

**COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN FRIO
ADICIONADA CON PARTÍCULAS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC)**

SEBASTIÁN PÉREZ ACOSTA

CÓDIGO: 150803

WARSBERG YUSSIF LEMUS FRANCO

CÓDIGO: 150811

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2018

**COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN FRIO
ADICIONADA CON PARTÍCULAS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC)**

SEBASTIÁN PÉREZ ACOSTA

CÓDIGO: 150803

WARSBERG YUSSIF LEMUS FRANCO

CÓDIGO: 150811

**Trabajo final de especialización presentado como requisito para optar al título de:
Especialista en ingeniería de pavimentos**

Docente asesor Ing. Carlos José Slebi Acevedo

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2018



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primeramente a Dios por sus grandes bendiciones, a mi esposa Pao por su incondicional apoyo, a mi adorada hija Sofía quien es la razón más grande mi vida y de mis proyectos, a mis padres por sus palabras de apoyo y a todas las personas que hacen parte de vida cotidiana.

Warsberg Yussif Lemus Franco

Ante todo dedico este proyecto a mi madre, María Helena Acosta Rojas quien me ha brindado su apoyo incondicional, inculcándome la virtud de la responsabilidad y enseñadome que las metas se cumplen, a mi hermano Andrés Camilo Pérez Acosta por ser mi mayor motivación de superación, aprendizaje y pulcritud personal, a mi novia Eliana Sánchez Santamaría por acompañarme en cada paso de mi vida e impulsarme a alcanzar este logro.

Sebastián Pérez Acosta

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Carlos José Slebi Acevedo por su orientación apoyo y entrega en este proyecto, al Ing. Mauricio Álvarez por su generosidad y confianza al darnos la oportunidad de trabajar en el laboratorio de BATEMAN INGENIERIA, a todo el personal de laboratorio de BATEMAN INGENIERIA por su entrega compromiso y profesionalismo en la elaboración de ensayos, al Ing. Juan Gabriel Bastidas por habernos apoyado en la realización de los ensayos, a Hugo Rondón por sus asesorías de experiencia de laboratorios.

A nuestros compañeros de estudio que aportaron conocimientos y recursos según su experiencia laboral a lo largo de su vida profesional. Y a todos los docentes que aportaron en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

Pág.

1.	TITULO.....	8
2.	ALTERNATIVA DE TITULO	8
3.	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	8
3.1.	EJE TEMÁTICO	8
4.	INTRODUCCIÓN.....	9
5.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	10
6.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
7.	MARCO DE REFERENCIA.....	12
8.	MARCO CONCEPTUAL.....	26
9.	OBJETIVOS.....	27
10.	ALCANCE	28
11.	LIMITACIONES	28
12.	METODOLOGÍA	28
13.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	29
14.	PRODUCTOS A ENTREGAR	32
15.	INSTALACIONES Y EQUIPOS REQUERIDOS	32
16.	PRESUPUESTO DE TRABAJO DE GRADO.....	33
17.	ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN.....	33
18.	PROCEDIMIENTO.....	33
18.1.	GRANULOMETRÍA	33
18.2.	CANTIDAD DE EMULSIÓN.....	37
18.2.1	MÉTODO DEL LABORATORIO CENTRAL DE PUENTES Y CAMINOS EN FRANCIA (LCPC) 38	
18.2.2	MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO.....	39
18.2.3	MÉTODO MARSHALL MODIFICADO	40
18.2.4	MÉTODO DE LA SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS DE MÉXICO (SAHOP).....	41
18.2.5	MÉTODO INVIAS E-622-13	42

18.2.6	CANTIDAD FINAL	43
18.3.	FORMULA DE TRABAJO (INMERSIÓN – COMPRESIÓN)	43
18.4.	REEMPLAZO DE AGREGADO CON PVC Y CURVAS GRANULOMÉTRICAS FINALES.....	47
18.4.1	DENSIDAD DEL MATERIAL TRITURADO DE PVC	49
18.4.2	DENSIDAD DEL AGREGADO RETENIDO EN EL TAMIZ NO. 8 (2.35mm)	49
18.4.3	GRADACIÓN FINAL CON REEMPLAZO DE AGREGADO CON PVC	51
19.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
19.1.	INMERSIÓN COMPRESIÓN (FORMULA DE TRABAJO)	55
19.2.	ENSAYO TIPO MARSHALL	59
19.3.	ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA (RTI)	60
19.4.	DENSIDAD.....	67
20.	CONCLUSIONES.....	68
21.	BIBLIOGRAFÍA.....	70

1. TITULO

COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN FRIO ADICIONADA CON PARTÍCULAS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC).

2. ALTERNATIVA DE TITULO

Teniendo en cuenta el acuerdo 171 de la Universidad Católica de Colombia, donde se establece las alternativas de trabajo de grado en los programas de posgrado en el área de ingeniería; se ha optado por la alternativa de trabajo de investigación. Estudio del remplazo de agregado pétreo por PVC (policloruro de vinilo) en una mezcla asfáltica en frío.

3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de grado está enmarcado dentro de la línea de investigación aprobada por la Universidad Católica de Colombia, denominada modificación de mezclas asfálticas, de esta forma analizar un posible mejoramiento en las propiedades mecánicas y dinámicas de mezclas asfálticas.

3.1. EJE TEMÁTICO

El eje central de investigación será en la línea de asfaltos donde se realizará una comparación entre las características iniciales o base de una mezcla convencional y el comportamiento de la mezcla a la cual se remplazó parte de los agregados pétreos por fracciones de PVC del mismo tamaño.

4. INTRODUCCIÓN

Existen numerosos tipos de mezclas asfálticas las cuales dependen de muchos factores, como son los materiales básicos que la componen, su granulometría, rangos de temperaturas y metodologías tanto de mezclado como de su compactación.

Históricamente han predominado las mezclas asfálticas en caliente para la construcción de capas de rodadura en estructuras de pavimento. Sin embargo, la producción de estas mezclas tiene asociada una amplia afectación ambiental y económica. Es por esto que en los últimos años ha ganado espacio la implementación de mezclas asfálticas frías (MAF), con el fin de reducir el consumo de fuentes energéticas y minimizar así el impacto medioambiental generado por los gases de efecto invernadero emitidos por las plantas de producción de mezcla asfáltica en caliente (Israel Garcia, 2017). Las MAF son una combinación de agregados finos y gruesos con emulsión asfáltica, cuyo proceso de fabricación no requiere calentar previamente los componentes, se lleva a cabo a temperatura ambiente. Las MAF son fáciles de extender y compactar dadas las propiedades de viscosidad de la emulsión, lo que conduce a una buena adhesión y cohesión entre las partículas de agregado y por ende, un adecuado comportamiento de la mezcla (Reyes, Alvarez, & Valdés, 2014).

Este desarrollo ha proporcionado una nueva solución para reparaciones de carreteras y pavimentos. La mezcla en frío permite realizar trabajos de reparación a todas las temperaturas sin preocuparse de poder mantener el asfalto caliente durante el transporte desde la planta de asfalto hasta el lugar de trabajo (Caulfield, 2013).

La elaboración de una mezcla asfáltica fría es un proceso sencillo y a su vez económico, la cual la hace una excelente opción para adecuaciones rápidas que no posean un tránsito vehicular alto ni sus cargas sean elevadas. Se constituye por el mezclado de una cantidad de áridos con una curva granulométrica deseada o normalizada junto con una emulsión asfáltica del tipo deseado.

5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El siguiente proyecto se enfocará hacia el uso adecuado y dosificado del policloruro de vinilo (PVC) proveniente de la demolición de edificaciones, para reducir el impacto ambiental que este tipo de material genera; también será de utilidad como componente de los materiales agregados utilizados para la conformación de la mezcla asfáltica en frío reduciendo costos en el proceso constructivo y garantizando el buen funcionamiento de la estructura. Los beneficiarios principales del proyecto son las entidades cuya actividad principal es el reciclaje del material PVC, los recicladores de la ciudad quienes a futuro dentro de la cadena ambiental podrían mejorar su condición económica trasladando el material proveniente de las tuberías, tejas, pisos entre otros utilizados en construcción conformados por PVC y similares a las plantas de acopio y trituración del mismo para su posterior uso. Las empresas constructoras también se verán beneficiadas mediante la metodología empleada en el proceso constructivo reduciendo tiempos y costos del material garantizando la duración y calidad de las vías en el tiempo de vida útil. Se mitigaría el déficit de materiales granulares del que actualmente padece la ciudad al reemplazar porcentajes de los mismos por policloruro de vinilo (PVC) tratado. La población en general de la ciudad de Bogotá, encontraría con este método un incentivo personal para manejar de forma adecuada el material de PVC reciclado.

El proyecto presenta una alta viabilidad en su implementación debido a la conciencia ambiental que este residuo genera en la ciudad. La utilización del PVC es favorable para complementar los agregados de las mezclas asfálticas, conservando las propiedades técnicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en frío. Además de esto se protegerán los suelos afectados en la ciudad y se relegará poco a poco el uso de las canteras y zonas de río de producción para agregados.

6. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las mezclas asfálticas en frío (MAF) son una alternativa muy eficiente al momento de realizar adecuaciones y reparaciones en tramos viales donde el flujo vehicular no posee cargas considerables además de no poder cerrar permanentemente el paso vehicular por una gran cantidad de tiempo. Estas mezclas asfálticas poseen la gran ventaja que su almacenamiento y transporte es bastante noble, es decir, a comparación de las mezclas en caliente donde se debe contar con una temperatura mínima de mezclado y compactación y a la vez no exceder dichas temperaturas para evitar un envejecimiento, las mezclas en frío nos evitan todas estas complicaciones, al ser mezcladas y compactadas a temperaturas ambiente (Xiomara Vargas, 2010). Cabe aclarar que entre el tiempo de mezclado y compactación en las mezclas en frío también se establece un tiempo máximo dado que, si se sobrepasa, la emulsión asfáltica no brindara al máximo sus propiedades, aun así, el manejo de una mezcla en frío es más simple.

Posiblemente la mayor falencia que presentan las mezclas asfálticas en frío, es que sus propiedades son considerablemente menores con respecto a las mezclas asfálticas en caliente, bien sea por la capacidad de cohesión o adherencia que brinda la emulsión asfáltica entre agregados, dando paso a alteraciones a futuro como el ingreso de agua y el desprendimiento de fracciones de mezcla. ¿Será posible igualar el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica en frío con respecto a una mezcla en caliente?

Lo anterior nos da como necesidad buscar alternativas que mitiguen estas falencias no a tal punto de igualar el comportamiento de una mezcla en caliente por ahora, pero sí de aumentar su desempeño a corto y largo plazo.

7. MARCO DE REFERENCIA

La normatividad colombiana nos denota dos grandes grupos de mezclas asfálticas frías, mezclas asfálticas con una curva granulométrica densa o cerrada en la cual el tamaño de los agregados pétreos es bien distribuida con el fin de obtener una mezcla con pocos vacíos evitando el ingreso de agua a la mezcla. Por otra parte, existen las mezclas asfálticas frías abiertas, la particularidad de este tipo de mezclas es que su curva granulométrica no es tan bien distribuida como las cerradas, es decir, el porcentaje de agregados de gran tamaño es mayor con respecto a los de menor tamaño, esto da como resultado una mezcla más porosa, con una relación de vacíos mayor y puede que su desempeño sea inferior con respecto a las cerradas, puesto que posee una menor rigidez y resistencia al envejecimiento por mayor contenido de vacíos con aire.

Así parezcan las mezclas abiertas en frío poco viables, también poseen ventajas que se deben tomar en cuenta al momento de decidir qué tipo de granulometría usar, ya que dependiendo de la finalidad y la disponibilidad de materiales se escogerá que tipo mezcla se usar. Según (Reyes & Rondon, Pavimentos (Materiales, construcción y diseño), 2015) plantea una serie de ventajas y desventajas a grandes rasgos para mezclas asfálticas abiertas en frío.

Las principales ventajas de utilizar este tipo de mezclas son las siguientes:

- Ayudan a reducir el grafo de accidentalidad en las vías debido a que disminuyen el fenómeno de hidroplaneo al permitir el ingreso del agua a la mezcla durante su vida útil.
- Buena textura superficial, mejorando la fricción neumático-pavimento.
- Disminuyen el ruido de rodadura.

De la misma manera se enuncia las principales desventajas:

- Por su alta porosidad son de baja rigidez y resistencia mecánica.
- Se desintegran fácilmente.
- El asfalto dentro de la mezcla se oxida y envejece rápidamente, debido a la fácil entrada y posterior evaporación del agua.
- Son por lo general de baja durabilidad.

Para poder definir qué tipo de mezcla abierta en frío (MAF) el (IDU, 2011) e (INVIAS, 2013) establecen unos rangos granulométricos de los porcentajes retenidos en cada uno de los tamices estándar y así caracterizar que tipo de MAF es (tabla 1).

Tabla1. Distribución granulométrica usada en Colombia para MAF (INVIAS, 2013) (IDU, 2011)

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alterno	MAF-38 MAF25	MAF-25 MAF20	MAF-19 MAF12
37.5 mm	1 1/2"	100	-	-
25.0 mm	1"	70-95	100	-
19.0 mm	3/4"	-	70-95	100
12.5 mm	1/2"	25-55	-	70-95
9.5 mm	3/8"	-	20-45	-
4.75 mm	No.4	0-15	0-20	10-30
2.36 mm	No.8	0-5	0-10	0-10
75 μ m	No.200	0-2	0-2	0-2

En este tipo de mezclas en frío la norma nacional de vías (INVIAS, 2013) y el (IDU, 2011) parametrizan que podrán ser empleadas para bacheos y capas de espesor compacto superior a 7,5 cm, la MAF-25 para espesores entre 4 y 7,5 cm y la MAF-19 para espesores inferiores a 4 cm (Reyes & Rondon, Pavimentos (Materiales, construcción y diseño), 2015).

Por otra parte, las mezclas densas en frío MDF se diferencia de una abierta o porosa en que los agregados minerales presentan granulometría con variedades e tamaño (bien gradada) con algún porcentaje de finos. Esto permite, una vez compactada la mezcla, lograr una reducción importante en los espacios vacíos, con incrementos en su resistencia mecánica u disminución de la permeabilidad (Reyes & Rondon, Pavimentos (Materiales, construcción y diseño), 2015). La ventaja que predomina con las MAF es que logra una mejor compactación al poseer un llenado mineral lo suficientemente capaz de ocupar los espacios vacíos y así evitar el ingreso de agua al interior de la estructura además de llegar a detener o evitar la propagación de fisuras superficiales.

Al igual que las MAF las mezclas densas poseen para el caso nacional una caracterización establecida donde enmarcan los porcentajes de agregado limite que podrá pasar en cada tamiz, de esta manera tener un control y una uniformidad en todas las estructuras de pavimento que posean una MAF o MDF (tabla 2).

Tabla 2. Distribución granulométrica usada en Colombia para MDF (INVIAS, 2013) (IDU, 2011)

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alternativo	MDF-38 MDF25	MDF-25 MDF20	MDF-19 MDF12
37.5 mm	1 1/2"	100	-	-
25.0 mm	1"	80-95	100	-
19.0 mm	3/4"	-	80-95	100
12.5 mm	1/2"	62-77	-	80-95
9.5 mm	3/8"	-	60-75	-
4.75 mm	No. 4	45-60	47-62	50-65
2.36 mm	No. 8	35-50	35-50	35-50
300 μ m	No. 50	13-23	13-23	13-23
75 μ m	No. 200	3-8	3-8	3-8

Además de delimitar una granulometría específica el (IDU, 2011) plantea unas recomendaciones según la finalidad de la estructura de asfalto, es decir que según el medio donde se emplee se aconseja tanto el tipo de gradación como el espesor compacto (tabla 3).

Tabla 3. Recomendaciones dadas por (IDU, 2011)

Tipo de capa	Espesor compacto [mm]	Tipo de mezcla
IDU (2011)		
Rodadura	50-75 40-50	MDF20 MDF12
Intermedia	≥ 50	MDF20
Base asfáltica	≥ 75	MDF25
Bacheo	50-75 >75	MDF20 MDF25

La mayor falencia que poseen tanto las mezclas asfálticas abiertas como densas en frío es que en comparación con las mezclas en caliente no se logra tener la misma compactación, el recubrimiento

de los áridos es menor y las resistencias finales disminuyen considerablemente en comparación de una mezcla en caliente. Todos estos factores influyen en el comportamiento de la mezcla bajo las cargas vehiculares, factores ambientales a corto y largo plazo.

El daño por la influencia del agua en el pavimento de asfalto acelerará la destrucción del pavimento y disminuirá la vida útil de la carretera, esta afectación es una de las enfermedades más comunes de la carretera, especialmente en las regiones lluviosas y con inviernos fuertes. Al permanecer en contacto, el agua que entra al vacío del pavimento y produce constantemente presión hidrodinámica, es decir el vacío y la presión negativa provocada por las cargas dinámicas y ciclos de congelación y descongelación. El proceso conduce a una menor adherencia del asfalto, y la mezcla asfáltica ha perdido gradualmente fuerza adhesiva debida al agua que entra a la interfaz de asfalto y agregados.

Finalmente aparecen fugas sueltas, exfoliaciones, picaduras, etc. en el pavimento debido a que la película de asfalto se despegó de la superficie del agregado, este proceso acorta la vida útil del pavimento asfáltico y empeoran su nivel de rendimiento (Ming, 2012).

Analizando por otra parte la emulsión asfáltica juega un papel sumamente importante en el comportamiento de una mezcla asfáltica en frío ya que es el ligante que aglomerará toda la matriz de áridos.

La definición que brinda (Asphalt Institute, 1999) una emulsión asfáltica es la disgregación de las partículas de asfalto puras en agua por medio de un emulsificante para obtener un compuesto líquido a temperaturas ambiente promedio facilitando su manejo y utilización. Una emulsión asfáltica consiste en tres ingredientes básicos, asfalto, agua y un agente emulsivo. En algunas ocasiones la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes mejorados de recubrimiento, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura.

En la emulsión que se utiliza en la tecnología en frío se pueden distinguir dos fases: una discontinua conformada por gotas esféricas de cemento asfáltico y una continua conformada por el medio en el cual se dispersa (figura 1) (Arenas, 1999).

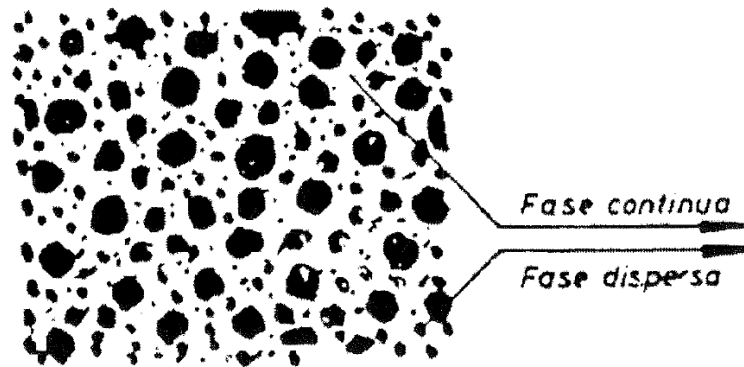


Figura 1. Fases de una emulsión asfáltica (Arenas, 1999)

Existen dos tipos de emulsiones según su distribución:

- Emulsiones directas: Cuando la fase continua es del tipo acuoso y a la fase discontinua del tipo aceitoso o (bituminoso). Son las más utilizadas en la tecnología en frío.
- Emulsiones inversas: Son dispersiones de agua en aceite. La fase continua es aceitosa, mientras que la fase discontinua es acuosa (Arenas, 1999).

Otro tipo de clasificación asocia las cargas que rodean las partículas de asfalto, este sistema se basa en una ley de electricidad básica, en donde las cargas con el mismo polo se repelen y las de polos opuestos se atraen. Los tres tipos de emulsiones se denominan aniónicas, catiónicas y no iónicas (Asphalt Institute, 1999). En las emulsiones catiónicas, el glóbulo de asfalto tiene carga positiva y gran afinidad con los agregados de origen silíceo. En las emulsiones aniónicas, la carga del glóbulo es negativa y tiene una gran afinidad por los agregados de origen calizo (Arenas, 1999).

Cuando se clasifica una emulsión asfáltica por su tiempo en la que el agua que hace parte de ella se libere al exterior se conoce como tiempo de rotura.

- Emulsiones asfálticas de rotura lenta (RL).
- Emulsiones asfálticas de rotura media (RM).
- Emulsiones asfálticas de rotura rápida (RR).
- Emulsiones asfálticas superestables (SS).

Los dos parámetros anteriormente mencionados son de gran importancia ya que dependen de ellos el proceso constructivo que se lleve a cabo como de los materiales a usar; si no se es conocedor de las

propiedades de la misma emulsión y del comportamiento que pasara a tener con los agregados no se podrá garantizar al máximo el funcionamiento de la mezcla asfáltica en frío.

Actualmente la tecnología en frío es una alternativa viable al momento de realizar una rehabilitación o reparaciones simples en tramos con flujos de tráfico liviano y con bajas frecuencias. Una alternativa que ha tomado gran fuerza, es la utilización de carpetas asfálticas las cuales se van a remplazar, este método es conocido como (RAP) por sus ciclas en inglés “Reclaimed asphalt pavement”. La utilización del RAP también se ha usado para mezclas asfálticas frías como agregado, todo esto con el fin de optimizar al máximo los recursos y convertir los pavimentos asfálticos en un posible ciclo de reutilización.

La necesidad constante de reparar las fallas en las carpetas asfálticas de manera localizada y sectorizada requiere en términos de cantidad de materiales y el momento en el cual las reparaciones necesitan ser ejecutadas, hacen necesario el uso de materiales que se pueden almacenar y usar cuando sea necesario. Aunque el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) es algo bien comprendido y existe un amplio conocimiento sobre su rendimiento, la incapacidad para producir y almacenar HMA en pequeñas cantidades para ser utilizada según sea necesario la hace inadecuada para bacheo y otras reparaciones localizadas. Para llenar esta necesidad, la mezcla asfáltica en frío (CMA) se usa normalmente, ya que sus características permiten que los usuarios tengan disponibilidad inmediata en stock, y úselo cuando y donde sea necesario (Diaz, 2016).

El mayor inconveniente que tienen las mezclas asfálticas frías ya sea por su metodología y naturaleza de fabricación es la resistencia y demás propiedades que se ven en gran medida disminuidas, esto ha llevado a conducir una serie de investigaciones a la modificación de las mezclas asfálticas frías con diversos materiales para poder compensar en algo está pérdida de propiedades.

En la investigación realizada por (Reyes, Alvarez, & Valdés, 2014) se realizó un reemplazo de material pétreo por cemento portland en la curva granulométrica y se analizó el comportamiento de dichas mezclas por ensayos de resistencia a la tracción indirecta y resistencia conservada (figura 2,3).

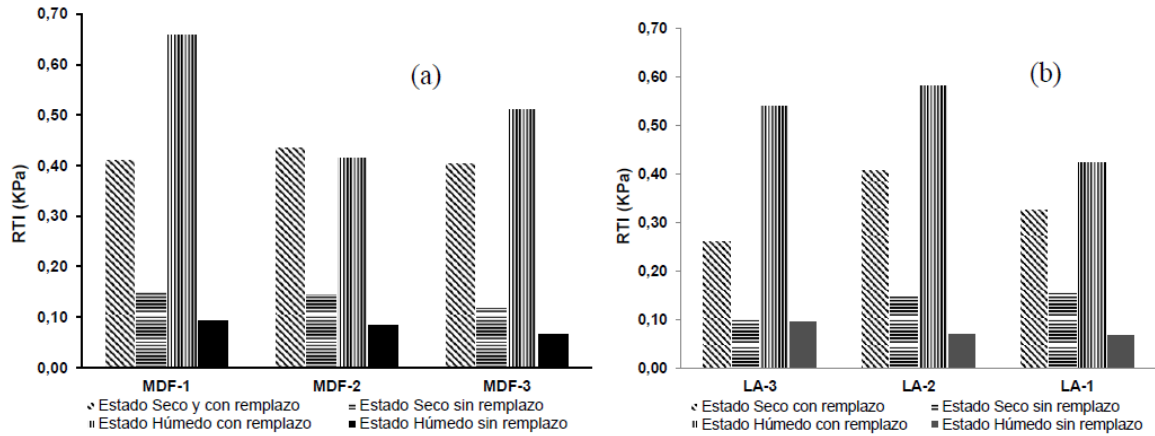


Figura 2. Resistencia a la tracción indirecta de MDF-INVIAS en estado seco y húmedo (a) y LA-IDU en estado seco y húmedo (b) (Reyes, Alvarez, & Valdés, 2014)

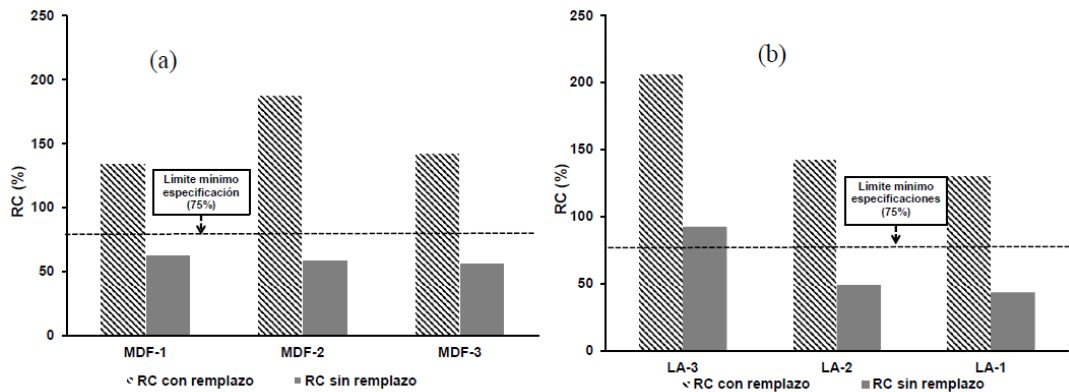


Figura 3. Resistencia conservada de MDF-INVIAS (a) y LA-IDU (b) (Reyes, Alvarez, & Valdés, 2014)

Lo anterior demostró como se había mencionado anteriormente que al momento de tener contacto peramente una mezcla asfáltica en este caso en frio con el agua, altera considerablemente las propiedades tanto mecánicas como dinámicas. Para el caso de mezclas en frio al no lograr una adhesión y un recubrimiento igual que al de una mezcla asfáltica en caliente, se da una mayor posibilidad del ingreso de agua y así mismo será su alteración.

Entrando en materia de la modificación de asfaltos ya sea bien por vía seca o por vía húmeda, se ha usado gran variedad de elementos poliméricos por su fácil elaboración y su producción en masa. Dichas modificaciones se han realizado en su mayoría con mezclas asfálticas en caliente.

El gran objetivo de la modificación de mezclas asfálticas con polímeros u otros aditivos es intentar modificar sus propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas. La idea de emplear asfaltos modificados tiene como propósito mejorar la respuesta que experimentan las mezclas que los utilizan, cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga (monotónica y cíclica) y del medio ambiente. El uso de esta tecnología es también frecuente cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o en aplicaciones especializadas que permiten espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores (Castro, Rondon, & Barrero, 2015).

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos, pues son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan totalmente sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés), cauchos sintéticos derivados del petróleo (estireno-butadieno- caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de los plastómeros se encuentran, entre otros: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD, respectivamente), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). Los elastómeros experimentan bajo carga una recuperación importante en la deformación. Este tipo de polímero al ser agregados al asfalto mejora principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga. Cuando las mezclas se modifican con aditivos plastoméricos se obtiene un incremento en la resistencia mecánica de las mezclas, debido a que el asfalto se vuelve rígido (Rahi, Fini, Hajikarimi, & Nejad, 2015).

La modificación de asfaltos con materiales en Colombia ha sido muy amplia, desde los años 1979 inicio una fuerte investigación en el uso de compuestos de origen no fósil, la mayoría de polímeros utilizados son por lo general producto del reciclaje o de desecho industrial. Otros por el contrario, como la asfaltita y el látex, se fabrican de materiales naturales (figura 4) (Rondón, y otros, 2007).

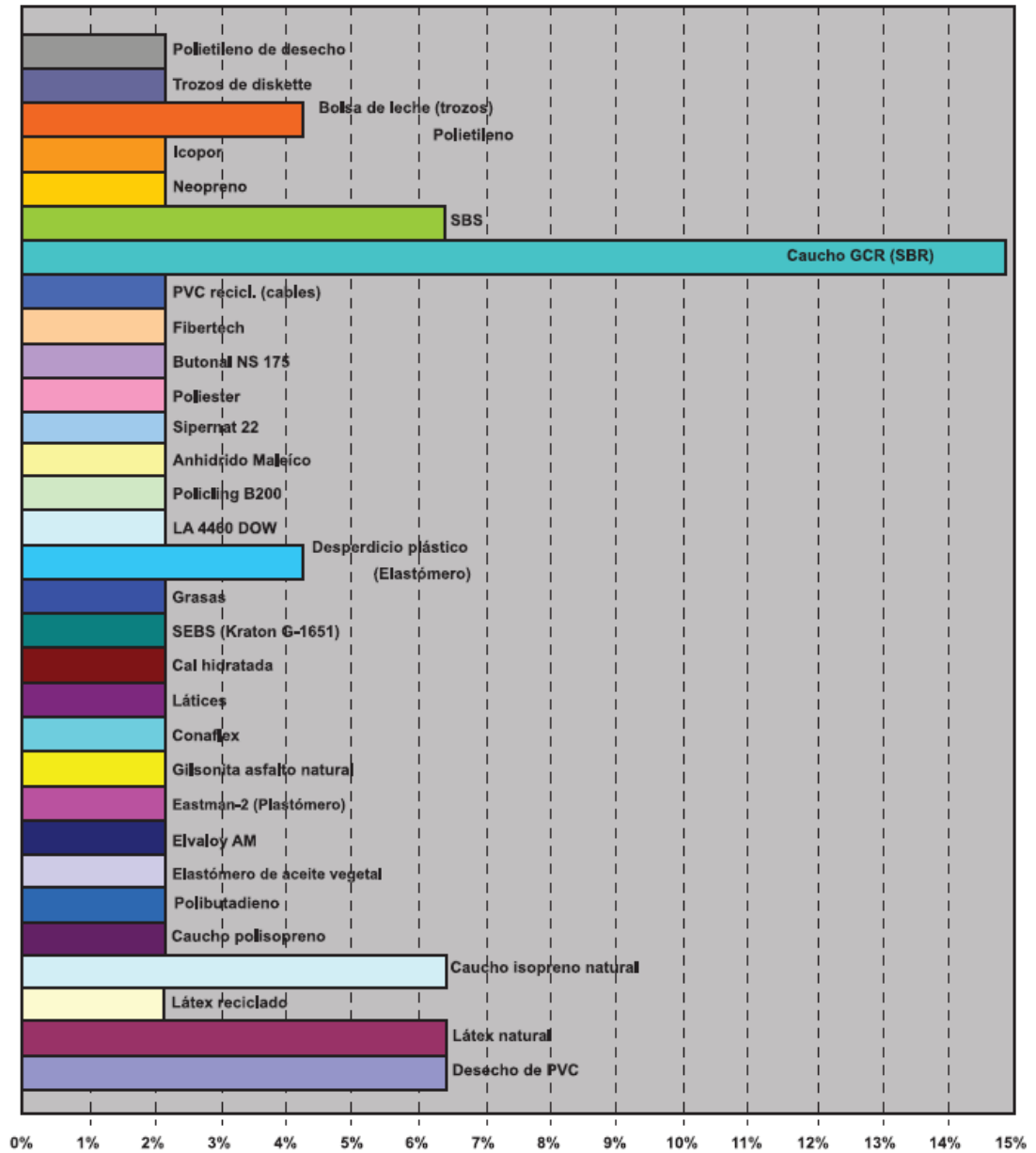


Figura 4. Modificaciones realizadas con materiales en Colombia (Rondón, y otros, 2007)

De acuerdo a lo anterior, la mayoría de los elementos usados para la modificación de asfaltos en Colombia han sido de tipo elastómeros.

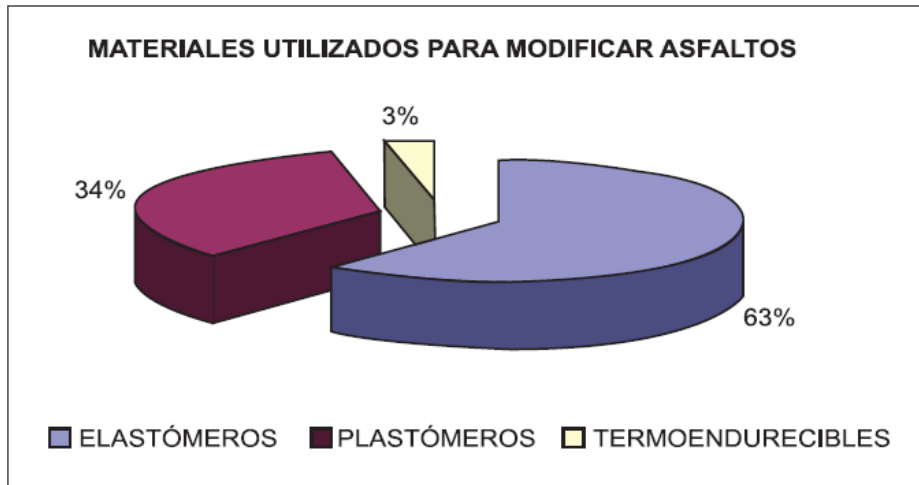


Figura 5. Materiales usadas para la modificación de asfaltos (Rondón, y otros, 2007)

El procedimiento usado para evaluar estas modificaciones en su mayoría es el ensayo Marshall, al ser un procedimiento económico y fácil de entender, sin embargo, esta alternativa no es tan confiable ya que dicho procedimiento se aleja en gran medida de la realidad (figura 6).

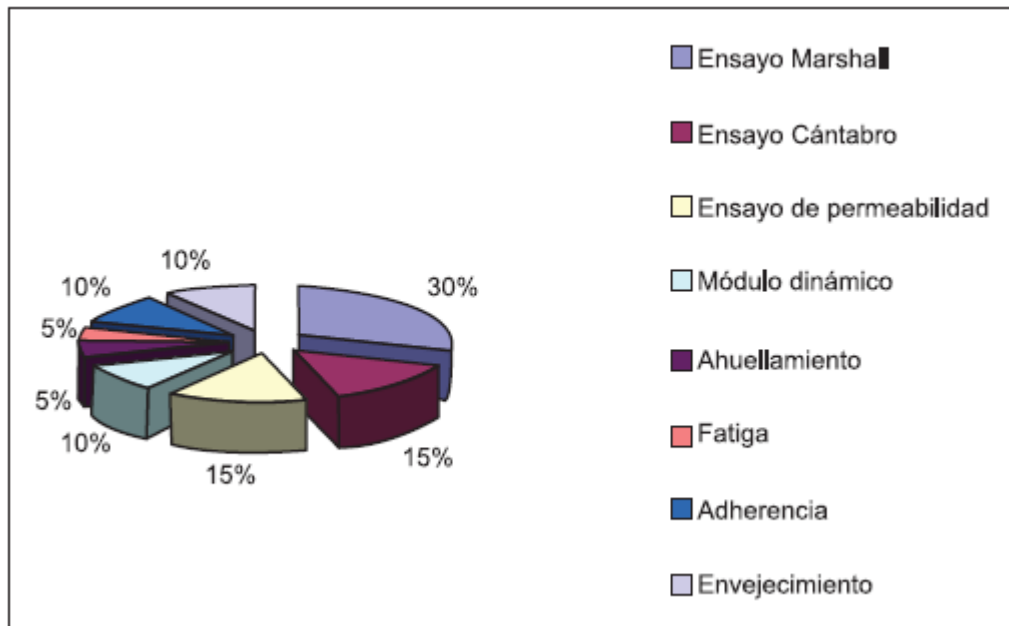


Figura 6. Ensayos de laboratorio realizados en asfaltos modificados (Rondón, y otros, 2007)

No siempre el comportamiento de una mezcla ya sea convencional o modificada se ve reflejada en los ensayos a la mezcla como se enuncio anteriormente. Los ensayos reológicos proporcionan parámetros muy utiles para determinar el comportamiento de un cemento asfaltico.

A la par de la modificación de asfaltos con polímeros también se enfoca la investigación del uso de residuos en su mayoría no reutilizables, es el caso del estudio realizado por (Maharaj & Maharaj, 2014), donde además de implementar en la modificación el polietileno de baja densidad (figura 7) y PVC (figura 8), ensayaron el comportamiento con la adición al cemento asfaltico aceite de motor usado (figura 9) y evaluar su comportamiento reológico.

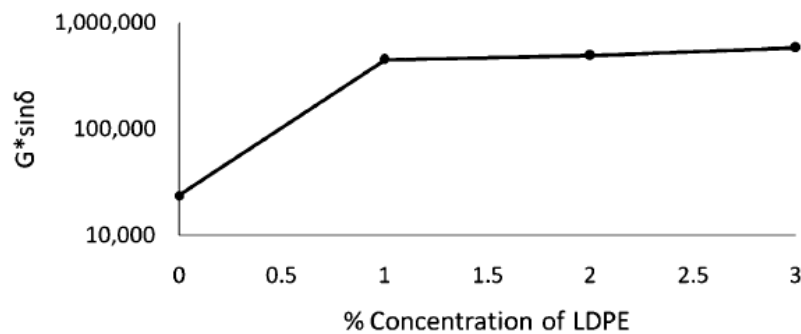


Figura 7. Variación de la resistencia al agrietamiento por fatiga con diferentes concentraciones de polietileno (Maharaj & Maharaj, 2014)

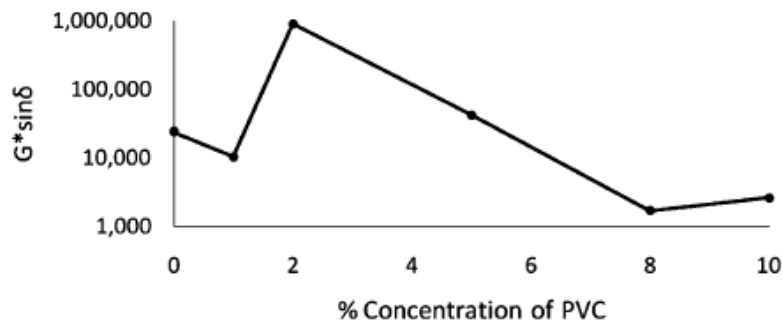


Figura 8. Variación de la resistencia al agrietamiento por fatiga con diferentes concentraciones de PVC (Maharaj & Maharaj, 2014)

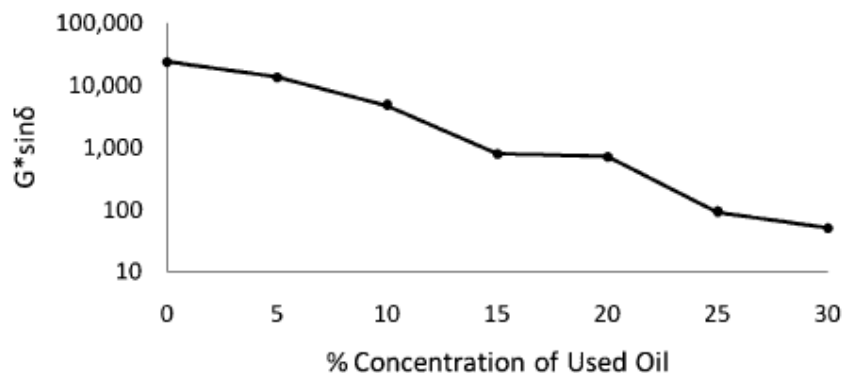


Figura 9. Variación de la resistencia al agrietamiento por fatiga con diferentes concentraciones de aceite de motor usado (Maharaj & Maharaj, 2014)

Según los resultados de la investigación de (Castro, Rondon, & Barrero, 2015) las propiedades reológicas se ven sumamente alteradas al modificar un cemento asfáltico convencional 60-70 (tabla 4) con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD) (tabla 5).

Tabla 4. Características reológicas del CA 60-70 (Castro, Rondon, & Barrero, 2015)

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70, sin envejecer					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1.00	1.00
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
58	10	85	4276	4.29	4.26
64	10	87	1701	1.70	1.70
CA 60-70 envejecido en RTFOT + PAV					
19	10	45	10193000	14415,1	7207,6
22	10	47	6659000	9105.0	4870.0

Tabla 5. Características reológicas del CA 60-70 modificado (Castro, Rondon, & Barrero, 2015)

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, sin envejecer					
64	10	68	2566,7	2,77	2,38
70	10	69	1294,3	1,39	1,21
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT					
70	10	70	2233	2,38	2,10
76	10	72	1289	1,36	1,23
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT + PAV					
22	10	43	10.329.130	15.145,4	7.044,4
26	10	44	7.111.600	10.237,6	4.940,1

Se pudo notar un cambio importante en los valores de ángulos de fase, módulos complejos y las componentes viscosas (módulo de pérdida de corte), reduciendo de esta manera el comportamiento viscoso o no recuperable del cemento asfáltico logrando un comportamiento más rígido con respecto al asfalto convencional.

Variando las temperaturas, el comportamiento viscoso sigue la misma tendencia a disminuir, rigidizando cada vez más la muestra, disminuyendo la fracción no recuperable del cemento asfáltico (figura 10) (Reyes, Guáqueta, Porras, & Rondón, 2013).

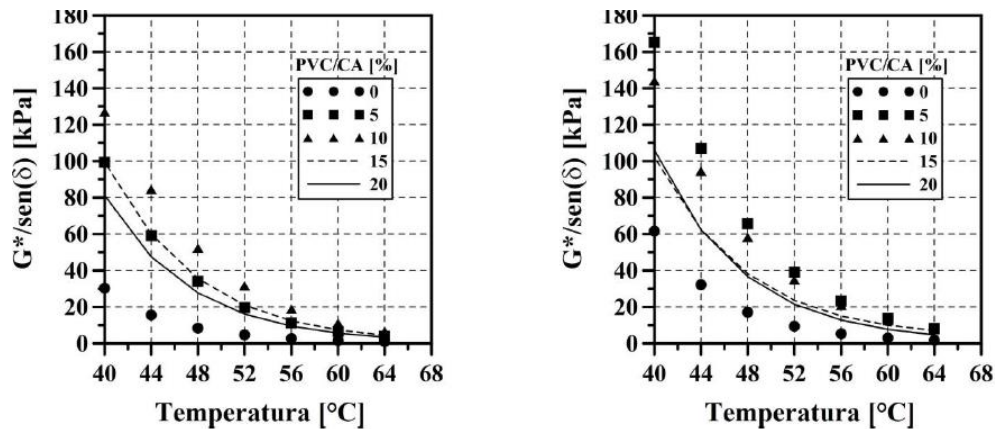


Figura 10. Evolución de $G^*/\sin(\delta)$ con el porcentaje de adición de PVC/CA y la temperatura sobre muestras sin envejecer y envejecida (Reyes, Guáqueta, Porras, & Rondón, 2013)

Al momento de analizar el comportamiento de asfaltos modificados con PVC mediante ensayos tradicionales (Marshall) los valores se ven muy alterados, las estabilidades con cantidades bajas de PVC y porcentajes superiores de asfalto arroja un valor mayor, pero al momento de aumentar el porcentaje de PVC, la mezcla con más cantidad de asfalto posee una menor estabilidad. En cuanto al flujo su comportamiento es inverso, a porcentajes bajos de PVC posee menor flujo cuando el porcentaje de asfalto es menor, al tener mayores porcentajes de PVC el que posee menor flujo es la mezcla que contiene mayor cantidad de asfalto (figura 11).

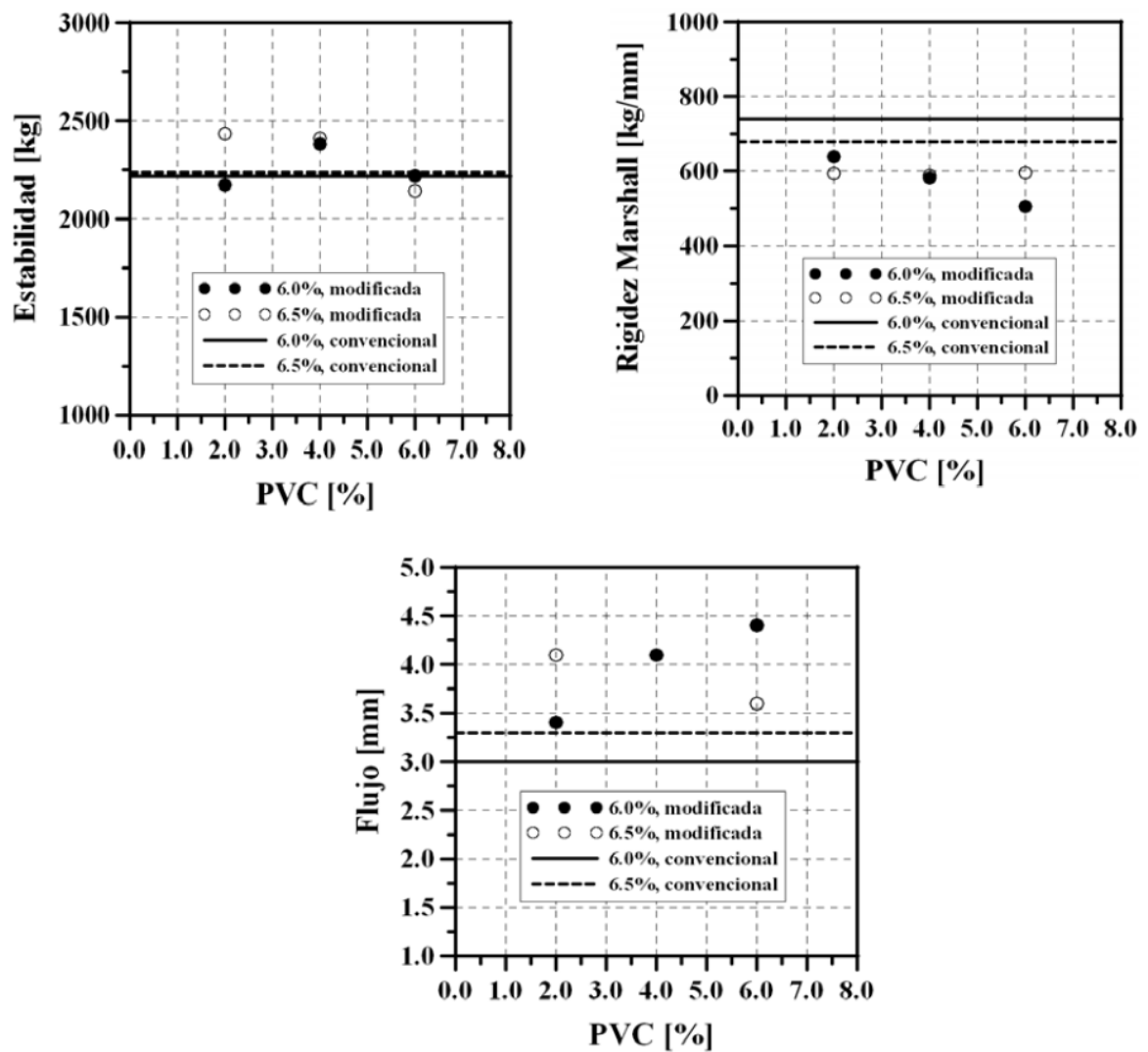


Figura 11. Comportamiento en ensayo Marshall de mezclas modificadas con PVC (Reyes, Guáqueta, Porras, & Rondón, 2013)

8. MARCO CONCEPTUAL

Reología del asfalto: Se trata del estudio de las propiedades naturales del cemento asfáltico refiriéndose a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo y de aplicación de una carga, modificando temperaturas, repeticiones y componentes modificantes al cemento asfáltico. Estos procedimientos a escala reducida arrojan variables muy eficaces al momento de evaluar el comportamiento de un cemento asfáltico y así prevenir o corregir propiedades según sea el caso donde se vaya a implementar la mezcla. Como se sabe el cemento asfáltico tiene un comportamiento visco-elasto-plástico, dando de esta manera fracciones de deformación recuperable, semi-recuperable y no recuperable.

Módulo de almacenamiento (G'): Es la energía almacenada por la muestra durante un ciclo de carga.

Módulo de disipación (G''): Es la energía perdida durante cada ciclo de ensayo por flujo o deformación permanente.

Módulo complejo (G^*): Se refiere a la relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante, siendo por lo tanto una medida de la resistencia del asfalto a la deformación cuando es solicitada por cargas dinámicas.

Angulo de fase (δ): Es el retraso con que la deformación del ligante sigue al esfuerzo aplicado, es decir, el ángulo que conforma el módulo complejo (G^*) con respecto al módulo de almacenamiento (G').

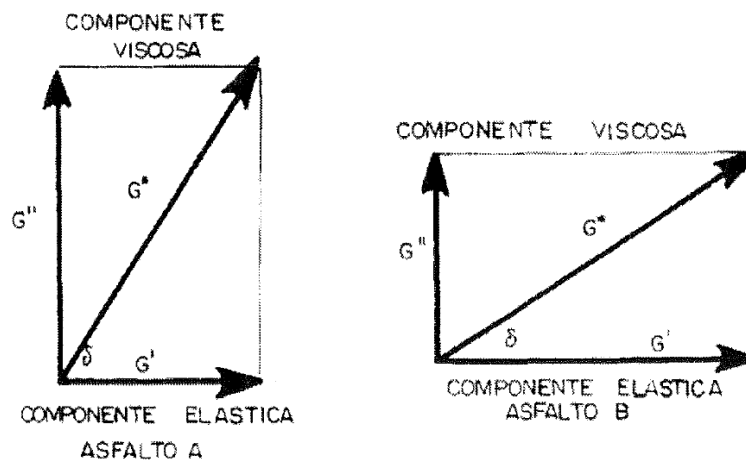


Figura 12. Graficas del comportamiento reológico para un cemento asfáltico (Arenas, 1999)

9. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en frío reemplazando porcentualmente material pétreo por partículas de policloruro de vinilo (PVC) con el mismo tamaño, mediante ensayos de laboratorio convencionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar por medio de ensayos de laboratorio el porcentaje de cemento asfáltico óptimo para una mezcla patrón y así evaluar el aumento o disminución de propiedades mecánicas.
- Evaluar la incidencia del agua para cada porcentaje de PVC y así determinar si las propiedades impermeables del PVC son representativas para el comportamiento de la mezcla.
- Determinar si la modificación de mezclas asfálticas densas en frío con material plastómero como el PVC aporta beneficios en el desempeño de la mezcla.

10. ALCANCE

Este proyecto se centra en la elaboración de una mezcla asfáltica en frío modificada con PVC, que busca la implementación de nuevas mezclas con mejores propiedades físico-mecánicas que cumpla la norma INVIAS y las especificaciones técnicas. De igual modo se establecerá el diseño de esta mezcla mediante ensayos de laboratorio en el cual se determinará el porcentaje óptimo de emulsión y el porcentaje de PVC adecuado para garantizar el buen comportamiento de esta mezcla.

Por otra parte, se hará la entrega de un documento a la Universidad Católica de Colombia con toda la investigación realizada, elaboración de ensayos, análisis y resultados, contemplados en este proyecto.

11. LIMITACIONES

El proyecto se ve limitado a la investigación detallada del PVC y al poder realizar más ensayos que puedan complementar el análisis de las propiedades propias de esta mezcla, esto debido al tiempo de la investigación, a la falta de equipos para poder realizar los ensayos y por el presupuesto contemplado para la investigación.

12. METODOLOGÍA

El diseño de la investigación es de tipo experimental ya que el material empleado es sometido a ensayos de acuerdo a lo indicado en las normas INV E-440-13, E-622, E-725 y E-748; Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall, prensa para compresión y aparato de tracción indirecta, para la mezcla MDF adicionada con el policloruro de vinilo (PVC).

En el proceso, se elaboran briquetas a diferentes porcentajes de emulsión para determinar el porcentaje óptimo de emulsión en la mezcla MDF por medio del ensayo de inmersión-compresión, se elaboran briquetas con adición de policloruro de vinilo (PVC) a diferentes porcentajes y sin adición de PVC para analizar el comportamiento del material, por último las curvas del comportamiento del material obtenidas serán analizadas con el objeto de determinar la resistencia de la mezcla en determinadas condiciones.

El suministro de material se hace a través de la empresa Doble AA, Incoasfalto y la trituración del PVC en Allan inyectoras.

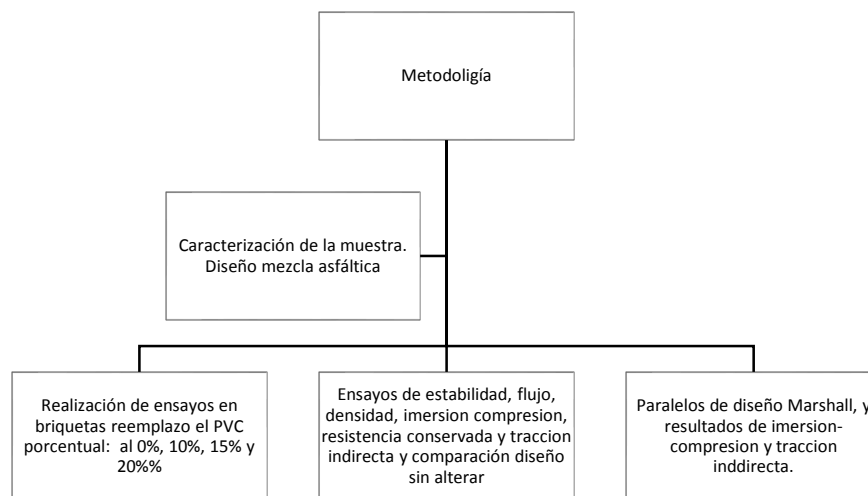


Figura 13. Diagrama de la metodología a emplear (Elaboración propia)

13. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 6. Programación de actividades (Elaboración propia)

EDT	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1	PROYECTO DE GRADO	405,69 días	vie 01/09/17	sáb 30/06/18
1.1	ANTEPROYECTO	124,44 días	vie 01/09/17	sáb 02/12/17
1.1.1	CONSULTA DEL ESTADO DEL ARTE	8 días	vie 01/09/17	jue 07/09/17
1.1.2	FORMULACIÓN INICIAL DEL ANTEPROYECTO	14 días	jue 07/09/17	lun 18/09/17
1.1.3	REUNIÓN CON EL TUTOR	1 día	lun 18/09/17	lun 18/09/17
1.1.4	PRESENTACIÓN INICIAL DEL ANTEPROYECTO	1 día	vie 20/10/17	vie 20/10/17
1.1.5	CORRECCIONES A LA PRIMERA ENTREGA DEL ANTEPROYECTO	29 días	jue 09/11/17	jue 30/11/17
1.1.6	ENTREGA DEL ANTEPROYECTO	1 día	sáb 02/12/17	sáb 02/12/17
1.1.7	APROBACIÓN DEL ANTEPROYECTO	0 días	sáb 02/12/17	sáb 02/12/17
1.2	ELABORACIÓN DE FORMULA DE TRABAJO	36,5 días	lun 04/12/17	sáb 30/12/17
1.2.1	COMPRA DE MATERIAL PÉTREO DE ACUERDO CON CURVA GRANULOMÉTRICA MDF 25	6 días	lun 04/12/17	vie 08/12/17
1.2.2	COMPRA DE EMULSIÓN A USAR	4 días	vie 08/12/17	lun 11/12/17
1.2.3	CONTENIDO OPTIMO TEÓRICO A USAR DE EMULSIÓN	1 día	lun 11/12/17	mar 12/12/17
1.2.4	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TEÓRICO DE FLUIDOS DE COMPACTACIÓN (CTF)	1 día	lun 11/12/17	mar 12/12/17
1.2.5	ELABORACIÓN ME LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE DE EMULSIÓN TEÓRICO (#1)	3 horas	mar 12/12/17	mar 12/12/17
1.2.6	COMPACTACIÓN DE PROBETAS (#1)	24 horas	mar 12/12/17	jue 14/12/17

1.2.7	CURADO DE PROBETAS (#1)	10 días	jue 14/12/17	jue 21/12/17
1.2.8	FALLO DE PROBETAS (#1)	1 día	jue 21/12/17	vie 22/12/17
1.2.9	ELABORACIÓN ME LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE DE EMULSIÓN (#2)	3 horas	jue 14/12/17	jue 14/12/17
1.2.10	COMPACTACIÓN DE PROBETAS (#2)	24 horas	jue 14/12/17	sáb 16/12/17
1.2.11	CURADO DE PROBETAS (#2)	10 días	sáb 16/12/17	lun 25/12/17
1.2.12	FALLO DE PROBETAS (#2)	1 día	lun 25/12/17	lun 25/12/17
1.2.13	ELABORACIÓN ME LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE DE EMULSIÓN (#3)	3 horas	sáb 16/12/17	sáb 16/12/17
1.2.14	COMPACTACIÓN DE PROBETAS (#3)	24 horas	sáb 16/12/17	mar 19/12/17
1.2.15	CURADO DE PROBETAS (#3)	10 días	mar 19/12/17	mié 27/12/17
1.2.16	FALLO DE PROBETAS (#3)	1 día	mié 27/12/17	mié 27/12/17
1.2.17	ELABORACIÓN ME LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE DE EMULSIÓN (#4)	3 horas	mar 19/12/17	mié 20/12/17
1.2.18	COMPACTACIÓN DE PROBETAS (#4)	24 horas	mié 20/12/17	jue 21/12/17
1.2.19	CURADO DE PROBETAS (#4)	10 días	jue 21/12/17	vie 29/12/17
1.2.20	FALLO DE PROBETAS (#4)	1 día	vie 29/12/17	vie 29/12/17
1.2.21	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 30/12/17	sáb 30/12/17
1.2.22	FORMULA DE TRABAJO	0 días	sáb 30/12/17	sáb 30/12/17
1.3	DEMOLICIÓN DEL PVC	6 días	lun 04/12/17	vie 08/12/17
1.3.1	COMPRA DE MATERIA PRIMA	1 día	lun 04/12/17	lun 04/12/17
1.3.2	TRANSPORTE AL SITIO DE TRITURACIÓN	1 día	lun 04/12/17	mar 05/12/17
1.3.3	TRITURACIÓN	3 días	mar 05/12/17	jue 07/12/17
1.3.4	ENTREGA DE MATERIAL	1 día	jue 07/12/17	vie 08/12/17
1.3.5	LLEGADA DE MATERIAL	0 días	vie 08/12/17	vie 08/12/17
1.4	ENSAYOS CON EL (0%) DE PVC	8,38 días	lun 01/01/18	sáb 06/01/18
1.4.1	ELABORACIÓN DE MEZCLA	1 día	lun 01/01/18	lun 01/01/18
1.4.2	COMPACTACIÓN DE PROBETAS	1 hora	lun 01/01/18	lun 01/01/18
1.4.3	CURADO DE PROBETAS	5 días	mar 02/01/18	vie 05/01/18
1.4.4	SATURACIÓN DE PROBETAS	1 día	vie 05/01/18	vie 05/01/18
1.4.5	ENSAYO MARSHALL Y RTI SECO	2 horas	vie 05/01/18	vie 05/01/18
1.4.6	ENSAYO RTI SATURADO	2 horas	vie 05/01/18	vie 05/01/18
1.4.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 06/01/18	sáb 06/01/18
1.4.8	DATOS (0%)	0 días	sáb 06/01/18	sáb 06/01/18
1.5	ENSAYOS CON EL (5%) DE PVC	8,38 días	lun 08/01/18	sáb 13/01/18
1.5.1	ELABORACIÓN DE MEZCLA	1 día	lun 08/01/18	lun 08/01/18
1.5.2	COMPACTACIÓN DE PROBETAS	1 hora	lun 08/01/18	lun 08/01/18
1.5.3	CURADO DE PROBETAS	5 días	mar 09/01/18	vie 12/01/18
1.5.4	SATURACIÓN DE PROBETAS	1 día	vie 12/01/18	vie 12/01/18
1.5.5	ENSAYO MARSHALL Y RTI SECO	2 horas	vie 12/01/18	vie 12/01/18
1.5.6	ENSAYO RTI SATURADO	2 horas	vie 12/01/18	vie 12/01/18
1.5.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 13/01/18	sáb 13/01/18
1.5.8	DATOS (5%)	0 días	sáb 13/01/18	sáb 13/01/18
1.6	ENSAYOS CON EL (10%) DE PVC	8,38 días	lun 15/01/18	sáb 20/01/18
1.6.1	ELABORACIÓN DE MEZCLA	1 día	lun 15/01/18	lun 15/01/18
1.6.2	COMPACTACIÓN DE PROBETAS	1 hora	lun 15/01/18	lun 15/01/18
1.6.3	CURADO DE PROBETAS	5 días	mar 16/01/18	vie 19/01/18
1.6.4	SATURACIÓN DE PROBETAS	1 día	vie 19/01/18	vie 19/01/18

1.6.5	ENSAYO MARSHALL Y RTI SECO	2 horas	vie 19/01/18	vie 19/01/18
1.6.6	ENSAYO RTI SATURADO	2 horas	vie 19/01/18	vie 19/01/18
1.6.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 20/01/18	sáb 20/01/18
1.6.8	DATOS (10%)	0 días	sáb 20/01/18	sáb 20/01/18
1.7	ENSAYOS CON EL (15%) DE PVC	8,38 días	lun 22/01/18	sáb 27/01/18
1.7.1	ELABORACIÓN DE MEZCLA	1 día	lun 22/01/18	lun 22/01/18
1.7.2	COMPACTACIÓN DE PROBETAS	1 hora	lun 22/01/18	lun 22/01/18
1.7.3	CURADO DE PROBETAS	5 días	mar 23/01/18	vie 26/01/18
1.7.4	SATURACIÓN DE PROBETAS	1 día	vie 26/01/18	vie 26/01/18
1.7.5	ENSAYO MARSHALL Y RTI SECO	2 horas	vie 26/01/18	vie 26/01/18
1.7.6	ENSAYO RTI SATURADO	2 horas	vie 26/01/18	vie 26/01/18
1.7.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 27/01/18	sáb 27/01/18
1.7.8	DATOS (15%)	0 días	sáb 27/01/18	sáb 27/01/18
1.8	ENSAYOS CON EL (20%) DE PVC	8,38 días	lun 29/01/18	sáb 03/02/18
1.8.1	ELABORACIÓN DE MEZCLA	1 día	lun 29/01/18	lun 29/01/18
1.8.2	COMPACTACIÓN DE PROBETAS	1 hora	lun 29/01/18	lun 29/01/18
1.8.3	CURADO DE PROBETAS	5 días	mar 30/01/18	vie 02/02/18
1.8.4	SATURACIÓN DE PROBETAS	1 día	vie 02/02/18	vie 02/02/18
1.8.5	ENSAYO MARSHAL Y RTI SECO	2 horas	vie 02/02/18	vie 02/02/18
1.8.6	ENSAYO RTI SATURADO	2 horas	vie 02/02/18	vie 02/02/18
1.8.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	1 día	sáb 03/02/18	sáb 03/02/18
1.8.8	DATOS (20%)	0 días	sáb 03/02/18	sáb 03/02/18
1.9	RECOPIACIÓN DE DATOS	1 día	lun 05/02/18	lun 05/02/18
1.9.1	AGRUPACIÓN DE RESULTADOS	1 día	lun 05/02/18	lun 05/02/18
1.9.2	DATOS ORGANIZADOS	0 días	lun 05/02/18	lun 05/02/18
1.10	ELABORACIÓN DEL ENTREGABLE FINAL	47 días	lun 05/02/18	lun 12/03/18
1.10.1	ADJUNTAR TABLAS DE DATOS	4 días	lun 05/02/18	jue 08/02/18
1.10.2	FORMULAR ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RESULTADOS	30 días	jue 08/02/18	vie 02/03/18
1.10.3	REALIZACIÓN DE LA PRIMERA ENTREGA	1 día	vie 02/03/18	sáb 03/03/18
1.10.4	ENTREGA PARA REVISIÓN TUTOR	1 día	sáb 03/03/18	sáb 03/03/18
1.10.5	REVISIÓN DEL TUTOR	5 días	sáb 03/03/18	jue 08/03/18
1.10.6	CORRECCIONES FINALES DEL ENTREGABLE DEFINITIVO	5 días	jue 08/03/18	lun 12/03/18
1.10.7	APROBACIÓN FINAL DEL TUTOR	1 día	lun 12/03/18	lun 12/03/18
1.10.8	ELABORACIÓN FINAL DEL ENTREGABLE	0 días	lun 12/03/18	lun 12/03/18
1.11	ELABORACIÓN DEL ARTICULO CIENTÍFICO	26 días	mar 13/03/18	sáb 31/03/18
1.11.1	REALIZACIÓN INICIAL DEL ARTICULO	15 días	mar 13/03/18	vie 23/03/18
1.11.2	ENVÍO DE CORRECCIONES POR PARTE DEL TUTOR	5 días	vie 23/03/18	mar 27/03/18
1.11.3	CORRECCIONES FINALES DEL ARTICULO	5 días	mar 27/03/18	vie 30/03/18
1.11.4	APROBACIÓN FINAL DEL TUTOR	1 día	sáb 31/03/18	sáb 31/03/18
1.11.5	ELABORACIÓN FINAL DEL ARTICULO	0 días	sáb 31/03/18	sáb 31/03/18
1.12	SUSTENTACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO	1 día	sáb 30/06/18	sáb 30/06/18

14. PRODUCTOS A ENTREGAR

Tabla 7. Productos a entregar

PRODUCTOS A ENTREGAR		
Tipo	Nombre del producto	Fecha de entrega
Documento	Informe de investigación	Fecha de presentación de proyectos de grado

15. INSTALACIONES Y EQUIPOS REQUERIDOS

Para la elaboración del presente proyecto se grado los equipos necesarios para llevar a cabo las caracterizaciones y los ensayos son:

- Tamices según norma ASTM.
- Baños para inmersión de probetas con control de temperatura constante.
- Prensa Marshall según norma INVIAS.
- Moldes para probetas tipo Marshall.
- Prensa para ensayo de inmersión compresión según norma INVIAS.
- Moldes para ensayo de inmersión compresión.
- Prensa para ensayo de tracción indirecta (RTI) según norma INVIAS.
- Herramienta menor para mezclado y manipulación de mezclas en frío.

16. PRESUPUESTO DE TRABAJO DE GRADO

**Tabla 8. Presupuesto inicial para el proyecto
PRESUPUESTO GLOBAL DEL ANTEPROYECTO**

	INGRESOS	EGRESOS
Ingresos		
Auxilio o patrocinio para la elaboración del trabajo.		
Recurso propio (s)	\$ 2.000.000,00	
Egresos		
Recurso Humano mano de obra para ensayos de laboratorio		\$ 100.000,00
Emulsión catiónica de rotura lenta tipo INVIAS (150 Kg)		\$ 150.000,00
Metro cubico de material pétreo tipo MDF 25		\$ 100.000,00
Viajes (transporte)		\$ 100.000,00
Tubería de PVC		\$ 120.000,00
Trituración de PVC		\$ 70.000,00
Pruebas de laboratorio		\$ 900.000,00
Imprevistos		\$ 460.000,00
Totales	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00

17. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN

Para realizar la divulgación del presente trabajo de investigación se plantea inicialmente la sustentación del proyecto como requisito de Universidad Católica de Colombia como de la facultad de ingeniería ante un jurado que será elegido por la misma universidad, se dispondrá en el repositorio de la universidad el trabajo de grado finalizado y aprobado por los jurados y el docente tutor del proyecto de grado. Finalmente se elaborará un artículo científico para aprobación y publicación en una revista de ingeniería internacional.

18. PROCEDIMIENTO

18.1. GRANULOMETRÍA

Para el presente proyecto se eligió una mezcla MDF-25 según el artículo 440-13 (INVIAS, 2013), el cual nos indica una franja máxima y mínima del porcentaje que pasa (% pasa) de agregado en cada

uno de los tamices. Esta curva granulométrica resulta útil al ser usada como capa de rodadura y capa intermedia según (INVIAS, 2013):

TIPO DE CAPA	ESPESOR COMPACTO (mm)	TIPO DE MEZCLA
Rodadura	50-75	MDF-25
	40-50	MDF-19
Intermedia	≥ 50	MDF-25
Base	≥ 75	MDF-38

Figura 14. Tipo de gradación por utilizar en función del tipo y espesor compacto de la capa (INVIAS, 2013)

Se tomó el valor medio entre los dos valores (máximo y mínimo) con el fin de encajar de manera correcta en la franja granulometría:

Tabla 9. Porcentajes retenidos máximo y mínimos

MDF-25				
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PASA MAX (%)	PASA MIN (%)	PASA MEDIO (%)
1 1/2"	37,5	100%	100%	100,0%
1"	25	100%	100%	100,0%
3/4"	19	95%	80%	87,5%
3/8"	9,5	75%	60%	67,5%
NO. 4	4,75	62%	47%	54,5%
NO. 8	2,35	50%	35%	42,5%
NO. 50	0,3	23%	13%	18,0%
NO.200	0,075	8%	3%	5,5%
BASE	0	0%	0%	0,0%

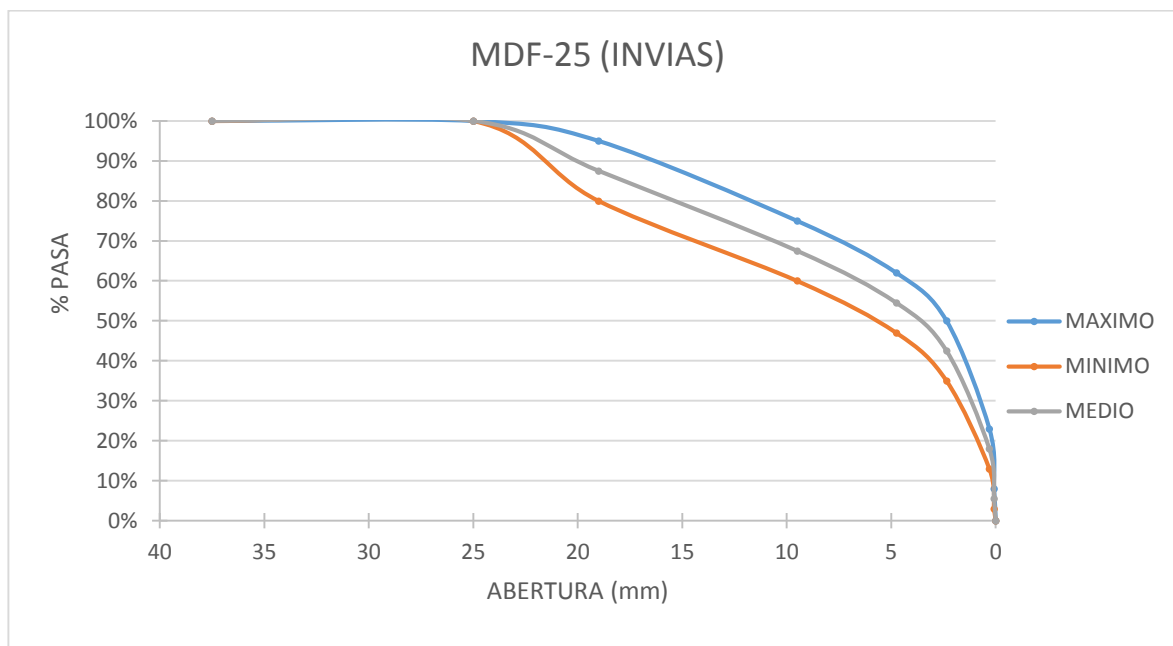


Figura 15. Valores máximos y mínimos según artículo 440-13 (INVIAS, 2013) y valor medio usado (Elaboración propia)

El material que se usó fue suministrado por la empresa concrecol al cual se realizó un tamizado por las aberturas anteriormente mencionadas para poder armar la curva granulométrica de acuerdo al artículo base tipo INVIAS:



Figura 16. Tamizado del material para ajuste a curva patrón (Elaboración propia)

Para calcular la cantidad de agregados en cada tamiz se deben tener en cuenta los ensayos a emplear, estos ensayos se describirán más adelante a profundidad, pero son necesarios para calcular la cantidad de material necesario. Cada ensayo posee una normatividad que describe el correcto procedimiento y la cantidad de material mínimo necesario. Sin embargo, para tener un margen de error por desperdicio se aumentó la cantidad de material por ensayo. Los procedimientos seleccionados para el presente trabajo son los siguientes:

Tabla 10. Ensayos a realizar y pesos de cuerpos de prueba

FINALIDAD	NORMA	NOMBRE	PESO NORMALIZADO (g)	PESO OPTADO (g)	CANTIDAD	PESO TOTAL (g)	
FORMULA DE TRABAJO	INV E 622	DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS, RECICLADOS O SIN RECICLAR, CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, MEDIANTE EL MÉTODO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN	1.800	2.000	24	48.000	
TRACCIÓN INDIRECTA	INV E 725	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA	1.200	1.700	24	40.800	
MARSHALL	INV E 748	ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL	1.200	1.700	12	20.400	
						TOTAL (G)	109.200
						TOTAL REDONDEADO (G)	110.000

Teniendo el peso total de material a usar y a partir de los porcentajes medios que pasan de cada tamiz adoptados para cumplir la granulometría, se calculan los pesos retenidos en cada uno de los tamices para cuantificar el necesario según tamaño:

Tabla 11. Granulometría necesaria para ensayos

TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	13.750	13,75	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	22.000	22,00	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	14.300	14,30	13,0%	45,5%	54,5%
NO. 8	2,35	13.200	13,20	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	26.950	26,95	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	13.750	13,75	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	6.050	6,05	5,5%	100,0%	0,0%
TOTAL		110.000	110			

18.2. CANTIDAD DE EMULSIÓN

Según el artículo 440 -13 (INVIAS, 2013) el material bituminoso, “será una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta de los tipos CRL-1 o CRL-1H, que cumpla con los requisitos de calidad establecidos en el artículo 411 y que sea compatible con los agregados pétreos por emplear”. La emulsión usada para el presente proyecto Presenta las siguientes características:

Tabla 12. Propiedades de la emulsión asfáltica a usar

ENSAYO	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
		MIN	MAX	
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 25°C	INV E-763	20	200	27,8
CONTENIDO DE AGUA EN VOLUMEN	INV E-761	-	43	41
ESTABILIDAD A 5 DÍAS	INV E-764	-	5	2,2
CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL	INV E-762	57	-	59
TAMIZADO RETENIDO TAMIZ # 20	INV E-765	-	0,1	TRAZAS
CARGA PARTÍCULA	INV E-767	POSITIVA		POSITIVA
PH	INV E-768	-	6	3,7

Para encontrar el porcentaje inicial de asfalto residual según la metodología INV E-622 se debe usar cualquier metodología que implique el correcto recubrimiento de los agregados por superficie específica. Se contemplaron 5 metodologías distintas para calcular este porcentaje de asfalto residual:

18.2.1 MÉTODO DEL LABORATORIO CENTRAL DE PUENTES Y CAMINOS EN FRANCIA (LCPC)

El método se basa en hallar una superficie específica evaluada en (m²/kg) dependiendo el porcentaje que pasa en determinados materiales. Para determinar la S.E. (en m²/kg), se usa la siguiente fórmula (Sarmiento, 1999):

$$S.E. = \frac{1}{100} (0.237G + 1.60g + 12.85A + 117.8F)$$

Donde:

G = % entre la malla 19.05 mm y 4.76 mm

g = % entre la malla 4.76 mm y 0.420 mm

A = % entre la malla 0.420 mm y 0.074 mm

F = % pasa la malla 0.074 mm

Para la curva granulométrica del proyecto se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13. Resultados de coeficientes por metodología LCPC

G	33%
g	37%
A	13%
F	6%
S.E (m ² /kg)=	8,75

Luego de obtener los coeficientes se recurre a la gráfica para hallar el porcentaje de cemento asfáltico requerido para dicha superficie específica, ingresando en el eje vertical el valor de S.E hasta intersectar la gráfica. Con los datos obtenidos y usando el gráfico se necesitaría 5,42% de cemento asfáltico para esta granulometría:

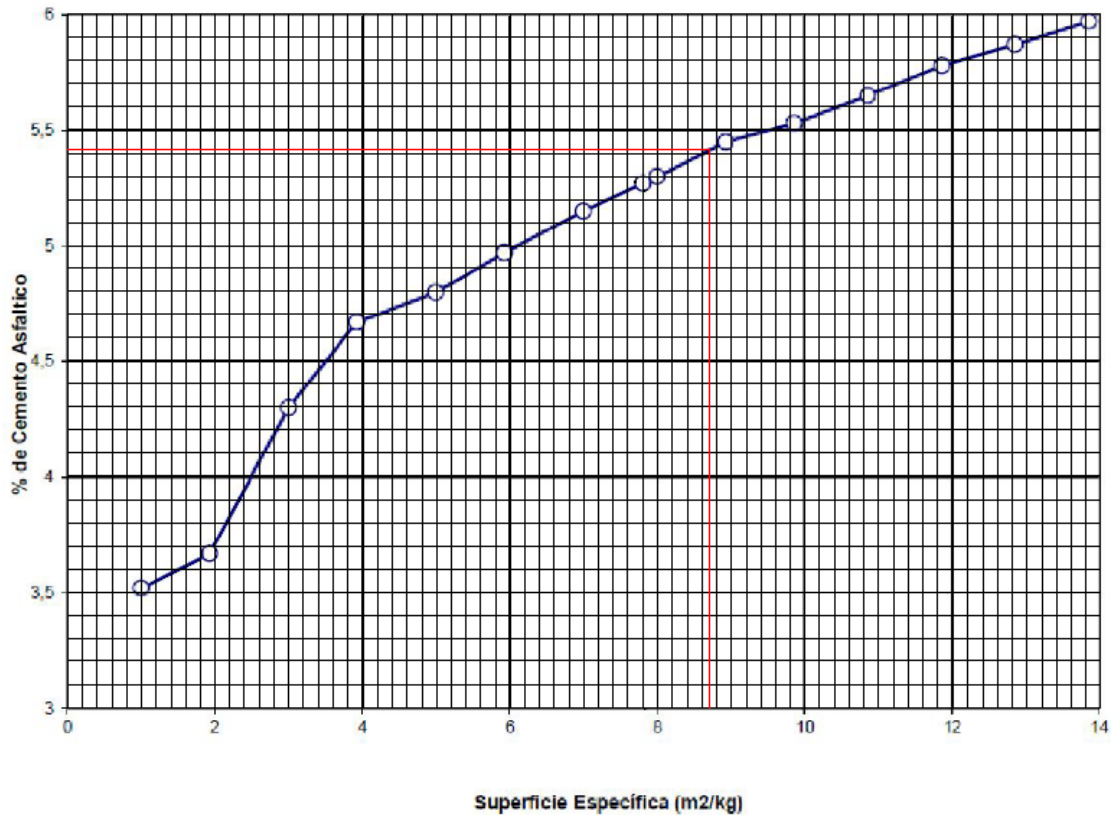


Figura 17. Grafica para obtener % de cemento asfáltico (Sarmiento, 1999)

18.2.2 MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

Este método parte del mismo principio con la siguiente ecuación (Asphalt Institute, 1999):

$$P = 0.035 a + 0.045 b + kc + K$$

Donde:

P = Porcentaje de cemento asfáltico respecto al peso de la mezcla

a = Porcentaje de agregado retenido en el tamiz N° 10

b = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 10 y se retiene en el tamiz N° 200

c = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200

k = Toma los siguientes valores:

0.20	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 varia del 11% al 15%
0.18	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 varia del 06% al 10%
0.15	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 es menos del 05%

K = Varia de 0 a 2, dependiendo del grado de absorción de los pétreos. Alta absorción: K = 2

Reemplazando los valores de la granulometría a estudio se obtendrían los siguientes valores:

Tabla 14. Resultados de coeficientes por metodología Instituto del asfalto

a	12,00
b	37,00
c	6,00
k	0,18
K	1,00
% CEMENTO ASFALTICO (P)	4,17

18.2.3 MÉTODO MARSHALL MODIFICADO

Esta variación del método Marshall convencional plantea una ecuación en la que arroja el % de emulsión asfáltica sin importar la concentración de asfalto en esta (Sarmiento, 1999):

$$E = 0.05 A + 0.1 B + 0.5 C$$

Donde:

E= Porcentaje en peso de la emulsión asfáltica

A= 100- pasante de la malla N° 8 en porcentaje

B= (Material pasante de malla N°8)-(Material pasante de la malla N°200)

C= Material pasante de la malla N° 200

Reemplazando los valores obtendríamos el siguiente resultado:

Tabla 15. Resultados de coeficientes por metodología Marshall modificado

A	57,50
B	36,95
C	5,50
% EMULSIÓN (E)	9,32

18.2.4 MÉTODO DE LA SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS DE MÉXICO (SAHOP)

La metodología plantea la siguiente ecuación (Sarmiento, 1999):

$$P = (n/100) * (0.41 G + 2.05 g + 15.38 A + 53.3 F)$$

Donde:

P = Porcentaje de cemento asfáltico mínimo para cubrir el pétreo, respecto al peso del árido.

G = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz 3/4 y se retiene en el tamiz N° 04

g = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 04 y se retiene en el tamiz N° 40

A = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 40 y se retiene en el tamiz N° 200

F = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200

n = Índice asfáltico

TIPO DE MATERIAL	n
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.55
Gravas angulosas redondeadas, triturados de baja absorción	0.60
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de absorción media	0.70
Rocas trituradas de alta absorción	0.80

Reemplazando los valores obtendríamos el siguiente resultado:

Tabla 15. Resultados de coeficientes por metodología SAHOP

G	33%
g	12%
A	37%
F	6%
n	60%
% CEMENTO ASFALTICO (P)	6,09

18.2.5 MÉTODO INVIAS E-622-13

La metodología inicia calculando el valor de superficie específica (Σ) considerando los siguientes factores (INVIAS, 2013):

TAMAÑO DEL AGREGADO, mm	% DE LA MASA TOTAL SECA DEL AGREGADO	FSE
> 10	A	0.17
4.76 -10	B	0.33
0.300-4.76	C	2.3
0.075- 300	D	12
<0.075	F	135

$$100 \Sigma = 0.17A + 0.33B + 2.3C + 12D + 135F$$

$$\% L = k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Figura 18. Coeficientes de recubrimiento (INVIAS, 2013)

Reemplazando los valores obtendríamos el siguiente resultado:

Tabla 16. Resultados de coeficientes por metodología INVIAS

A	33%
B	13%
C	37%
D	13%
F	6%
Σ	9,86
K	3
% CEMENTO ASFALTICO (L)	5,92

18.2.6 CANTIDAD FINAL

Como la emulsión asfáltica por naturaleza no posee en su totalidad asfalto, se debe tener en cuenta para alcanzar cierto porcentaje de asfalto residual contar su porcentaje de participación dentro de la emulsión misma que para este tipo de emulsión es del 59% de asfalto. Los porcentajes de asfalto residual calculados serían los siguientes:

Tabla 17. Resultados % de asfalto residual

MÉTODO	FRANCÉS	INSTITUTO DEL ASFALTO	MARSHALL MODIFICADO	SECR. DE MEXICO	INVIAS	PROMEDIO
% CEMENTO ASFALTICO	5,42%	4,17%	5,50%	6,09%	5,92%	5,42%
% EMULSIÓN	9,19%	7,06%	9,32%	10,32%	10,03%	9,18%

Como la metodología que regula este procedimiento E-622 (INVIAS, 2013) sugiere tomar un punto por debajo, un punto por encima y dos por encima del porcentaje teórico inicial de asfalto, se decide determinar como valor teórico de asfalto el 5,5% , lo cual significa un valor teórico de emulsión del 9,32% en peso de la mezcla.

18.3. FORMULA DE TRABAJO (INMERSIÓN – COMPRESIÓN)

Con el anterior procedimiento podemos sintetizar los datos de entrada de la siguiente manera:

Tabla 18. Resultados iniciales para formula de trabajo

% ASFALTO TEÓRICO	5,50%
% DE ASFALTO EN LA EMULSIÓN	59,00%
% CANTIDAD DE EMULSIÓN	9,32%

Tabla 19. Cantidad de agregado y asfalto para procedimiento E-622 (INVIAS, 2013)

% ASFALTO	MATERIAL (AGREGADO + ASFALTO) (g)		ASFALTO (g)	AGREGADO (g)	CANTIDAD SECAS	CANTIDAD HÚMEDAS	TOTAL PROBETAS	TOTAL AGREGADO (g)	TOTAL ASFALTO (g)
4,5%	1.500	2.000	90	1.910	3	3	6	11.460	540
5,5%	1.500	2.000	110	1.890	3	3	6	11.340	660
6,5%	1.500	2.000	130	1.870	3	3	6	11.220	780
7,5%	1.500	2.000	150	1.850	3	3	6	11.100	900

Basándonos en la Tabla 19 los pesos necesarios de material en cada tamiz para los 4 porcentajes a evaluar son:

Tabla 20. Valores necesarios para una mezcla MDF-25 con 4.5% de asfalto

#1 (4,5%)								
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)		
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO	4,5%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO (g)	540
3/4"	19	1.433	1,43	12,5%	12,5%	87,5%	EMULSIÓN (g)	915
3/8"	9,5	2.292	2,29	20,0%	32,5%	67,5%		
NO. 4	4,75	1.490	1,49	13,0%	45,5%	54,5%		
NO. 8	2,35	1.375	1,38	12,0%	57,5%	42,5%		
NO. 50	0,3	2.808	2,81	24,5%	82,0%	18,0%		
NO.200	0,075	1.433	1,43	12,5%	94,5%	5,5%		
BASE	0	630	0,63	5,5%	100,0%	0,0%		
TOTAL		11.460	11					

Tabla 21. Valores necesarios para una mezcla MDF-25 con 5.5% de asfalto

#2 (5,5%)								
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)		
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO	5,5%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO (g)	660
3/4"	19	1.418	1,42	12,5%	12,5%	87,5%	EMULSIÓN (g)	1119
3/8"	9,5	2.268	2,27	20,0%	32,5%	67,5%		
NO. 4	4,75	1.474	1,47	13,0%	45,5%	54,5%		
NO. 8	2,35	1.361	1,36	12,0%	57,5%	42,5%		
NO. 50	0,3	2.778	2,78	24,5%	82,0%	18,0%		
NO.200	0,075	1.418	1,42	12,5%	94,5%	5,5%		
BASE	0	624	0,62	5,5%	100,0%	0,0%		
TOTAL		11.340	11					

Tabla 22. Valores necesarios para una mezcla MDF-25 con 6.5% de asfalto

#3 (6,5%)								
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA 0(%)		
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO	6,5%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO (g)	780
3/4"	19	1.403	1,40	12,5%	12,5%	87,5%	EMULSIÓN (g)	1322
3/8"	9,5	2.244	2,24	20,0%	32,5%	67,5%		
NO. 4	4,75	1.459	1,46	13,0%	45,5%	54,5%		
NO. 8	2,35	1.346	1,35	12,0%	57,5%	42,5%		
NO. 50	0,3	2.749	2,75	24,5%	82,0%	18,0%		
NO.200	0,075	1.403	1,40	12,5%	94,5%	5,5%		
BASE	0	617	0,62	5,5%	100,0%	0,0%		
TOTAL		11.220	11					

Tabla 23. Valores necesarios para una mezcla MDF-25 con 7.5% de asfalto

#4 (7,5%)								
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)		
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO	7,5%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%	ASFALTO (g)	900
3/4"	19	1.388	1,39	12,5%	12,5%	87,5%	EMULSIÓN (g)	1525
3/8"	9,5	2.220	2,22	20,0%	32,5%	67,5%		
NO. 4	4,75	1.443	1,44	13,0%	45,5%	54,5%		
NO. 8	2,35	1.332	1,33	12,0%	57,5%	42,5%		
NO. 50	0,3	2.720	2,72	24,5%	82,0%	18,0%		
NO.200	0,075	1.388	1,39	12,5%	94,5%	5,5%		
BASE	0	611	0,61	5,5%	100,0%	0,0%		
TOTAL		11.100	11					

Luego de tener los materiales seleccionados y dosificados se procede a compactar las muestras aplicando sobre la mezcla una presión inicial o de asentamiento de 1 MPa (10 kgf/cm²) o de 150 lbf/pg², con objeto de asentar inicialmente la mezcla; se retiran entonces las dos varillas de soporte para compactar por el sistema de doble émbolo, y se comienza la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente, regulando la velocidad lo más uniformemente posible, hasta alcanzar, en un tiempo de 2 a 3 minutos, una presión máxima de 20.7 MPa (210 kgf/cm²) o de 3000 lbf/pg², manteniendo esta presión sobre la mezcla durante 2 minutos. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm (4") de diámetro, esta presión viene a representar una carga de unos 170 kN (INVIAS, 2013).



Figura 19. Equipos compresión (Zealchon)

Luego de aplicar la carga se dejan en el molde por 24 para una mejor compactación. Pasando las 24 horas comienza el proceso de curado en el cual por porcentaje se hacen dos grupos de tres probetas para realizar el curado de la siguiente forma:

- Grupo 1 – Las tres probetas de este grupo se curan durante 14 días en el baño de aire a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$) y con una humedad relativa del 50 %.
- Grupo 2 – Las probetas tres de este grupo se curan durante 7 días en el baño de aire y luego durante 7 días en el baño de agua a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$).

Terminado el período de curado, se coloca cada probeta en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial sin soporte lateral, a una velocidad de deformación vertical constante equivalente a 1.3 mm/min (0.05"/min) por cada 25 milímetros (1") de altura de la probeta. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm (4") de diámetro, este valor representa una velocidad de deformación de 5.08 mm/min (0.2"/min) (INVIAS, 2013).

El porcentaje de asfalto resultante del ensayo fue del 7% en conclusión; en el capítulo de análisis de resultados se explicarán a profundidad los valores resultantes y el sustento de dicho porcentaje.

18.4. REEMPLAZO DE AGREGADO CON PVC Y CURVAS GRANULOMÉTRICAS FINALES

Teniendo el porcentaje de asfalto óptimo (7%) se procederá a establecer la curva granulometría base. Dicha curva se basa en la dimensión d los cuerpos de prueba y su cantidad de acuerdo al número de ensayos. Tal como se mencionó en el numeral 18.1. los ensayos a implementar para evaluar el comportamiento de la mezcla con PVC será el de Marshall, RTI en estado seco y RTI en estado húmedo o saturado. El número de probetas para cada uno de estos ensayos es de tres (3) por cada porcentaje de reemplazo de PVC (0%, 5%, 15%, 30%) por lo tanto la cantidad de agregado y asfalto base sería la siguiente:

Tabla 24. Pesos necesarios de agregado para un porcentaje de reemplazo de 0%

% ASFALTO FINAL A USAR	MATERIAL (AGREGADO + ASFALTO) (g)		ASFALTO (g)	AGREGADO (g)	CANTIDAD TOTAL	TOTAL AGREGADO (g)	TOTAL ASFALTO (g)
7,00%	1.200	1.700	119	1.581	9	14.229	1071

Tabla 25. Granulometría para un juego de 9 probetas con un porcentaje de reemplazo del 0%

TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	1.779	1,78	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	2.846	2,85	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	1.850	1,85	13,0%	45,5%	54,5%

NO. 8	2,35	1.707	1,71	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	3.486	3,49	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	1.779	1,78	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	783	0,78	5,5%	100,0%	0,0%
TOTAL		14.229	14			

Para iniciar el proceso de reemplazo de partículas de PVC trituradas por material granular del mismo tamaño se realizó un tamizado de toda la trituración del material logrando obtener dos grandes grupos; retenido en el tamiz No. 4 (4.75mm) y No. 8 (2.35mm):



Figura 20. Material obtenido a partir de la trituración de tubos de PVC (Elaboración propia)

Por la cantidad del material obtenido se decidió realizar el reemplazo con el retenido en No. 8 ya que es mayor cantidad y no se presentaría escases de material.

Para iniciar el proceso de reemplazo de material pétreo retenido en el tamiz No. 8 se debe tener en cuenta que tanto el material granular como el triturado de PVC no poseen la misma densidad, por lo tanto, si se reemplaza una determinada masa de agregado con la misma masa de triturado de PVC

para una misma granulometría, no será equivalente en superficie específica y cantidad de “agregados” las dos muestras. Esto daría como resultado una cantidad insuficiente de cemento asfáltico para recubrir de manera correcta el conjunto de agregados, un aumento en la altura de la probeta; incumpliendo las medidas establecidas por (INVIAS, 2013).

Si se desea que el reemplazo sea equivalente para la muestra en conjunto se debe hacer por volumen tratando de mantener la superficie que ocupa inicialmente el agregado, para esto se debe hallar la densidad de los dos materiales.

18.4.1 DENSIDAD DEL MATERIAL TRITURADO DE PVC

Como el material a usar de reemplazo no fue alterado químicamente posee todavía después de la trituración, las propiedades de fábrica del material, por lo tanto se pueden tener en cuenta para el proyecto.

PROPIEDADES	NORMA	UNIDADES
Peso Específico a 25°C	ASTM D.792	1.40 gr/cm ³
coeficiente de Dilatación Térmica	ASTM D.696	0.06 mm / m / °C
Constante Dieléctrica	ASTM D-150	A 10 ² -10 ⁶ Hz:3.0 - 3.8
Inflamabilidad	NTP 399.007	Autoextinguible
Coefficiente de Fricción	-	n=0.009 Manning; C= 150 Hazen-Williams
Tensión de Diseño	-	100 bar
Resistencia a la Tracción	ASTM D.638	48 Mpa

Figura 21. Propiedades mecánicas y físicas del PVC suministrado por PAVCO

18.4.2 DENSIDAD DEL AGREGADO RETENIDO EN EL TAMIZ NO. 8 (2.35mm)

Para hallar la densidad del agregado retenido en el tamiz No. 8 (2,35mm) se debe seguir el procedimiento establecido por las normas NTC 176 y ASTM C127. Estas normas describen las metodologías para hallar las densidades (absoluta, nominal y aparente). Para este caso se usara la densidad aparente la cual está definida como la relación que existe entre el peso de la masa del

material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros saturables y no saturables. Este tipo de densidad se determina de la siguiente manera según (NTC 176):

- Se seca la muestra de ensayo hasta obtener una masa constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, enfríela en el aire a temperatura ambiente durante 1 h a 3 h para las muestras de ensayo de tamaño máximo nominal de 37,5 mm, o más tiempo para muestras de tamaños más grandes hasta que el agregado se haya enfriado hasta una temperatura que sea cómoda de manipular (aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Subsecuentemente, se sumerge el agregado en agua a temperatura ambiente por un período de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.
- Cuando los valores de la absorción y la densidad vayan a ser usados en el proporcionamiento de mezclas de concreto en las cuales los agregados estén en su condición de humedad natural, se puede eliminar el requerimiento de secado inicial hasta una masa constante, y, si las superficies de las partículas en la muestra se han mantenido continuamente húmedas hasta el ensayo, se puede también eliminar la inmersión por 24 h.
- Se remueve la muestra de ensayo del agua y se envuelve en un paño absorbente hasta que todas las películas visibles de agua sean removidas. Se secan las partículas más grandes individualmente. Una corriente de aire puede usarse para ayudar en la operación de secado. Se debe de evitar la evaporación del agua de los poros del agregado durante la operación de secado superficial. A) Se determina la masa de la muestra de ensayo en la condición superficialmente seca. B) Se registra esta y todas las masas subsecuentes con la aproximación que sea mayor entre 0,5 % y 0,05 % de la masa de la muestra.
- Después de determinar la masa, se coloca inmediatamente la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca en el recipiente de la muestra y se determina su masa en el agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una densidad de $997\text{ kg/m}^3 \pm 2\text{ kg/m}^3$ (valor C). Se tiene cuidado de remover todo el aire atrapado antes de determinar la masa, sacudiendo el recipiente mientras está sumergido.
- Se seca la muestra hasta obtener una masa constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se enfría a temperatura ambiente de 1 h a 3 h, o hasta que el agregado se haya enfriado hasta una temperatura que sea cómoda para manipular (aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), y se determina su masa (valor A).

La fórmula para este tipo de densidad es la siguiente:

$$D_{sBulk} = 0,9975 \times A / (B - C)$$

Figura 22. Fórmula para densidad aparente (NTC 176)

Donde:

A=masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, g.

B=masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca, g.

C=masa en el agua de la muestra de ensayo saturada, g.

Reemplazando las variables con los obtenidos para el agregado No. 8 la ecuación sería la siguiente:

$$\rho(\text{Aparente}) = 0,9975 \times \frac{A}{B - C} = \frac{200g}{210,48g - 132g} = 2,57 \frac{g}{cm^3}$$

18.4.3 GRADACIÓN FINAL CON REEMPLAZO DE AGREGADO CON PVC

Al tener las densidades de los dos materiales a reemplazar (agregado retenido en tamiz No. 8 y PVC de igual tamaño) (tabla 26), se sustituye porcentualmente en peso del agregado, es decir, se extrae un determinado porcentaje en peso del agregado y se sustituye el volumen ocupado por dicho agregado con el equivalente en peso de PVC de la siguiente manera:

Tabla 26. Densidad final de los materiales del reemplazo

DENSIDAD AGREGADO NO. 8 (g/cm ³)	2,57
DENSIDAD PVC NO. 8 (g/cm ³)	1,40

Tabla 27. Reemplazo de PVC equivalente para cada juego de probetas

PVC	0%	5%	15%	30%
AGREGADO INICIAL NO. 8 (g)	1707,00			
AGREGADO REEMPLAZADO NO. 8 (g)	0,00	85,00	256,00	512,00

VOLUMEN A REEMPLAZAR (cm ³)	0,00	33,07	99,61	199,22
EQUIVALENCIA EN PVC NO. 8 (g)	0,00	46,30	139,46	278,91
AGREGADO FINAL NO. 8 (g)	1.707,00	1.622,00	1.451,00	1.195,00

Con el valor equivalente de PVC para cada reemplazo y el porcentaje de asfalto óptimo ya se pueden consolidar los valores finales en cada tamiz para cada porcentaje de reemplazo de la siguiente manera:

Tabla 28. Granulometría necesaria para reemplazar 0% de agregado con PVC en tamiz No. 8

PVC AL 0%						
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	1.779	1,78	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	2.846	2,85	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	1.850	1,85	13,0%	45,5%	54,5%
NO. 8	2,35	1.707	1,71	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	3.486	3,49	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	1.779	1,78	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	783	0,78	5,5%	100,0%	0,0%

ASFALTO	7,0%
ASFALTO (g)	1071
EMULSIÓN (g)	1815
PVC (g)	0,00
CANTIDAD DE PROBETAS	9

Tabla 29. Granulometría necesaria para reemplazar 5% de agregado con PVC en tamiz No. 8

PVC AL 5%						
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%

1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	1.779	1,78	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	2.846	2,85	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	1.850	1,85	13,0%	45,5%	54,5%
NO. 8	2,35	1.622	1,62	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	3.486	3,49	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	1.779	1,78	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	783	0,78	5,5%	100,0%	0,0%

ASFALTO	7,0%
ASFALTO (g)	1071
EMULSIÓN (g)	1815
PVC (g)	46,30
CANTIDAD DE PROBETAS	9

Tabla 30. Granulometría necesaria para reemplazar 15% de agregado con PVC en tamiz No. 8

PVC AL 15%						
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	1.779	1,78	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	2.846	2,85	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	1.850	1,85	13,0%	45,5%	54,5%
NO. 8	2,35	1.451	1,45	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	3.486	3,49	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	1.779	1,78	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	783	0,78	5,5%	100,0%	0,0%

ASFALTO	7,0%
ASFALTO (g)	1071
EMULSIÓN (g)	1815
PVC (g)	139,46

CANTIDAD DE PROBETAS	9
----------------------	---

Tabla 31. Granulometría necesaria para reemplazar 30% de agregado con PVC en tamiz No. 8

PVC AL 30%						
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO (g)	RETENIDO (kg)	RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
1"	25	0	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19	1.779	1,78	12,5%	12,5%	87,5%
3/8"	9,5	2.846	2,85	20,0%	32,5%	67,5%
NO. 4	4,75	1.850	1,85	13,0%	45,5%	54,5%
NO. 8	2,35	1.195	1,20	12,0%	57,5%	42,5%
NO. 50	0,3	3.486	3,49	24,5%	82,0%	18,0%
NO.200	0,075	1.779	1,78	12,5%	94,5%	5,5%
BASE	0	783	0,78	5,5%	100,0%	0,0%

ASFALTO	7,0%
ASFALTO (g)	1071
EMULSIÓN (g)	1815
PVC (g)	278,91
CANTIDAD DE PROBETAS	9

19. ANÁLISIS DE RESULTADOS

19.1. INMERSIÓN COMPRESIÓN (FORMULA DE TRABAJO)

La finalidad de este procedimiento es hallar el porcentaje óptimo de asfalto para para obtener la máxima resistencia a la compresión en seco, en húmedo y conservada. Este ensayo se basó en la norma INV E-622 (INVIAS, 2013).



Figura 23. Ensayo de probetas a inmersión – compresión variando % de asfalto (Elaboración propia)

Al momento de realizar el ensayo a distintos porcentajes de asfalto dieron como resultado las siguientes gráficas:

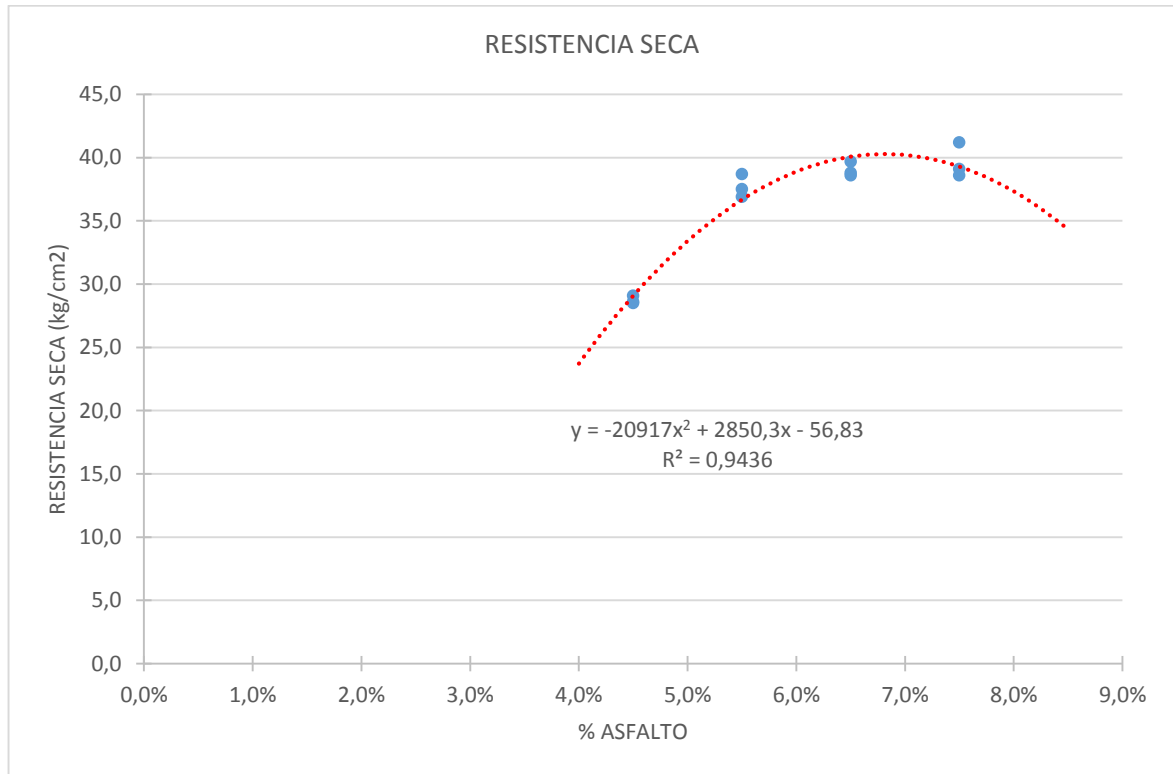


Figura 24. Resistencia a la compresión seca de la muestra con variaciones del % de asfalto (Elaboración propia)

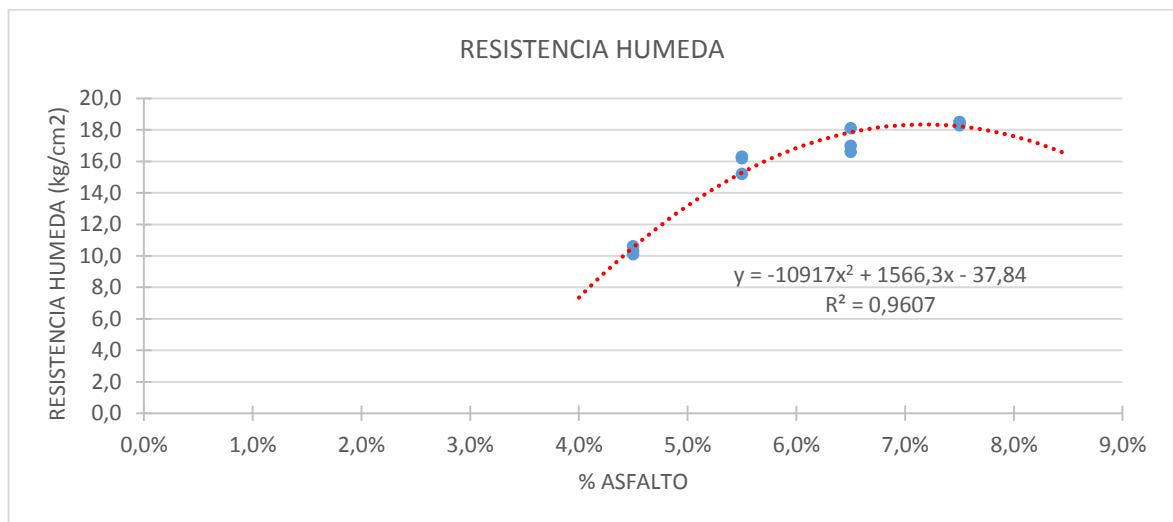


Figura 25. Resistencia a la compresión húmeda de la muestra con variaciones del % de asfalto (Elaboración propia)

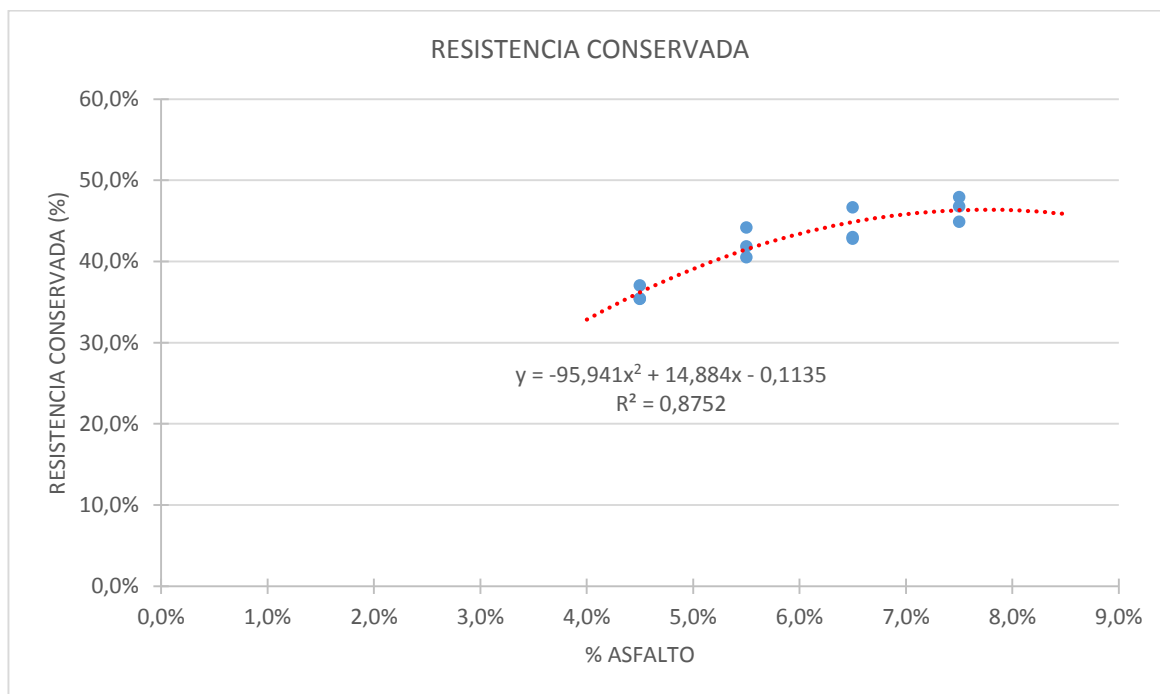


Figura 26. Resistencia conservada de la muestra con variaciones del % de asfalto (Elaboración propia)

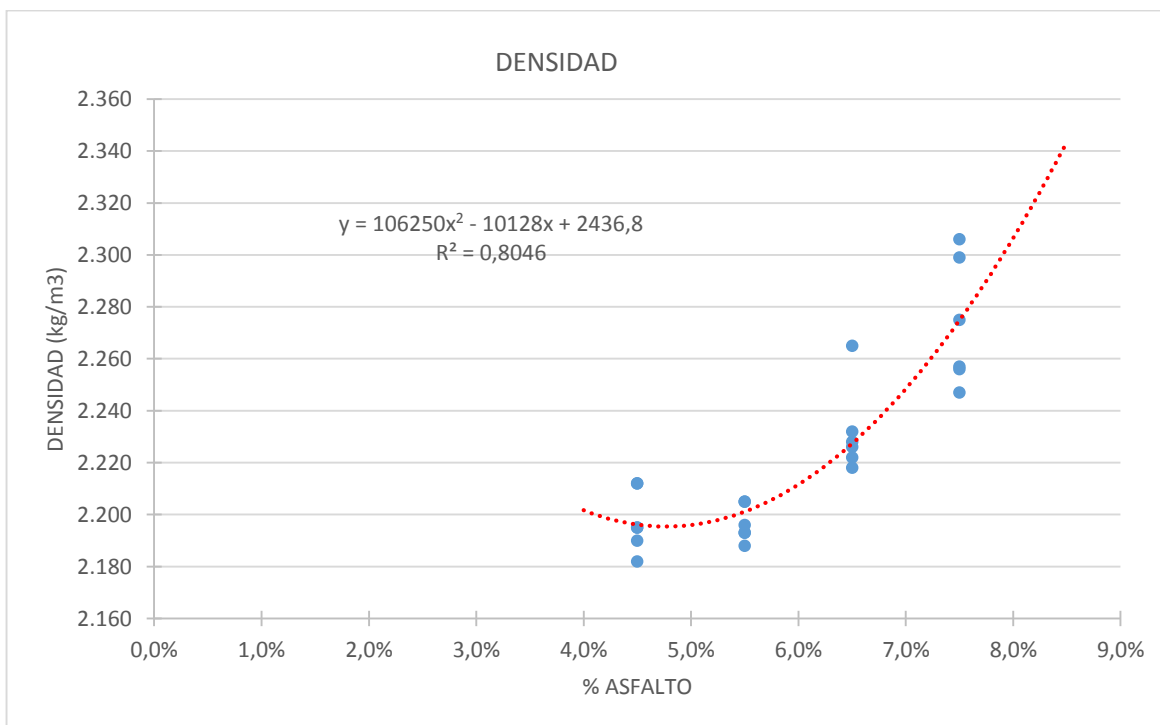


Figura 27. Densidad de la muestra con variaciones del % de asfalto (Elaboración propia)

Para hallar los valores máximos de resistencia se recurre a primera derivada de la función de regresión enunciada en cada gráfico, se iguala a cero (0) y determina el valor de x, de la siguiente manera:

- Resistencia seca:

$$f(x) = -20917x^2 + 2850,3x - 56,83$$

$$f'(x) = \frac{28503}{10} - 41834x$$

$$0 = \frac{28503}{10} - 41834x$$

$$x = \frac{28503}{41834 \times 10}$$

$$x = 0,0681335 \approx 6,8\%$$

- Resistencia húmeda:

$$f(x) = -10917x^2 + 1566,3x - 37,84$$

$$f'(x) = \frac{15663}{10} - 21834x$$

$$0 = \frac{15663}{10} - 21834x$$

$$x = \frac{15663}{21834 \times 10}$$

$$x = 0,0711173 \approx 7,1\%$$

- Resistencia conservada:

$$f(x) = -95,941x^2 + 14,884x - 0,1135$$

$$f'(x) = \frac{3721}{250} - \frac{95941}{500}x$$

$$0 = \frac{3721}{250} - \frac{95941}{500}x$$

$$x = \frac{3721 \times 500}{250 \times 95941}$$

$$x = 0,07756 \approx 7,8\%$$

Como se pudo evidenciar los valores máximos de las resistencias rondan entre 6,8% y 7,8% de asfalto en la mezcla, sin embargo, este rango se ve afectado rotundamente por el valor del asfalto para de la resistencia máxima conservada (7,8%). Si se define el valor optimo comandado por la resistencia conservada, los resultados de las resistencias secas y húmedas disminuirán notablemente ya que lo único que se logra es acercar los dos valores de resistencia (seca y húmeda) entre sí.

Por lo anterior se definió el porcentaje de asfalto con las resistencias secas y húmedas ya que presentaban valores muy cercanos y la diferencia no sería representativa en la muestra, dicho porcentaje se estableció finalmente del 7% al ser un punto medio y un valor entero.

19.2. ENSAYO TIPO MARSHALL

Aunque el diseño tipo Marshall se usa exclusivamente para mezclas en caliente, se decidió solo ensayar los cuerpos de prueba por esta metodología para poder obtener valores de referencia estimativos y así poder ser comparados. Para la compactación se siguió realizando con el equipo de compresión es decir realizando una carga constante con prensa y no por golpes.

Se fueron obteniendo los valores mediante la variación del porcentaje de reemplazo de PVC por el agregado manteniendo granulometría, porcentaje de asfalto, compactación y curado:

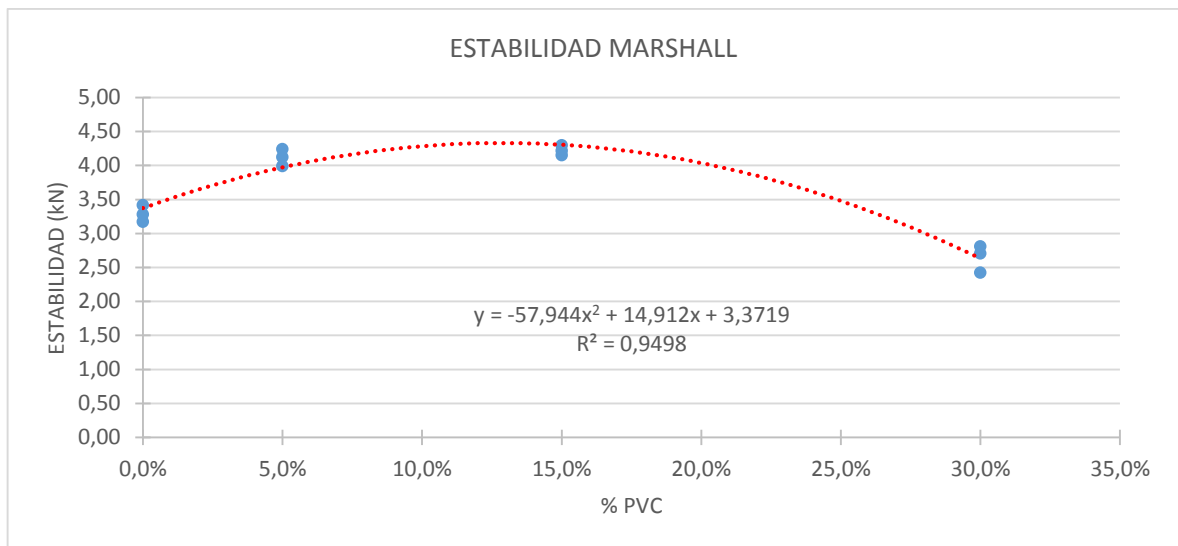


Figura 28. Estabilidad vs % de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

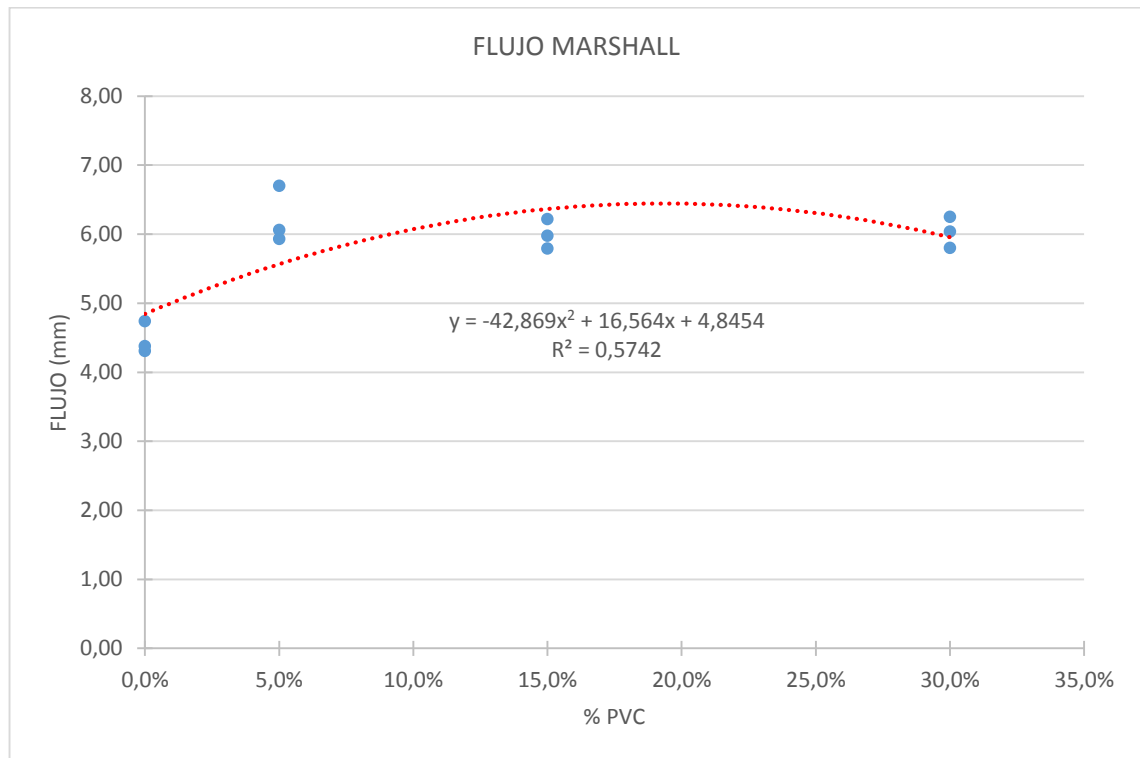


Figura 29. Flujo vs % de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

19.3. ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA (RTI)

Este procedimiento se realizó con el fin de estudiar la cohesión y adhesión de la mezcla modificada y sin modificar ya que el espécimen se ve sometido a tracción pura sin confinamiento alguno. Adicional al valor de su resistencia a la tracción se entablaron curvas de comportamiento, donde además de su carga máxima y desplazamiento en esta carga, se determina el área bajo la curva antes y después de la rotura, para evaluar mejor su comportamiento:



Figura 30. Proceso de falla a tracción indirecta (Elaboración propia)

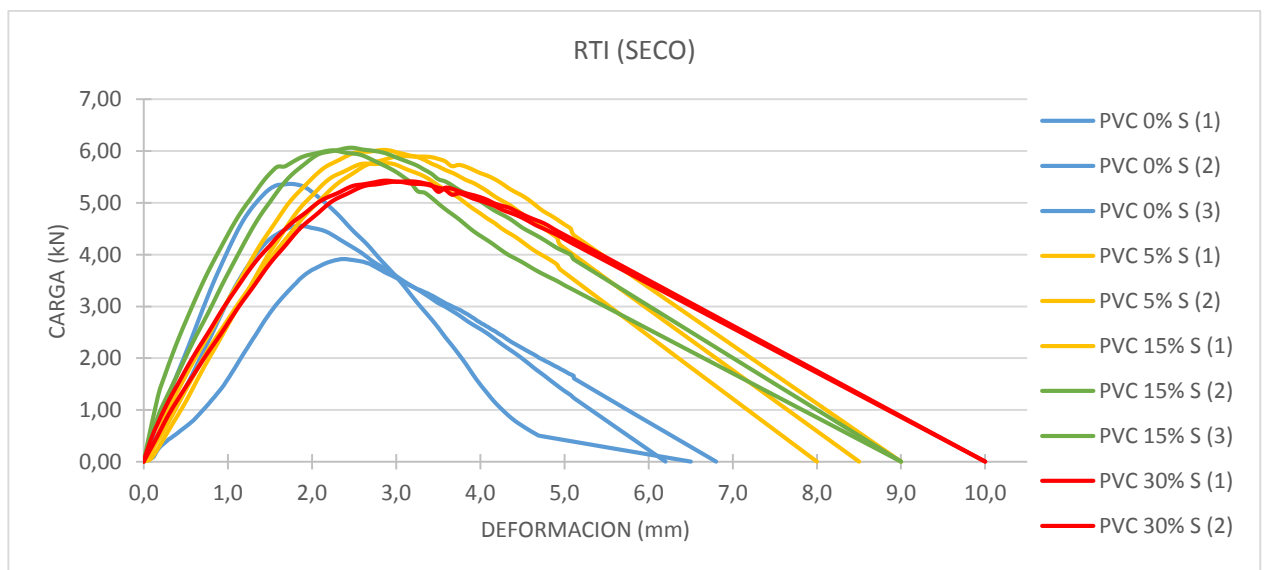


Figura 31. Curvas del ensayo de tracción indirecta en seco con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

De la figura 31 se puede evidenciar que en todos los casos de reemplazo de material granular por PVC se genera un aumento en la carga máxima con respecto a la muestra sin modificación (curvas azules). Sin embargo, entre las muestras con reemplazo también existen variaciones en sus comportamientos:

- A medida que aumenta el porcentaje de reemplazo el valor del desplazamiento final acumulado o de fractura última también aumenta.
- Los valores máximos de carga se encuentran localizados entre las muestras con un 5% y 15% de reemplazo.
- En los cuerpos de prueba adicionados con PVC se ve como a medida que aumenta la carga máxima se ve disminuido el desplazamiento en dicho punto, es decir que entre mayor sea la carga última menor será el desplazamiento en ese instante.

Para el caso de los especímenes húmedos, fueron colocados en inmersión en agua a temperatura ambiente por 12 horas, luego pasados a baño de María a 60° por 12 horas y así completar las 24 horas para saturación:



Figura 32. Inmersión de cuerpos de prueba para ensayo a tracción indirecta húmeda (Elaboración propia)

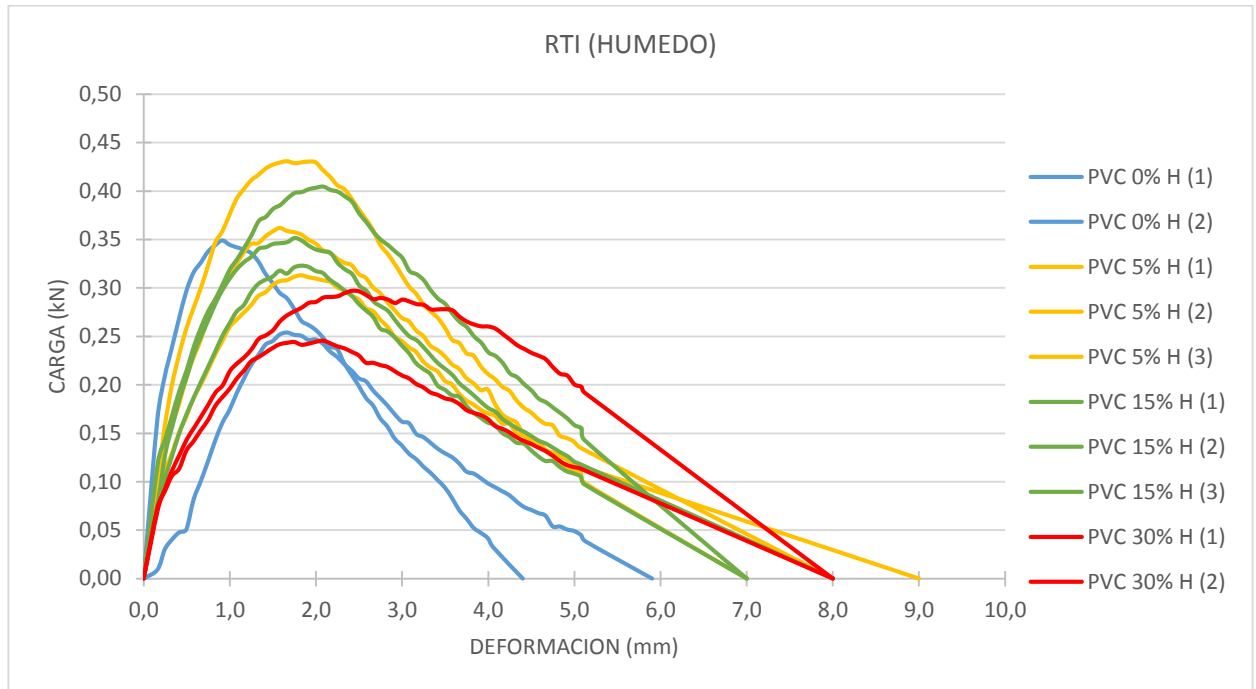


Figura 33. Curvas del ensayo de tracción indirecta en húmedo con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

Las muestras falladas en estado húmedo se pueden determinar lo siguiente:

- Las cargas máximas disminuyen considerablemente alrededor del 94% con y sin reemplazo, lo cual indica una afectación sumamente alta por condiciones de saturación.
- Los valores máximos de carga varían unos entre otros muy poco, el rango de estos valores está entre 0,25 kN y 0,44kN.
- Al igual que el estado seco, los valores máximos de carga se localizan entre los reemplazos de 5% y 15% de PVC.
- La deformación acumulada no sigue el patrón al de los ensayos en seco, es decir, no es directamente proporcional al porcentaje de reemplazo.

Cada grafica del ensayo a tracción indirecta determina junto con los valores máximos de carga y desplazamiento, áreas elásticas e inelásticas bajo la curva a lo largo del proceso de falla de la muestra. Estas áreas arrojan indicios del comportamiento de la mezcla para generar una recuperación total o parcial ante una carga.

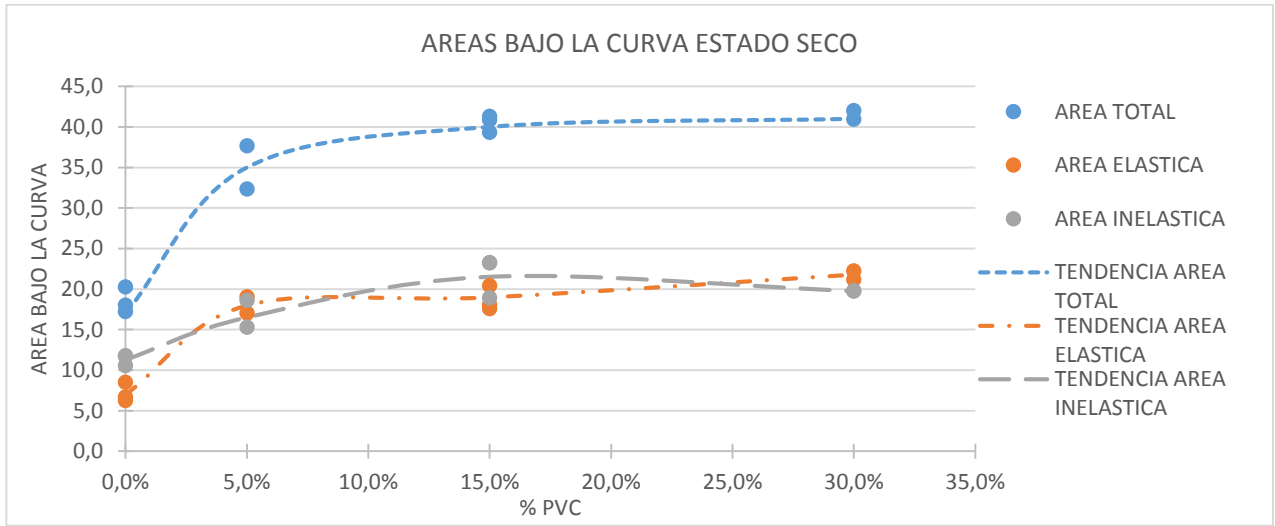


Figura 34. Áreas bajo la curva del ensayo a tracción indirecta en seco con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

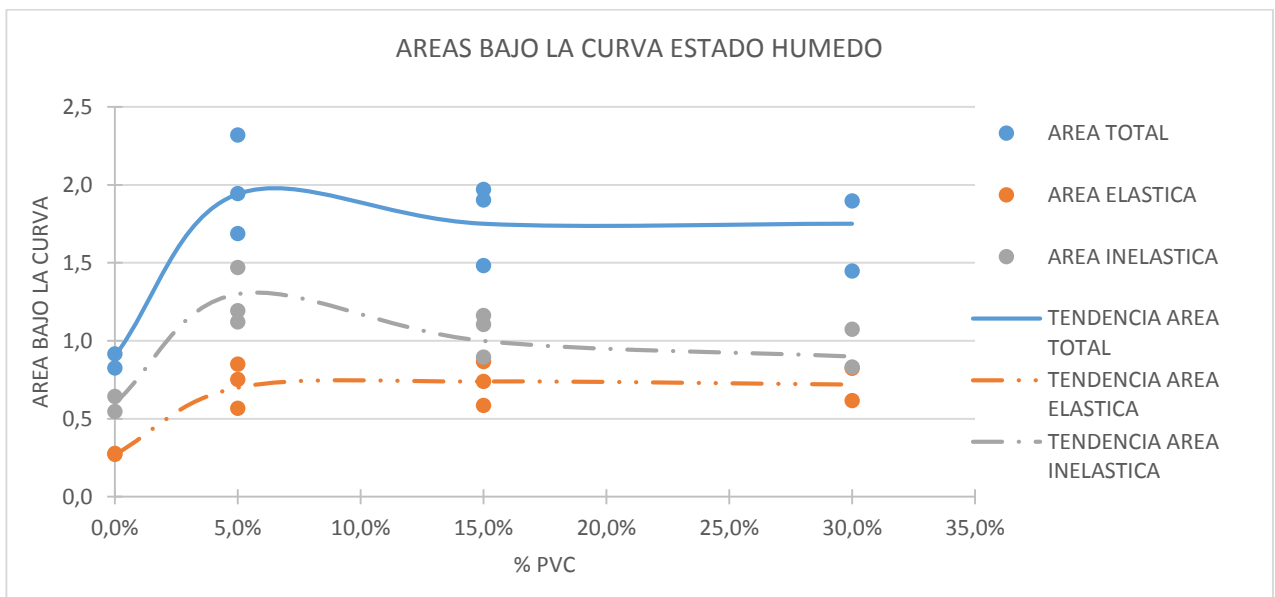


Figura 35. Áreas bajo la curva del ensayo a tracción indirecta en húmedo con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

Por último, se calcula la resistencia a la tracción de la muestra por la siguiente ecuación (INVIAS, 2013):

$$R_t = \frac{2000 * P(\max)}{\pi * H * D}$$

Donde:

P(max): Carga máxima del ensayo (N)

H: Altura promedio de la probeta (mm)

D. Diámetro promedio de la probeta (mm)

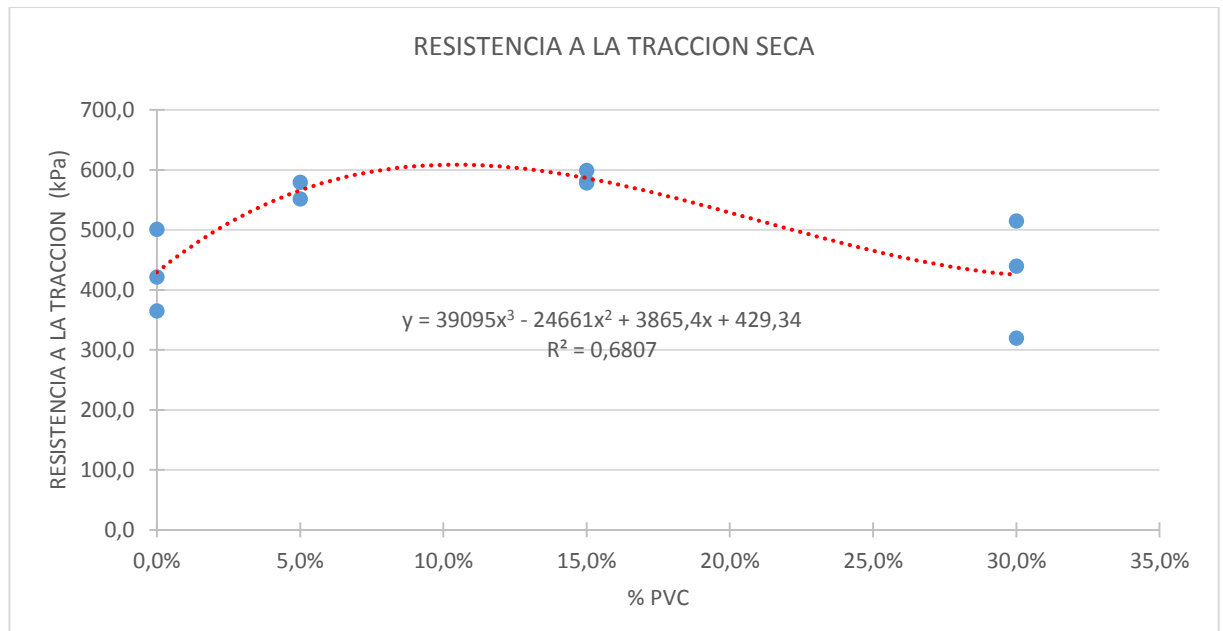


Figura 36. Resistencia a la tracción indirecta en seco con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

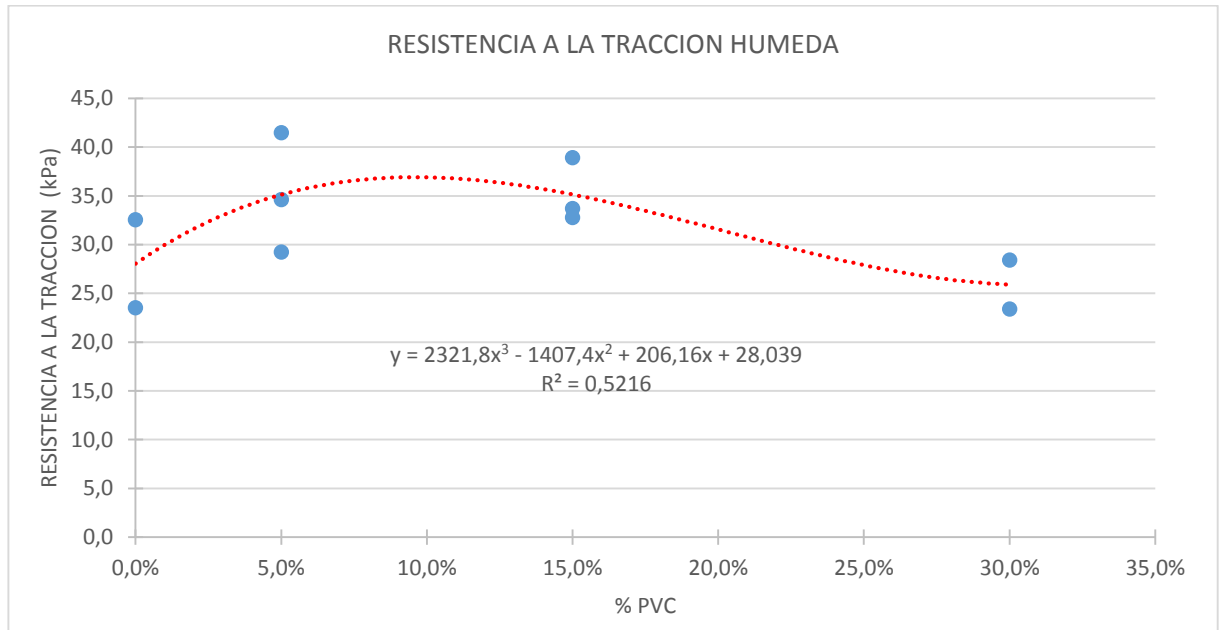


Figura 37. Resistencia a la tracción indirecta en húmedo con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

Para determinar la susceptibilidad de la muestra a la tracción en estado húmedo se determina la relación entre los dos valores anteriores con un valor determinado de reemplazo de PVC (INVIAS, 2013):

$$RRT = \frac{Rth}{Rts} X 100$$

Donde:

RRT: Relación de resistencia a la tensión (%)

Rth: Resistencia a la tensión en estado húmedo (kPa)

Rts: Resistencia a la tensión en estado seco (kPa)

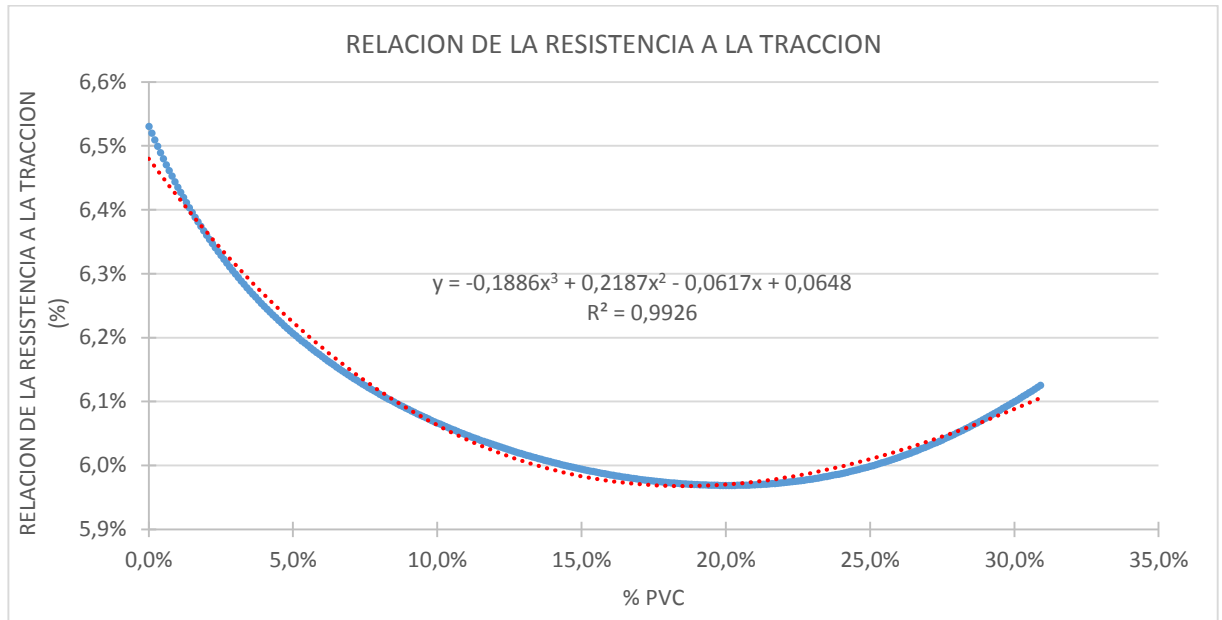


Figura 38. Relación de la resistencia a la tracción indirecta con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

19.4. DENSIDAD

Para este tipo de modificaciones la densidad no es determinante para evaluar el comportamiento de la mezcla, sin embargo, es una buena medida de control en campo y resulta fácil de comparar con otro tipo de modificaciones:

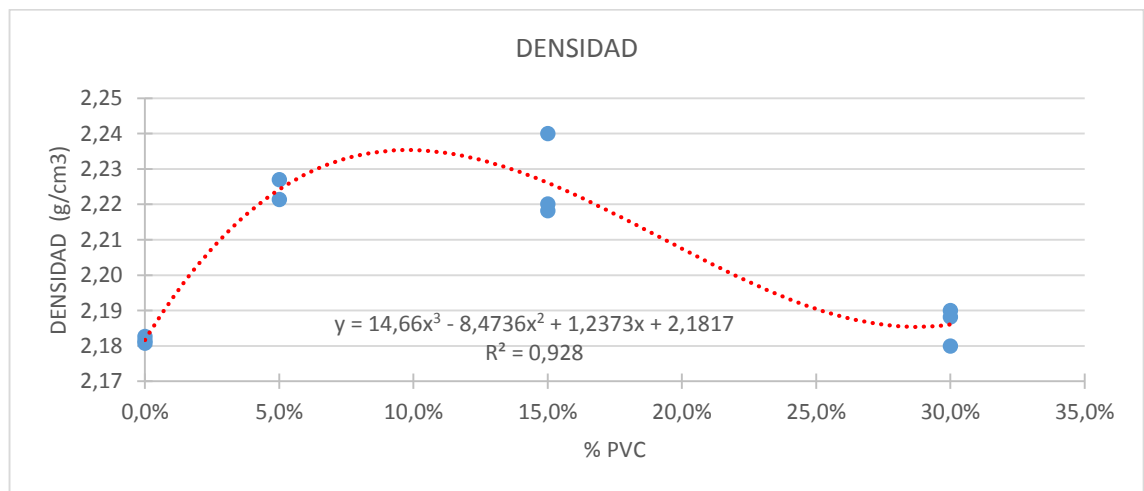


Figura 39. Densidad de las probetas con distintos porcentajes de reemplazo con PVC (Elaboración propia)

20. CONCLUSIONES

- Las mezclas asfálticas elaboradas y compactadas en frío solicitan un gran contenido de asfalto residual proveniente de la emulsión asfáltica, ya que por su bajo nivel de penetración a temperatura ambiente no alcanzan niveles de adhesión y cohesión óptimos. Desatando así problemas de compactación y resistencias bajas comparadas con mezclas de preparación en caliente. Sin embargo, resultan como una buena alternativa para procedimientos de bacheo y parcheo donde no sea posible suspender el tráfico de manera continua o prolongada.
- Los valores del ensayo de resistencia conservada evidencian la gran afectación de las mezclas asfálticas ante agentes como el agua, para el porcentaje de asfalto óptimo (7%) se logra perder casi un 55% de la resistencia a la compresión lo cual significa que si la mezcla es implementada en campo y se encuentra en estado de saturación parcial o total, tendrá una eficiencia alrededor del 45% con respecto a si se encontrara en estado seco.
- La estabilidad arrojada de la mezcla en frío por la metodología tipo Marshall resulta ser inferior a los obtenidos en mezclas convencionales en caliente, sin embargo, el reemplazo con PVC entre un 5% y 15% resulta favorable para la mezcla, ya que logra aumentar alrededor de 1,5 kN la estabilidad con respecto a la mezcla sin ser reemplazada.
- El flujo Marshall no presenta mejora con el reemplazo de PVC ya que a medida que este se va aumentando el flujo lo hace igualmente, no obstante, dicho aumento dentro de los porcentajes donde se mejoró la estabilidad (5%-15%) es menor a 1mm con respecto a la mezcla patrón.
- El reemplazo de partículas de PVC por agregado en el tamiz No. 8 resulta efectivo en los tres porcentajes usados (5%, 15%, 30) para la evaluación de la tracción indirecta en estado seco, ya que en los tres casos aumento la carga máxima y se extendió la deformación final acumulada, logrando una demora en el desprendimiento total entre las dos mitades de la muestra.
- Tanto para las muestras en seco y las muestras en húmedo reemplazando entre un 5% y 15% los valores de carga máxima por tracción indirecta logran aumentar. En el caso de las muestras en seco llega a aumentar 1 kN y en las muestras en húmedo 0,1 kN.
- Lógicamente las áreas bajo la curva en cada caso se ven afectadas, para el caso seco el área total aumenta desde que se inicia el reemplazo, pero logra volverse constante al llegar a 20% de reemplazo. El área elástica consigue aumentar hasta llegar al 5% de reemplazo, pero en

dicho valor toma una tendencia constante. Finalmente, el área inelástica aumenta hasta alcanzar el 15% de reemplazo, pero inmediatamente tiende a disminuir; como se evidencio en la figura 31 al tener menor pendiente inicial y no disminuir en gran medida el valor máximo alcanzado logra acumular una mayor área elástica y a su vez mayor desplazamiento.

- Los resultados de resistencia a la tracción son quizás los más representativos para evaluar el cambio de la cohesión entre una mezcla modificada y una patrón. Se comprobó que un reemplazo alrededor del 10% de agregado retenido en el matiz No. 8 por PVC logra aumentar cerca de 200 kPa para condiciones secas y 10 kPa para condiciones húmedas.
- La relación de la resistencia a la tracción no varía en gran medida a lo largo de los porcentajes reemplazados, ya que la muestra patrón arroja 6,5% y la mínima relación obtenida (5,95%) se encontró reemplazando la mezcla con 17% de PVC. Esto concluye que entre el valor mínimo y máximo de la relación de la resistencia a la tracción es de 0,55%.
- Como último parámetro a evaluar la máxima densidad lograda fue en el 9% de reemplazo por PVC, sin embargo el aumento con respecto a la muestra no modificada es mínimo (0,055 g/cm³).
- Para futuras investigaciones se recomienda hallar un contenido óptimo de asfalto residual proveniente de la emulsión, ya que los agregados reaccionan distinto según su procedencia, granulometría y compactación de la mezcla. Dicho contenido de asfalto puede variar con el porcentaje de PVC, por lo tanto, puede existir un porcentaje optimo según la cantidad de material pétreo reemplazado.

21. BIBLIOGRAFÍA

- Arenas, H. (1999). *Tecnología del Cemento Asfáltico*. Cali: Faid.
- Asphalt Institute. (1999). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*. Maryland.
- Castro, W., Rondon, H., & Barrero, J. (2015). Evaluation of rheological and thermic properties of neat and modified asphalt with a waste of LDPE. *Revista Ingeniería*, 12.
- Caulfield, P. (2013). Developing cold mix. *Rock to Road*, 2.
- Diaz, L. (2016). Creep performance evaluation of Cold Mix Asphalt patching mixes. *ScienceDirect*, 11.
- IDU, I. d. (2011).
- INVIAS, I. N. (2013).
- Israel Garcia, L. d. (2017). Evaluacion de las fuentes de emisiones contaminantes en plantas de mezclas de asfalto en caliente. *Congreso mexicano del transporte*.
- Maharaj, R., & Maharaj, C. (2014). Physical properties of Low Density Polyethylene, Polyvinylchloride and Used Engine Oil Modified Asphalt. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, Vol. 31, 16.
- Ming, L. (2012). Experimental Study on Water Stability of Cold Recycled Mixture Stabilized With Emulsified Asphalt. *Applied Mechanics and Materials*, 6.
- Rahi, M., Fini, E., Hajikarimi, P., & Nejad, F. (2015). Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15.
- Reyes, F., & Rondon, H. (2015). *Pavimentos (Materiales, construcción y diseño)*. Bogotá: ECOE.
- Reyes, F., Guáqueta, C., Porras, L., & Rondón, H. (2013). COMPORTAMIENTO DE UN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON UN DESECHO DE PVC. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 10.
- Reyes, O. J., Alvarez, Á., & Valdés, G. (2014). Evaluación Mecánica de Mezclas Asfálticas Frías Fabricadas con Reemplazo de Llenante Mineral. *Información Tecnológica*, 11.

Rondón, H., Reyes, F., Figueroa, A., Rodríguez, E., Real, C., & Montealegre, T. (2007). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Infraestructura vial*, 11.

Sarmiento, A. (1999). *Aplicación del ensayo cantabro a mezclas asfálticas de emulsion-petreo*. MORELIA.

Xiomara Vargas, F. R. (2010). Asphalts' aging phenomenon. *Ingeniería e investigación* , 18.