.5	5	95	2.039	2.079	0	2.159567	7.35469
2	5	95	2.029	2.030	0	3.561960	4.54684
2.5	5	95	2.018	1.997	0	4.108950	3.35419
3	5	95	2.005	1.971	0	3.684652	2.35416
3.5	5	95	1.994	1.949	0	5.516157	1.54650
4	5	95	1.885	1.834	0	8.651582	0.65469

Fuente: Propia

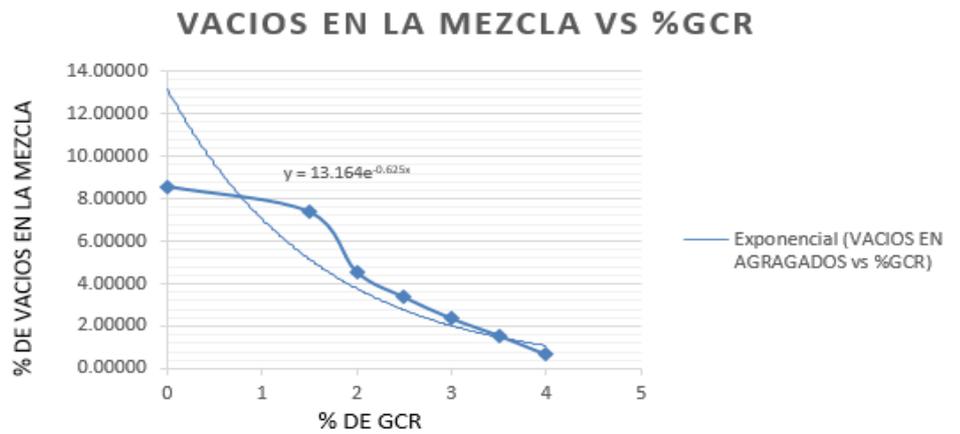
Fig. 21: grafica de % de vacíos con respecto al % de GCR



Fuente: Propia

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.

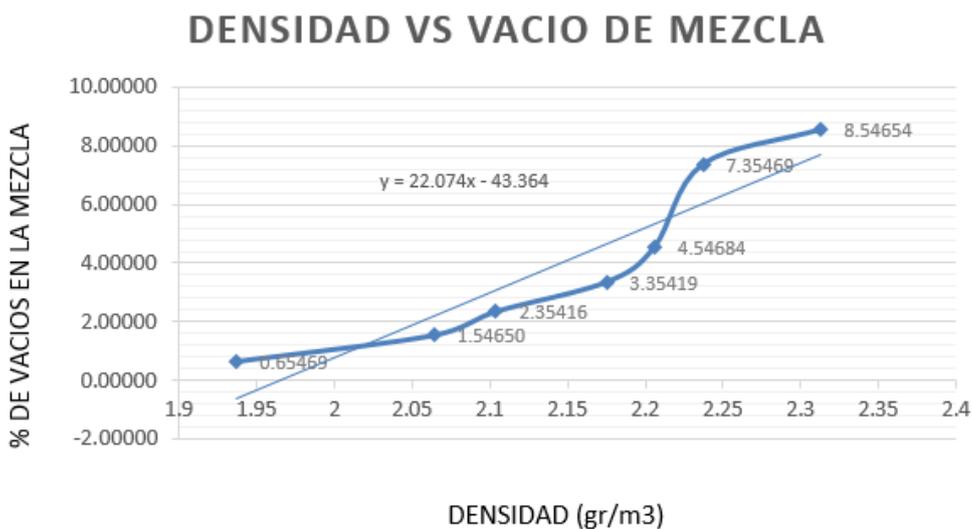
Fig. 22: grafica de Vacíos en la mezcla con respecto al % de GCR



Fuente: Propia

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.

Fig. 23: Grafica de densidad con respecto a los vacíos de la mezcla



Fuente: Propia

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,

5.6 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

Tabla 46: Estabilidad y Flujo de briquetas

ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLA ASFALTICA CON % DE GCR Y CONVENCIONAL				
% DE GCR	# DE BRIQUETAS	ESTABILIDAD0	FLUJO 0.001"	FLUJO EN mm
0	1	1235.3	12	3.055
	2	1250.1	12.5	3.098
	3	1145.6	12.9	3.154
1.5	4	1054.6	14	3.159
	5	1165.4	12	3.228
	6	978.3	13	3.763
2	7	954.2	14	3.984
	8	968.1	16	3.987
	9	944.7	18	4.066
2.5	10	912.4	16	4.159
	11	852.1	17	4.346
	12	642.3	18	4.879
3	13	185.2	22	5.145
	14	145.9	21	5.975
	15	154.6	23	6.841
3.5	16	68.7	24	5.843
	17	33.0	21	5.885
	18	1.6	26	6.354
4	19	0.5	26	6.129
	20	0.2	25	7.541
	21	0.1	27	6.974

Fuente: Propia

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 fueron la mezcla asfáltica con incorporación de 1.5% Y 2%, 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

Fig. 24: Grafica de la estabilidad con respecto al % de GCR

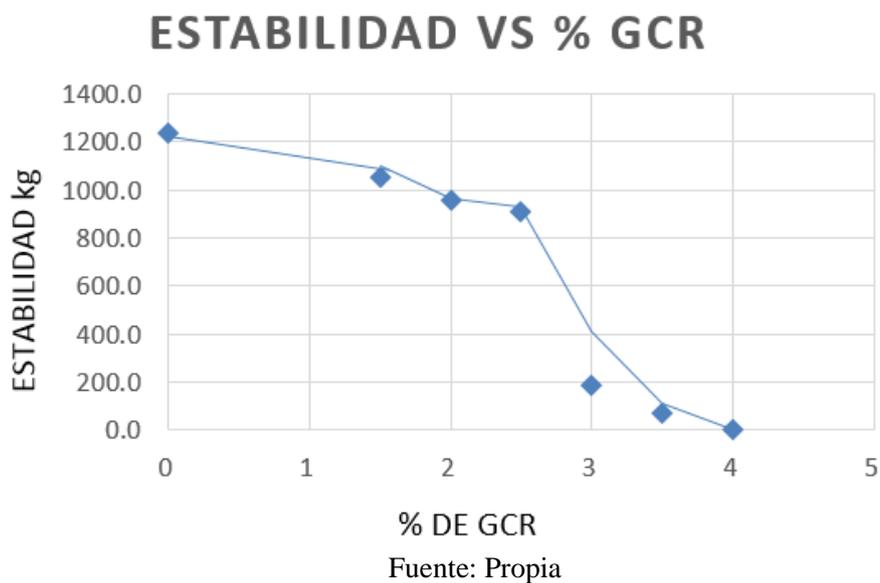
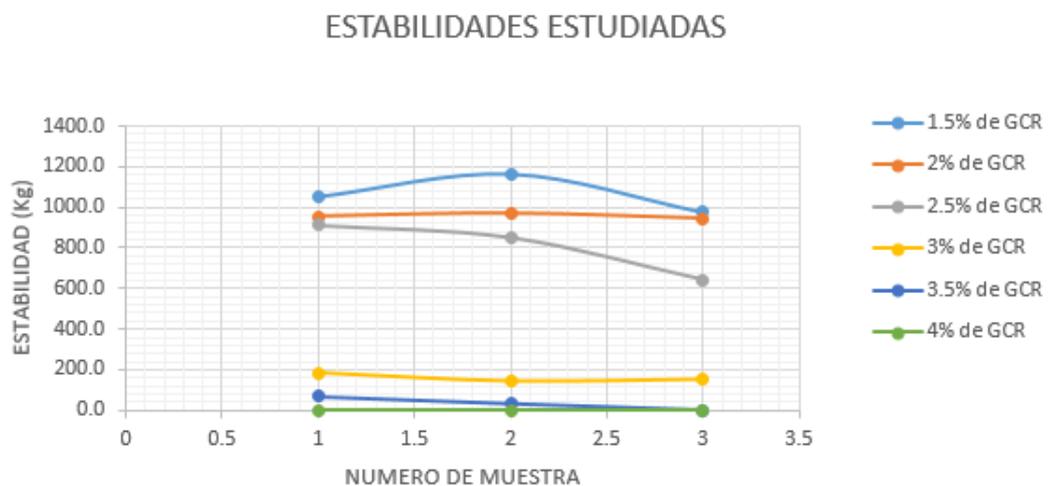


Fig. 25: Grafica de la estabildades estudiadas



Fuente: Propia

Fig. 26: Grafica de flujo con respecto al % de GCR

FLUJO vs % DE GCR

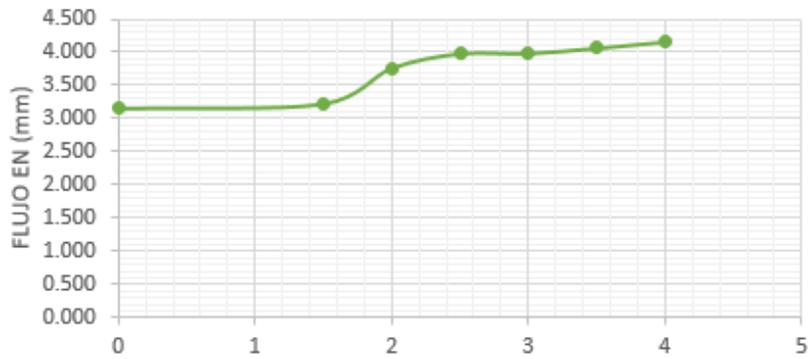
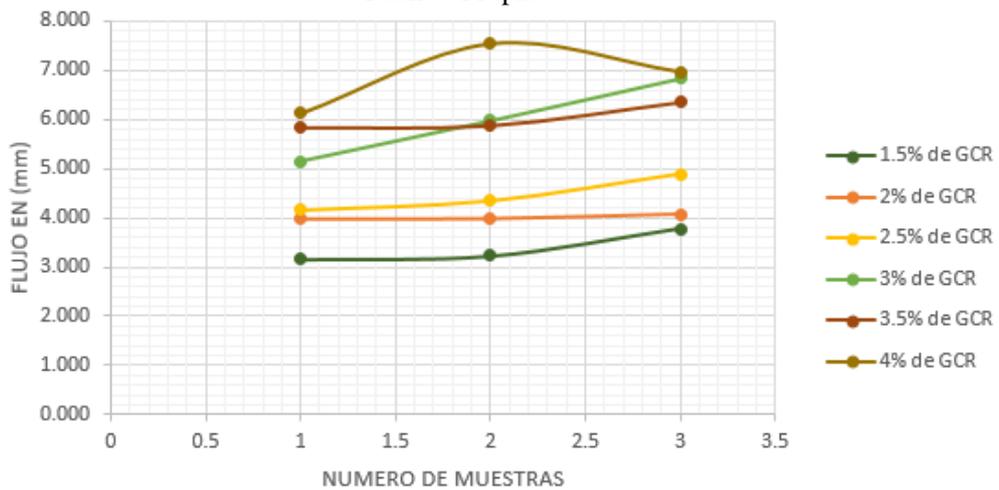


Fig. 27: Valores de Flujo estudiados

VALORES DE FLUJO
Fuente: Propia



Fuente: Propia

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.

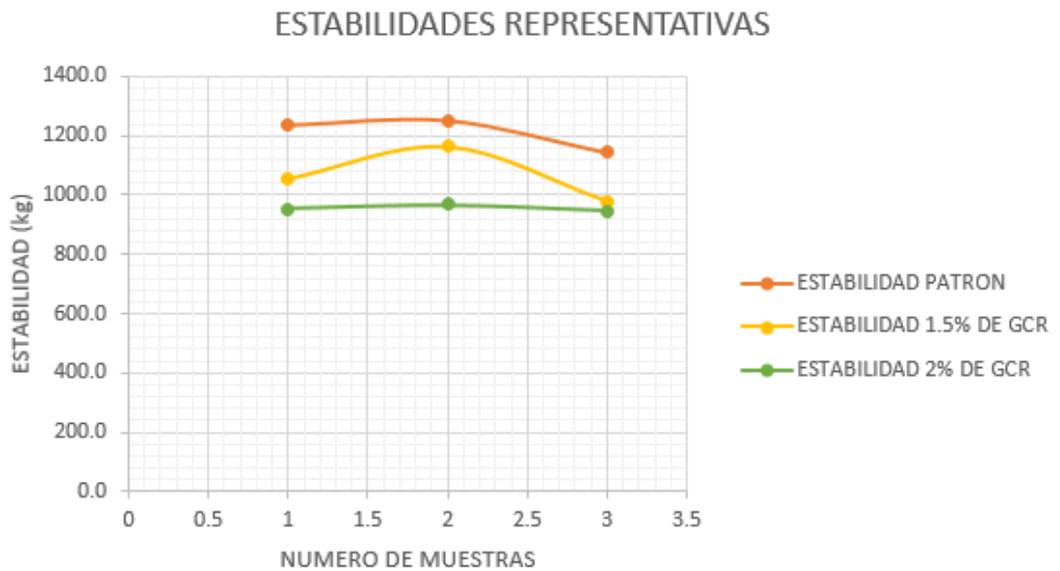
Entonces al revisar los valores aceptables por la norma vigente MTC E-504, se puede ver claramente que solamente cumplieron los requisitos mínimos las mezclas asfálticas con incorporación de GCR entre el 1.5 y 2.0%, además de la muestra patrón. Es importante recalcar que tanto la muestra patrón como 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.

5.7 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 con un 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 tomaron los dos primeros porcentajes de mezcla modificada porque los valores superiores a 2.0% en la incorporación de GCR presentan altos rangos en la pérdida de la estabilidad.

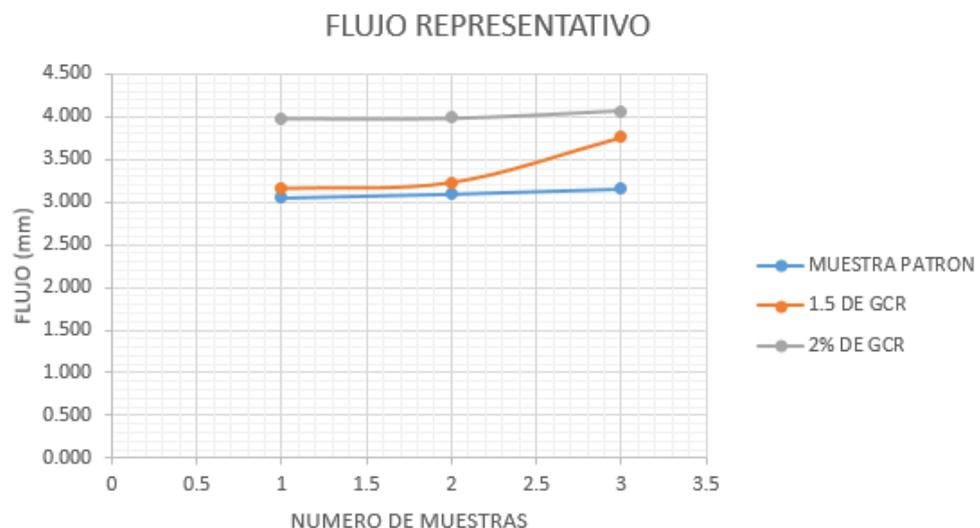
Fig. 28: Estabilidades de muestra patrón y de muestras con % de GCR correspondientes al 1.5 y al 2%



Fuente: Propia

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 graficas; obteniendo mejores resultados con relación al porcentaje de incorporación de GCR del 1.5%

Fig. 29: Flujos de muestra patrón y de muestras con % de GCR correspondientes al 1.5 y al 2%



Fuente: Propia

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 MTC E-504. 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 47: Disminución de la resistencia de las muestras con diferente % de GCR

% DE GCR	ESTABILIDAD (Kg)	FLUJO EN mm	DISMINUCION DE LA RESISTENCIA
1.5	1066.1	3.4	12%
2	955.7	4.0	21%
2.5	802.3	4.5	34%
3	161.9	6.0	87%
3.5	34.4	6.0	97%
4	0.2	6.9	100%
M PATRON	1210.3	3.1	0.00%

Fuente: Propia

Fig. 30: Grafica de la disminución de la resistencia con respecto a la muestra patrón



Fuente: Propia

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.

CAPITULO VI

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

- Se observó y analizo que las partículas de gramo de caucho reciclado en proporciones y tamaños específicos cumplen como agregado en la medición de la resistencia a la compresión de las mezclas asfáltica, porque al incorporar dicho material en la elaboración de mezclas asfáltica satisface con los parámetros establecidos por las normas del MTC que las rigen.
- La influencia que trae la incorporación del uso del triturado de llantas como un agregado de la mezcla asfáltica, un porcentaje de 5 % de asfalto y una dosificación preestablecida trajo 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.
- Debido a los constantes residuos que generan el caucho de llanta, el presente trabajo buscó implementar los cauchos reciclados como material de agregado, esto traerá consigo la disminución de contaminación de dicho material, por lo consiguiente se contribuye al reciclado de estos materiales y darle un uso mas
- La resistencia a la compresión de las muestras (briquetas) fue disminuyendo al incrementarse la incorporación de las partículas de gramo de caucho reciclado, esto se debió a que dicho material generaba mayores porcentajes de vacíos en las partículas de agregado mineral lo cual no permitía una buena compactación de la muestra.

2. CONCLUSIONES

- Fue establecido un procedimiento de diseño con el uso de un 5% de asfalto 20% de agregado pasa 3/4", 35% triturado pasa 1/2", 20% de arena lavada zarandeada, otro 20% en arena triturada y un 1.5 % de GCR, al cumplir con los valores de estabilidad y flujo establecidos por la norma MTC
- Se identificó que solo las muestras (briquetas) con el 1.5% y 2.0% de caucho reciclado cumplieron con los valores superiores de 900kg de estabilidad.
- El valor de la Resistencia a la compresión de las muestras (briquetas) disminuyen con respecto al incrementarse el porcentaje de GCR
- Solo los flujos de las muestras con % de GCR de 1.5% y de 2% fueron aceptadas al cumplir con los parámetros del MTC
- Se observó que el valor de las densidades bulk obtenidas de las muestras (briquetas), fueron disminuyendo a medida que se incrementaba los porcentajes de gramo de caucho reciclado
- El porcentaje de vacíos de las muestras (briquetas) se incrementado a medida que fue aumentada el % de GCR

3. RECOMENDACIONES

- Se presentó una limitación con algunas briquetas, que al parecer no fueron compactadas lo suficientemente, ocasionando un deterioro 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.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ramírez Palma N.I. (2006) *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*, Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. . facultad de ciencias físicas departamento de ingeniería civil.
- Fajardo Chancay y Vergaray Huaman (2014). *Efecto de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas*, Lima, Perú: facultad de ingeniería y arquitectura Escuela profesional de ingeniería civil
- Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 125-137. Diciembre 2009, *Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura*: Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)
- Garcia Eiler L.M (2009), *Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro brookfield*: Medellín, Colombia, Centro de investigaciones

viales

- SANCHEZ, A., & F. BELMONTE. (2009). *Análisis de la reutilización de residuos procedentes de la industria del Silestone en la fabricación de mezclas asfálticas*. Granada - España: Universidad de Granada
- RAFAEL ALEXANDER CRESPIAN MOLINA, ISMAEL ERNESTO STACRUZ JEVEL, & PABLO ALBERTO TORRES. (2012). *aplicación del método Marshall y granulometría superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño*. San Salvador.

5. ANEXOS



ANALISI GRANULOMETRICO POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS. FUENTE PROPIA



HORNO PARA LOS ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD



TAMIZADO PARA LOS DIFERENTES
ENSAYOS DE LABORATORIO



ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA



ENSAYO DE DENSIDAD DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS AGREGADOS





ENSAYO DE ABRASIÓN MAQUINA DE LOS ÁNGELES





PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS



PREPARACION DE LAS BIQUETAS MODIFICADAS COJ PARTICULAS DE CAUCHO



HOMOGENIZACION DE LA MEZCLA MODIFICADA



VERIFICACION DE LA TEMPERATURA DE MEZCLADO



PESO DE LA MUESTRA



COMPACTACION DE LA MUESTRA





SE DESMONTA LAS MUESTRAS CON LA GATA HIDRAULICA



PESO DE LAS MUESTRAS MODIFICADAS COMPACTADAS



DENSIDAD DE BULK DE LAS MUESTRAS



MUSTRAS EN BAÑO MARIA A 60°C



MAQUINA DE MARSHALL





MAQUINA DE MARSHALL



**CALIBRACION LA MAQUINA DE
MARSHALL**



ENSAYO DE MARSHALL