

**COMPORTAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS
(ESTABILIDAD, FLUJO Y DENSIDAD) DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON
PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP) Y CAUCHO RECICLADO DE
LLANTAS (CRL)**

**CAMILO ANDRÉS GARZÓN RAMÍREZ
DAVID FERNANDO RODRÍGUEZ RESTREPO**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2014**

**COMPORTAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS
(ESTABILIDAD, FLUJO Y DENSIDAD) DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON
PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP) Y CAUCHO RECICLADO DE
LLANTAS (CRL)**

**CAMILO ANDRÉS GARZÓN RAMÍREZ
DAVID FERNANDO RODRÍGUEZ RESTREPO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
ingeniero civil**

**Asesor Disciplinario
Adolfo Niño Vega
Asesor Metodológico
Jeannette Martínez González**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2014**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTAS DE TABLAS	5
LISTAS DE FOTOGRAFÍAS	6
LISTA DE GRAFICAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS	8
INTRODUCCIÓN	9
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.2 JUSTIFICACIÓN	12
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 MARCO REFERENCIAL	15
2.1 ANTECEDENTES	15
2.2 MARCO REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.2.1 El caucho.....	18
2.2.2 Cementos asfálticos	19
2.2.3 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP).....	21
2.2.4 Método Marshall	22
2.3 MARCO LEGAL.....	22
3 DISEÑO METODOLÓGICO	24
3.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	24
3.2 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	24
3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	24
3.4 INSTRUMENTACIÓN	24
3.5 FASES DE INVESTIGACIÓN	26
3.5.1 Recolección de información.....	26
3.5.2 Obtención y caracterización de los materiales.....	26
3.5.3 Diseño de las mezclas asfálticas de prueba	28

3.5.4	Comparación y el análisis de las características mecánicas de las mezclas de prueba.....	29
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
4.1	CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS (CRL)	30
4.1.1	Caracterización.....	30
4.2	PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP).....	36
4.2.1	Caracterización.....	36
4.2.2	Extracción en frío del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP).....	43
4.2.3	Granulometrías de los agregados del residuo de las extracciones.....	46
4.3	DISEÑO DE MEZCLAS DE PRUEBA MEDIANTE PROBETAS MARSHALL 48	
4.4	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LAS PROBETAS	60
4.5	PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (MÉTODO RICE) Y DENSIDAD (RICE).....	64
4.6	ESTABILIDAD MARSHALL Y FLUJO MARSHALL.....	72
5	CONCLUSIONES.....	77
6	BIBLIOGRAFÍA	80
7	ANEXOS	81
7.1	PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)	81
7.1.1	Extracción en frío Del Pavimento Asfáltico Recuperado.....	81
7.1.2	Tamizado Del Pavimento Asfáltico Recuperado.....	82
7.2	PRUEBAS PARA CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS (CRL).....	83
7.2.1	Caracterización Del Caucho.....	83
7.3	CRONOGRAMA.....	84
7.4	PRESUPUESTO.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: figura de consistencia del cemento asfáltico Modificado y el cemento asfáltico modificado convencional.....	21
Figura 2: extracción del RAP.....	76
Figura 3: granulometría del RAP.....	77
Figura 4: granulometría del caucho.....	78

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1: distribución de tamaños de grano de caucho reciclado (CRL).....	27
Tabla 2: franja granulométricas para mezclas asfálticas en calientes.....	30
Tabla 3: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	32
Tabla 4: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	33
Tabla 5: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	33
Tabla 6: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	38
Tabla 7: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	39
Tabla 8: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.....	40
Tabla 9: promedio de las granulometrías obtenidas del RAP.....	42
Tabla 10: promedio de las granulometrías obtenidas del RAP.....	45
Tabla 11: granulometría de la extracción del RAP.....	46
Tabla 12: granulometría de la extracción del RAP.....	47
Tabla 13: datos de gravedades específicas de los agregados pétreos.....	50
Tabla 14: cálculo de las gravedades Bulk para gravas y finos.....	51
Tabla 15: Porcentajes de gravas y finos de la muestra.....	51
Tabla 16: dosificación de los materiales para diseño TIPO C.....	56
Tabla 17: coeficientes de diseño de la mezcla de prueba.....	56
Tabla 18: pesos de los materiales para diseño.....	56
Tabla 19: dosificación de los materiales para diseño.....	56
Tabla 20: dosificación de los materiales para diseño TIPO B	59
Tabla 21: dosificación de los materiales para diseño TIPO C	59
Tabla 22: dosificación de los materiales para diseño TIPO D	60
Tabla 23: dosificación de los materiales para diseño.....	62
Tabla 24: dosificación de los materiales para diseño.....	63
Tabla 25: peso específico medido.....	65
Tabla 26: del Método Marshall.....	66

Tabla 27: Tabla 450.4 Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.....	68
Tabla 28: Resultados estabilidad Marshall	70
Tabla 29: resultados estabilidad Marshall en briquetas TIPO B, C, D.....	71

LISTAS DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1: tamices utilizados según tabla 2.....	31
Foto 2: dos mil gramos de caucho reciclado de las llantas (CRLI).....	31
Foto 3: material retenido por el tamiz No.1/2.....	31
Foto 4: material retenido por el tamiz No.3/8.....	31
Foto 5: material retenido por el tamiz No.4.....	31
Foto 6: material retenido por el tamiz No.10.....	31
Foto 7: material retenido por el tamiz No.40.....	32
Foto 8: material retenido por el tamiz No.200.....	32
Foto 9: tamaño inicial del RAP.....	36
Foto 10: muestra inicial del RAP.....	36
Foto 11: proceso trituración del RAP.....	36
Foto 12: muestra final RAP.....	36
Foto 13: muestra retenida en 3/8".....	37
Foto 14: muestra retenida en 1/2" ".....	37
Foto 15: muestra retenida en 3/4" ".....	37
Foto 16: muestra retenida en No.4".....	37
Foto 17: muestra retenida en No.10".....	37
Foto 18: muestra retenida en No.40".....	37
Foto 19: muestra retenida en No.80".....	38
Foto 20: muestra retenida en No.200".....	38
Foto 21: maquina extractora usa para obtener el AC del RAP.....	44
Foto 22: proceso de la extracción.....	44
Foto 23: RAP caliente a 60°C con gasolina (500ml) en el recipiente de la extractora.....	44
Foto 24: filtro después Extracción.....	44
Foto 25: comparación entre la muestra del RAP y la muestra obtenida después de la extracción.....	44
Foto 26: calentamiento de la muestra para obtener su condición SSS.....	49
Foto 27: prueba del cono para chequear la condición SSS.....	49
Foto 28: introducción del agregado fino en el picnómetro.....	49
Foto 29: eliminación de las burbujas de aire.....	49
Foto 30: peso final de la muestra con picnómetro y agua.....	49

Foto 31: moldes para las briquetas Marshall.....	53
Foto 32: engrasa miento de los moldes.....	53
Foto 33: colocación de la muestra en los moldes	53
Foto 34: golpeteo con la espátula en la muestra.....	53
Foto 35: compactación de la mezcla con el martillo Marshall.....	54
Foto 36: cambio de lado de la muestra.....	54
Foto 37: equipo de armado de la briqueta.....	54
Foto 38: compactación final de la briqueta.....	54
Foto 39: enfriamiento de la muestra.....	54
Foto 40: proceso de la extracción de la briqueta del molde.....	55
Foto 41: dosificación original del CRLL.	57
Foto 42: muestra calentada para su posterior compactación.....	57
Foto 43: briqueta TIPO C con la dosificación inicial.....	58
Foto 44: modo de disgregación de las briquetas.....	58
Foto 45: desmoronamiento briqueta.....	58
Foto 46: separación de las partículas.....	58
Foto 47: briquetas TIPO A.....	61
Foto 48: Proceso Bulk.....	61
Foto 49: Peso sumergido.....	62
Foto 50: Probeta parafinada.....	62
Foto 51: Comparación entre una probeta parafinada.....	62
Foto 52: briquetas en el horno.....	62
Foto 53: equipo para el ensayo RISE.....	64
Foto 54: válvula para la presión.....	64
Foto 55: muestra más agua antes del ensayo.....	64
Foto 56: muestra más agua después del ensayo.....	64.

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-2.....	34
Grafica 2: granulometría del CRLL tabla 3.....	34
Grafica 3: granulometría del CRLL tabla 4.....	35
Grafica 4: granulometría del CRLL tabla 5.....	35
Grafica 5: Granulometría RAP tabla 6.....	39
Grafica 6: Granulometría RAP tabla 7.....	40
Grafica 7: Granulometría RAP tabla 8.....	41
Grafica 8: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-1.....	42
Grafica 9: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-2.....	43
Grafica 10: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-2.....	47

Grafica 11: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-2.....	48
Grafica 12 estabilidad Marshall.....	71
Gráfica 13 flujo Marshall.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO: Asociación Americana De Carreteras Estatales Y Transportes Oficiales

AC: Cemento asfáltico

CRL: Caucho Reciclado De Las Llantas

INVIAS: El Instituto Nacional De Vías

MDC: Mezcla Densa en Caliente

RAP: Pavimento Asfáltico Reciclado.

RPM: Revolución Por Minuto

INTRODUCCIÓN

La investigación presente está basada en el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente tipo MDC – 02 de prueba, utilizando materiales de rehúso no convencionales como Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) y Caucho Reciclado de la Llantas (CRL), como reemplazo del agregado mineral y de las cuales se quiere determinar la Estabilidad, Flujo y densidad Bulk, además de otras propiedades que por medio de fórmulas se puedan obtener para dar más parámetros que se puedan comparar con el artículo 450 – 07 del INV E.

La vía de objeto del presente es de tipo experimental la cual se desarrollará de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma INVIAS dependiendo de cada uno de los ensayos a realizar, las cuales nos permite tener y realizar una evaluación de cada una de los resultados obtenidos tanto a los insumos a utilizar como a las briquetas de prueba.

Con los resultados finales se establece el funcionamiento que pueda tener estos diseños, además del porcentaje a usar de cada uno de los insumos y con qué porcentaje de cemento asfáltico se deben producir. Esta investigación está apoyada por la línea de Geotecnia la cual tiene como nombre “Geotecnia Grancolombiana para el desarrollo de la infraestructura física y regional sostenible y la calidad de vida”.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia existe un serio problema ambiental debido a la gran cantidad de llantas que finalizan su vida útil y en muchas ocasiones van a parar a lo largo de un río, un botadero al aire libre o en el peor de los casos realizando quemas ilegales; lo anterior puede ocasionar riesgos a la salud de las personas. En total, existen alrededor de 61000 toneladas de residuos de llanta en la ciudad de Bogotá (dato del 2008)¹, es por ello importante tratar de darle un buen uso a estos elementos que finalizaron su labor, convirtiéndolos en un componente fundamental para diferentes procesos, como lo es por ejemplo, en la incorporación y generación de alternativas de nuevos componentes asfálticos.

Por lo tanto, con las necesidades de competitividad del país, las vías en Colombia han reducido sus niveles de servicios hasta puntos críticos, lo que genera una necesidad de cambio que procure promover una renovación y optimización de éstas. Dentro de las metodologías con potencial de utilización para la conservación y/o rehabilitación de las superficies asfálticas, se acude al fresado y reciclaje de las capas asfálticas antiguas. Cuando se realiza este proceso se obtienen volúmenes importantes de RAP, el cual no es aprovechado para su utilización de manera sistemática; en el momento en que se disponga de procedimientos técnicamente viables, el uso del RAP podría producir grandes beneficios empezando por los costos de construcción y reparación de las vías.

Dentro de los avances e investigaciones recientes, han surgido nuevas metodologías para el diseño de mezclas asfálticas que han permitido minimizar el daño que se le hace a los recursos del medio ambiente con los contaminantes que éstas generan, ya que se utilizan materiales que no son biodegradables, pero que son indispensables para mantener y mejorar las características mecánicas de las mezclas asfálticas. Uno de los aspectos relevantes, hace referencia a la búsqueda de una disminución de los costos de producción, reduciendo la necesidad de uso del asfalto y agregados vírgenes. Por ello, en los últimos años se ha intentado acudir a insumos no convencionales en la tecnología de los pavimentos asfálticos, como puede ser el caucho CRLL (producto del reciclaje de neumáticos usados) y el RAP (por sus siglas en inglés correspondería a Pavimento Asfáltico Reciclado) que usualmente son materiales que se dejan a la intemperie y a veces son usados

¹ Redacción vehículos. ESTE ES EL DESTINO FINAL DE LAS LLANTAS DE SU VEHÍCULO. En: El Tiempo. Bogotá D.C. 12, Julio, 2013. 1 p

para el diseño de mezclas asfálticas y por algunos entes del estado para la reparación de vías locales.

En este trabajo se pretende analizar el comportamiento de las características mecánicas de una mezcla asfáltica, la cual en su diseño contienen RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) y CRLL (producto del reciclaje de neumáticos usados). Debido a lo anterior se procurará establecer, el comportamiento mecánico que presentan las mezclas asfálticas con CRLL y RAP, básicamente las pruebas que se puedan desarrollar con la instrumentación disponible en la facultad de ingeniería civil, tales como estabilidad Marshall, flujo Marshall, pesos específicos y características de los vacíos de las mezclas asfálticas de prueba.

Dado lo anterior se busca responder el siguiente interrogante ¿Cómo se comportan las características mecánicas que presentan las mezclas asfálticas que utilizan CRLL y RAP?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El pavimento de tipo asfáltico, es un producto que a través del tiempo ha ido modificando su diseño y por esta misma razón sus componentes. Esto ha generado que investigadores se concentren en su estudio, para comprobar su viabilidad económica, su resistencia, su comportamiento y demás características mecánicas. En los últimos años se ha implementado la utilización de varios materiales no biodegradables para el diseño de las mezclas asfálticas, sin que a la fecha, en nuestro medio, esta práctica sea de uso comercial en las obras de infraestructura vial.

Uno de los materiales usados para tal fin es el caucho que compone las llantas de los automóviles, camiones, buses y busetas; ese caucho es un producto que se obtiene del látex y la secreción de algunas plantas. Para la fabricación de esos neumáticos se utiliza entre 60% y 70% de la totalidad del caucho que se produce a nivel mundial; la composición básica para una llanta de automóvil, que pesa unas 21 libras corresponde a: caucho sintético, caucho natural, carbón, cordones de acero, poliéster y nylon, alambre para talón, químicos, ceras, aceite y pigmentos. Esta composición hace que la llanta -o mejor el caucho- sea un material altamente contaminante para el planeta y por ello la importancia de realizar un proceso de reciclaje, ya que muchas de estas llantas terminan en botaderos al aire libre, a los lados de los ríos o en el peor de los casos quemándolas (la quema de llantas produce elementos tóxicos como azufre y benceno) afectando la salud de las personas y el medio ambiente. En Colombia el consumo de llanta es de alrededor de 4.000.000 de unidades anuales, las cuales se distribuyen de la siguiente manera: 1 millón para camiones, 2.2 millones para automóviles y 0,8 millones para camionetas. Es importante mencionar que la vida útil de cada llanta es alrededor de 18 meses. Los pesos promedio para las carcasas usadas son 7 kg. para autos; 15 kg. para camionetas y 50 kg. para camiones, con lo cual el consumo de llantas es del orden de las 77.400 toneladas al año².

Aunque es importante reconocer que ya se han hecho diferentes estudios y ensayos a cerca de las mezclas asfálticas que incorporan asfaltos modificados con el caucho, producto del reciclaje de las llantas en su diseño, también es de gran importancia mencionar que en esta ocasión lo que se pretende, es realizar mezclas asfálticas de prueba con la incorporación no solo del caucho procedente del reciclado de las llantas sino también con el material denominado RAP. Bajo

² Fuente: ALCOFA, *El sector Automotor Colombiano*, 2008. Manual Estadístico 28

ese esquema, se podría solucionar otro problema, al poder incorporar los grandes volúmenes del RAP, que generalmente no tienen una utilización final.

Bajo las premisas, si bien se puede deducir que las mezclas asfálticas en análisis se podrían producir de dos maneras diferentes, es decir utilizando el caucho del reciclaje de las llantas a manera de agregado virgen o modificando el asfalto con el caucho del reciclaje de las llantas, también se puede colegir que las características y comportamiento de las mezclas asfálticas así generadas, deben ser diferentes. Resulta prudente comentar que la modificación de los asfaltos es un proceso industrializado que escapa al alcance del presente proyecto; es por lo anterior que el trabajo se centra en utilizar un granulado del caucho del reciclaje de llantas como agregado de aporte a las mezclas asfálticas de prueba.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento mecánico que presentan las mezclas asfálticas que utilizan CRLL y RAP, por medio de pruebas de laboratorio.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de RAP y CRLL como agregado virgen de adición.
- Determinar la variación del comportamiento de las características mecánicas de las mezclas asfálticas de prueba.
- Comparar los resultados experimentales de las mezclas asfálticas elaboradas con RAP y CRLL, respecto de lo que sería una mezcla asfáltica convencional, en este caso representada por el material denominado RAP.

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 ANTECEDENTES

Según los estudios realizados por Hajj, Sebaaly, y Shrestha³ que evaluaron el impacto de los diferentes porcentajes y de la obtención de RAP de distintos lugares, en las propiedades de las mezclas asfálticas finales en términos de sensibilidad a la humedad, resistencia a formación de surcos, la resistencia a la figuración por fatiga, y la resistencia a la degradación térmica. Para ello utilizaron las técnicas y prácticas definidas por la Comisión Regional de Transporte (RTC) en España, que llevaron a recomendar una mezcla que pudiera soportar las acciones combinadas de tráfico y los agentes medioambientales.

Para esto, se realizó la extracción y/o recuperación de la carpeta asfáltica, de la cual se identificó el grado de cemento asfáltico virgen requerido para producir el grado especificado en la mezcla. También se llevó a cabo un diseño de mezcla donde se identificó el contenido de cemento asfáltico en la mezcla combinada con la realización del método Marshall. Se midieron las humedades en la mezcla final con los respectivos contenidos óptimos de aglutinante por medio del método de la AASHTO T283 “Ensayo de susceptibilidad a la humedad”, la resistencia a la fatiga por medio de la prueba de la viga de flexión, la dilatación térmica por medio de la prueba del esfuerzo, las cuales fueron evaluadas en términos de ahuellamiento, fatiga, daños por humedad, y agrietamiento térmico, que dependiendo de las características del RAP serían modificadas según el grado del aglutinante de la zona de extracción o en otras palabras por su grado de pureza o impureza.

También se variaron los porcentajes de RAP para el diseño de la mezcla y de la cual se concluyó lo siguiente: Cuando los porcentajes de RAP son del 15% y el 30% la mezcla presentaba una resistencia aceptable a daños por humedad. Además generó una mayor resistencia a la degradación térmica, pero con estos mismos porcentajes la mezcla presentó una reducción en la resistencia a la tracción, a la fatiga y, con relación a estos mismos porcentajes, el 15% fue el que mejor comportamiento presentó frente a la humedad, estos resultados se dan sin importar la fuente o la pureza del RAP.

³ HAJJ, Y. Elie, SEBAALY E. Peter Y SHRESTHA Raghubar. Laboratory Evaluation of Mixes Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP), Road Materials and Pavement Design. En: Taylor & Francis. University Nevada. 19, septiembre, 2011. Sección 10:3, 495-517p

Por otra parte, Angulo y Duarte⁴ realizaron una investigación de la modificación de un asfalto con CRL, en la que se buscaba comparar las características mecánicas de este tipo de mezclas, los costos de producción, los daños sufridos por estas mezclas en diferentes factores del entorno y las diferentes variables acerca de su realización.

Debido a los distintos procesos que existen para la obtención del CRL, lo primero que se realizó es la caracterización de este material, ya que definido el tamaño del grano se decide el método de diseño de las mezclas asfálticas modificadas con cauchos, después de realizado este proceso se realizó la caracterización del cemento asfáltico para ello utilizaron las técnicas y prácticas definidas por el INVIAS.

Para el diseño de la mezcla se utilizó una temperatura de 165°C durante 45 minutos, esta temperatura es la aconsejable debido a que a temperaturas mayores se pueden generar efectos contraproducentes en el cemento asfáltico como lo es la pérdida de material volátil, se acelera su proceso de oxidación lo que conlleva a un envejecimiento prematuro y a un cambio desfavorable en las propiedades originales.

Con el material ya caracterizado se procedió a realizar los ensayos pertinentes los cuales fueron: penetración, punto de ablandamiento, fatiga, ductilidad, punto de chispa y viscosidad absoluta. En este estudio se pudo establecer que con la adición de CRL al asfalto virgen, la recuperación elástica por torsión aumenta entre un 100 y un 300%, lo que genera que el asfalto tenga grandes deformaciones. También establecieron que por cada tonelada de cemento asfáltico se puede utilizar 285 kilogramos de CRL, esta relación es de gran importancia, ya que propone una alternativa de carácter ambiental para el manejo de estos residuos sólidos.

Por último, es importante mencionar la investigación de Xiao y Amirkhanian⁵ en este caso utilizaron el CRL y el RAP en diferentes porcentajes con el fin de determinar el módulo de elasticidad de un pavimento flexible. Esta investigación de tipo experimental usó el caucho con porcentajes de 0 %, 5 %, 10% y 15%, y de

⁴ ANGULO Ricardo y Duarte José Luis. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero químico. Bucaramanga, Colombia. Universidad industrial de Santander, Facultad de Ciencias Físicoquímicas, 2005. 94p

⁵ XIAO Feipeng y Serji N. Amirkhanian. "Resilient Modulus Behavior of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement". Road Materials and Pavement Design. En: Taylor & Francis. Clemson. 19, September, 2011. Sección, 9:4, 633-649p

RAP con porcentajes de 0 %, 15 %, 25% y 30%. El tamaño del caucho que se utilizó en esta investigación corresponde a un pasa tamiz número 40 (0.425 mm), la extracción de las propiedades y/o aglutinantes del RAP se hicieron de acuerdo con la norma técnica AASHTO TP 2-01 (Método de prueba estándar para la extracción cuantitativa y Recuperación de Asfalto Carpeta de Mezclas Asfálticas) y ASTM D 5402 (Práctica estándar para la recuperación de asfalto de la solución Utilizando el evaporador rotatorio).

Para el diseño de la mezcla se usó polvo del caucho del reciclado de las llantas de los automóviles, el aglutinante viejo el cual fue obtenido del RAP o el fresado del pavimento y un aglutinante virgen, además de esto para la mezcla de estos componentes fue necesario utilizar un mezclador mecánico utilizando un tiempo de reacción de 30 minutos, una temperatura de reacción de 177° C (350° F), y una velocidad de mezcla de 700 rpm.

Después de obtener la mezcla asfáltica se realizaron diferentes estudios a su comportamiento: viscosidad, módulo de corte y ángulo de fase aglutinante, la susceptibilidad a la humedad, módulo resiliente y módulo de elasticidad esto se realizó por medio de ensayos de laboratorios siguiendo los procedimientos establecidos por las normas técnicas AASHTO en cada uno de los respectivos casos.

En conclusión se puede decir que debido al uso del polvo del caucho y del RAP la viscosidad de la mezcla asfáltica aumenta, pero depende del estado en que se encuentre las propiedades aglutinantes del RAP en uso. La adición del polvo del neumático es de gran eficacia para evitar el envejecimiento prematuro sin importar la fuente o las propiedades del RAP. El uso de RAP en mezclas modificadas beneficio en la disminución del asfalto virgen y aumentó el valor de su módulo de resistencia en diferentes condiciones ambientales. Además, el polvo de neumático adicionado a una mezcla resulta en un aumento en el contenido de aglutinante de asfalto virgen y una disminución en su resistencia.

2.2 MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

Las mezclas asfálticas se han caracterizado por su gran variedad de componentes en su diseño, en este proyecto se pretende hacer un diseño de mezcla asfáltica partiendo de componentes reciclados que son el RAP y el CRL, y del uso del AC. Además de establecer el método por el cual se va a realizar este diseño, para ello es importante reconocer y describir cada uno de los procedimientos; con los que se llevaran a cabo ensayos en donde se simularan el comportamiento que sufrirá

el material diseñado, para así determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas con los materiales anteriormente mencionados y descritos a continuación.

2.2.1 El caucho

Los cauchos es un material poliméricos donde sus dimensiones pueden variar según el esfuerzo al que sean sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira⁶. El caucho es una sustancia natural compleja (aunque también se puede sintetizar), que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica, que se encuentra en el jugo lechoso de gran número de plantas tropicales. El sintético que posee las mismas propiedades, se obtiene a partir de hidrocarburos insaturados.

✓ Caucho sintético

Puede llamarse caucho sintético a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural⁷. Se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros. Después de su fabricación, el caucho sintético se vulcaniza.

✓ Caucho reciclado de llanta

El reciclado de llanta pertenece al grupo de los cauchos sintéticos; su utilización se orienta a dar, una nueva utilidad a este material que está en desuso, para evitar la contaminación y reducir el uso de nuevos productos manufacturados⁸.

La obtención del CRLR se inicia con el acopio y reciclado de llantas, que pasa por un proceso de trituración y pulverización para luego reutilizarlo en la fabricación ya sea de artículos de uso diario juegos infantiles, suelas de zapatos, partes de dispositivos electrónicos y en el uso constructivo de vías y carreteras. De este

⁶ CASTRO, Guillermo. Materiales y compuestos para la industria del neumático, Argentina, 2008, p 19

⁷ Ibid., P 19

⁸ Artículo de INTI. Reciclado y disposición final de neumáticos. [En línea]. <http://goo.gl/gUKNZs>. [Fecha de consulta]: Septiembre 6 del 2013

proceso se obtienen otros materiales que no son de uso para la elaboración de una mezcla asfáltica, tales como el alambre de acero y cuerdas de nylon, que podrán disponerse para otro tipo de uso, ya sea para su fundición, en el proceso del reciclaje de las llantas.

En la industria para la producción de neumáticos, la tendencia actual corresponde a la utilización del petróleo como aditivo, gracias a ello se ha conseguido fabricar neumáticos de larga duración. Otros dos avances importantes son el desarrollo de la espuma de caucho sintética, que se usa en tapicería, colchones y almohadas, y el caucho bruto de superficie arrugada para la industria del calzado.

Al caucho bruto, se le adicionan elementos como: negro de carbón, óxido de zinc, azufre, cauchos regenerados y ablandadores. Cada uno de estos ingredientes cumple una finalidad determinada; el negro de carbón, sirve para aumentar la resistencia a la abrasión. El óxido de zinc es un acelerador de vulcanización, y el caucho regenerado se utiliza para disminuir el costo del neumático acabado. Los productos químicos que actúan como aceleradores se incorporan para acortar el tiempo de vulcanización y para proteger el caucho acabado, del envejecimiento ocasionado por la acción de la luz y del aire.

Los ablandadores o plastificantes, son aceites minerales o vegetales, ceras y alquitranes. De las máquinas de masticación el caucho pasa a través de calandrias, que consisten en tres rodillos huecos colocados uno encima del otro, quedando obligado el caucho a laminarse en hojas finas, y entre los rodillos se introducen también tejidos de algodón, con el objeto de que el producto sea una lámina fina adherida al tejido.

2.2.2 Cementos asfálticos

El asfalto es un material derivado del petróleo, conformado por los hidrocarburos más pesados, de color negro, con características cementantes, que varía de consistencia entre sólido y semisólido a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezclas en caliente. El asfalto se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y además es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis o bases, o las sales.

Los Cementos Asfálticos se presentan como una masa negra y brillante, cuya consistencia varía con la temperatura. Es un producto termo-sensible, es sólido a

temperatura ambiente pero al calentarse se vuelve líquido y vuelve a su estado sólido cuando se enfría. Proviene de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo. Es también elemento base para la fabricación de asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas, asfaltos modificados y asfaltos espumados.

El Cemento Asfáltico es un ligante flexible, impermeable y duradero. Mediante la aplicación de calor disminuye su viscosidad, permitiendo mezclarse con agregados pétreos, obteniéndose así una mezcla cuyas excelentes características han permitido un alto desarrollo tecnológico para su utilización en la ingeniería vial; se clasifican por su consistencia de acuerdo al grado de penetración o por su viscosidad.

Son recomendados para la construcción de carreteras, autopistas, caminos y demás vías y forman parte de la estructura del pavimento de una vía, brindando propiedades de impermeabilidad, flexibilidad y durabilidad aún en presencia de los diferentes agentes externos tales como las condiciones ambientales y las condiciones severas de tráfico⁹.

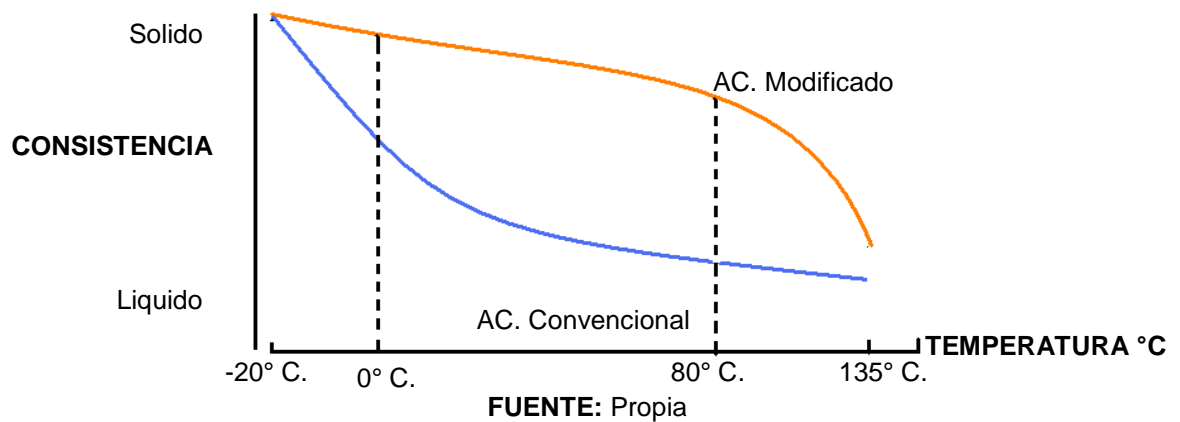
✓ **Cementos asfálticos modificados**

Bajo las situaciones tan exigentes del tránsito aparecen los Cementos Asfálticos modificados, en ellos se han incorporado, por ejemplo, polímeros, con el fin de obtener un producto de propiedades mejoradas (menor susceptibilidad térmica y mayor elasticidad). De este modo se logra producir mezclas de alto desempeño tanto a bajas como a altas temperaturas de servicio.

A temperaturas elevadas el Cemento Asfáltico Modificado con Polímeros tiene un comportamiento sólido elástico, soportando de mejor forma la tendencia a las deformaciones permanentes. A temperaturas bajas tiene un comportamiento líquido viscoso, manteniendo sus características elásticas y evitando el agrietamiento térmico. Las mezclas asfálticas preparadas con estos asfaltos modificados presentan una mejor resistencia a la fatiga, lo que permite obtener superficies más durables y resistentes al desgaste.

⁹ Artículo de REPSOL. Cementos asfálticos. [En línea]. <http://goo.gl/qFPM9n>. [Fecha de consulta]: Septiembre 7 del 2013.

Figura 1: Grafica de consistencia del cemento asfaltico Modificado y el cemento asfaltico modificado convencional.



La aplicación de este producto en nuestros medios se recomienda en pavimentos, sometidos a condiciones climáticas y de cargas extremas, como es el caso de carreteras de alta cordillera y de caminos con pendientes fuertes y tránsito pesado.

2.2.3 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)

Rap, que significa Pavimento Asfáltico Reciclado por sus siglas en inglés¹⁰. Este material que hace parte de la estructura del pavimento, es obtenido por los trabajos de fresado o de perfilado en frío, que consiste en retiro de la capa de rodadura del pavimento para poner otra nueva usando materiales vírgenes o el reciclado de este mismo. Con la tendencia actual del tratamiento de residuos, es el aprovechamiento al máximo de los recursos mediante la reutilización o reciclado antes de su eliminación¹¹.

También puede conseguirse de varias otras fuentes. Las compañías de servicios públicos continuamente hacen cortes y desechan material reciclable valioso. Este material a menudo se encuentra en trozos grandes que requieren ser triturados y procesados. Para utilizar RAP apropiadamente, es mejor manejarlo como si fuera

¹⁰ BROCK, J. Don. Fresado y reciclaje. En: Boletín técnico T-127S. ASTEC. Chattanooga. Septiembre, 1997. 26 p.

¹¹ Botasso. H.G, Cuattrocchio. Informe "Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera." [En línea]. <http://goo.gl/zAVZ9M>. [Fecha de consulta]: Septiembre 26 del 2013.

agregado virgen. Al usarlo en cantidades grandes, se lo debe separar en al menos dos tamaños diferentes para controlar apropiadamente la granulometría.

El tamaño de los materiales fresados oscila de 50 a 100 mm. Por lo tanto, una fresadora funciona bien no sólo para el perfilado en frío, sino también como una máquina que podría reemplazar a la trituradora principal.

2.2.4 Método Marshall

Este método permite diseñar las mezclas asfálticas en caliente. Se utiliza para diseños de laboratorio, pero también se usa para el control de producción de mezclas a escala industrial y además del uso para el control de calidad de las obras¹².

En este método se procede por tanteos hasta obtener el contenido óptimo de cementos asfálticos (AC), para que las mezclas fabricadas con dichos porcentajes, presenten unas características determinadas; las características buscadas se refieren a estabilidad, durabilidad impermeabilidad, manejabilidad y una proporción de vacíos especiales.

2.3 MARCO LEGAL

En este trabajo de grado se utilizaron las siguientes normativas y especificaciones establecidas por instituciones nacionales e internacionales, las cuales se siguieron para obtener los resultados aquí mostrados.

Al RAP se le practicaron pruebas de extracción en frío de acuerdo a la norma de ensayo AASHTO T164 del año 2006, fundamentada en la máquina centrífuga y utilizando como disolvente, en este caso, gasolina. Los agregados pétreos, producto de la extracción en frío, se tamizaron según la norma de ensayo AASHTO T30.

De manera complementaria se adoptaron las normas de ensayo del Instituto Nacional de Vías de Colombia- INVIAS, en su versión del año 2007, que se relacionan a continuación:

- **Norma INV E-222-07** Gravedad específica y absorción de agregados finos.

¹² CACERES, M. Informe “Estado del arte (diseño de mezclas asfálticas)”. [En línea]. <http://goo.gl/InOIKe>. [Fecha de consulta]: Septiembre 26 del 2013.

- **Norma INV E-223-07** Gravedad específica y absorción de agregados gruesos
- **Norma INV E-736-07** porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas Compactadas densas y abiertas
- **Norma INV E-735-07** gravedad específica máxima teórica (Gmm) y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos
- **Norma INV E-748-07** resistencia de mezclas asfálticas en caliente Empleando el aparato Marshall
- INV E-799-07

A manera de consulta, se tuvo acceso a los proyectos de especificaciones y normas de ensayo del Instituto Nacional de Vías de Colombia – INVIAS, que en su versión designada como del año 2013, están próximas a ser adoptadas oficialmente en nuestro país

- **PROYECTO ESPECIFICACIÓN INVIAS 413** suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado
- **PROYECTO ESPECIFICACIÓN INVIAS 450** mezclas asfálticas en caliente (concreto asfáltico y mezcla de alto módulo)

3 DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación pertenece a la línea de geotecnia debido a que el estudio se va a realizar en base al comportamiento de los materiales en los diferentes diseños de las mezclas asfálticas.

3.2 ENFOQUE METODOLÓGICO

Este tipo de investigación está regida por un enfoque cuantitativo, ya que la recolección y el análisis de datos es el fundamento para dar argumentos para aprobar o desaprobar las diferentes hipótesis establecidas, además por medio de estos mismos se puede proporcionar una respuesta a la pregunta de investigación y dar cumplimiento con los objetivos establecidos.

3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este tipo de investigación es experimental, ya que se basa en la aplicación de técnicas controladas sobre un objeto de estudio para explicar su funcionamiento y predecir su comportamiento.

3.4 INSTRUMENTACIÓN

Debido a que esta investigación es de tipo experimental la instrumentación varía de acuerdo a cada ensayo, las herramientas a utilizar están en el anexo 9.1 el cual corresponde a ensayos y caracterización de las muestra, y debido al enfoque la técnica más apropiada es la observación, ya que con ella se determinara los cambios que sufran las características mecánicas de las mezclas asfálticas con RAP y CRL. Los principales instrumentos a utilizar son los siguientes:

- **Tamices**
Un tamiz es una malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el material. Las aberturas que deja el tejido y, que en conjunto constituyen la superficie de tamizado, pueden ser de forma distinta.
- **Dispositivos para moldear probetas**
Consistente en un molde cilíndrico con un collar de extensión y una placa de base plana. El molde deberá tener un diámetro interior de 101.6 mm (4") y una altura interna aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables.
- **Martillo de Compactación**
Es un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 9 g (10 ± 0.02 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457.2 ± 1.524 mm (18 ± 0.06 ")
- **Equipo para extracción de AC**
Es una maquina centrifugadora que funciona adecuadamente A altas velocidades (de 3000 rpm o mayor) de flujo continuo. Con la cual se hará la extracción junto con la ayuda de otros elementos químicos derivados del petróleo.
- **Recipientes de vacío**
Estos elementos deben ser capaces de soportar todo el vacío aplicado y todos deben estar equipados con los accesorios. La abertura del recipiente que permite instalar la bomba de vacíos debe estar cubierta por un pedazo de malla de $75\mu\text{m}$ (No. 200) con el fin de minimizar la pérdida de material fino. Los recipientes de vacío deben tener una capacidad entre 200 y 10000 ml. Se debe evitar utilizar una muestra pequeña en un recipiente grande.
- **Bomba de vacío o aspirador de agua**
Debe ser tal que pueda evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 4.0 kPa (30 mm de Hg) o menos. Cuando se usa una bomba de vacío, una trampa apropiada constituida por uno o más frascos de 100 ml de capacidad o equivalentes, se deben instalar entre el frasco de vacío y la fuente de vacío para reducir la cantidad de vapor de agua que pueda entrar en la bomba.
- **Horno**
Capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}$ F). Este horno es necesario cuando se ensayan muestras diferentes a mezclas preparadas en el laboratorio usando agregados secos al horno. Además de preparar las mezclas para su compactación.

3.5 FASES DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se ejecutara en cuatro fases de investigación y dentro de cada una de las fases estarán sus respectivas actividades, las cuales empiezan con la recolección de información, en segundo lugar se realizará la obtención y caracterización de cada uno de los materiales a utilizar en el diseño de las mezclas asfálticas de prueba, posteriormente se dosificaran las mezclas asfálticas de prueba y finalmente se efectuará la comparación y el análisis de las características mecánicas de las mezclas asfálticas con CRLI y RAP.

3.5.1 Recolección de información

- Se busca información en las diferentes bases de datos acerca de mezclas asfálticas que en su diseño hayan incluido RAP o CRLI.
- Se analiza la información encontrada y se selecciona la que más pueda aportar a la investigación en desarrollo.

3.5.2 Obtención y caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales se realizara por medio de ensayos de laboratorio los cuales están regidos por diferentes normas, las cuales están establecidas por los diferentes entes técnicos reguladores.

✓ Caracterización del caucho reciclado de llantas

De este insumo, la caracterización se centra en la determinación de la composición de los tamaños de los granos de caucho; para los efectos se adoptará la granulometría por tamizado, según la norma INV E 213-07. A manera de orientación de los tamaños de los granos del caucho de reciclaje que se utilizan, pero para la modificación de los cementos asfálticos, se encontró un proyecto de especificación, próxima a ser adoptada por el Instituto Nacional de Vías, tal como se muestra en la tabla 2:

Tabla 1: distribución de tamaños de grano de caucho reciclado (CRLI)

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)					
	2.38	2.00	1.19	0.59	0.30	0.075
	No. 8	No. 10	No. 16	No. 30	No. 50	No. 200
	% PASA					
Tipo A	100	95-100	0-10	-	-	-
Tipo B	-	100	65-100	20-100	0-45	0-5

Fuente: proyecto especificación INVIAS 413-2014

✓ **Caracterización de los Cementos Asfálticos (AC)**

Si se utiliza AC de adición, su caracterización comprende:

- **Viscosidad:** caracteriza el comportamiento del flujo a una temperatura de 60°C y la cual puede ser usada para requerimientos específicos de asfaltos líquidos y cementos asfálticos. Se rige por la norma INVIAS E-716-07 la cual indica su procedimiento.
- **Penetración:** El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas. Se rige por la norma INVIAS E-706-07 la cual indica su procedimiento.
- **Punto de inflamación:** El punto de inflamación representa la temperatura a la cual un asfalto puede calentarse con seguridad, El ensayo se realiza en el "vaso abierto Cleveland " consiste en llenar un vaso de bronce con asfalto, y se calienta a una velocidad gradual de temperatura. Cada cierto tiempo se pasa una llama sobre la superficie hasta que se produzca una inflamación o flash debido a la evaporación de solventes. Esta temperatura representará el punto de inflamación.
- **Ductilidad:** Se rige por la norma INVIAS E-724-07 la cual indica su procedimiento, el cual consiste en formar una probeta de cemento asfáltico con dimensiones determinadas y sostenerlas a un proceso de elongación. Este proceso se efectúa a una temperatura normalizada de 25°C y a una velocidad de 5 cm/min. El ensayo de ductilidad nos da la distancia a la cual se rompe la muestra y se mide en cm.
- **Solubilidad en tricloroetileno o tricloroetano:** Se rige por la norma INVIAS E-713-07 la cual indica su procedimiento, el cual consiste en disolver 2 gramos de asfalto en 100 mililitros de solvente, para luego

filtrar dicha solución y por diferencias de pesos conocer el grado de pureza de los cementos asfálticos y para ello se utiliza actualmente como solvente el tricolor-etileno

✓ **Caracterización del Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)**

En este caso se atenderá a:

- La granulometría de los tamaños de las partículas del RAP, para lo cual se adoptara la norma de ensayo INV E-213. Este resultado permitirá orientar hacia el tipo de mezcla asfáltica en caliente, factible de dosificar con los tamaños de las partículas del RAP y tomando como referencia la especificación 450-07 del Instituto Nacional de Vías.
- La extracción en frío de la mezcla asfáltica que constituye el RAP, para obtener el porcentaje de Cemento Asfáltico de dicha mezcla. Para los efectos se adopta la norma ASTM D2172-05, la cual es una versión modificada del método de ensayo ASTM D1856-95^a conocido como Método Abson.

3.5.3 Diseño de las mezclas asfálticas de prueba

El diseño de las mezclas se realizará según la caracterización de los componentes de ella, en este caso dependerá fundamentalmente de la granulometría del RAP y de la granulometría del CRLL; a las mezclas diseñadas se les practicarán los ensayos correspondientes a la metodología Marshall, tomando como referencia la especificación INVIAS 450-07 y las normas de ensayo INV E 746-07.

Se aclara que para diseño de las mezclas se relacionará, de una parte, la granulometría individual del RAP y de otro lado la granulometría combinada del RAP y del CRLL con las franjas granulométricas establecidas en la tabla 450.2 de la especificación del INVIAS referida con anterioridad. Para las granulometrías combinadas de RAP y CRLL se estiman proporciones de CRLL con valores de 5%, 10% y 15%; con el RAP solo y con las combinaciones de RAP y CRLL se prepararan y compactaran las probetas Marshall necesarias para realizar los diferentes ensayos (estabilidad, flujo, densidad Bulk, porcentaje de vacíos).

Para la preparación y compactación de las probetas, el componente o componentes, se ha previsto llevarlos a una temperatura de mezclado de 110°C;

una vez enfrían las probetas, se colocaran en un baño maría con temperatura de 60°C y posteriormente se procederá al ensayo de estabilidad y flujo.

Dada las características del RAP y los tamaños tan variables de su composición, se practicarán granulometrías a los agregados pétreos resultantes de las extracciones en frío y consecuentemente se establecerán los pesos específicos de esos agregados pétreos.

3.5.4 Comparación y el análisis de las características mecánicas de las mezclas de prueba.

La comparación y el análisis de las probetas de pruebas se realizarán en base a los resultados obtenidos de los ensayos realizados a cada una de las combinaciones establecidas anteriormente, las probetas que tengan un diseño combinado entre RAP y CRLI su comparación se realizará con las probetas que solo contengan RAP y con la especificación 450-07 del INVIAS, en cambio las que solo tienen un insumo (RAP), su comparación y análisis se basará solo en las especificaciones dadas por el INVIAS.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el diseño de las mezclas asfálticas de prueba es importante tener en cuenta la granulometría de los materiales a utilizar; en este caso, la del Caucho Reciclado de Llantas (CRL) y la del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP); es por ello que la primera caracterización que se realizó fue la de la distribución de los tamaños de sus partículas; este procedimiento se hizo siguiendo los parámetros establecidos por la norma INVIAS INVE-213 y relacionando los resultados con la tabla 450.2 franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de la especificación del INVIAS 450-07, que se puede apreciar en la tabla 2. En esta tabla se encuentran los límites granulométricos de los diferentes tipos de mezclas asfálticas, con la cual se enmarcaron las granulometrías de los insumos que se iban a utilizar.

Tabla 2: Franja granulométricas para mezclas asfálticas en calientes

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm/U.S. Standard)									
		3,75	25,5	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
Densa	MDC-1		100	80 -95	67 - 85	60 - 77	43 - 59	29 - 45	14 - 25	8 - 17	4 - 8
	MDC-2			100	80 - 95	70 - 88	49 - 65	29 - 45	14 - 25	8 - 17	4 - 8
	MDC-3					100	65 - 87	43 - 61	16 - 29	9 - 19	5 - 10
Semidensa	MSC-1		100	80 -95	65 - 80	55 - 70	40 - 55	24 - 38	9 - 20	6 - 12	3 - 7
	MSC-2			100	80 - 95	65 - 80	40 - 55	24 - 38	9 - 20	6 - 12	3 - 7
Gruesa	MGC-0	100	75 - 95	65 -85	47 - 67	40 - 60	28 - 46	17 - 32	7 - 17	4 - 11	2 - 6
	MGC-1		100	75 -95	55 - 75	40 - 60	28 - 46	17 - 32	7 - 17	4 - 11	2 - 6
Alto módulo	MAM		100	80 -95	65 - 80	55 - 70	40 - 55	24 - 38	10 - 20	8 - 14	6 - 9







Fuente: propia

4.1 CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS (CRL)

4.1.1 Caracterización

Según la norma INVE-213 la granulometría del agregado en este caso del Caucho Reciclado De Llantas (CRL) se obtuvo adoptando los tamices establecidos en la tabla 2 (foto 1).

Para los procesos se tomaron tres muestras diferentes de dos mil gramos (2000 g) de Caucho Reciclado De Las Llantas (CRLL), cada una; con ello se pretendió establecer a qué tipo de mezcla de las establecidas en la tabla 2, se ajustaba mejor el resultado de la granulometrías practicadas. El procedimiento y el resultado se presentan a continuación:

<p>Foto 1: tamices utilizados según tabla 2</p> 	<p>Foto 2: dos mil gramos de caucho reciclado de las llantas (CRLL)</p> 
<p>Foto 3: material retenido por el tamiz No.1/2</p> 	<p>Foto 4: material retenido por el tamiz No.3/8</p> 
<p>Foto 5: material retenido por el tamiz No.4</p> 	<p>Foto 6: material retenido por el tamiz No.10</p> 

Fuente propia

Tabla 3: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.

RECIPIENTE 21 - CRLI (30-ene-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (Gr)	W Recipiente. (Gr)	W Muestra (Gr)	%retenido	%acumulado	% pasa
¾						
½	383	380	3	0,15	0,15	99,85
3/8	399	387	12	0,60	0,75	99,25
#4	507	377	130	6,50	7,25	92,75
#10	976	386	590	29,50	36,75	63,25
#40	1325	262	1063	53,15	89,90	10,10
#80	427	255	172	8,60	98,50	1,50
#200	78	49	29	1,45	99,95	0,05
Pasa 200	402	401	1	0,05	100,00	0,00
Total			2000	100,00		

Fuente propia

Tabla 4: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.

RECIPIENTE 21 - CRLI (06-feb-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (Gr)	W Recipiente. (Gr)	W Muestra (Gr)	%retenido	%acumulado	% pasa
¾						
½	44	42	2	0,10	0,10	99,90
3/8	45	37	8	0,40	0,50	99,50
#4	88	41	47	2,35	2,85	97,15
#10	667	250	417	20,85	23,70	76,30
#40	1581	261	1320	66,00	89,70	10,30
#80	424	254	170	8,50	98,20	1,80
#200	415	380	35	1,75	99,95	0,05
Pasa 200	402	401	1	0,05	100,00	0,00
Total			2000	100,00		

Fuente propia

Tabla 5: gradación de 2000 gramos de caucho reciclado de las llantas.

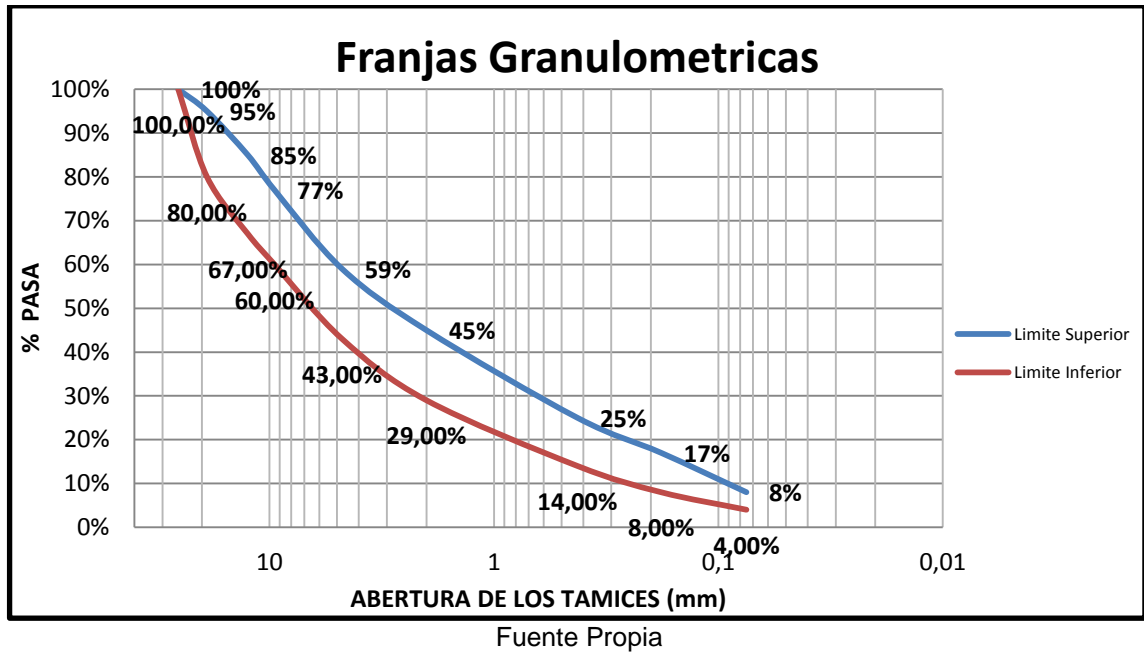
RECIPIENTE 21 - CRLL (06-feb-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (Gr)	W Recipiente. (Gr)	W Muestra (Gr)	%retenido	%acumulado	% pasa
¾						
½	46	42	4	0,20	0,20	99,80
3/8	40	37	3	0,15	0,35	99,65
#4	121	41	80	4,00	4,35	95,65
#10	754	250	504	25,20	29,55	70,45
#40	1474	261	1213	60,65	90,20	9,80
#80	415	254	161	8,05	98,25	1,75
#200	414	380	34	1,70	99,95	0,05
Pasa 200	409	408	1	0,05	100,00	0,00
Total			2000	100,00		

Fuente propia

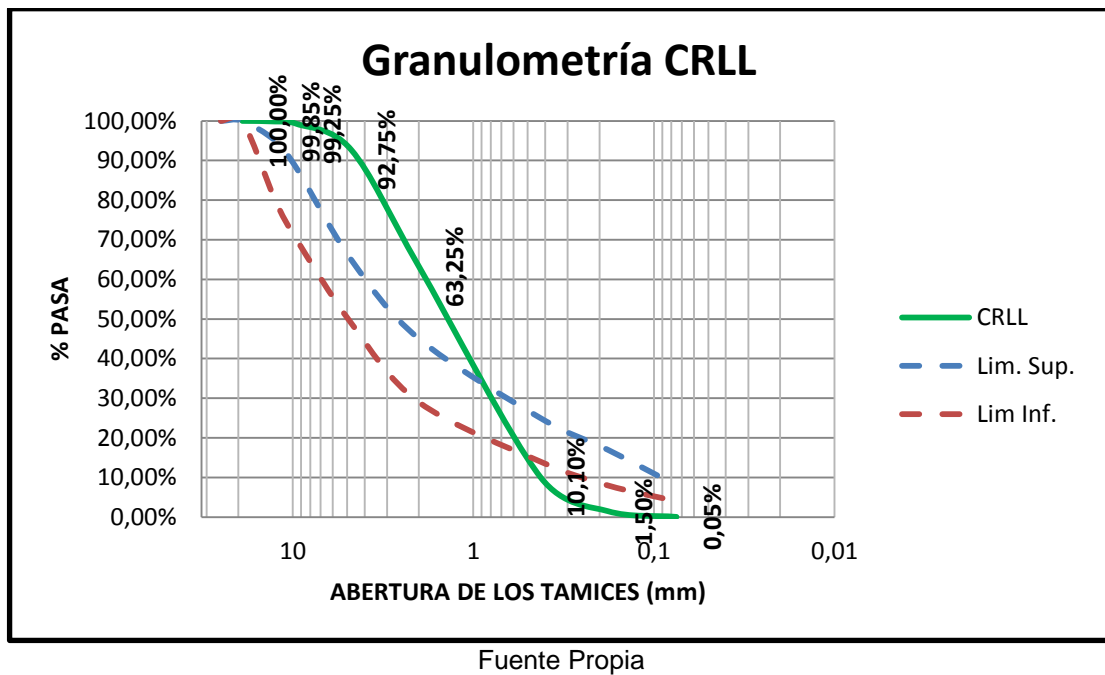
Por observación de los resultados que se obtuvieron en las granulometrías practicadas al CRLL, mostradas en las tablas 3, 4 y 5 en las fotos 3, 4, 5, 6, 7 y 8, al compararlas con las normas de la tabla 2, se consideró que este material se asimila a la mezcla MDC-2.

Para los efectos, se superpusieron de manera gráfica las granulometrías de cada una de las muestras de CRLL ensayadas. Esta condición, se puede apreciar en las gráficas 2, 3 y 4.

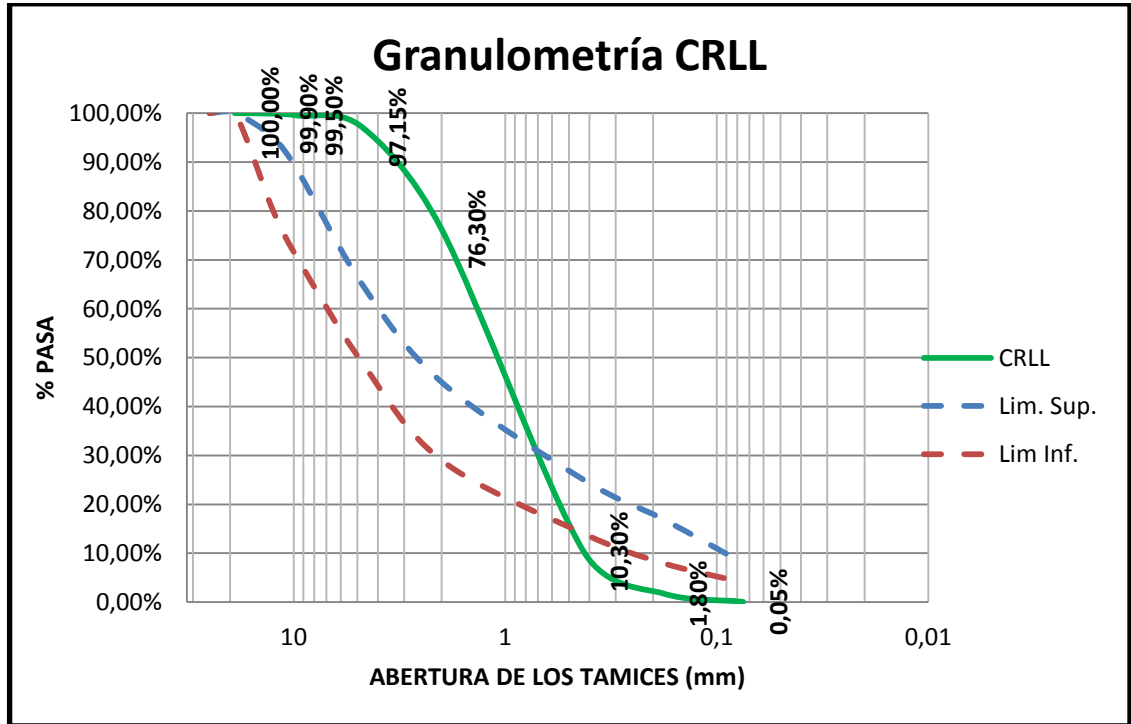
Gráfica 1: límites granulométricos de una mezcla tipo MDC-2



Gráfica 2: granulometría del CRLI tabla 3

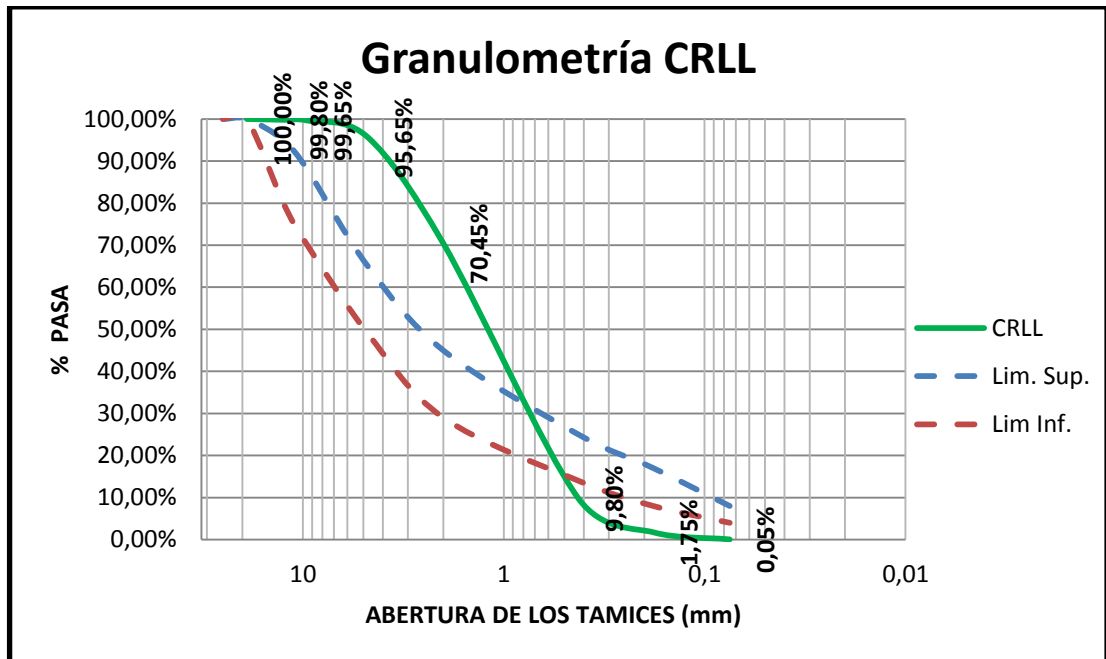


Gráfica 3: granulometría del CRLL tabla 4



Fuente Propia

Gráfica 4: granulometría del CRLL tabla 5



Fuente Propia

4.2 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

4.2.1 Caracterización

De igual forma que con el Caucho Reciclado De Las Llantas (CRL), se evaluó la granulometría del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), con base en la norma INVIAS INVE-213; por la inspección visual del material, se analizó y se consideró prudente practicarse un proceso de trituración tal y como se puede apreciar en las fotos 9,10, 11 y 12; a continuación se ensayaron por tamizado tres muestras de 2000 gramos cada una, obteniendo resultados con los que se pudo establecer que el RAP no disponía de partículas equivalentes al llénate mineral (pasa tamiz No. 200), como se puede apreciar en las fotos 13 a la 20. Como consecuencia y dado que el material pasaba el 100% por el tamiz de 1", inicialmente se dedujo que este podría manejarse como componente de mezclas asfálticas en caliente de los tipos MDC - 1 o MDC - 2 definidas en la tabla 2.

Foto 9: Tamaño inicial del RAP



Foto 10: Muestra inicial del RAP



Foto 11: Proceso trituración del RAP



Foto 12: Muestra final RAP



Fuente: Propia

Foto 13: muestra retenida en 3/8"



Foto 14: muestra retenida en 1/2"



Foto 15: muestra retenida en 3/4"



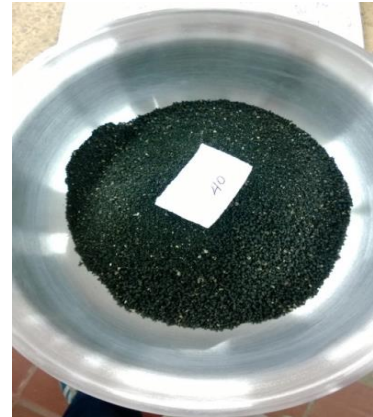
Foto 16: muestra retenida en No.4



Foto 17: muestra retenida en No.10



Foto 18: muestra retenida en No.40



Fuente: Propia

Foto 19: muestra retenida en No.80**Foto 20:** muestra retenida en No.200

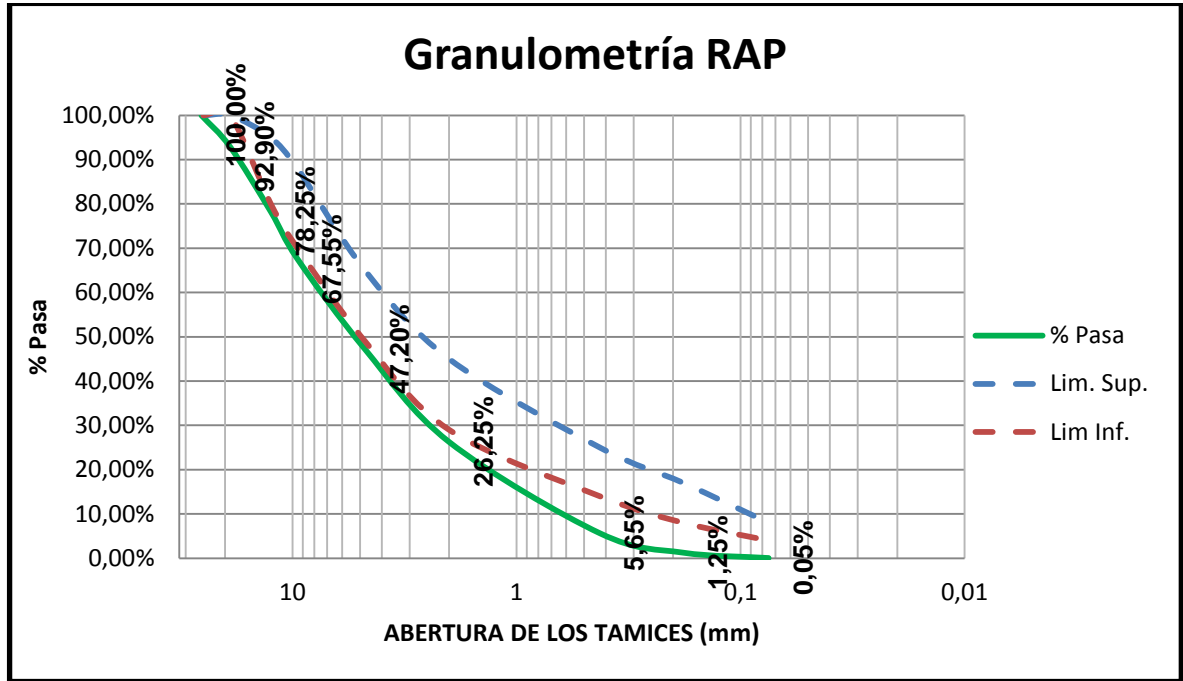
En seguida se presentan los resultados de lo ensayo granulométricos de cada una de las tres muestras de RAP ensayadas, así como la superposición grafica de esas granulometrías con la franja granulométrica correspondiente a la mezclas asfáltica tipo MDC – 2. Ver tablas 6, 7 y 8 y graficas 5, 6 y 7.

Tabla 6: gradación de 2000 gramos de pavimento asfaltico recuperado (RAP)

RECIPIENTE 22 - RAP (19-FEB-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (g)	W Recipiente. (g)	W Muestra (g)	%retenido	%acumulado	% pasa
1"						100,00
3/4"	255	113	142	7,10	7,10	92,90
1/2"	407	114	293	14,65	21,75	78,25
3/8"	332	118	214	10,70	32,45	67,55
No. 4	521	114	407	20,35	52,80	47,20
No. 10	531	112	419	20,95	73,75	26,25
No. 40	522	110	412	20,60	94,35	5,65
No. 80	200	112	88	4,40	98,75	1,25
No. 200	136	112	24	1,20	99,95	0,05
Pasa 200	400	399	1	0,05		0,00
Total			2000	100,00		

Fuente Propia

Gráfica 5: Granulometría RAP tabla 6



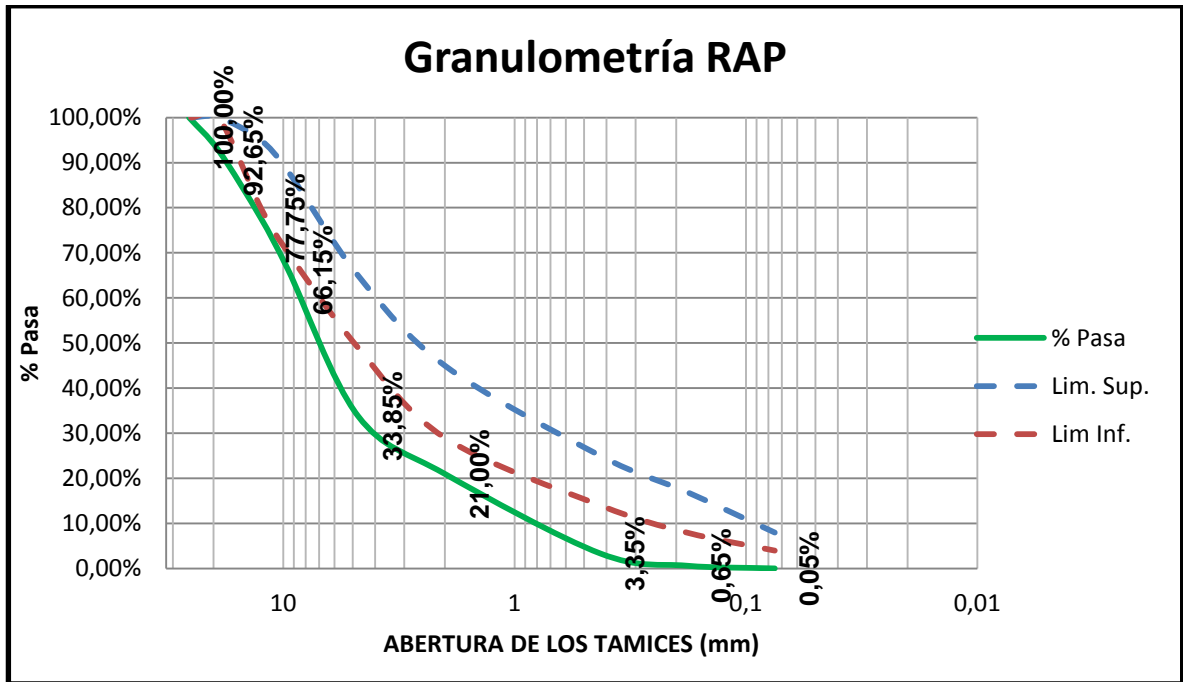
Fuente Propia

Tabla 7: gradación de 2000 gramos de pavimento asfáltico recuperado (RAP)

RECIPIENTE 22 - RAP (19-FEB-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (g)	W Recipiente. (g)	W Muestra (g)	%retenido	%acumulado	% pasa
1"						100,00
3/4"	260	113	147	7,35	7,35	92,65
1/2"	412	114	298	14,90	22,25	77,75
3/8"	350	118	232	11,60	33,85	66,15
No. 4	760	114	646	32,30	66,15	33,85
No. 10	369	112	257	12,85	79,00	21,00
No. 40	463	110	353	17,65	96,65	3,35
No. 80	166	112	54	2,70	99,35	0,65
No. 200	124	112	12	0,60	99,95	0,05
Pasa 200	370	369	1	0,05		0,00
Total			2000	100,00		

Fuente Propia

Gráfica 6: Granulometría RAP tabla 7



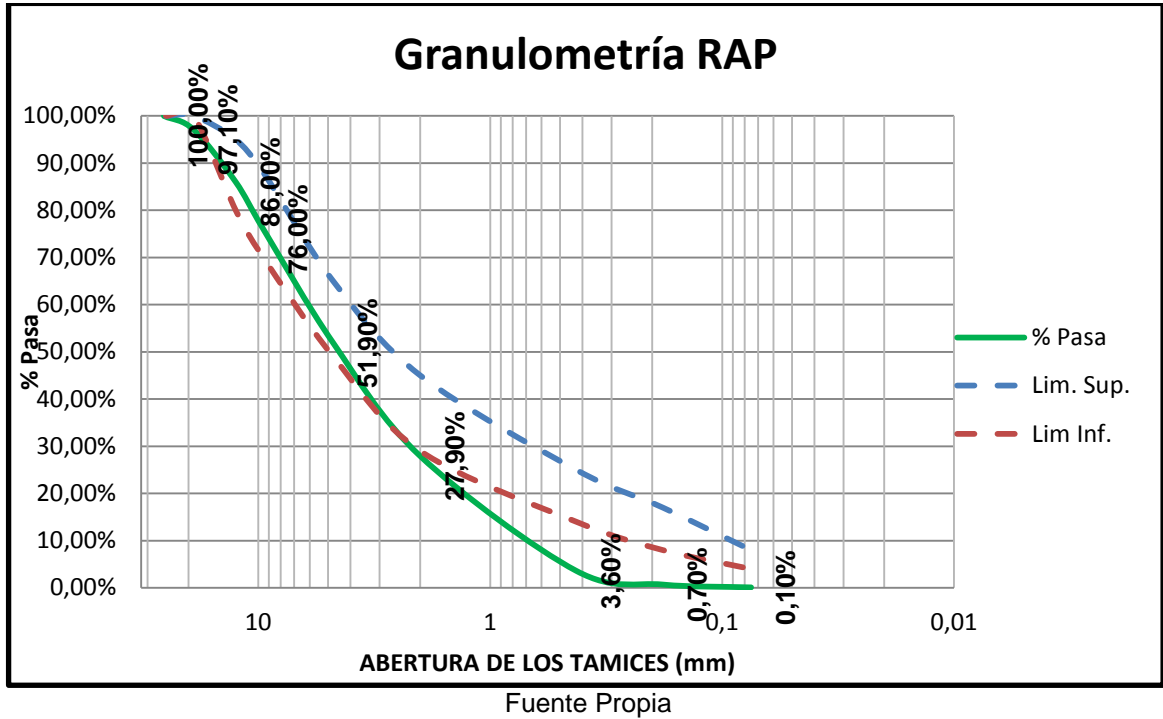
Fuente Propia

Tabla 8: gradación de 2000 gramos de pavimento asfaltico recuperado (RAP)

RECIPIENTE 114 - RAP (20-FEB-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (g)	W Recipiente. (g)	W Muestra (g)	%retenido	%acumulado	%pasa
1"						100,00
3/4"	172	114	58	2,90	2,90	97,10
1/2"	328	106	222	11,10	14,00	86,00
3/8"	312	112	200	10,00	24,00	76,00
No. 4	594	112	482	24,10	48,10	51,90
No. 10	590	110	480	24,00	72,10	27,90
No. 40	598	112	486	24,30	96,40	3,60
No. 80	248	190	58	2,90	99,30	0,70
No. 200	128	116	12	0,60	99,90	0,10
Pasa 200	402	400	2	0,10	100,00	0,00
Total			2000	100,00		

Fuente Propia

Gráfica 7: Granulometría RAP tabla 8



Por observación de los resultados consignados en las tablas 6, 7 y 8, se puede reafirmar que el material no dispone de partículas del tamaño del denominado llenante mineral (pasa tamiz No. 200); adicionalmente, es palpable la aproximación de la granulometría de cada muestra de material, a la especificación granulométrica de la mezcla típica MDC – 2, pero lógicamente se presenta deficiencia o exceso de algunos tamaños para un ajuste razonable.

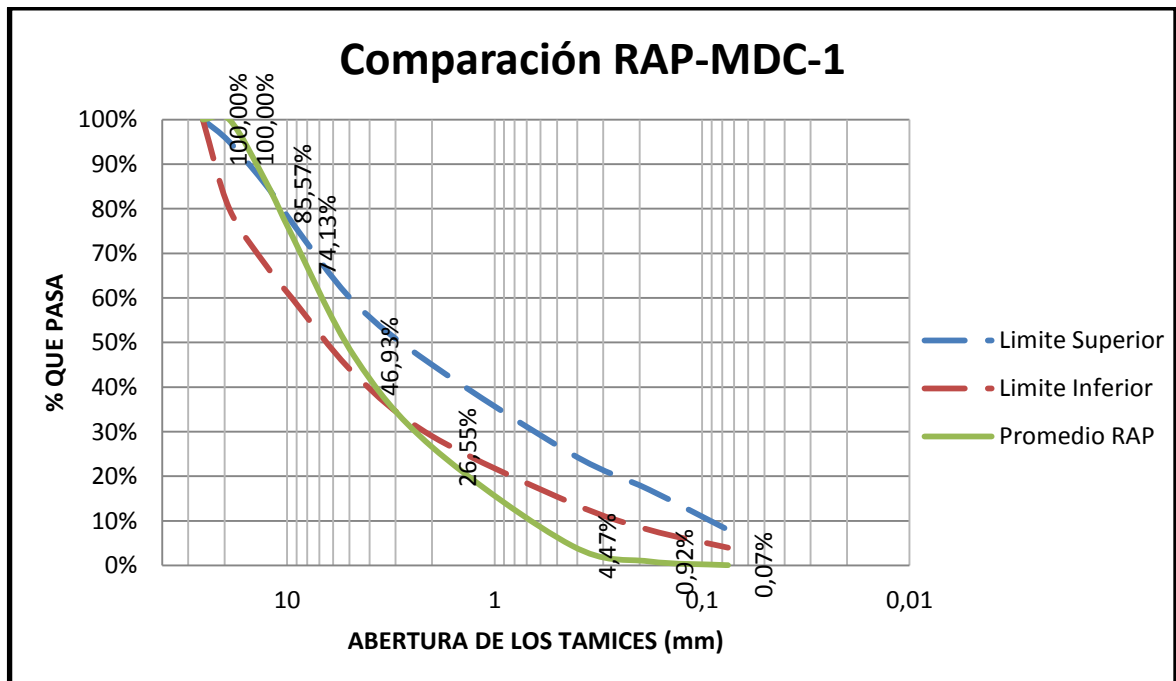
Así las cosas, se adelantó el establecimiento de una granulometría promedio, derivada de las tres granulometrías individuales de las muestras del RAP; esta labor se puede apreciar en la tabla 9. Esta granulometría promedio se superpuso gráficamente con las franjas granulométricas de las mezclas tipo MDC-1 Y MDC - 2, tal como aparece en las gráficas 8 y 9.

Tabla 9: promedio de las granulometrías obtenidas del RAP

RAP			
1	2	3	Promedio
100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
84,23%	83,92%	88,57%	85,57%
72,71%	71,40%	78,27%	74,13%
50,81%	36,54%	53,45%	46,93%
28,26%	22,67%	28,73%	26,55%
6,08%	3,62%	3,71%	4,47%
1,35%	0,70%	0,72%	0,92%
0,05%	0,05%	0,10%	0,07%

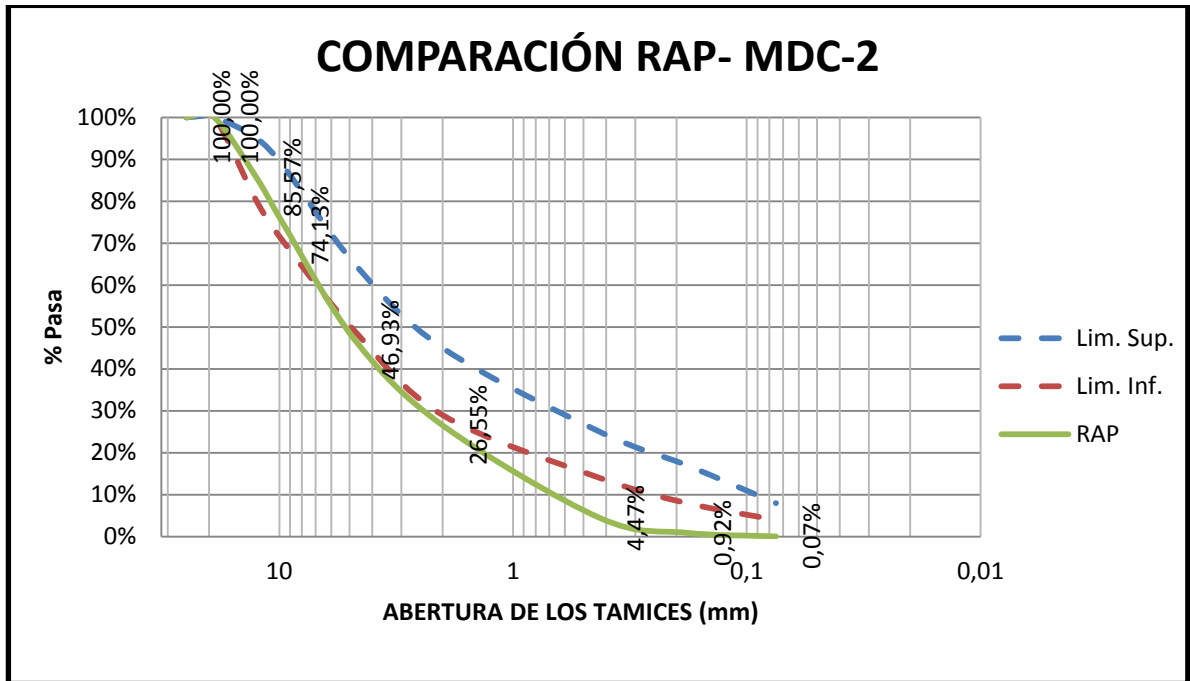
Fuente Propia

Gráfica 8: limites granulométricas de una mezcla tipo MDC-1



Fuente Propia

Gráfica 9: límites granulométricos de una mezcla tipo MDC-2



Fuente Propia

4.2.2 Extracción en frío del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

Para esta actividad se utilizó la norma INVIAS INV E-732-07, mediante la cual se pudo determinar la cantidad de Cemento Asfáltico (AC) que contiene el Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP). Para los efectos se tomaron 4 muestras del RAP 1200 gramos cada una y se utilizaron 500 mililitros de gasolina para cada uno de los procesos (foto 23); en cada muestra, hubo la necesidad de efectuar entre 6 a 8 lavadas de las muestras y practicar centrifugados a 2500 rpm de la (foto 21), hasta que el disolvente utilizado para la extracción no presentara cambios significativos en su coloración, en pocas palabras hasta que la gasolina no saliera oscura (foto 22), cuando esto sucedida era un indicativo que se había presentado el lavado completo del AC presente en el RAP. Los residuos de las extracciones en frío fueron recolectados para su posterior análisis y se continuo con el cálculo del porcentaje de cemento asfáltico existen en el RAP (foto 25).

- Elementos para la extracción del AC del RAP

Foto 21: Maquina extractora usa para obtener el AC del RAP



Foto 22: Proceso de la extracción



Foto 23: RAP caliente a 60°C con gasolina (500ml) en el recipiente de la extractora.



Foto 24: Filtro después Extracción



Fuente Propia

Foto 25: comparación entre la muestra del RAP y la muestra obtenida después de la extracción.



Fuente Propia

Tabla 10: resultados de las extracciones en frío.

EXTRACCIÓN DE A.C. (18-feb-2014)					
ELEMENTOS	PESO INICIAL (g)	PESO SECO AL HORNO (g)	PESO MUESTRA (g)	PESO DE AC	% de AC
filtro	13,3	15,3	2	27	2,24
muestra	1204	1288	1175		
recipiente		113			

EXTRACCIÓN DE A.C. (19-feb-2014)					
ELEMENTOS	PESO INICIAL (g)	PESO SECO AL HORNO (g)	PESO MUESTRA (g)	PESO DE AC	% de AC
filtro	13,4	17,1	3,7	124,3	10,21
muestra	1217	1204	1089		
recipiente		115			

EXTRACCIÓN DE A.C. (20-feb-2014)					
ELEMENTOS	PESO INICIAL (g)	PESO SECO AL HORNO (g)	PESO MUESTRA (g)	PESO DE AC	% de AC
filtro	13	16,3	3,3	124,7	10,49
muestra	1189	1176	1061		
recipiente		115			

EXTRACCIÓN DE A.C. (20-feb-2014)					
ELEMENTOS	PESO INICIAL (g)	PESO SECO AL HORNO (g)	PESO MUESTRA (g)	PESO DE AC	% de AC
filtro	13,7	18,1	4,4	111,6	9,22
muestra	1210	1208	1094		
recipiente		114			

Fuente Propia

Tal y como se observa en la tabla 10 que contienen los resultados de las extracciones en frío, es palpable que el RAP presentaba un alto contenido de cemento asfáltico, con valores que fluctuaban entre el 2,24 % y el 10,5 %, indicando con ello que es material provenía de una mezcla asfáltica con exceso de asfalto, toda vez que esos valores son sensible anormales para una mezcla asfáltica en caliente y convencional. Conviene señalar, que el primer resultado que aparece en la primera muestra de la tabla 10 es contrastante con los otros tres resultados obtenidos, indicando con ellos que se pudo a ver presentado alguna deficiencia en la parte operativa del ensayo de extracción en frío y por ende su valor se descartó para los propósitos de este proyecto.

Teniendo en cuenta los altos contenidos de cemento asfáltico que presentaron las muestras del RAP, se optó por no adicionar cemento asfáltico nuevo, que era una de las filosofías inicialmente previstas para manejar las mezclas asfálticas de prueba de este proyecto. Resultaría poco ortodoxo, para mezclas asfálticas en caliente que poseen agregados relativamente gruesos, dosificarlas con contenidos de asfaltos superiores al 10%. Es probable, que estas cantidades de asfalto que presentaba el RAP hubiesen motivado su fresado.

4.2.3 Granulometrías de los agregados del residuo de las extracciones

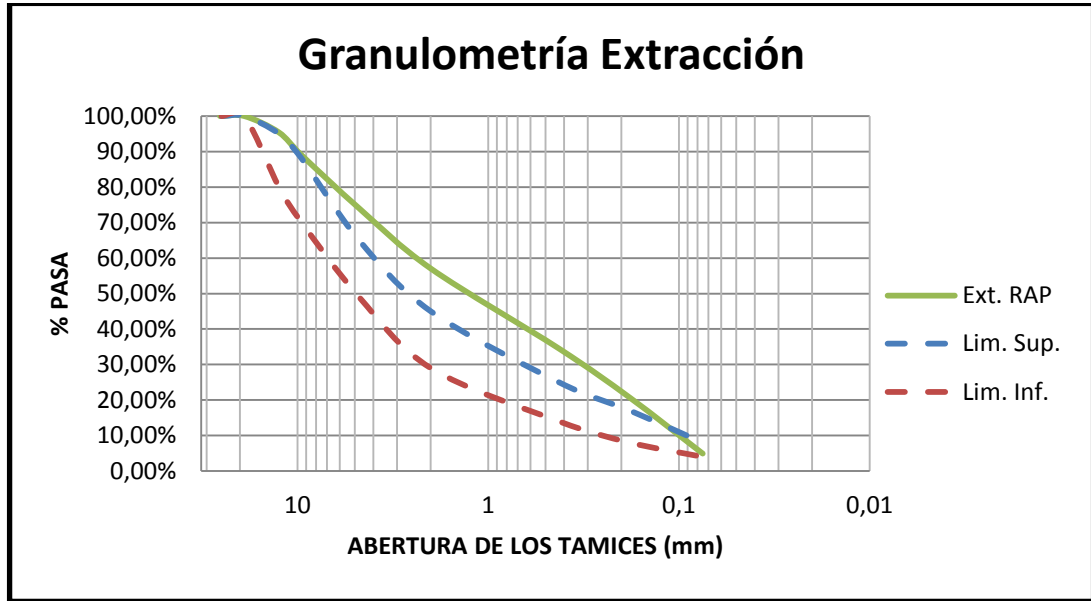
A los agregados provenientes de las extracciones, se les practicaron pruebas de granulometría tomando como referencia los tamices estandarizados para la mezcla tipo MDC – 2 del INVIAS (ver tabla 2); con esta actividad se procuró establecer la granulometría original de la mezcla asfáltica que genero el RAP. Los resultados de las pruebas granulométricas se presentan en las tablas 11 y 12. En adición se superpusieron gráficamente las granulometrías de los agregados producidos por las extracciones con la norma granulométrica de la mezcla tipo MDC – 2 tal como aparece en la graficas 10 y 11.

Tabla 11: granulometría de la extracción del RAP

EXTRACCIÓN DE AC DEL RAP (28-FEB-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (g)	W Recipiente. (g)	W Muestra (g)	%retenido	%acumulado	% pasa
1"						100,00%
3/4"	0	0	0	0,00%	0,00	100,00%
1/2"	201,5	112,3	89,2	4,61%	0,05	95,39%
3/8"	237,8	113,1	124,7	6,45%	0,11	88,94%
No. 4	404,9	116,4	288,5	14,92%	0,26	74,02%
No. 10	444,5	116,2	328,3	16,97%	0,43	57,05%
No. 40	550,1	113,8	436,3	22,56%	0,66	34,49%
No. 80	381	112,3	268,7	13,89%	0,79	20,60%
No. 200	416,2	113	303,2	15,68%	0,95	4,92%
Pasa 200	494,2	399	95,2	4,92%	1,00	0,00%
Total			1934,1	1,00		

Fuente Propia

Gráfica 10: granulometría de la extracción



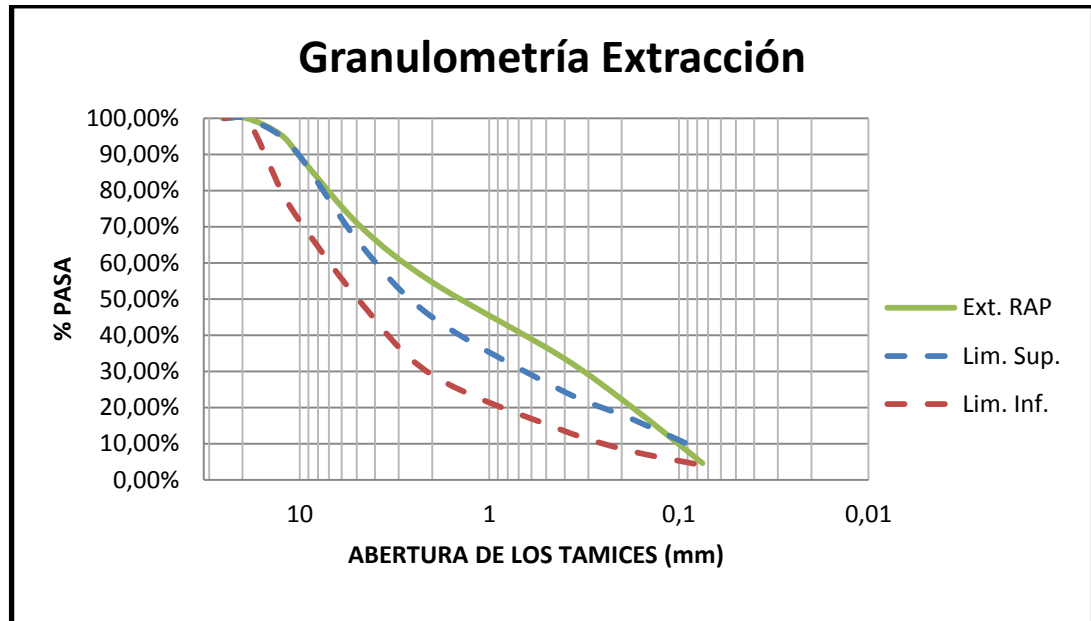
Fuente Propia

Tabla 12: granulometría de la extracción del RAP

EXTRACCIÓN DE AC DEL RAP (03-MAR-2014)						
Tamiz	W Recipiente. + W muestra (Gr)	W Recipiente. (Gr)	W Muestra (Gr)	%retenido	%acumulado	% pasa
1"	-					100,00%
3/4"	0	0	0	0,00%	0,00	100,00%
1/2"	524,9	390,5	134,4	4,62%	0,05	95,38%
3/8"	403,3	190,2	213,1	7,32%	0,12	88,06%
No. 4	724,8	197,8	527	18,10%	0,30	69,96%
No. 10	633,8	188,2	445,6	15,31%	0,45	54,66%
No. 40	777,3	186,1	591,2	20,31%	0,66	34,35%
No. 80	593,8	188,4	405,4	13,93%	0,80	20,42%
No. 200	652,1	191,3	460,8	15,83%	0,95	4,60%
Pasa 200	532,8	399	133,8	4,60%	1,00	0,00%
Total			2911,3	1,00		

Fuente propia

Gráfica 11: granulometría de la extracción



Fuente Propia

Por observación de las gráficas 10 y 11 se puede establecer que los agregados pétreos analizados no se ajustan a las exigencias granulométricas de la mezcla tipo MDC – 2; dado que no fue factible conocer el tipo de mezcla asfáltica de la cual proviene el material de fresado o RAP, se puede comentar que esta pudo ser otras de las razones por las cuales se recurrió al proceso de fresado del material asfáltico.

4.3 DISEÑO DE MEZCLAS DE PRUEBA MEDIANTE PROBETAS MARSHALL

Para empezar a realizar el diseño Marshall el primer ensayo que se realizó fue el peso específico de los agregados obtenidos de la extracción del cemento Asfáltico (AC), del pavimento asfáltico recuperado (RAP), la cual se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en la Norma INV E-222-07 “gravedad específica y absorción de los agregados específicos” y la Norma INV E-223-07 “gravedad específica y absorción de los agregados gruesos”. Para los efectos el proceso se puede observar en las fotos 26 a la 30:

Foto 26: calentamiento de la muestra para obtener su condición SSS.



Foto 27: Prueba del cono para chequear la condición SSS



Foto 28: introducción del agregado fino en el picnómetro.



Foto 29: eliminación de las burbujas de aire.



Fuente Propia

Foto 30: peso final de la muestra con picnómetro y agua.



Fuente Propia

Con base en las pruebas ejecutadas se determinaron los valores que aparecen en las tablas número 13 y número 14.

Tabla 13: datos de gravedades específicas de los agregados pétreos

Gravedad específica agregados			
Gravas			
Peso SSS (Gr)	W. Recipiente (Gr)	W. en H2O (Gr)	W. seco al horno (Gr)
402,5	117	167,5	397,4
396,1	112,4	167	392,4
422,3	106	227,4	416,6
994,9	115,3	525,5	979,3

Gravedad específica agregados		
Finos		
muestra seca al horno (gr)	A	496,2
Picnómetro lleno de agua (gr)	B	664,6
picnómetro + agua + muestra (gr)	C	969,7
muestra saturada y superficialmente seca (gr)	S	500

Fuente Propia

Las gravedades específicas de los agregados finos y de los agregados gruesos se calculan de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$Gsb = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 1

Dónde:

- A = masa al aire de la muestra seca al horno, g.
- B = masa del picnómetro aforado lleno de agua, g.
- C = masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g.
- S = masa de la muestra saturada y superficie seca, g.

$$Gsb = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 2

Dónde:

- A = masa en el aire de la muestra seca en gramos.
- B = masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en gramos.
- C = masa sumergida en agua de la muestra saturada, en gramos.

Tabla 14: cálculo de las gravedades Bulk para gravas y finos.

Gravas	
Muestra	G Bulk
1	2,376
2	2,399
3	3,494
4	2,440
Promedio	2,677

Finos	
Muestra	G Bulk
1	2,546

A partir de los datos anteriores y tomando como referencia los porcentajes de gravas y finos de la granulometría original de la muestra (ver tabla 15), y por medio de la ecuación 3 se procedió a calcular la gravedad específica promedio.

Tabla 15: Porcentajes de gravas y finos de la muestra.

Porcentaje gravas	Porcentajes finos
25,98%	74,02%

$$G_{agr} = \frac{1}{\frac{\%G}{G_{Bulk}} + \frac{\%F}{G_{Bulk}}}$$

Ecuación 3

Dónde:

- %G = de gravas de la muestra
- %F = de finos de la muestra

$$G_{agr} = 2,57$$

El valor de la gravedad específica se calcula para determinar los pesos específicos máximo teórico y máximo medido requeridos para el proceso de análisis mediante el método Marshall; estos datos se van a utilizar tal y como aparece en la tabla 27 del diseño Marshall.

Luego de conocer la granulometría del Caucho Reciclado De Las Llantas y del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP), se procedió a separar estos materiales en cuatro tamaños equivalentes a lo denominado como gravas, arenas gruesas, arenas finas y llenante con el fin de realizar las combinaciones granulométricas que mejor se ajustaran a las exigencias de las mezclas típicas del INVIAS. Para esta clasificación se utilizaron los tamices $\frac{3}{4}$ ", 4", No. 40 y No. 200

Después de separar los materiales en fracciones, se pasa a hacer los diseños o distribuciones de las mezclas de prueba; se determinó preparar y compactar seis probetas por cada una de las mezclas de prueba diseñadas, de las cuales cinco de ellas fueron usadas para someterlas a las prueba de estabilidad y flujo según el método Marshall; la probeta restante, se sometió a un ensayo denominado RICE, el cual permite obtener valores de peso específico máximo medido. Las determinaciones anteriores permiten desarrollar mediante la metodología Marshall, la estimación de porcentaje de vacíos, porcentaje de asfalto efectivo, la estabilidad y el flujo, representativos de cada mezcla de prueba analizada. Resulta pertinente indicar que para las mezclas de pruebas y la posterior preparación de las probetas se adoptaron las siguientes denominaciones:

MEZCLA TIPO A: utiliza 100% de RAP

MEZCLA TIPO B: utiliza 95% de RAP y 5% de CRL

MEZCLA TIPO C: utiliza 90% de RAP y 10% de CRL

MEZCLA TIPO D: utiliza 85% RAP y 15% de CRL

- **TIPO A**

Para realizar las probetas de tipo A, se tomó una muestra de 1200 gramos de solo RAP para cada una de las 6 probetas, la cual no necesitó de dosificación, ya que solo se trabajó con el 100% de dicho material. Cada muestra se llevó al horno a una temperatura de 110°C de tal forma que adquiriese esa temperatura para el posterior proceso de compactación.

Simultáneamente al calentamiento de las muestras se colocaba también en calentamiento, el conjunto del molde, collar y placa de base, así como el martillo para el proceso de compactación (ver foto 31); a continuación, se procedió a engrasar cada uno de los elementos del conjunto de compactación (ver foto 32); en seguida, se colocó toda la muestra preparada en el molde y se acomoda mediante la inserción de una espátula o palustre caliente, 15 veces en el perímetro y 10 veces en el interior (ver foto 34).

Foto 31: Moldes para las briquetas Marshall



Foto 32: engrasamiento de los moldes



Foto 33: colocación de la muestra en los moldes



Foto 34: golpeteo con la espátula en la muestra.



Fuente Propia

Una vez acomodada la muestra con la espátula se procedió a la compactación con el martillo del Marshall, que debe tener unas características específicas tal y como aparece en la norma de ensayo del INVIAS INV-E-748 (ver foto 35); en términos generales el martillo de compactación debe tener una caída libre de 457 mm y un peso de 4536 g. Desde el punto de vista de energía de compactación, se tomó como referencia un número de golpes de pisón de compactación de 75 golpes por

cara; es necesario precisar que durante el procedimiento se debe mantener una perpendicularidad y procurando que la muestra conserve la temperatura tomada como referencia para la compactación.

Foto 35: compactación de la mezcla con el martillo Marshall



Foto 36: cambio de lado de la muestra



Foto 37: equipo de armado de la briqueta



Foto 38: compactación final de la briqueta



Fuente Propia

Al momento en que se desmontó la briqueta, de 100% de RAP, que se realizó con un gato hidráulico para poder preservar con la mayor integridad la briqueta (foto 40), ya que no le producía mayor alteración a ésta. Este procedimiento se realizó después de dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente o en un plazo de 2 a 3 horas (foto 39); esto se realizó para evitar que la briqueta sufra deformaciones a causa de la temperatura en el momento de ser compactada.

Foto 39: enfriamiento de la muestra



Foto 40: Proceso de la extracción de la briqueta del molde



Fuente Propia

Respecto de la preparación y compactación de las probetas, el método Marshall indica que ellas deben tener un espesor de 2.5" (63.5 mm), luego de compactadas; así las cosas, existen diversos criterios para unificar y utilizar probetas estandarizadas; un criterio consiste en el uso de la siguiente expresión:

$$\text{Masa correcta del agregado (g)} = \frac{63,5 \times \text{Masa usada del agregado (g)}}{\text{Altura obtenida de la probeta (mm)}}$$

Ecuación 4

$$\text{Masa correcta del agregado (g)} = \frac{63,5 \times 1168,6}{67,8}$$

$$\text{Masa} = 1094,5 \text{ g}$$

Otro criterio utilizado para este propósito, corresponde a la aplicación de los factores para corrección de la estabilidad que aparecen en la tabla número 1 de la norma de ensayo de INV E-748-07; bajos esos esquemas se asegura que utilizamos probetas normalizadas cuyas características pueden ser comparadas.

Para el diseño de las mezclas de prueba que contenían RAP y CRL, es decir para las mezclas de prueba **TIPO B, C, y D**, la parte inicial correspondió a procurar la dosificación de ellas mediante la combinación granulométrica de los dos insumos; para este propósito se determinó la gradación ideal de la mezcla típica que se tomaba como referencia (MDC-02) y a partir de ella se realizó la combinación de tamaños. Es el caso, que para la mezcla TIPO C la dosificación se puede apreciar en la tabla 16.

Tabla 16: dosificación de los materiales para diseño TIPO C

DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES		
Clasificación	RAP	CRL
Gravas	43%	69,29%
Arenas Gruesas	37,50%	28,66%
Arenas finas	13,50%	2,04%
Llenante	6%	0,01%

Porcentajes de los materiales	
RAP	90%
CRL	10%

Fuente: propia

Para obtener los coeficientes de cada uno de los insumos utilizados en el diseño se realiza una multiplicación entre el porcentaje de la clasificación del material según la tabla 16 (gravas, arena gruesas, arena fina y llenante), por el porcentaje de diseño utilizado para cada uno de los tipos.

Tabla 17: coeficientes de diseño de la mezcla de prueba TIPO C.

Clasificación	Coeficientes RAP	Coeficientes CRL
Gravas	38,70%	6,9290%
Arenas Gruesas	33,75%	2,8663%
Arenas finas	12,15%	0,2039%
Llenante	5,40%	0,0009%

Para el peso de la cantidad de material que se utilizó para el diseño, se multiplica el coeficiente hallado en la tabla 17 por el peso total de la muestra en este caso 1200 gramos. De esto se obtiene la cantidad de gravas, arena gruesa, arena fina y llenante en peso que es utilizado para el diseño de los diferentes tipos de mezclas asfálticas (tabla 18). Estos procedimientos se repitieron para los demás diseños modificando tan solo la participación del CRL y por ende la participación del RAP.

Tabla 18: pesos de los materiales para diseño

Cantidad de Material (g)	
RAP	
Gravas	464,4
Arenas Gruesas	405,0
Arenas Finas	145,8
Llenante	64,8

CRL	
Gravas	83,1
Arenas Gruesas	34,4
Arenas finas	2,4
llenante	0,0
Total	1200,0

Al momento de compactar con este diseño de **TIPO C**, se observó que las probetas presentaban desmoronamiento inclusive antes de sacarlas del molde de compactación; se dedujo, que posiblemente esto era al tamaño de partículas de caucho utilizadas, en este caso del tamaño de las gravas; ante esta circunstancia, se decidió modificar el tamaño de las partículas de caucho CRL que se debían utilizar, seleccionando mejor las partículas correspondientes a las fracciones de arenas fina, arena gruesa y de llenante (ver fotos de la 41 a la 46).

<p>Foto 41: dosificación original del CRL.</p> 	<p>Foto 42: muestra calentada para su posterior compactación</p> 
<p>Foto 43: briqueta TIPO C con la dosificación inicial.</p> 	<p>Foto 44: modo de disgregación de las briquetas</p> 

Fuente: propia

Foto 45: desmoronamiento briqueta**Foto 46: separación de las partículas**

Fuente: propia

El diseño de las probetas de diferentes porcentajes los cuales son de **TIPO B, C, D**, se determinaron de acuerdo con las tablas 19, 20, 21 y 22 donde se define el peso que se va a usar en cada una de las probetas con cada uno de los tamices:

Tabla 19: dosificación de los materiales para diseño

DOSIFICACIÓN DE LOS MATERIALES		
Clasificación	RAP	CRLI
Gravas	43%	-
Arenas Gruesas	37,50%	93,33%
Arenas finas	13,50%	6,64%
Llenante	6%	0,03%

Tabla 20: dosificación de los materiales para diseño TIPO B

Porcentajes de los materiales	
RAP	95%
CRLI	5%

Clasificación	Coefficientes RAP	Coefficientes CRLI
Gravas	40,85%	-
Arenas Gruesas	35,63%	4,6666%
Arenas finas	12,83%	0,3320%
Llenante	5,70%	0,0014%

Cantidad de Material (Gr)	
RAP	
Gravas	490.2
Arenas Gruesas	427.5
Arenas Finas	153.9
Llenante	68.4
CROLL	
Arenas Gruesas	56.0
Arenas finas	4.0
llenante	0.0
Total	1200.0

Fuente: propia

Tabla 21: dosificación de los materiales para diseño **TIPO C**

Porcentajes de los materiales	
RAP	90%
CROLL	10%

Clasificación	Coeficientes RAP	Coeficientes CROLL
Gravas	38,70%	-
Arenas Gruesas	33,75%	9,3333%
Arenas finas	12,15%	0,6639%
Llenante	5,40%	0,0028%

Cantidad de Material (Gr)	
RAP	
Gravas	464.4
Arenas Gruesas	405
Arenas Finas	145.8
Llenante	64.8
CROLL	
Arenas Gruesas	112.0
Arenas finas	8.0
llenante	0.0
Total	1200.0

Fuente: propia

Tabla 22: dosificación de los materiales para diseño **TIPO D**

Porcentajes de los materiales	
RAP	85%
CROLL	15%

Clasificación	Coeficientes RAP	Coeficientes CROLL
Gravas	36,55%	-
Arenas Gruesas	31,88%	13,99999%
Arenas finas	11,48%	0,9959%
Llenante	5,10%	0,0042%

Cantidad de Material (Gr)	
RAP	
Gravas	438.6
Arenas Gruesas	382.5
Arenas Finas	137.7
Llenante	61.2
CROLL	
Arenas Gruesas	168.0
Arenas finas	12.0
llenante	0.1
Total	1200.0

Fuente: propia

Al tener estas distribuciones en peso se procede a la compactación de las probetas de cada **TIPO**; inicialmente se procedió con las **TIPO B**, en las cuales se realizaron los mismo procesos de compactación que en las de **TIPO A**.

Como se puede desprender, estos procedimientos se repitieron con los demás tipos (**TIPO C y D**), es decir, se procedió a su desmonte hasta que estuviera a temperatura baja o ambiente, con la ayuda del gato hidráulico y se realizaron los ensayos de estabilidad Marshall, flujo Marshall, Rice y gravedad específica Bulk.

4.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DE LAS PROBETAS

Para el ensayo de gravedad específica Bulk se siguieron los parámetros establecidos en la norma INV E- 733 y INV E- 734; debido a que las probetas tipo A no fueron parafinadas, ya que su absorción era menor al 2%, se hizo necesario

que en el caso de las probetas tipo B, C y D, ellas se parafinaran dado que eran muy absorbentes con lo cual se afectaban los resultados de los ensayos que se deberían practicar a continuación.

<p>Foto 47: briquetas TIPO A</p> 	<p>Foto 48: Proceso Bulk</p> 
<p>Foto 49: Peso sumergido</p> 	<p>Foto 50: Comparación entre una probeta parafinada.</p> 
<p>Foto 51: Probeta parafinada</p> 	<p>Foto 52: briquetas en el horno</p> 

Fuente: propia

Nota 1: el cálculo de la absorción de las briquetas de prueba se realizó siguiendo las especificaciones de la norma INV E 733 - 07

Después de retirar las probetas del molde y dejarlas una hora a temperatura ambiente, se determinaron sus pesos secos, sus pesos secos parafinadas y sus

pesos sumergidas en agua estando parafinadas; en el caso las probetas del TIPO A, se siguió el procedimiento convencional sin parafinarlas, es decir se pesaron en el aire, se llevaron a saturación, se pesaron saturadas superficialmente secas y se pesaron sumergidas en agua pero estando superficialmente secas. Los resultados de las probetas **TIPO A** se puede apreciar en la tabla 23.

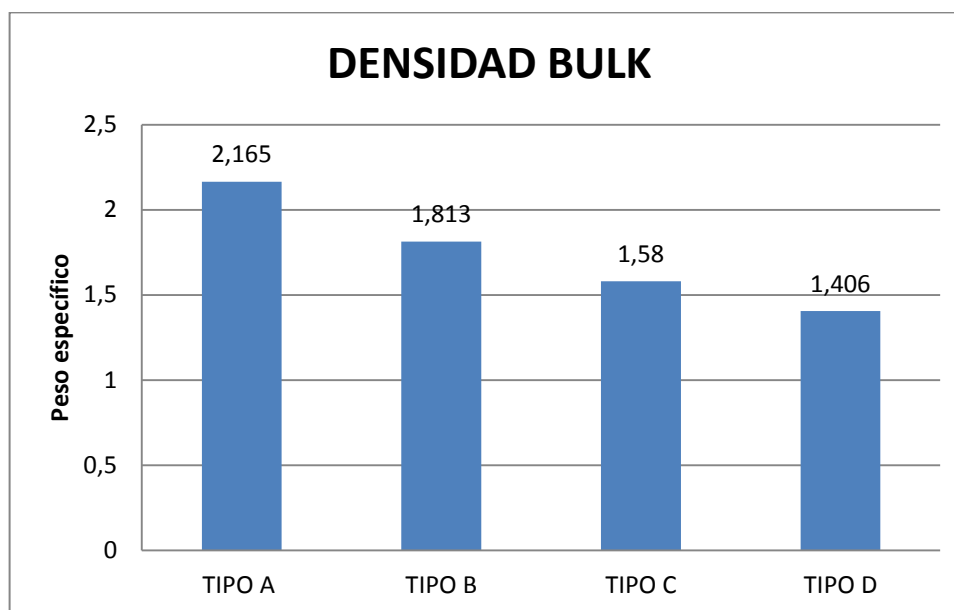
Tabla 23: dosificación de los materiales para diseño

Briqueta	Asfalto	Espesor	Peso (g)			Peso específico
No.	(%)	Briqueta (mm)	Seca en aire	S.S.S. en aire	En agua	"Bulk"
a	b	c	d	e	f	g
						d/(e-f)
1	10,49	67,8	1168,6	1169,6	627,4	2,155
2	10,49	65,6	1115,5	1116,6	599,5	2,157
3	10,49	68,5	1112,6	1113,1	603,6	2,184
Promedio.	10,49	67,3	1132,2	1133,1	610,2	2,165

Fuente: propia

Como se mencionó con anterioridad, para las briquetas tipo B, C y D, debido a su absorción se decidió parafinarlas, este procedimiento se realizó, después de retirar las briquetas del molde y dejarlas enfriar más o menos una hora a temperatura ambiente, después se tomó un primer peso el cual fue el peso seco de la muestra, luego se colocó a calentar la parafina para recubrir las muestras, tratando de que no quedara vacíos en la muestra, se toma el nuevo peso de la probeta con la parafina, para luego sumergirlas y tomar este último peso; es importante conocer la gravedad específica de la parafina. Los datos de las probetas TIPO B, C y D se pueden apreciar en la tabla 24.

Gráfica 12: Densidades Bulk de las muestras de prueba.



Fuente: propia

Tabla 24: dosificación de los materiales para diseño

TIPO DE BRIQUETA	Briqueta No.	Asfalto (%)	Espesor Briqueta (mm)	Peso (g)			Peso específico
				Seca en aire	S.S.S. en aire	En agua	"Bulk"
	a	b	c	D	e	f	g
							d/(e-f)
B	0	10,49	70,3	1068,5	1098,9	487,9	1,835
	1	10,49	69,6	1058,8	1082,4	464,9	1,784
	2	10,49	69,8	1070,8	1121,2	479,9	1,819
	Promedio.	10,49	69,9	1066,0	1100,8	477,6	1,813
C	0	10,49	69,8	1061,1	1107,9	387,6	1,580
	1	10,49	70,7	1067,2	1110,5	395,9	1,594
	2	10,49	73,1	1057,1	1091,7	381,3	1,566
	Promedio.	10,49	71,2	1061,8	1103,4	388,3	1,580
D	2	10,49	75,5	1013,7	1062,2	251,9	1,338
	3	10,49	76,0	1025,9	1086,5	310,9	1,445
	4	10,49	76,1	1016,3	1061,4	306,7	1,435
	Promedio.	10,49	75,9	1018,6	1070,0	289,8	1,406

Fuente: propia

4.5 PESO ESPECÍFICO MÁXIMO MEDIDO (MÉTODO RICE) Y DENSIDAD (RICE)

Este método que se realizó de acuerdo a la norma INV E-735-07, consistió en dejar una muestra (de cada uno de los tipos) sin compactar y someterlas a la prueba del vacío con la máquina del mismo nombre (ver fotos 53 y 54); en este proceso se requiere conocer básicamente el peso de la muestra de mezcla seca y suelta así como su peso en agua (desairada) y suelta (ver fotos 55 y 56). Como resultado se obtuvieron unos valores que requirieron un análisis, dado que la presencia de agregado como el caucho generaron afectaciones en los valores finalmente obtenidos; se dedujo, que resultaba poco ortodoxo el manejo de la absorción adquirida por las partículas del caucho que intervinieron.

Foto 53: equipo para el ensayo RICE



Foto 54: válvula para la presión



Foto 55: muestra más agua antes del ensayo.

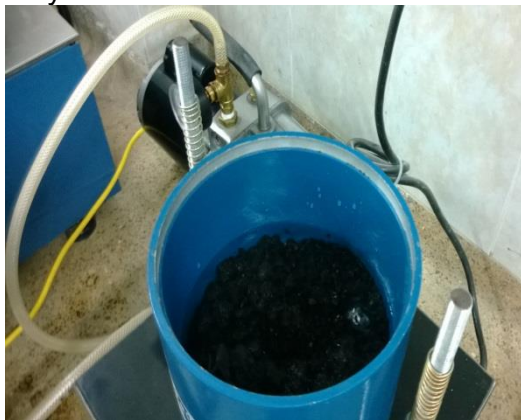


Foto 56: muestra más agua después del ensayo.



Fuente: propia

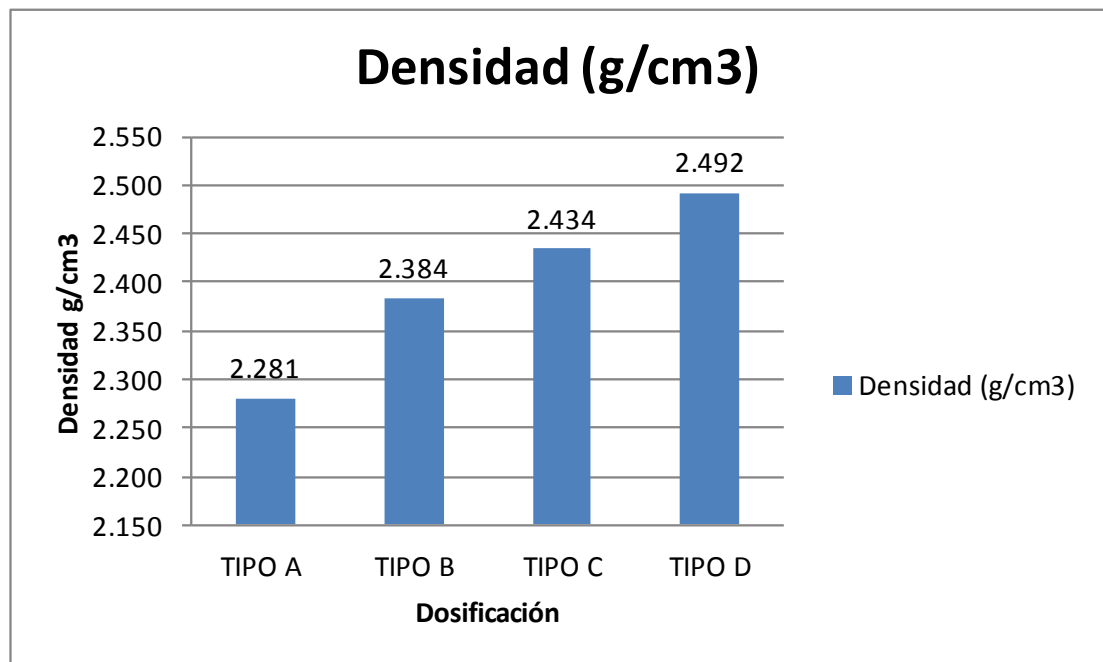
Finalmente, los valores establecidos como resultado de esta prueba, se muestran en la tabla 25.

Tabla 25: peso específico medido

Dosificación	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO D
% DE ASFALTO	9,7	9,7	9,7	9,7
Masa pipeta + agua + tapa (g)	8649,1	8707	8649,1	8649,1
Masa mezcla (g)	1200,0	1500	1200	1200
Masa pipeta + material + tapa + agua (g)	9319,8	9532	9352,9	9342,5
Volumen (cm ³)	529,3	675	496,2	506,6
Volumen corregido a 25°C (cm ³)	529,3	675	496,2	506,6
Densidad (g/cm ³)	2,267	2,222	2,418	2,369
Temperatura Agua °C	19°C	19	20	19
Factor de Corrección	0,998435	0,998435	0,998234	0,998435
Densidad Corregida (g/cm ³)	2,264	2,219	2,414	2,365

Fuente: Propia

Gráfica 13: Densidad de las mezclas TIPO.



Fuente propia

Los resultados arrojados con respecto a las probetas no compactadas, se comportaron de acuerdo a lo esperado, ya que el valor obtenido estuvo siempre por encima del peso específico calculado. Que se determinó con la ecuación 5

$$G_h = \frac{100}{\frac{\% \text{ asfalto}}{G \text{ Asfalto}} + \frac{\% \text{ Agregado}}{G \text{ Agregado}}}$$

Ecuación 5

$$Gh = \frac{100}{\frac{10,49}{1,01} + \frac{89,51}{2,57}}$$

$$Gh = 2,212$$

Los datos del *peso específico máximo medido* se utilizaron para efectuar el análisis de densidad y vacíos requerido cuando se utiliza la metodología Marshall; ese valor es indispensable para la estimación de las diferentes clases de vacíos que se contemplan en este tipo de mezclas; el análisis aludido se presenta en la tabla número 26.

Tabla 26: Método Marshall:

Tipo de briqueata	Asfalto (%)	Peso (g)			Peso específico			Asfalto Absorbido (%)	Volumen - % Total			Vacíos agregados minerales (%)	Vacíos mezcla asfáltica
		Seca en aire	S.S.S. en aire	En agua	"Bulk"	Máximo teórico	Máximo medido		Agregados	Vacíos con aire	Asfalto efectivo		
-	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
					$b/(c-d)$	Gh	Gmm	$(g-f)*104 / gf(100-a)$	$(100-a)*e / Gagr$	$(1-e/g)*100$	$100-i-j$	$100-i$	$(l-j) / l$
A	10.49	1168.6	1169.6	627.4	2.155	2.165	2.281	2.622	77.168	5.504	17.328	22.832	75.893
		1115.5	1116.6	599.5	2.157	2.165	2.281	2.622	77.237	5.420	17.343	22.763	76.191
		1112.6	1113.1	603.6	2.184	2.165	2.281	2.622	78.186	4.258	17.556	21.814	80.480
Promedio		1132.2	1133.1	610.2	2.165	2.165	2.281	2.622	77.530	5.061	17.409	22.470	77.521
B		1068.5	1098.9	487.9	1.835	2.165	2.384	4.738	65.704	23.019	11.277	34.296	32.880
		1058.8	1082.4	464.9	1.784	2.165	2.384	4.738	63.890	25.145	10.965	36.110	30.366
		1070.8	1121.2	479.9	1.819	2.165	2.384	4.738	65.136	23.684	11.179	34.864	32.066
Promedio		1066.0	1100.8	477.6	1.813	2.165	2.384	4.738	64.910	23.949	11.140	35.090	31.771
C		1061.1	1107.9	387.6	1.580	2.165	2.434	5.708	56.564	35.099	8.337	43.436	19.193
		1067.2	1110.5	395.9	1.594	2.165	2.434	5.708	57.082	34.505	8.413	42.918	19.602
	1057.1	1091.7	381.3	1.566	2.165	2.434	5.708	56.071	35.665	8.264	43.929	18.812	
Promedio	1061.8	1103.4	388.3	1.580	2.165	2.434	5.708	56.573	35.090	8.338	43.427	19.200	
D	1013.7	1062.2	251.9	1.338	2.165	2.492	6.771	47.904	46.309	5.787	52.096	11.109	
	1025.9	1086.5	310.9	1.445	2.165	2.492	6.771	51.738	42.011	6.250	48.262	12.951	
	1016.3	1061.4	306.7	1.435	2.165	2.492	6.771	51.387	42.405	6.208	48.613	12.770	
Promedio	1018.6	1070.0	289.8	1.406	2.165	2.492	6.771	50.343	43.575	6.082	49.657	12.277	

Fuente: Propia

Los resultados de la tabla 26 se analizaron, inicialmente, en cuanto al **% Asfalto Absorbido**, que se calculó con la ecuación 6.

$$\% \text{ Asf. Abso.} = \frac{(g - f) \times 104}{d \times f(100 - a)}$$

Ecuación 6

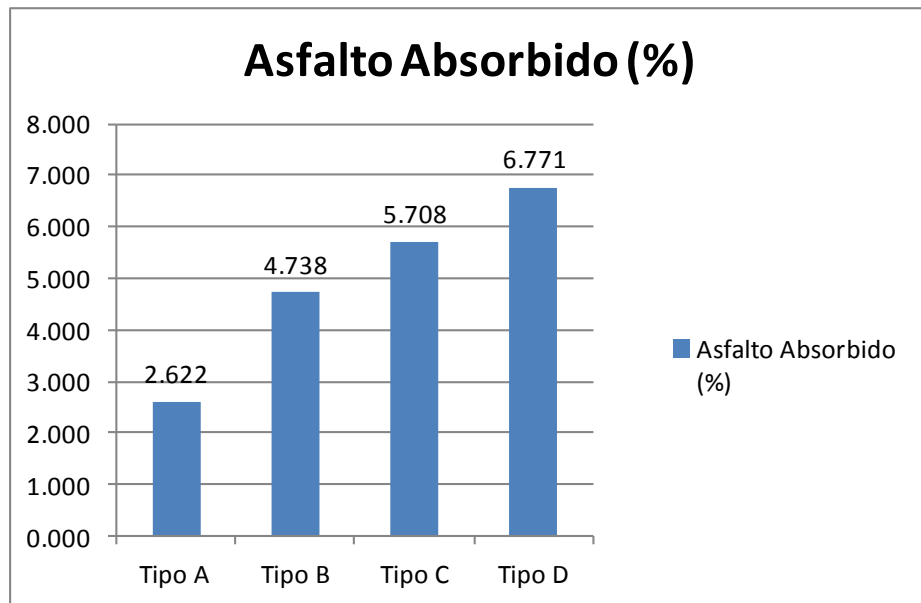
Dónde:

a = % de asfalto

f = Peso específico máximo teórico

g = Peso específico máximo medido

Gráfica 14: Asfalto Absorbido



Fuente Propia

Del análisis se considera, que en los promedios de cada TIPO de mezcla, es notorio ya que a medida que se le agrega el caucho este valor va aumentando hasta cierto punto, por ejemplo en la mezcla TIPO D, se presenta el máximo valor de asfalto absorbido (6,771 %), mientras en la distribución de TIPO A se obtiene el valor mínimo. Con base a lo anterior, se puede definir que la variable del asfalto absorbido tiene dependencia en la cantidad de caucho que se adicione, gracias al agregado de aporte a las diferentes mezclas de prueba.

En cuanto al **Volumen De Los Agregados** que se determinaron mediante la ecuación 7

$$\text{Vol. agregados} = \frac{(100 - a)e}{G. gre}$$

Ecuación 7

Dónde:

$e = \text{Peso específico Bulk}$

Este dato se evidencia que el volumen de los agregados, en este caso pétreos, disminuyó en cuanto se agregó el caucho en las distribuciones TIPO B, C, y D.

En el **Volumen de vacíos con aire** que se calculó con la ecuación 8:

$$\text{vacios con aire} = \left(1 - \frac{e}{g}\right) 100$$

Ecuación 8

Este parámetro aumenta cada vez que se le agrega el caucho, lo cual indicaría que la mezcla se vuelve más porosa y por ende que tendría un pobre comportamiento, si lo que se pretendiera es mantener una mezcla densa.

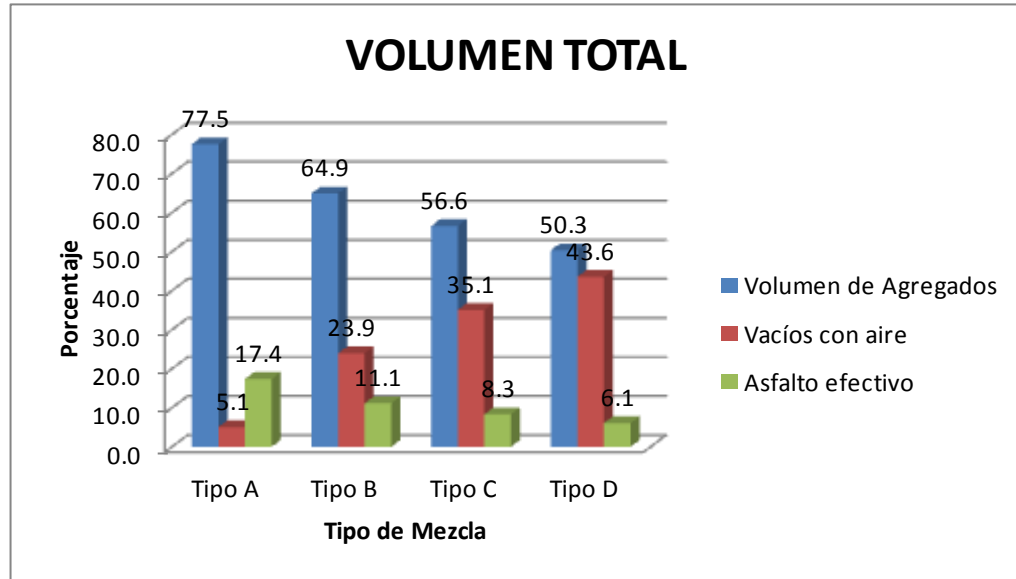
Luego se analizó el porcentaje de **Vacíos En Los Agregados Minerales** y en la **Mezcla Asfáltica**, comparándolos con los establecidos en la tabla 28 denominada Tabla 450.4 “Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall” de la Especificación 450 del INVIAS.

Tabla 27: Tabla resumen de vacíos en las mezclas

Volumen - % Total			
	Volumen de Agregados	Vacíos con aire	Asfalto efectivo
Tipo A	77.5	5.1	17.4
Tipo B	64.9	23.9	11.1
Tipo C	56.6	35.1	8.3
Tipo D	50.3	43.6	6.1

Fuente propia

Gráfica 15: Volumen total de los agregados de las Mezclas



Fuente propia

Según la especificación, los valores obtenidos de la mezcla **TIPO A** son los únicos que cumplen con el rango de valores requeridos, para una categoría de tránsito NT3. Las otras mezclas (**TIPO B, C y D**) que son las que contienen caucho, presentaron resultados que no cumplen para cualquier categoría de tránsito.

Tabla 28: Tabla 450.4 Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748	50	75	75	75	
Estabilidad mínima (kg)	E-748	500	750	900	1500	
Flujo (mm)	E-748	2 – 4	2 – 4	2 – 3.5	2 – 3	
Vacíos con aire(V _a)*, %	Rodadura	E-736	3 – 5	3 – 5	4 – 6	–
	Intermedia	o	4 – 8	4 – 8	4 – 7	4 – 6
	Base	E-799	–	5 – 9	5 – 8	–
Vacíos en los agregados minerales (VAM), %	Mezclas 0	E-799	≥13	≥13	≥13	–
	Mezclas 1		≥14	≥14	≥14	≥14
	Mezclas 2		≥15	≥15	≥15	–
	Mezclas 3		≥16	≥16	≥16	–
% de vacíos llenos de asfalto (VFA) (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados minerales) x 100 Capas de rodadura e intermedia	E-799	65 – 80	65 – 78	65 – 75	63 – 75	
Relación Llenante/ Asfalto efectivo, en peso	E-799	0.8 – 1.2			1.2 – 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E – 745	Valor crítico				

Fuente: Especificación 450-07 del INVIAS

Con los **Vacíos de Agregado Mineral (VAM)** que se determina con la ecuación 9 la cual está basada en la norma INV E-799-07:

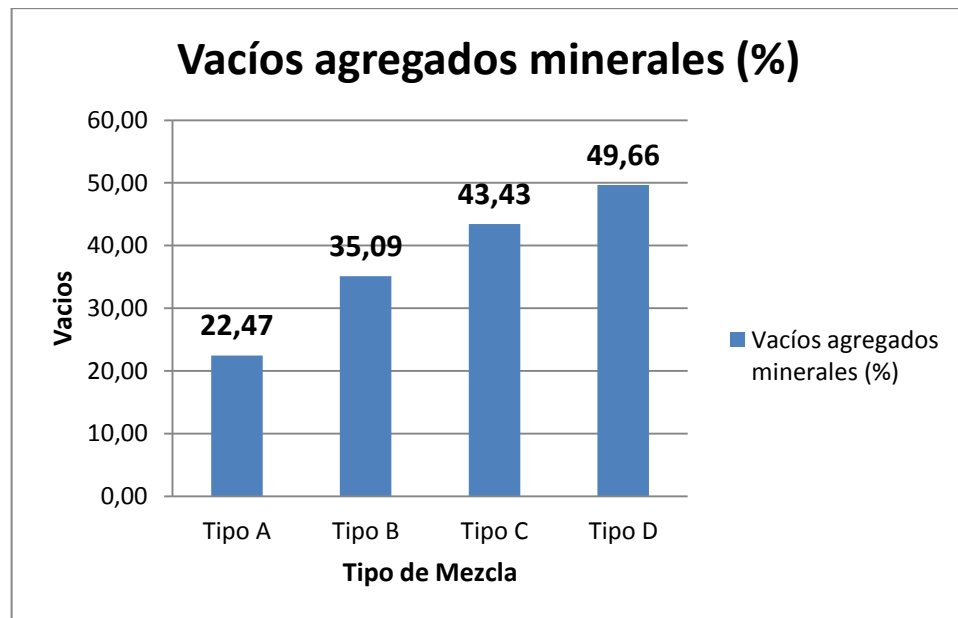
$$\boxed{Vacios\ Agregados\ Minerales = 100 - i}$$

Ecuación 9

Dónde:

$i = \% \text{ de volumen de agregados}$

Grafica 16: Vacíos agregados minerales



Fuente propia

Se analiza que los resultados obtenidos en cada uno de los diferentes TIPOS de mezcla se encuentran dentro del rango que determina la especificación que son >13 para cualquier tipo de tránsito en cada muestra; sin embargo, el uso del CRL, aumenta esta relación de vacíos a causa de su propiedad al contraerse y expandirse por acción del calor, lo que generara los vacíos en los agregados.

En cuanto a los **Vacíos En La Mezcla Asfáltica** se determinó con la ecuación 10 basadas en la norma INV E-799-07:

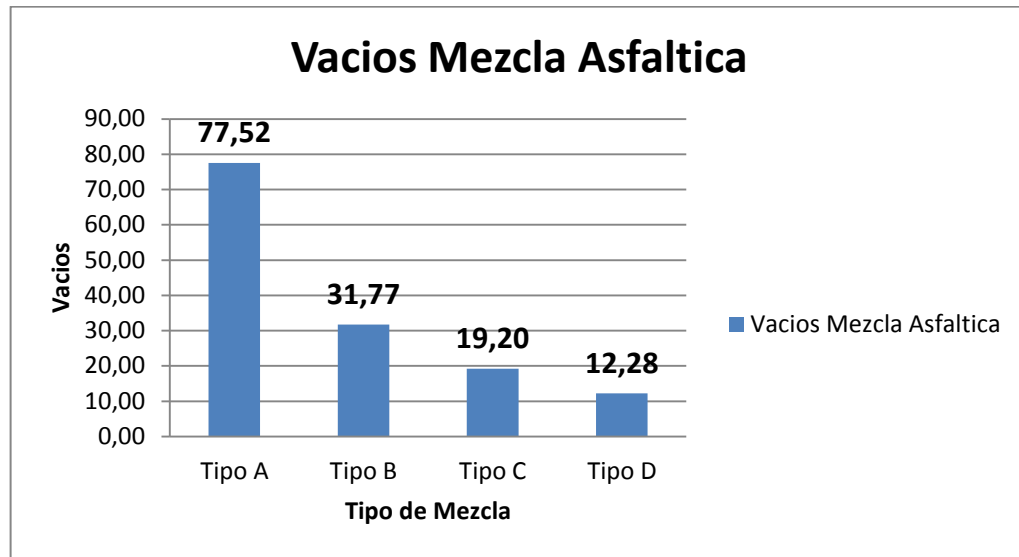
$$\boxed{Vacios\ Mezcla\ Asfaltica = \frac{(l - j)}{l}}$$

Ecuación 9

Dónde:

j = volumen de vacíos con aire
l = vacíos agregados minerales (vam)

Gráfica 17: Vacíos de Mezclas Asfálticas



Fuente propia

4.6 ESTABILIDAD MARSHALL Y FLUJO MARSHALL

El ensayo de estabilidad y flujo está regido por la norma INV E-748-07. Se colocaron las briquetas en un baño de agua a una temperatura de 60°C durante 35 minutos que es el tiempo estimado para que las briquetas obtengan esta temperatura, la cual es la temperatura en la que se realizó el ensayo, éste se desarrolló con la máquina de ensayo a la compresión y su mordazas, las cuales consiste en dos segmentos cilíndricos con un radio interior de 50,8 mm. Las mordazas se colocaron en el baño de agua junto con las briquetas, esto se realizó para darle mayor tiempo de conservación a la temperatura de las briquetas, después del tiempo establecido por la norma se sacaron las mordazas se limpiaron y engrasaron para con ello empezar la ejecución del ensayo.

En seguida se sacó la primera biqueta del baño de agua y fue ubicada en el centro de la mordaza inferior, a continuación se coloca la parte superior con el deformímetro y todo este conjunto se colocó en la maquina a la compresión en todo el centro, luego y verificando que el deformímetro estaba en cero se comenzó a aplicar la carga sobre la probeta, hasta que ocurrió la falla, esta se obtuvo cuando la indicado de carga de la maquina deja de aumentar y comienza a

disminuir, con el valor máximo registrado en la maquina se obtiene el valor de la estabilidad y el flujo de las briquetas se determinó con la lectura del deformímetro en el instante donde se registró la mayor carga. Este valor indica la disminución del diámetro entre la carga cero del ensayo y el punto de falla de la biqueta. Por medio del procedimiento mencionado anteriormente se determinó la estabilidad y el flujo de las briquetas tipo A, las cuales arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 29: Resultados estabilidad Marshall

Briqueta No.	Asfalto (%)	Espesor Briqueta (mm)	Estabilidad			Flujo (mm)
			Lect. Def. (KN)	Medida (kgf)	Corregida (kg)	
a	b	c	d	e	f	g
1	10,49	67,8	18,220	1857,89	1677,675	5,59
2	10,49	65,6	13,820	1409,23	1340,178	5,97
3	10,49	68,5	17,150	1748,79	1549,428	4,83
Promedio.	10,5	67,3	16,397	1671,97	1522,427	5,463

Fuente: Propia

En la tabla 29 se hallaron la estabilidad y el flujo de las tres probetas del tipo A, donde los resultados obtenidos fueron de 1522,43 kg y 5,46 mm, respectivamente. Es importante mencionar que los datos de la columna b fueron determinados en el numeral 4.2.2 la extracción del cemento asfáltico (AC), del pavimento asfáltico recuperado (RAP). Los datos de la columna e y g, fueron los observados durante este ensayo, el dato de la columna g es la conversión de unidades de kgf a KN, y para el dato de estabilidad corregida se utilizó la tabla 1 de la norma INV E 748-07 la cual relaciona el espesor con un factor de corrección. Para la biqueta 1, 2 y 3 los factores fueron 0,903, 0,951 y 0,886 respectivamente.

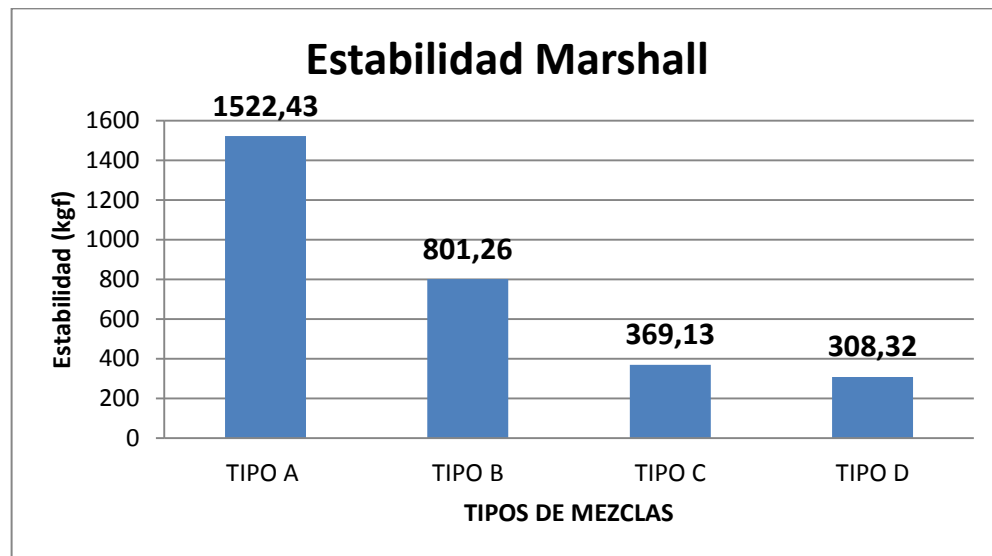
Para las probetas de los tipo B, C y D, se realizó un cambio en la ejecución del ensayo de estabilidad y flujo debido a que la incorporación de caucho a su diseño género que estas se volvieran absorbentes, y al momento de colocarlas en el baño maría, se alteraban los resultados obtenidos del ensayo. Por lo cual y basándose en la normal anteriormente mencionada, este calentamiento de la muestra se realizó por medio de un horno a temperatura de 60°C pero esta vez el tiempo necesario para que la probeta llegara a dicha temperatura fue de dos horas. El resto del procedimiento fue el mismo realizado para las probetas del tipo A.

Tabla 30: resultados estabilidad Marshall en probetas de los TIPOS B, C, D

Briqueta No.	Asfalto (%)	Espesor Briqueta (mm)	Estabilidad			Flujo mm
			Lect. Def. KN	medida (kgf)	corregida (kg)	
a	b	c	q	r	s	u
0	10,49	70,3	6,75	687,80	586,69	11,05
1	10,49	69,6	9,58	976,30	850,36	12,01
2	10,49	69,8	11,01	1121,50	966,73	11,18
Promedio.	10,49	69,9	9,11	928,53	801,26	11,41
0	10,49	69,8	3,19	324,80	279,9776	19,41
1	10,49	70,7	4,54	462,60	390,897	17,83
2	10,49	73,1	5,29	538,90	436,509	17,17
Promedio.	10,49	71,2	4,34	442,10	369,127867	18,14
2	10,49	75,5	3,05	310,60	238,8514	17,55
3	10,49	76,0	4,76	485,10	370,1313	15,65
4	10,49	76,1	4,07	415,20	315,9672	16,66
Promedio.	10,49	75,9	3,96	403,63	308,316633	16,62

Fuente: Propia

Gráfica 18: estabilidad Marshall

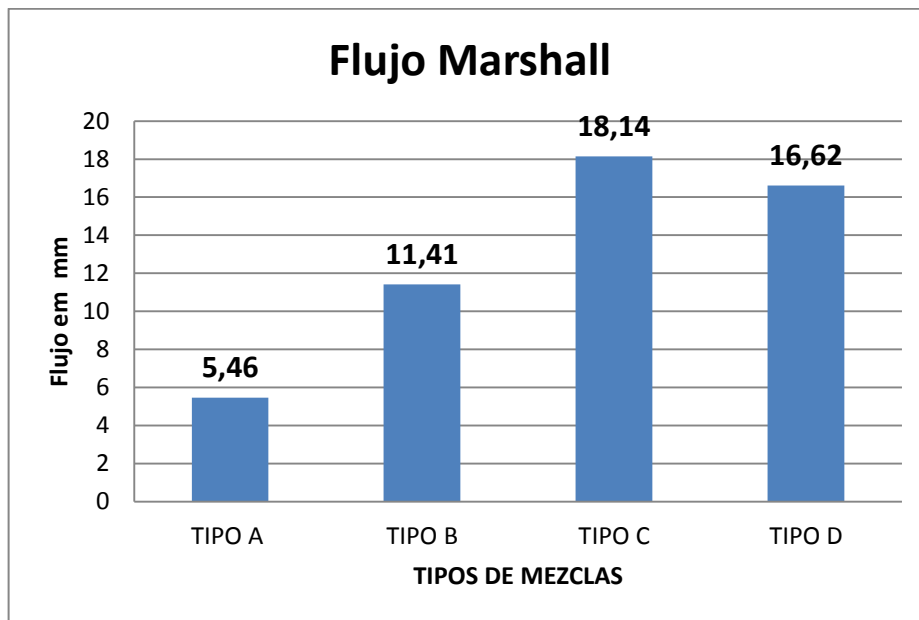


Fuente: Propia

De la gráfica 17 se observó que la tipo A es la mezcla que más capacidad tiene de soportar carga dado que el resultado obtenido fue de 1522,43 Kgf pero con la incorporación de caucho reciclado de las llantas este valor se redujo cerca del

50% si se compara con las de tipo B, la tipo C y la tipo D; en las dos últimas se obtuvieron valores que están muy por debajo de las especificaciones y por esto se puede decir que el grano del caucho reduce considerablemente la capacidad de carga de las probetas; así las cosas, pareciera poco recomendable utilizar porcentajes de caucho mayores al 5% del total de la mezcla; respecto de las mezclas tipo A y Tipo B se puede indicar que ellas satisfacen la exigencia de estabilidad contenida en la especificación 450-07.

Gráfica 19: flujo Marshall



Fuente: Propia

Por otra lado y debido al exceso de Cemento Asfáltico del RAP original, los flujos obtenidos en todas las mezclas presentan valores muy altos respecto de cualquier especificación; ahora bien, con la incorporación del CRLI la tendencia fue a aumentar dado que la mezcla tipo B aumento el doble de la tipo A y en la tipo C se triplico; no obstante cuando el porcentaje de caucho fue del 15%, esa tendencia se modificó, en el sentido que empezó a decrecer; desafortunadamente por el cronograma no fue factible tratar de evaluar esta característica con proporciones de CRLI más altas, considerando que la tendencia obtenida orientaría a que el flujo tendría un valor máximo en función de los diferentes porcentajes de CRLI.

Dado los resultados de las mezclas de pruebas, incluyendo la mezcla asfáltica con el solo RAP, se puede estipular que ningún de ellas cumplió simultáneamente con las características de estabilidad Marshall y flujo Marshall que se tomaron como referencia para efectos comparativos, en función de todas las observaciones, del proceso de manipulación de todos los materiales y de algunos de los resultados

obtenidos pareciera que un proporción razonable del CRLL, como agregado de aporte, puede ser el 5% en peso y preferencialmente utilizando partículas de ese caucho equivalentes al tamaño de las arenas finas y del llenante.

5 CONCLUSIONES

- El uso del material CRLI, como agregado de aporte, se tradujo en dificultades al momento del proceso de compactación de las mezclas asfálticas de prueba. Al momento de realizar su dosificación y como se mencionó anteriormente, las gravas o el tamaño retenido de las partículas de CRLI superior a $\frac{3}{4}$ " no permiten una mezcla adecuada y por ende el armado de estas. Por este motivo, se dedujo que el uso del caucho reciclado de las llantas para las mezclas asfálticas debe manejarse con tamaños comprendidos entre el tamiz de No. 40 y el tamiz No. 200. El anterior criterio fue el finalmente seleccionado para preparar las mezclas asfálticas de prueba, observando que resultaba más práctico el proceso de compactación y las probetas presentaban un mejor terminado.
- En cuanto a los porcentajes utilizados de CRLI en la diferentes mezclas de pruebas, se puede establecer que la TIPO B, es decir la que posee menor cantidad de caucho es la que mejor se comporta a la luz de las pruebas de caracterización desarrolladas, sin que ello implique que con la adición de caucho se pudiese detectar una mejora en las propiedades de la mezcla, respecto de la mezcla TIPO A, que fue elaborada utilizando únicamente el RAP. Respecto de las mezclas TIPO C y TIPO D, que se prepararon con porcentajes de caucho del 10 y del 15% respectivamente, bajo los indicadores establecidos presentaron un comportamiento más pobre que las mezclas TIPO B.
- En virtud, que a pesar de la investigación de antecedentes efectuada, no se encontró una tecnología específica para el tipo de mezclas asfálticas que motivaron el proyecto, se adoptó la tecnología de las mezclas asfálticas en caliente y su método de diseño denominado Marshall; bajo ese esquema y la normatividad que rige a este procedimiento, se tropezó con dificultades en el manejo de las temperaturas de mezcla y compactación, así como en los procesos donde se requiere adoptar etapas de saturación y de verificación de propiedades físicas fundamentadas por el desplazamiento de un sólido en agua; en adición, se decidió por una variante en cuanto a la temperatura para el ensayo de estabilidad y flujo, evitando la inmersión en una baño maría y reemplazándola por calentamiento en horno hasta lograr la temperatura estándar de 60°C. en atención a lo descrito, es que se puede explicar, que la mezcla TIPO A, presentara mejor comportamiento ,

que las demás, habida cuenta que por estar constituida íntegramente por RAP, la tecnología adoptada del Marshall le resultaba perfectamente aplicable; un aspecto relevante, tuvo que ver por ejemplo que las probetas elaboradas con la mezcla TIPO A, presentaban impermeabilidad, mientras que las mezclas elaboradas con caucho, es decir las mezclas TIPO B, TIPO C y TIPO D, presentaban absorciones significativas de agua, lo cual se traducía en su inestabilidad manifiesta fundamentalmente al intentar su calentamiento.

- Para la ejecución del proyecto se dispuso de los insumos factibles y se acudió a la capacidad instalada del laboratorio de materiales de la universidad de ingeniería civil; como consecuencia, se utilizó un RAP, que a lo largo de este documento se indicó, que al efectuar las pruebas de extracción en frío, estaba conformado por una cantidad elevada de cemento asfáltico, del orden del 2,24% al 10,5%; así las cosas, al utilizarlo sin adición de caucho, si bien su estabilidad era razonable no sucedió lo mismo con su condición de flujo, que necesariamente resultó mayor a los admisibles para una mezcla asfáltica en caliente; probablemente la explicación de una estabilidad razonable tiene como origen que al desarrollar el recalentamiento del RAP para su compactación, el cemento asfáltico que poseía presentó un endurecimiento adicional a la naturaleza misma de este producto. Respecto del caucho utilizado en su versión CRLL, correspondió a un producto disponible en el mercado, por lo cual resultaba inaplicable un control en cuanto a las formas y tamaños de sus partículas; es el caso, que dentro de este insumo se encontraron fibras que no necesariamente se podrían asimilar a partículas equivalentes a la de un agregado pétreo.
- Como se puede desprender de la lectura de este documento, el principal ingrediente para su obtención, corresponde a la preparación y ejecución de ensayos de laboratorio utilizados de manera convencional en las tecnologías de pavimentos; no obstante también se puede intuir, que muchas de las tareas adelantadas tomaron como orientación la metodología de ensayo y error, motivada como se manifestó previamente, en la carencia específica de una tecnología para el ejercicio que se ejecutó.
- Resulta conveniente comentar, que en este momento la tendencia para el uso del caucho producido por el reciclado de las llantas (CRLL), corresponde a utilizarlo como un agente modificador de los cementos

asfálticos, para lo cual se requiere un proceso muy elaborado para la incorporación de ese caucho. Esta tendencia resultaba fuera del alcance y posibilidades del presente trabajo, por lo cual a partir de acá se puede tener un abanico de alternativas para futuros proyectos de grado.

6 BIBLIOGRAFÍA

ALCOFA, El sector Automotor Colombiano, 2008. Manual Estadístico 28 (5)

ANGULO Ricardo y DUARTE J. L. “Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en PAVIMENTOS”. Proyecto de grado para optar el título de ingeniero químico. Bucaramanga, Colombia. Universidad industrial de Santander, Facultad de Ciencias Fisicoquímicas, 2005. 94p. (3)

Artículo de REPSOL. Cementos asfálticos. [En línea]. <http://goo.gl/qFPM9n>. [Fecha de consulta]: Septiembre 7 del 2013. (6)

BOTASSO. H.G, Cuattrocchio. Informe “Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera.” [En línea]. <http://goo.gl/zAVZ9M>. [Fecha de consulta]: Septiembre 26 del 2013. (8)

BROCK, J. D. Fresado y reciclaje. En: Boletín técnico T-127S. ASTEC. Chattanooga. Septiembre, 1997. 26 p. (7)

HAIJ, Y. Elie, SEBAALY E. Peter Y SHRESTHA Raghobar. Laboratory Evaluation of Mixes Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP), Road Materials and Pavement Design. En: Taylor & Francis. University Nevada. 19, septiembre, 2011. Sección 10:3, 495-517p. (2)

Redacción vehículos. ESTE ES EL DESTINO FINAL DE LAS LLANTAS DE SU VEHÍCULO. En: El Tiempo. Bogotá D.C. 12, Julio, 2013. 1 p. (1)

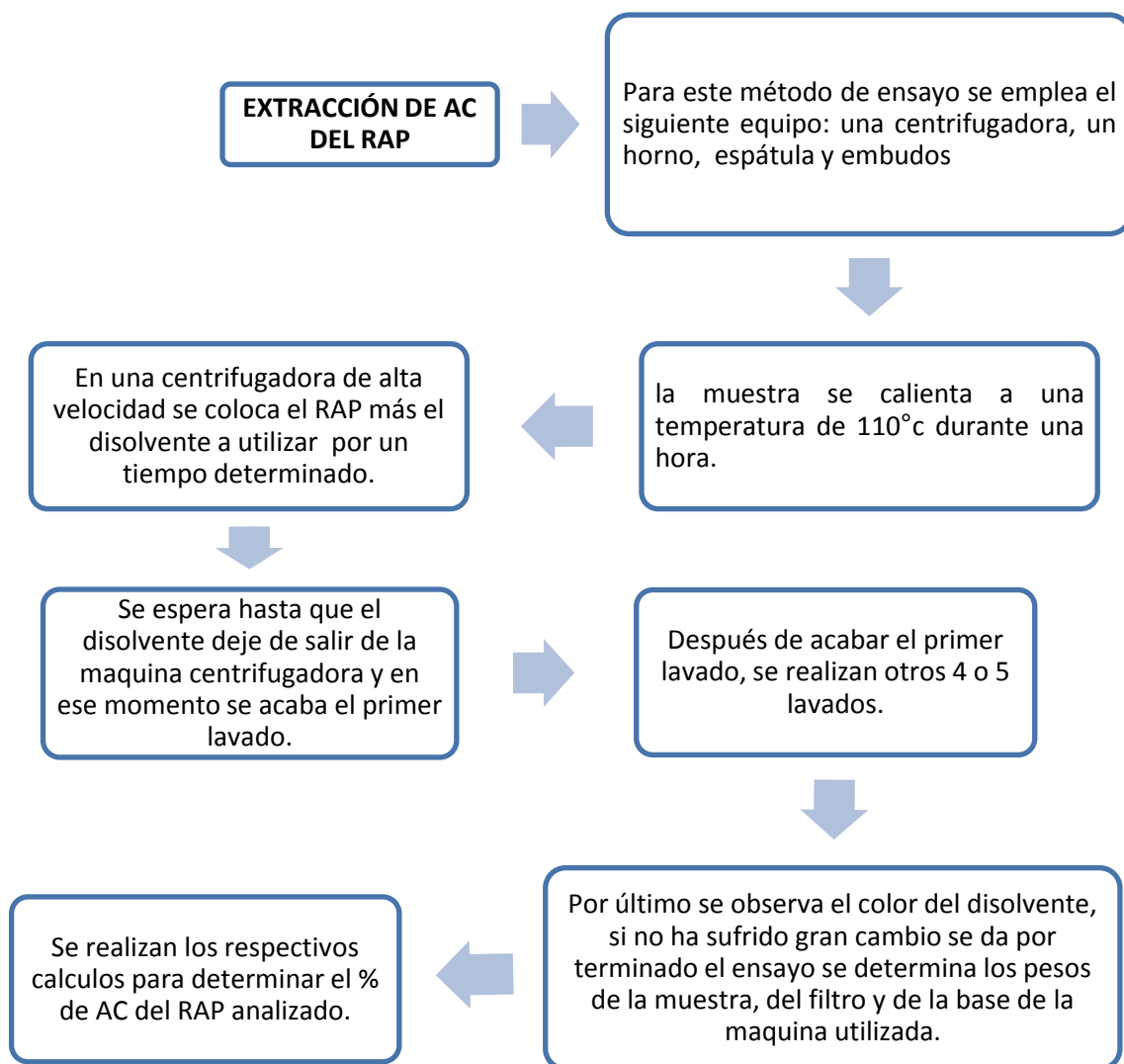
XIAO Feipeng y Serji N. Amirkhanian. “Resilient Modulus Behavior of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement”. Road Materials and Pavement Design. En: Taylor & Francis. Clemson. 19, September, 2011. Sección, 9:4, 633-649p. (4)

7 ANEXOS

7.1 PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)

7.1.1 Extracción en frío Del Pavimento Asfáltico Recuperado

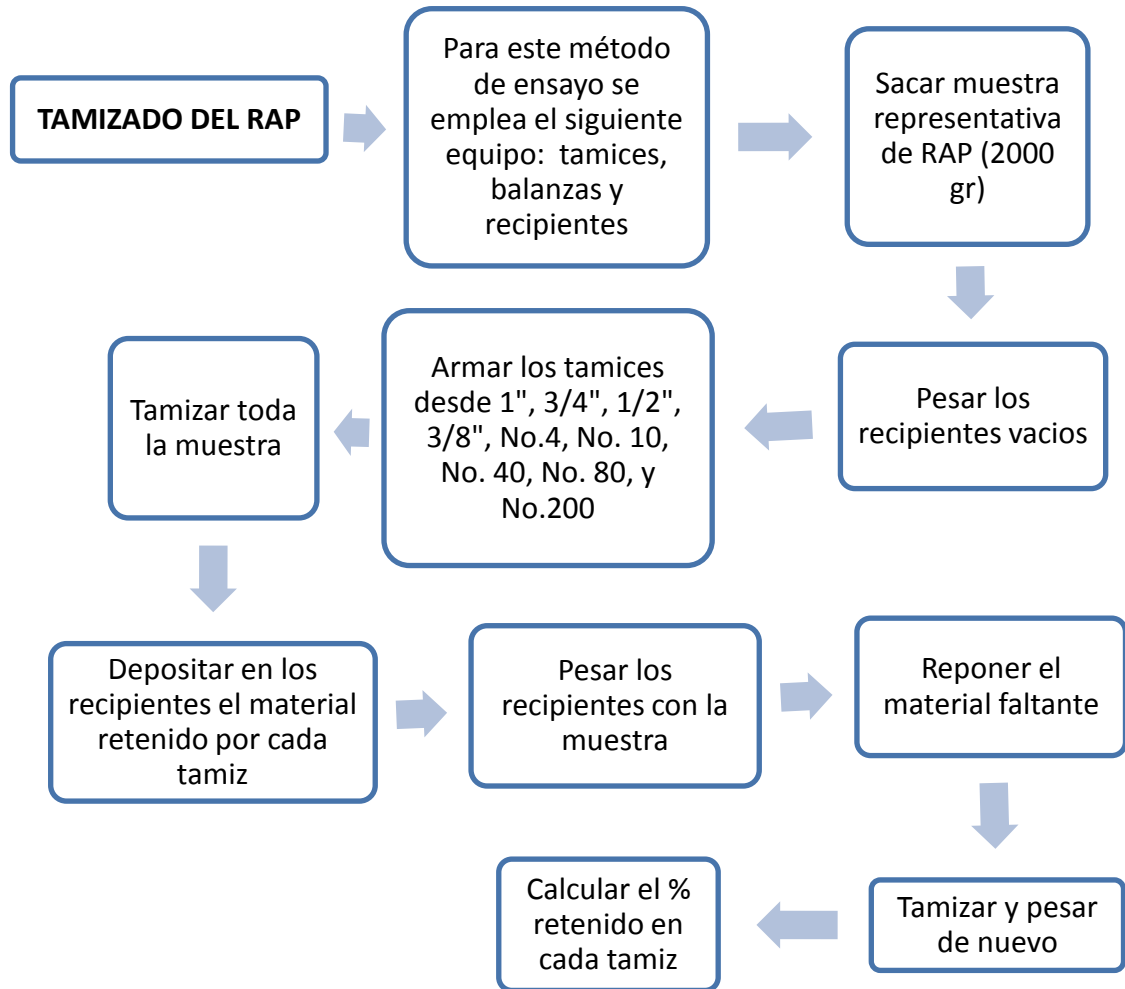
Figura 2: Extracción del RAP



Fuente: propia

7.1.2 Tamizado Del Pavimento Asfáltico Recuperado

Figura 3: Granulometría RAP

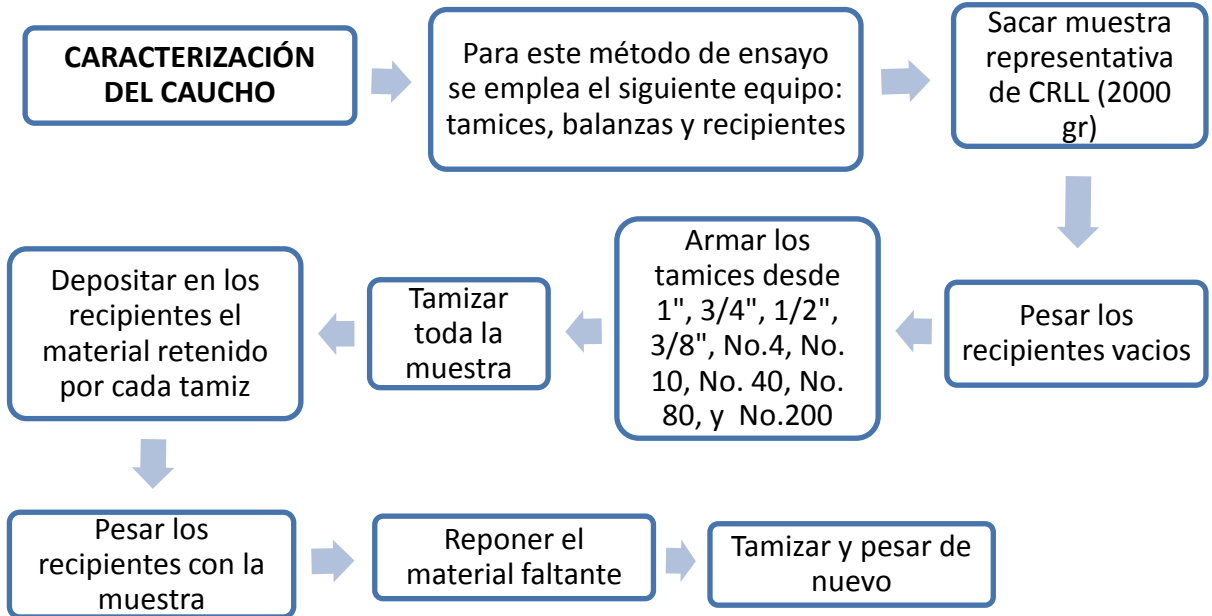


Fuente: propia

7.2 PRUEBAS PARA CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS (CRLI).

7.2.1 Caracterización Del Caucho

Figura 4: Granulometría del caucho



Fuente: propia

7.3 CRONOGRAMA

		Cronograma de actividades																																			
Fases	Actividades	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8				Mes 9			
		Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4
RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	Se busca información en las diferentes bases de datos acerca de mezclas asfálticas que en su diseño hayan incluido RAP o CRL.	█																																			
	Se analiza la información encontrada y se seleccionada la información que más pueda aportar a la investigación en desarrollo.			█	█	█	█																														
OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	Caracterización del caucho reciclado de llantas					█	█	█	█																												
	Caracterización de los Cementos Asfálticos (AC)									█	█	█	█	█	█	█	█																				
DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE PRUEBA	Caracterización del Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)																	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
	Ensayos para la obtención de parámetros y funcionalidad																	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
ANÁLISIS DE RESULTADOS	Comparación y evaluación de las mezclas asfálticas con RAP y CRL, y las mezclas asfálticas convencionales																																	█	█	█	█
																																		█	█	█	█

7.4 PRESUPUESTO

MATERIAL	COSTO POR UNIDAD (PESOS)	CANTIDAD UTILIZADA (Kg)	TOTAL (PESOS)	LUGAR DE OBTENCIÓN	DESCRIPCIÓN
CRL	\$ 40/Kg	30	\$1200	Vulcanizadora	El material fue obtenido en la serviteca de la calle 13 con carrera 32
RAP	Donación	200	\$ 0	Obra de la calle 94 por NQS	Este material fue donado por la obra de la calle 94 por NQS