



CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y REOLÓGICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON
ACEITE DE COCO

JAVIER FLOREZ SANCHEZ
SERGIO LEONARDO GÓMEZ PÁEZ
NESTOR EDGARDO CELY LEAL

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTA D.C.
2018

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y REOLÓGICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON
ACEITE DE COCO

Trabajo Para Optar Por Título de Especialistas en Ingeniería de Pavimentos

JAVIER FLOREZ SANCHEZ	COD: 150826
SERGIO LEONARDO GÓMEZ PÁEZ	COD: 150840
NESTOR EDGARDO CELY LEAL	COD: 150842

Director

JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTINEZ

Coordinador Especialización en Ingeniería de Pavimentos

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS
BOGOTA D.C.

2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

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).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. General.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. MARCOS DE REFERENCIA.....	4
2.1. Marco Conceptual.....	4
2.1.1. Aceite de Coco – CCO (por las siglas en ingles de Coconut Oil).....	4
2.1.2. Asfalto.....	4
2.1.3. Asfaltos Modificados.....	4
2.1.4. Propiedades Físicas del Asfalto.....	5
2.1.5. Propiedades Reológicas del Asfalto.....	5
2.2. Marco Teórico.....	6
2.2.1. Modificación del asfalto.....	6
3. MÉTODO.....	9
3.1. Enfoque de la investigación.....	9
3.2. Alcance.....	9
3.2.1. Experimental.....	9
3.2.2. Correlacional.....	9
3.3. Hipótesis.....	9
3.4. Caracterización Física del Asfalto:.....	9
3.4.1. Ensayo de Penetración.....	9
3.4.2. Ensayo de Ductilidad.....	10
3.4.3. Ensayo de Punto de Ablandamiento.....	11
3.4.4. Ensayo de Pérdida de Masa en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO).....	12
3.5. Caracterización Reológica del Asfalto.....	14
3.5.1. Conceptos Reológicos (Elasticidad, Viscosidad Y Viscoelasticidad).....	14
3.5.2. Parámetros Evaluados en el Grado de Desempeño PG, obtenido mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR).....	15
3.5.3. Evaluación por Cargas Repetitivas (Fatiga).....	17
4. RESULTADOS.....	20
4.1. Caracterización del Aceite de Coco.....	20
4.2. Caracterización del asfalto.....	20
4.2.1. Caracterización Física.....	20



4.2.2. Caracterización Reológica	26
4.3. Comparación características físicas y reológicas del asfalto convencional y los asfaltos modificados con aceite de coco.....	35
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
6. BIBLIOGRAFÍA.....	38



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Estado Actual De Los Procesos De Modificación Del Asfalto.....	2
Ilustración 2 Relación Del Ángulo De Fase Y Módulo Complejo El Comportamiento Elástico Y Viscoso. Fuente: (Rangel, 2002).	15
Ilustración 3 Punto De Ablandamiento Del Asfalto Modificado Con Aceite De Coco Sin Envejecer.	21
Ilustración 4 Punto De Ablandamiento Del Asfalto Modificado Con Aceite De Coco Sin Envejecer.	23
Ilustración 5 Penetración Del Asfalto Modificado Con Aceite De Coco Sin Envejecer Y Envejecido.	24
Ilustración 6 Penetración Del Asfalto Modificado Con Aceite De Coco Sin Envejecer Y Envejecido.	24
Ilustración 7 Pérdida De Masa - Asfalto Modificado Con Aceite De Coco	25
Ilustración 8 Resultados Ensayo Mcsr Para Los Asfaltos Modificados Con Aceite De Coco	26
Ilustración 9 Porcentaje (%) De Recuperación De Los Asfaltos Modificados Con Aceite De Coco	27
Ilustración 10 Parámetro Jnr De Los Asfaltos Modificados Con Aceite De Coco.....	28
Ilustración 11 Resultados Del Barrido De Frecuencias Para Todos Los Asfaltos A Una Temperatura De 15 Oc.	28
Ilustración 12 Clasificación Pg De Los Asfaltos + %Cco Envejecidos, A Temperaturas Altas.	29
Ilustración 13 Valores Del Módulo Complejo G^* De Todos Los Asfaltos + %Cco Envejecidos.	30
Ilustración 14 Valores Del Ángulo De Fase Δ Para Todos Los Asfaltos Envejecidos.	30
Ilustración 15 Clasificación Pg De Los Asfaltos + %Cco Envejecidos, A Temperaturas Intermedias.....	31
Ilustración 16 Valores Del Módulo Complejo G^* De Todos Los Asfaltos + %Cco Envejecidos.	32
Ilustración 17 Valores Del Ángulo De Fase Δ Para Todos Los Asfaltos Sin Envejecer. ...	32
Ilustración 18 Curva Maestra Del Asfalto Modificado Con 1% De Aceite De Coco.....	33
Ilustración 19 Curva Maestra Del Asfalto Modificado Con 2% De Aceite De Coco.....	34
Ilustración 20 Curva Maestra Del Asfalto Modificado Con 5% De Aceite De Coco.....	34
Ilustración 21 Curva Maestra Del Asfalto Modificado Con 10% De Aceite De Coco.....	35



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características generales del CA 60-70.....	20
Tabla 2 Penetración de los materiales asfálticos INV E 706 - 13	21
Tabla 3 Punto de ablandamiento de anillo y bola INV E 712 - 13.....	21
Tabla 4 Índice de penetración INV E 724 - 07.....	22
Tabla 5 Penetración de los materiales asfálticos envejecidos INV E 706 - 13.....	22
Tabla 6 Rigidización de los materiales asfálticos envejecidos INV E 706 - 13	22
Tabla 7 Punto de ablandamiento de anillo y bola asfaltos envejecidos INV E 712 - 13....	23
Tabla 8 Ductilidad de materiales asfálticos modificados con cco envejecidos INV E 702 - 13	25
Tabla 9 Ensayo en el horno de lamina asfáltica delgada en movimiento INV E 720 - 13 .	26
Tabla 10 Resultados MSCR.....	27
Tabla 11 Caracterización PG.....	33
Tabla 12 Comparación características físicas y reológicas asfaltos estudias vs asfalto original.....	35



LISTA DE FOTOS

Foto 1 Ensayo de Penetración.....	10
Foto 2 Ensayo de Ductilidad.....	11
Foto 3 Ensayo de Punto De Ablandamiento.	12
Foto 4 Ensayo RTFOT.....	13
Foto 5 Preparación Muestras para el DSR.....	18
Foto 5 Equipos PAV Y DSR.....	19



1. INTRODUCCIÓN

El transporte a nivel global juega un papel importante en la economía especialmente dentro en la globalización, por ser un factor determinante en la competitividad de los productos y servicios que el país pueda ofrecer en los mercados internacionales, al facilitar la movilidad y la accesibilidad de los servicios básicos. La ingeniería de pavimentos se mantiene en un constante desarrollo y en búsqueda de nuevas tecnologías que aporten a la mejora continua de la durabilidad y el desempeño de las mezclas asfálticas, a través de la utilización de materiales y recursos que ayuden con la sostenibilidad ambiental.

El asfalto se caracteriza por tener una consistencia, durabilidad, viscosidad, elasticidad y resistencia específica. Por lo anterior cabe mencionar que todo material tiene un ciclo de vida específico el cual depende de variables que pueden hacer que este cambie. De aquí que se quieran mejorar estas propiedades para hacer un asfalto más duradero y resistente.

Por otro lado, vemos que el coco ha crecido en más de 93 países y uno de los países de origen es el sudeste de Asia. La cáscara de coco es uno de los que más contaminan y contribuye a la problemática de la contaminación en el mundo, ya que es un desecho sólido en forma de concha con aproximadamente 3,18 millones de toneladas al año. A pesar de su creciente auge con fines estéticos y comerciales, falta investigar sus beneficios en otros campos.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es evaluar los efectos nivel físico (penetración, punto de ablandamiento, pérdida de masa) y reológicos (LAS, caracterización PG, CREEP) en la adición de aceite de coco al ligante asfáltico.

1.1. Planteamiento del Problema

En el desarrollo de las obras viales en Colombia uno de los grandes retos es poder controlar la temperatura de mezcla del cemento asfáltico con los agregados, ya que el proceso de mezclas en caliente usa una excesiva cantidad de energía y conlleva al envejecimiento del asfalto.

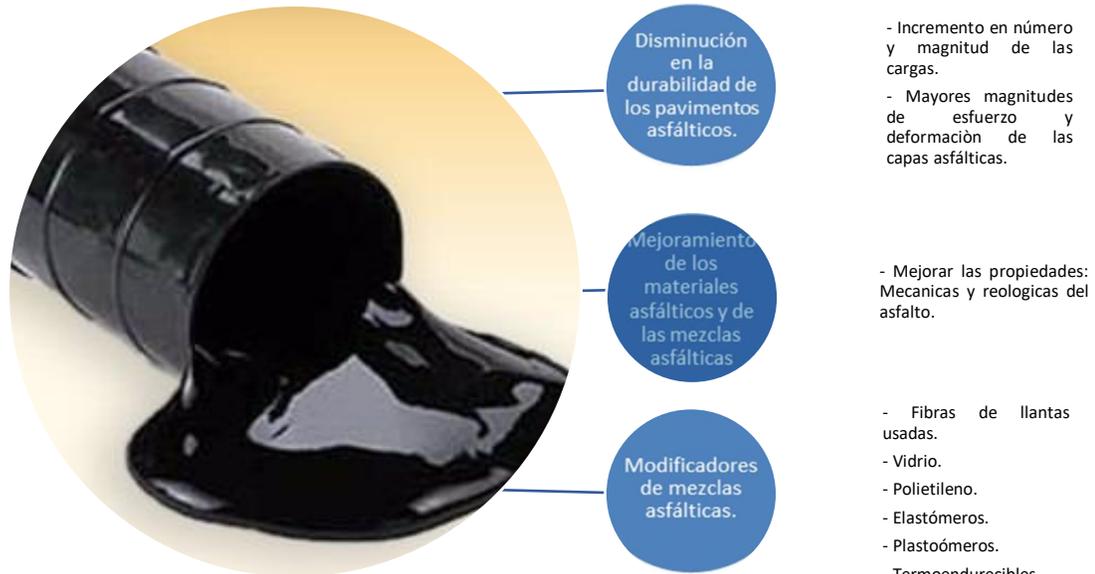


Ilustración 1 Estado actual de los procesos de modificación del asfalto

Al realizar modificaciones al asfalto lo que se busca es mejorar la viscosidad y bajar temperaturas, partiendo de lo anterior, se propone la inclusión del aceite de coco como modificador de tal forma que mejore las propiedades del asfalto con el fin de poder disminuir las temperaturas de mezclado y colocación de forma que pueda darse servicio en un tiempo menor sin que se lleguen a presentar daños prematuros, tales como ahuellamientos o daños superficiales.

1.2. Justificación

La presente investigación se enfoca en evaluar las características físicas y reologías de una muestra de asfalto modificado con aceite de coco en diferentes cantidades, con el fin de poder plantear una alternativa diferente a las mezclas convencionales. El aceite de coco por ser un producto natural de fácil producción y renovación brindara al asfalto y a la mezcla asfáltica beneficios en la reducción de las temperaturas de instalación con los cual se contará con una alternativa de mezcla asfáltica de baja temperatura de instalación reduciendo los tiempos de curado en obra de la mezcla, la facilidad y la confiabilidad de dar al servicio una estructura de pavimento en un menor tiempo sin que se presenten daños a la mezcla asfáltica.

Así el presente trabajo podrá arrojar resultados satisfactorios para reducir en gran medida el alto impacto medio ambiental de las mezclas asfálticas y abrir más campo de investigación en la modificación de asfaltos. Todo esto con el fin de explorar nuevos materiales que tengan mejor desempeño y sean más sostenibles.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

El objetivo de la investigación es evaluar el desempeño del cemento asfáltico al ser modificado con aceite de coco.

1.3.2. Específicos

- Determinar la metodología apropiada para el cálculo de los porcentajes (%) de aceite de coco a utilizar en la modificación, mediante el cálculo de la densidad de este modificador.
- Identificar el comportamiento del Asfalto 60-70 de la refinería de Barrancabermeja modificado con aceite de coco, por medio de su caracterización física y reológica.
- Contrastar las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico modificado con aceite de coco y el cemento asfáltico sin modificar.



2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1. Marco Conceptual.

2.1.1. Aceite de Coco – CCO (por las siglas en inglés de Coconut Oil).

El aceite de coco virgen, se obtiene mediante presión en frío de la pulpa blanca del coco (endospermo) sin usar ningún tipo de producto químico. Existe principalmente dos tipos, el proveniente de agricultura ecológica y el normal. En el caso del aceite de coco tener certificaciones de agricultura ecológica significa que no se han utilizado productos químicos en las plantaciones de los cocoteros de los que se han recolectado los frutos (aceitedecoco.org: <https://www.aceitedecoco.org/composicion-y-propiedades-del-aceite-de-coco/>).

No hay que confundir el aceite de coco con el aceite de palma. Aunque ambos provienen del mismo fruto, el coco, estos aceites se extraen de partes distintas del coco por lo tanto tienen propiedades muy distintas. Al contrario que el aceite de coco, el aceite de palma se extrae del mescarpo, que es la capa fibrosa no comestible que se encuentra inmediatamente después de la piel del fruto. El aceite de coco se compone de casi el 90% de grasas saturadas, la mayoría de ellas los beneficiosos ácidos grasos de cadena media (MCFA – médium chain fatty acids) de estos ácidos grasos, aproximadamente el 45% es ácido laurico. El único alimento natural que contiene más ácido laurico que el aceite de coco es la leche materna. Otros ácidos grasos presentes en el aceite de coco son el palmítico, el esteárico y el mirístico. El ácido oleico está presente con valores inferiores al 6%. El aceite de coco se encuentra de manera líquida a partir de los 25 grados centígrados de temperatura. Por debajo de esa temperatura tiende a solidificarse con mayor intensidad a más baja temperatura las propiedades del aceite de coco no se alteran al pasar del estado sólido a líquido ni viceversa. Su coloración es blanca en estado sólido y transparente ligeramente amarillenta en estado líquido. Su acidez está por debajo del 2%.

2.1.2. Asfalto.

El asfalto es un material bituminoso de color negro o café oscuro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Estos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleo y los naturales. (Wulf, 2008)

2.1.3. Asfaltos Modificados.

En las últimas décadas, la academia, apoyada en la investigación, ha venido direccionando la búsqueda del mejoramiento de las mezclas asfálticas con el uso de agentes modificadores, tal y como lo señalaron Sierra Hernández & Mejía Umbarila, en el año 2017, estas modificaciones brindan la posibilidad de reducir el impacto ambiental sin desmejorar las características físicas y reológicas de las mismas. Las mezclas asfálticas modificadas

tal como su nombre lo indica son aquellas donde se adiciona un elemento distinto a cemento asfáltico y agregados pétreos, buscando disminuir las patologías propias de los pavimentos.

2.1.4. Propiedades Físicas del Asfalto.

De acuerdo con Sierra Hernández & Mejía Umbarila (2017) las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento que a continuación se definen:

2.1.4.1. Penetración. Un ensayo que permite medir cuantitativamente la consistencia (resistencia a rotura o deformación fácil) de los materiales bituminosos, valores altos de penetración indican consistencias blandas. (Invias, Norma INV E-724-07 Índice de Penetración, 2013).

2.1.4.2 Punto de Ablandamiento. Ensayo que determina la temperatura a la cual el material bituminoso adquiere un estado de fluidez empleando un aparato de anillo y bola. (Invias, Norma INV E-712-07 Punto de ablandamiento., 2013).

2.1.4.3. Ductilidad. Ensayo que provee una medida de las propiedades de tensión de los materiales bituminosos, la distancia de elongación recorrida por un material, a temperatura controlada en un baño de agua, es la medida de la ductilidad del material. (Invias, Norma INV E-702-07 Ductilidad, 2013).

2.1.5. Propiedades Reológicas del Asfalto.

Las propiedades mecánicas y reológicas del ligante asfáltico están relacionadas con el desempeño de un pavimento. Durante la vida útil de un pavimento, los ligantes asfálticos experimentan varios entornos que le conducen a un envejecimiento, generalmente asociado con la variación de temperatura y accesibilidad de oxígeno. El envejecimiento puede cambiar significativamente las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos y provocar que estos se rigidicen, volviéndolos susceptibles a él agrietamiento u otros mecanismos de falla de un pavimento (Qian, Schabron, Boysen, & Farrar, 2013.). En laboratorio se utilizan varios ensayos de envejecimiento artificial, como el horno rotatorio de película delgada (RTFO), el envejecimiento a presión (PAV), y procesos modificados, como el ensayo agitado de flujo de aire y la tecnología de microondas. Estos ensayos han sido propuestos para ofrecer métodos de envejecimiento rápidos y eficientes para Asfaltos modificados y convencionales (Lu & Isacsson, 2002).

Se ha demostrado que en las primeras 0.25 pulgadas de la carpeta asfáltica se presenta el envejecimiento más severo, donde el promedio de la viscosidad decrece lentamente de 0.5 pulgadas a 1.5 pulgadas. Se han realizado estudios en los pavimentos de Texas y Minnesota en donde se demostró que el mayor envejecimiento lo sufre el Asfalto en la parte superficial de la carpeta, sin embargo, se ha reportado que en carpetas con espesores mayores a 6 pulgadas existe una tendencia de envejecimiento opuesto a su profundidad, o sea que los valores de viscosidad para el Asfalto más cercano a la capa de base son mayores, esto se atribuye a diferentes niveles de accesibilidad de vacíos de aire a lo largo de la profundidad. Por ende el envejecimiento en campo no solo depende a variaciones de temperatura, sino también depende de la estructura del ligante asfáltico, de la estructura de

la mezcla asfáltica y del entorno local dentro de los pavimentos (Woo, Prapaitrakul, Chowdhury, & Glover, 2008). Dado el alcance del presente documento, a continuación se presentaran los ensayos utilizados para establecer las propiedades reológicas del asfalto:

2.1.5.1. Endurecimiento y envejecimiento. Durante este proceso de elaboración de una mezcla asfáltica, los asfaltos se oxidan por acción del oxígeno del aire y de las altas temperaturas de mezclado, permitiendo que el fenómeno de envejecimiento inicie en forma inmediata, y posteriormente, es inducido por los diversos factores climáticos que inciden en los pavimentos (Vargas & Reyes, 2010).

2.1.5.2. Envejecimiento RTFOT. El principio fundamental es realizar los envejecimientos en el horno de película delgada rotacional (RTFO) y medir las propiedades reológicas de la muestra en condición original y la muestra acondicionada en el RTFOT y determinar el grado de afectación en la muestra. (I.N.V.E-720, 2007)

2.1.5.3. PAV. Envejecimiento secundario. Este ensayo representa el envejecimiento de ligantes asfálticos durante el servicio es afectado por variables asociadas a la mezcla asfáltica, como son las proporciones volumétricas, la permeabilidad de la mezcla, las características de los agregados y posiblemente otros factores. Este ensayo permite evaluar la resistencia relativa, de distintos ligantes asfálticos, al envejecimiento por oxidación para temperaturas seleccionadas y no considera el conjunto de todas las variables descritas. Asimismo, la norma I.N.V.E-751-07 describe el procedimiento que se debe seguir para producir el envejecimiento acelerado (oxidación) de ligantes asfálticos mediante un método con aire presurizado y temperaturas elevadas. Esta prueba pretende simular el envejecimiento de los ligantes asfálticos por oxidación en servicio y esta propuesto para residuos provenientes del ensayo de película delgada rotatoria, (Invias, Norma INV E-751-07 Método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando cámara de envejecimiento a presión PAV, 2013).

2.1.5.4. Reómetro de Corte Dinámico DSR. Este método cubre la determinación del módulo de corte dinámico y el ángulo de fase de un ligante asfáltico cuando es ensayado al corte dinámico (oscilatorio), utilizando una geometría de prueba de platos paralelos. Es aplicable a ligantes asfálticos con valores de módulo de corte dinámico de 100 Pa a 10 MPa. Este rango se obtiene típicamente entre 6° y 88° C. Este método de prueba está pensado para determinar las propiedades lineales viscoelásticas de ligantes asfálticos, para requerimiento de especificación y no como un procedimiento para comprender la caracterización completa de las propiedades viscoelásticas de ligante (INVIAS, 2007).

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Modificación del asfalto.

En el año 2008, se realizó una modificación del asfalto, con aceite lubricante, por medio del metodo Superpave, se concluyó que a bajas temperaturas ambientales la adición de aceite lubricante de motor disminuye la temperatura de aplicación de Superpave en 25°C, pero cuando la aplicación se realiza a altas temperaturas ambientales la reducción de la temperatura de aplicación no es significativa, además se encontró que la aplicación de

aceites lubricantes pueden ser perjudicial sobre la calidad del asfalto por la reducción de la adhesión de éste con los agregados, lo que puede ocasionar desprendimientos. (Villanueva, Ho, & Zanzotto, 2008).

En el año 2010, se presentaron los resultados experimentales de ensayar dos mezclas asfálticas densas en caliente tipo M19 y M12 (acorde con las especificaciones del Instituto Venezolano del Asfalto - INVEAS, 2004) modificadas con un desecho de policloruro de vinilo (PVC), suministrado por Mexichem Resinas S.A. (Colombia). Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo) y modificadas se realizaron ensayos Marshall, módulo dinámico y deformación permanente. Las mezclas fueron elaboradas con un cemento asfáltico (CA) producido en Venezuela tipo A20 según la especificación de la Comisión Venezolana de Normas Industriales - COVENIN (2000). Para el CA con y sin aditivo se realizaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad. La modificación de las mezclas se realizó por vía húmeda. Las mezclas modificadas con desecho de PVC experimentan mayor rigidez (bajo carga monotónica y cíclica) y resistencia a la deformación permanente en comparación con las convencionales. De la misma forma, el CA modificado presenta mayor resistencia a la penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y menor susceptibilidad térmica a fluir que el convencional. (Prada, Rondón, González, & Reyes, 2010).

Del mismo modo, en la ciudad de Medellín – Colombia, por medio de la utilización de aceite de palma en las mezclas asfálticas tibias se logró la reducción en la viscosidad; buena resistencia mecánica y buen desempeño a menor temperatura para aceite en concentraciones inferiores al 1%. (Lopera, 2011)

En la ciudad de Michigan, DeDene, realizó pruebas para conocer el comportamiento del RAP cuando se le adiciona aceite usado de motor, concluyeron que el aceite usado es un posible rejuvenecedor de asfaltos envejecidos ya que aporta maltenos (están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas), que contribuyen a mejorar la capacidad de flujo de la mezcla. En el momento, en que se utilizó tanto RAP como aceite usado en la fabricación de mezclas asfálticas se observó que las fuerzas de cohesión no aumentan lo que puede ocasionar un incremento en las probabilidades de desprendimiento de agregados por pérdida de fuerzas ligantes en terreno. De esta investigación se determinó que una de las cualidades del aceite usado fue la capacidad para contrarrestar la capacidad de endurecimiento. (DeDene, 2011).

La Universidad de Queens de Canadá realizó durante 5 años estudios en dos tramos de la autopista Trans-Canadá, que fueron construidos en el año 1999 con asfalto modificado con aceite de motor usado, los resultados encontrados para el pavimento después de 5 años de uso, no fueron satisfactorios debido a los agrietamientos generalizados presentados a lo largo de todo el tramo de vía, según el estudio esta falla en la mezcla asfáltica se debió a la presencia de metales pesados en el aceite usado y la susceptibilidad del asfalto modificado a los cambios de temperatura, lo cual generó oxidación de estos metales, acelerando los procesos de envejecimiento del pavimento por lo que no recomienda el uso de este tipo de productos en cementos asfálticos. (Shurvell, 2012).

Otra alternativa que se ha evaluado es la adición de aceite de cocina usado en mezclas asfálticas en caliente (HMA), se realizaron ensayos con concentraciones que van del 0% al 60%, demostrando que la adición de este aceite disminuyó la rigidez de la mezcla, se

propició la formación de surcos y/o grietas. Además, se observó mejora en la resistencia térmica a las fisuras. (Wen, Bhusal, & Wen, 2013).

En el mismo año (2013), se estudió el efecto de la adición de aceite usado en las características críticas de las carpetas asfálticas, este estudio indicó que el aceite usado es un modificador del comportamiento reológico y térmico de las carpetas asfálticas debido a la reducción de la rigidez, generando un incremento en la relajación del módulo. Los resultados también mostraron que la adición del aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia aglutinante del asfalto en un amplio rango de temperatura. (Golalipour, 2013).

Asimismo, se realizó una comparación entre una mezcla asfáltica adicionada con cascara de palma de aceite – POS y otra adicionada con cáscaras de coco - CS (Al-Mansob, Ismail, Algorafi, Hafezi, & Baghini, 2013), de esta investigación los autores concluyeron POS y CS con más del 5% de contenido de adición, hicieron que el concreto asfáltico sea más susceptible a la deformación permanente. Ambas adiciones redujeron la posibilidad de mejorar la resistencia a la fluencia después de la disminución de las propiedades cohesivas y plásticas de las mezclas asfálticas.

En el año 2016, investigadores de la Universidad de Malaysia reemplazaron los agregados gruesos por cantidades significativas de cáscara de coco (CS), utilizándola como una fuente artificial de agregados gruesos. En este estudio, cuatro tipos de CSs volúmenes en peso del 0%, 10%, 20%, 30% y 40. Los tamaños de partícula de la CSs utilizado como principales agregados gruesos intervalo de 5 mm a 20 mm. La prueba de estabilidad Marshall muestra que el contenido de betún óptima para mezclas asfálticas es 5,1%. Las propiedades de ingeniería investigados incluyen la volumétrica, la fluencia dinámica, resistencia a la tracción indirecta, y el módulo elástico. Los resultados muestran que la estabilidad disminuye al aumentar el contenido de CS debido a la alta absorción de agua. Además, el uso de CSs como agregados gruesos en el concreto asfáltico ayudo a aumentar el módulo elástico, la rigidez y la resistencia a la tracción indirecta hasta un 30%. Generalmente, una sustitución del 10% de agregados gruesos con CSs es el límite óptimo. (Jeffry, Jaya, Manap, Miron, & Hassan, 2016)

En la Ciudad de Manizales – Colombia, se evaluó la resistencia mecánica de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con aceites lubricantes usados, de este estudio se determinó que las temperaturas óptimas de mezcla y compactación disminuyen a medida que se va adicionando aceite al asfalto, por lo que se pueden catalogar como mezclas tibias, lo cual puede disminuir los costos energéticos para la fabricación de pavimentos y aumentar las distancias a las que se pueden transportar. De esta forma se determinó que para concentraciones del 2% en peso de aceite la temperatura de mezcla es de 135 °C, debido a que el aceite transmite sus características lubricantes al asfalto, disminuyendo la viscosidad del asfalto. No obstante, como efecto contraproducente se determino que este tipo de modificación con aceite usado aumenta la susceptibilidad térmica del bitumen, lo que puede causar deformaciones y ahuellamiento, cuando se aplica en zonas donde la temperatura es alta. (Cárdenas, 2017).



3. MÉTODO

3.1. Enfoque de la investigación

Los estudios realizados son cuantitativos ya que utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente relacionándolas con una medición numérica. A igual también se puede realizar un tratamiento estadístico con los datos obtenidos.

La investigación está enfocada en evaluar las posibles mejoras que traería modificar el asfalto convencional 60/70 producido por Ecopetrol con aceite de coco.

3.2. Alcance.

3.2.1. Experimental.

Por medio de ensayos de laboratorio físicos y reológicos y tras la variación de distintos porcentajes de aceite de coco para evaluar sus efectos sobre las propiedades mecánicas del cemento asfáltico como lo son la permeabilidad al agua y resistencia a la compresión.

3.2.2. Correlacional.

Se mide el grado de relación que tiene la adición de aceite de coco (variable independiente) sobre la permeabilidad al agua y resistencia a la compresión (variables dependientes).

3.3. Hipótesis

Al determinar el porcentaje óptimo de aceite de coco al modificar un cemento asfalto, se obtendrán mejores parámetros de comportamiento a la fatiga y desempeño del cemento asfáltico, disminuyendo su viscosidad y las temperaturas de mezclado.

3.4. Caracterización Física del Asfalto:

La caracterización física se realizó a los ocho Asfaltos modificados y al Asfalto convencional como muestra testigo. Los ensayos fueron regidos por los estándares de la norma ASTM, AASHTO, y las normas Colombianas INVIAS. (Ver Anexos para fotografías de los Ensayos).

3.4.1. Ensayo de Penetración.

Fue publicado por primera vez en 1959, consiste en derretir y enfriar el Asfalto a condiciones controladas, donde se utiliza una aguja estándar para penetrar el Asfalto con una carga equivalente a 100 gramos, a una temperatura de 25 °C, se debe tomar el dato de cuanto penetra la aguja en un tiempo de 5 segundos. La profundidad de penetración es



medida en unidades de 0.1 mm y reportada en unidades de penetración. Por ejemplo si la aguja penetra 8 mm se reporta un valor de penetración de 80. Este ensayo está regido por las normas AASHTO T 49 y ASTM D 5, y es utilizado para medir la consistencia del asfalto, valores altos de penetración son característicos de asfaltos blandos (Halstead & Zenewitz, 1961).

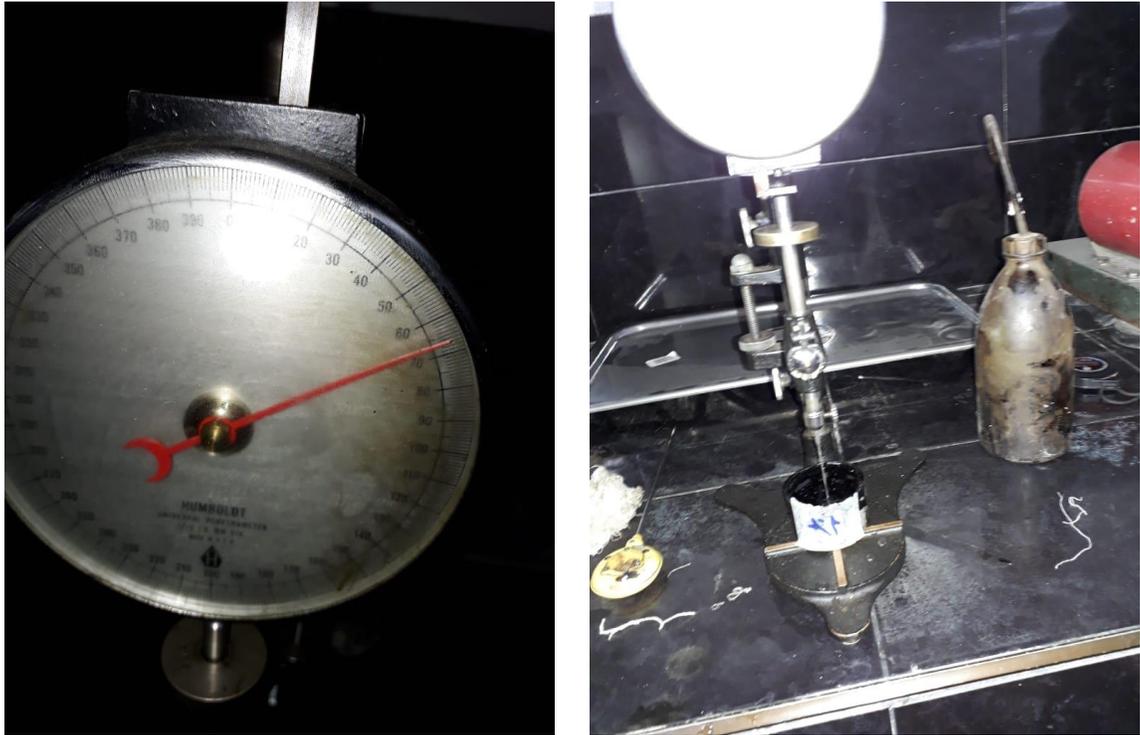


Foto 1 Ensayo de Penetración

3.4.2. Ensayo de Ductilidad.

Este ensayo mide las propiedades a tensión del asfalto, y consiste en estirar la muestra de Asfalto hasta su punto de ruptura. La distancia medida en centímetros entre el punto inicial y el punto de ruptura se reporta como la ductilidad del material. Por lo general se realiza a una temperatura de 25 °C, sin embargo, en ocasiones se recomienda experimentar con temperaturas más críticas dependiendo de la naturaleza del Asfalto y las condiciones de diseño. Es un ensayo que ha sido limitado por su carácter empírico. Está regido por la norma AASHTO T 51 y la ASTM D 113 (Halstead & Zenewitz, 1961).



Foto 2 Ensayo de Ductilidad

3.4.3. Ensayo de Punto de Ablandamiento.

Definido como la temperatura a la cual, una muestra de Asfalto no puede soportar el peso de una bola de acero de 3.5 g, es un ensayo muy utilizado en Europa y en Estados Unidos para los asfaltos utilizados en techos. El ensayo consiste básicamente en dos discos horizontales de Asfalto soportados por dos anillos de cobre, los cuales son calentados a una rata de temperatura controlada, en un baño de agua destilada, donde cada muestra soporta la bola de acero. El punto de ablandamiento es reportado como el promedio de las temperaturas en donde los dos discos se han suavizado lo suficiente para dejar caer 25 mm la bola cubierta en Asfalto. El punto de ablandamiento es útil para determinar la temperatura a la que el Asfalto alcanza un determinado estado de fluidez. Regido por la norma AASHTO T 53 y ASTM D 36.

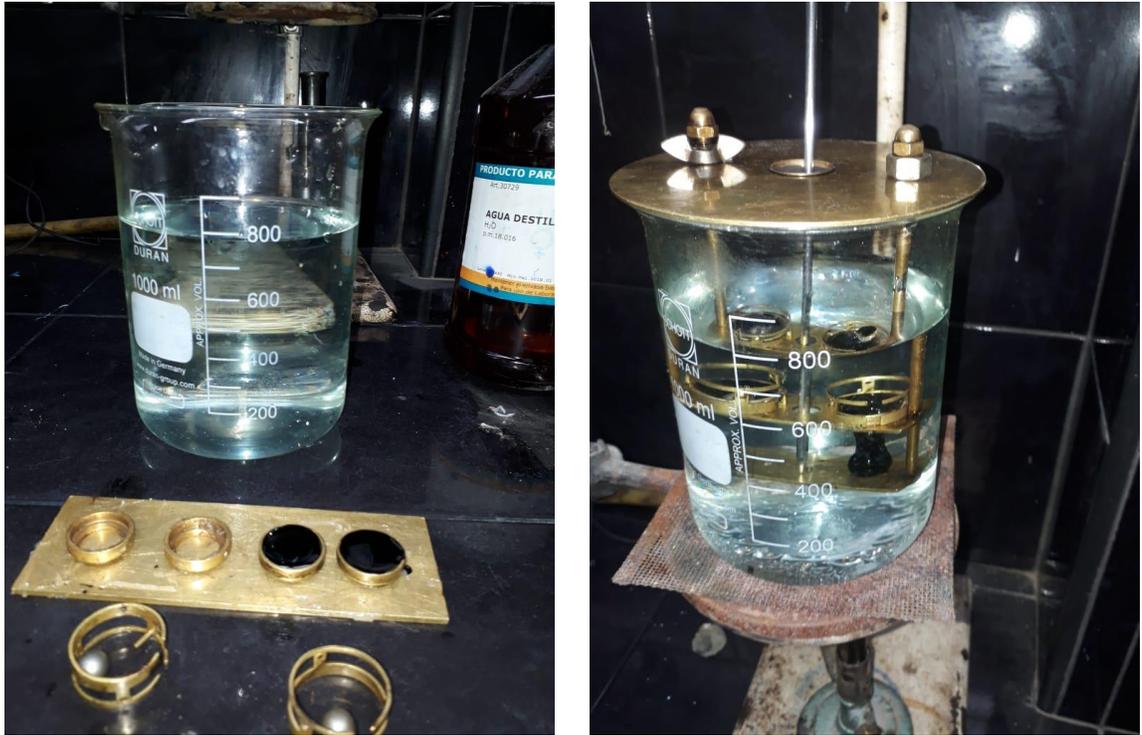


Foto 3 Ensayo de Punto de Ablandamiento.

3.4.4. Ensayo de Pérdida de Masa en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO).

El RTFO simula el envejecimiento a corto plazo del Asfalto, el Asfalto es expuesto a una temperatura de $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ para simular el envejecimiento por mezclado y puesta en obra. Este ensayo también permite obtener una medida cuantitativa de la pérdida de volátiles durante este proceso de envejecimiento. El procedimiento se realiza con 35 gramos de Asfalto sin envejecer, ubicado en botellas cilíndricas las cuales son colocadas en los agujeros del horno rotatorio, el horno rota por 85 minutos a una temperatura de $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ una vez finalizado el proceso se toman los pesos finales y se conserva el Asfalto como residuo. Los ligantes asfálticos por lo general pierden volátiles durante el mezclado y los procesos de puesta en obra. Las altas temperaturas que se utilizan en estos procesos envejece el asfalto eliminando una cantidad significativa de volátiles (Corbett L. , 1969). Según las pruebas de campo de Corbett & Merz (1975) el ligante asfáltico una vez colocado ya no pierde una cantidad significativa de volátiles durante su vida útil.



Foto 4 Ensayo RTFOT

3.5. Caracterización Reológica del Asfalto

3.5.1. Conceptos Reológicos (Elasticidad, Viscosidad Y Viscoelasticidad)

Todo inicia con la teoría de la elasticidad (sólido ideal) de Robert Hooke en 1678, quien describe el comportamiento mecánico de un sólido ideal, relacionando la deformación aplicada, al esfuerzo resultante, mediante un factor de proporcionalidad llamado módulo (Rangel, 2003).

$$\text{Esfuerzo } (\sigma) = \text{Módulo } (G) * \text{Deformación } (\gamma) \quad (3-1)$$

Luego vendría en 1687 la aparición de la ley de Newton, quien desarrollo una relación similar a la ley de Hooke, para fluidos viscosos ideales, relacionando linealmente el esfuerzo con la velocidad de corte (Rangel, 2003).

$$\text{Esfuerzo } (\sigma) = \text{Coeficiente de Viscosidad } (\eta) * \text{Velocidad de Corte } (\dot{\gamma}) \quad (3-2)$$

3.5.1.1 *El módulo complejo (G^*): se define como una medida de la resistencia total de los materiales a la deformación.*

$$G^* = (G'^2 + G''^2)^{0.5} \quad (3-3)$$

3.5.1.2 *El módulo elástico (G'): se define como una medida de la elasticidad del material y de la habilidad del material de almacenar energía o de recobrar su forma original después de haber sido deformado.*

3.5.1.3 *El módulo viscoso (G''): se define como la habilidad del material para disipar energía (energía que se transforma en calor) o la resistencia del material a fluir, en otras palabras, refleja la rata de disipación de energía deformacional mediante flujo.*

3.5.1.4 *El valor de $\text{Tan } \delta$: es una medida de la capacidad de amortiguamiento del material.*

$$\text{Tan } \delta = G''/G' \quad (3-4)$$

3.5.1.5 δ : *es el ángulo de fase, que es la medida entre la onda de entrada estimulante ya sea esfuerzo o deformación, y la onda de respuesta también siendo un esfuerzo o una deformación. Un $\delta = 0^\circ$ es característico de un sólido ideal (ley de Hooke), y un $\delta = 90^\circ$ es característico de un fluido newtoniano o un fluido viscoso donde la elasticidad es nula.*

Otros autores como (Rangel, 2002) definen la viscoelasticidad como la respuesta del material a una fuerza o desplazamiento, exhibiendo bien el flujo elástico o viscoso o una combinación de ambas, los materiales que exhiben este comportamiento se denominan viscoelásticos. Un material elástico es completamente recuperable y un material viscoso es completamente no recuperable. En la figura 2 se presenta de manera gráfica la relación entre el ángulo de fase y el modulo complejo.

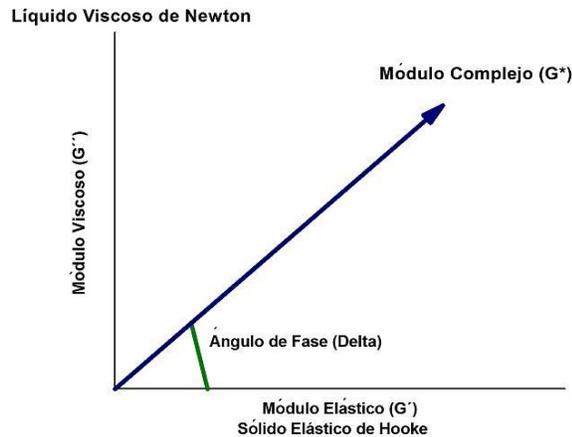


Ilustración 2 Relación del ángulo de fase y módulo complejo el comportamiento Elástico y Viscoso. Fuente: (Rangel, 2002).

3.5.2. Parámetros Evaluados en el Grado de Desempeño PG, obtenido mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

El DSR proporciona información sobre la viscosidad de los materiales en función de la velocidad de corte o esfuerzo, tiempo y dependencia de temperatura; también, proporciona información sobre las propiedades visco elásticas del material ($G' =$ módulo elástico, $G'' =$ módulo viscoso, $\tan\delta =$ ángulo de fase) con respecto al tiempo, temperatura, frecuencia y la relación esfuerzo/deformación e información de respuesta de carga y descarga, con el módulo de relajación, creep y recuperación de creep. En el reómetro, un esfuerzo es calculado por medio del torque aplicado a la muestra, con la siguiente ecuación:

$$\sigma = K\sigma M \quad (3-5)$$

Siendo σ el esfuerzo en Pa o Dyne/cm², $K\sigma$ la constante de esfuerzo que depende de la geometría y M el torque en nNm o gm*cm. Las ecuaciones para los parámetros reológicos de módulo y viscosidad son los siguientes:

$$(\text{Para módulo}) MxK\sigma/\theta xK\gamma = \sigma/\gamma = G \quad (3-6)$$

Siendo M y θ especificaciones del reómetro, $K\sigma$ y $K\gamma$ constantes geométricas, σ/γ la ecuación constitutiva y G el parámetro reológico del módulo. (Para viscosidad)

$$MxK\sigma/\Omega xK\gamma = \sigma/\gamma = \eta_b \quad (3-7)$$

Siendo M y Ω especificaciones del reómetro, $K\sigma$ y $K\gamma$ constantes geométricas, σ/γ la ecuación constitutiva y η_b el parámetro reológico para la viscosidad.



3.5.2.1 *El Parámetro de deformación Permanente: se relaciona con el ahuellamiento que pueda experimentar una carpeta asfáltica a causa de cargas de tráfico y temperaturas altas, este mecanismo de falla es más crítico en la edad temprana del pavimento. Dentro de la capa superficial es un fenómeno controlado por el esfuerzo, se infiere como un mecanismo de dislocación permanente del agregado después del cizallamiento del ligante entre los agregados y se acumula gradualmente con el tráfico (Rangel, 2003). El parámetro que se utiliza para el control de la deformación permanente es:*

$G^*/\text{Sen}\delta$

(3-8)

El concepto de este parámetro consiste en que un ligante asfáltico más rígido y más elástico será menos susceptible a la deformación permanente. Tiene su fundamento en el concepto de disipación de la energía, valores altos de $G^*/\text{Sen}\delta$ son característicos de una disminución en la energía disipada.

3.5.2.2 *Parámetro de control de Fatiga: se relaciona con las cargas cíclicas de tráfico, es más crítica en temperaturas intermedias del pavimento, suele ocurrir a largo plazo con el ligante asfáltico envejecido. Existen dos tipos principales de daños por fatiga: para pavimentos de capas finas sobre bases blandas, suele ocurrir debido al flexionamiento repetitivo de la capa, este es controlado por deformación, y para capas gruesas suele ocurrir por esfuerzos repetitivos al que se expone la capa, no se presenta mayor flexión de la capa, por lo tanto, es controlado por esfuerzo (Rangel, 2003). El parámetro que se utiliza para el control de fatiga es:*

$G^*\text{Sen}\delta$

(3-9)

El concepto de este parámetro consiste en que un ligante menos rígido y más elástico será más resistente a la fatiga, también tiene su fundamento en el concepto de disipación de energía. Para disminuir la energía disipada se necesitan $G^*\text{sin}\delta$ más bajos (Rangel, 2003), (Navarro, Partal, Martínez-Boza, & Gallegos, 2004).

3.5.2.3 *Evaluación por Deformaciones Permanentes (Ahuellamiento).* La resistencia de las mezclas asfálticas a deformaciones permanentes está relacionada con la rigidez del Asfalto, el volumen de la mezcla y la interacción entre la unión del Asfalto con el agregado. Uno de los mayores campos de interés en la reología, es identificar como el módulo complejo G^* del Asfalto, que es una variable dependiente del módulo viscoso, del módulo elástico y del ángulo de fase, varía en un rango de temperaturas de 20 °C (Petersen JC, 1994).

El ensayo se detiene cuando se alcanza un valor mínimo del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ y un valor máximo del parámetro $G^*\text{sen}(\delta)$. G^* es el Módulo complejo de corte y δ es el ángulo de fase.

- Betunes en estado original: $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1$ [KPa]
- Betunes envejecidos en RTFOT: $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 2,2$ [KPa]
- Betunes envejecidos en PAV: $G^*\text{sen}(\delta) \leq 5000$ [KPa]

3.5.3. Evaluación por Cargas Repetitivas (Fatiga)

El agrietamiento por fatiga es el mecanismo de falla más común en los pavimentos flexibles. Es casi imposible prevenir que un pavimento no se agriete después de un largo periodo de servicio. En el diseño de pavimentos, el nivel de servicio de los pavimentos está en términos de la resistencia al agrietamiento por fatiga, es por esto que se evalúa el bitumen y las mezclas por cargas cíclicas a temperaturas críticas (Botella, Pérez-Jimenez, & Miró, 2012.). Se ha comprobado que las propiedades de fatiga de la mezcla asfáltica están fuertemente relacionadas con la fatiga en el Asfalto, sin embargo, los agregados también juegan un papel importante (Acevedo, y otros, 2007)

El dispositivo más común para evaluar las propiedades reológicas del asfalto es el reómetro de corte dinámico DSR, este equipo ha sido utilizado para caracterizar el comportamiento a la fatiga, aplicando ensayos de deformación controlada y evaluando el número de ciclos hasta llegar a la falla, estos ensayos también se han realizado en condiciones de esfuerzos controlados (Bahia, Zhai, Bonnetti, & Kose, 1999). En la mayoría de los ensayos de fatiga con deformación controlada se sigue el mismo procedimiento: Un desplazamiento constante es aplicado y la deformación es calculada tomando en cuenta la forma geométrica de la muestra y el número de ciclos para determinar la falla. El criterio más común para determinar esta falla está basado en el valor del módulo viscoso calculado en cada ciclo del ensayo. En ocasiones se programa para que tome como referencia el módulo inicial y que pare en el momento que el valor del módulo es menor a cierto porcentaje del valor inicial (por lo general el 50%). Cada ensayo representa un punto en una gráfica log-log relacionando la amplitud de deformación Vs. el número de ciclos de falla. Se podría hacer una serie de fallas para tener los puntos suficientes y determinar la ley de fatiga del material. Esto se puede lograr aplicando la siguiente ecuación:

$$\epsilon = a \cdot N^{-b} \quad (3-10)$$

Siendo ϵ la deformación aplicada, N el número de ciclos para alcanzar la falla y los factores a y b los parámetros de ajuste. La desventaja de este procedimiento es que se tienen que realizar muchos ensayos a diferentes amplitudes de deformación, pero dado que el tiempo que requiere el reómetro DSR para realizar un solo ensayo es extenso, entonces se necesitan de largos periodos de tiempo para lograr obtener la ley de fatiga del material (Botella, Pérez-Jimenez, & Miró, 2012.). Es por esto que en esta investigación se realiza únicamente un barrido de frecuencias, relacionando el módulo complejo (G^*) vs la frecuencia. Actualmente, el laboratorio de investigación de la Universidad de Cataluña está desarrollando un nuevo procedimiento experimental para evaluar las propiedades de fatiga de los ligantes asfálticos, utilizando un ensayo cíclico tensión-compresión uniaxial, el ensayo es denominado EBADE o ensayo de barrido de deformaciones.

El reómetro de corte dinámico ha sido utilizado para caracterizar el comportamiento a fatiga de los ligantes asfálticos desde principios de los años 90 (Bahia, Zhai, Bonnetti, & Kose, 1999). Durante el desarrollo del programa estratégico de investigación de carreteras (SHRP) el módulo de corte dinámico de los ligantes asfálticos fue de mucho interés, debido a la tendencia que tienen los agregados de transmitirle fuerzas de corte al Asfalto, durante las cargas dinámicas del tráfico (Petersen JC, 1994).

Fue a raíz del proyecto NCHRP 9-10 de los protocolos de Superpave, para Asfaltos modificados que surgió el ensayo de barrido-tiempo, el cual consiste en aplicar una deformación constante de carácter cíclico hasta completar la falla en la muestra (Bahia, Zhai, Bonnetti, & Kose, 1999). Según algunas investigaciones este ensayo correlaciona mucho mejor la fatiga en mezclas que el parámetro $G^*\sin\delta$. El ensayo de barrido de amplitud lineal (LAS) ha sido descrito como un método acelerado para evaluar el comportamiento a fatiga. Este ensayo consiste básicamente en aplicar 100 ciclos de carga a 0.1% de deformación, para determinar las propiedades visco elásticas lineales no dañadas del Asfalto. Posteriormente cada nivel de carga consiste en 100 ciclos, con una tasa de ascendencia del 1%, aplicando una deformación del 1% por nivel, hasta llegar a los 20 niveles o 20% de deformación (Johnson, 2010). Una de las ventajas de hacer un barrido de frecuencia, es la respuesta del material al incremento de frecuencias (velocidad de deformación), la cual es monitoreada a una amplitud constante (esfuerzo o deformación) y temperatura contante.



Foto 5 Preparación muestras para el DSR



Foto 6 Equipos PAV y DSR

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del Aceite de Coco

Durante la primera semana de trabajo se realizó la medición de la densidad del aceite de Coco, este ensayo se realizó por medio del densímetro, en este se determinó que la densidad del Aceite era 0,987 kg/lit.

4.2. Caracterización del asfalto

Al cemento asfáltico CA 60-70, se le realizaron los ensayos que exige la especificación del Instituto Nacional de Vías INVIAS [25-26] para caracterizarlos, los resultados se presentan en la Tabla 1. Así, se observa que el asfalto cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas (Castro López, Rondón Quintana, & Barrero Calixto, 2015).

Ensayo	Método	Unidad	Recomendado INVIAS [25]	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60-70	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	Entre -1 y +1	-0,8
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1800
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>100	>105
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	-	50
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0,2	<0,2
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	232 mínimo	285
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máximo	0,65
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	% (de la penetración original)	48 mínimo	73

Tabla 1 Características generales del CA 60-70.

4.2.1. Caracterización Física

La caracterización física en esta investigación fue importante para determinar las propiedades térmicas y cambios en la consistencia de los asfaltos modificados con Aceite de Coco - CCO, respecto al asfalto convencional. Es importante mencionar que los métodos de ensayo utilizados en la caracterización física son de índole más empírica, que los utilizados en la caracterización química y reológica.

En la Tabla 2 se presentan los valores de Penetración de los asfaltos modificados sin envejecer, es destacable que los 4 contenidos de CCO, modifican la consistencia del bitumen, haciendo que el asfalto sea más blando que el Asfalto sin modificar. Por otro lado, la Tabla 3 muestran los Puntos de Ablandamiento de los asfaltos modificados, al igual que lo antes señalado, el CCO afecta la temperatura de ablandamiento, disminuyéndola

significativamente, haciendo que este por debajo de los 40°C, esto indica que todas las muestras de asfalto modificado están llegando a un estado de fluidez a temperaturas muy bajas, haciendo notable el efecto provocado por la modificación con los CCO en este ensayo (ver Ilustración 3).

Tabla 2 Penetración de los Materiales Asfálticos INV E 706 - 13

PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS INV E 706 - 13				
PORCENTAJE (%)	PENETRACION N°1 (mm)	PENETRACION N°2 (mm)	PENETRACION N°3 (mm)	PENETRACIÓN PROMEDIO (mm)
1%	87	85	84	85
2%	102	101	99	101
5%	120	123	121	121
10%	225	227	225	226

Tabla 3 Punto de Ablandamiento de Anillo y Bola INV E 712 - 13

PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ANILLO Y BOLA INV E 712 - 13			
PORCENTAJE (%)	PROBETA N°1 (°C)	PROBETA N°2(°C)	PROMEDIO
0%	51	49	50
1%	38,4	38,8	38,6
2%	36,5	37	36,75
5%	34,2	33,5	33,85
10%	30,5	31	30,75

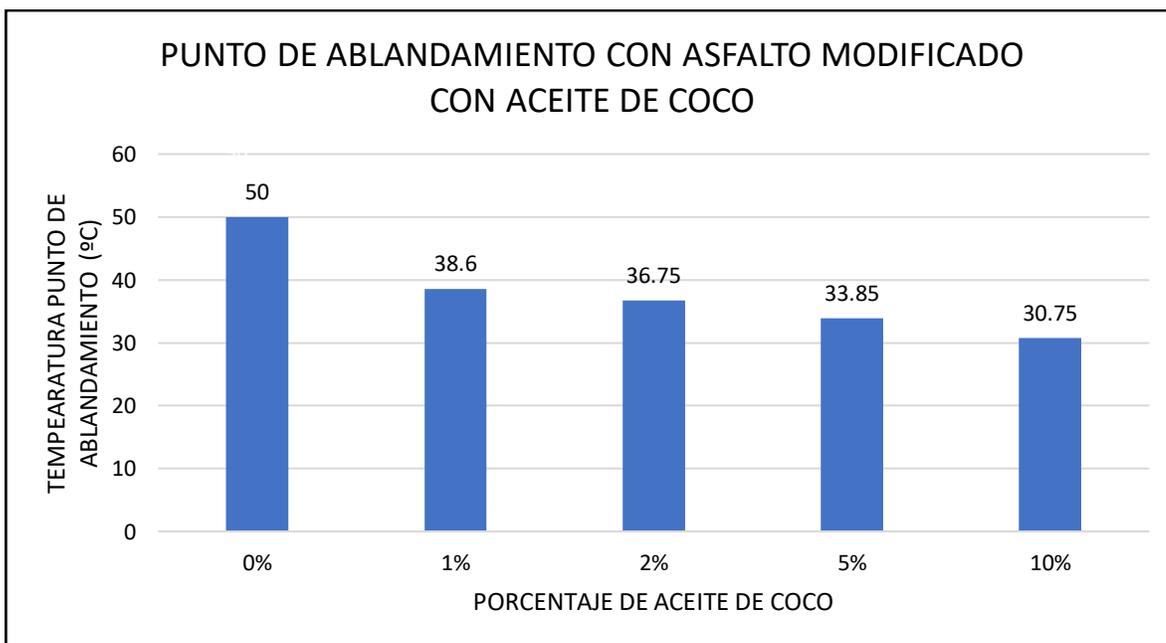


Ilustración 3 Punto de Ablandamiento del Asfalto Modificado con Aceite de Coco Sin Envejecer.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de Penetración y Punto de Ablandamiento se calculó el Índice de Penetración, tal y como se describe en la norma INV 724-07, los resultados de IP para los asfaltos modificados Sin Envejecer se pueden ver en la tabla 4.

Tabla 4 Índice de Penetración INV E 724 - 07

INDICE DE PENETRACIÓN INV E 724 - 07	
PORCENTAJE (%)	INDICE DE PENETRACIÓN (IP)
1%	-2,2
2%	-2,3
5%	-2,7
10%	-2,1

Lo valores obtenidos Penetración y Punto de Ablandamiento concuerdan con el Índice de Penetración calculado para los cuatro asfaltos modificados, dado que al ser el IP < -1, muestra el comportamiento viscoso, generado por la modificación hecha con Aceite de Coco – CCO, comportamiento que concuerda con el mayor punto de penetración.

Por otro lado, al revisar los valores de penetración del asfalto modificado con CCO, envejecido mediante RTFOT (ver Tabla 5) se ve como aumenta la rigidez o dureza con respecto al asfalto sin envejecer. En la Tabla 6 se ve el porcentaje (%) de rigidización del asfalto envejecido con respecto al asfalto sin envejecer.

Tabla 5 Penetración de los Materiales Asfálticos Envejecidos INV E 706 - 13

PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS CON CCO ENVEJECIDOS INV E 706 - 13				
Porcentaje (%)	PENETRACION N°1 (mm)	PENETRACION N°2 (mm)	PENETRACION N°3 (mm)	PENETRACIÓN PROMEDIO (mm)
1%	35	35	37	36
2%	45	45	42	44
5%	110	112	114	112
10%	158	160	159	159

Tabla 6 Rigidización de los Materiales Asfálticos Envejecidos INV E 706 - 13

% RIGIDIZACIÓN	
PORCENTAJE CCO (%)	% RIGIDIZACIÓN
1%	58%
2%	56%
5%	7%
10%	30%

la Tabla 7 muestran los Puntos de Ablandamiento de los asfaltos modificados envejecidos, al igual que lo antes señalado, el CCO afecta la temperatura de ablandamiento, disminuyéndola significativamente, haciendo que estén para las dosificaciones del 2%, 5% y 10% por debajo de 50°C (ver Ilustración 4).

Tabla 7 Punto de Ablandamiento de Anillo y Bola Asfaltos Envejecidos INV E 712 - 13

PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ANILLO Y BOLA ASFALTOS MODIFICADOS CON CCO ENVEJECIDOS INV E 712 - 13			
PORCENTAJE (%)	PROBETA N°1 (cm)	PROBETA N°2(cm)	PROMEDIO (cm)
1%	52,9	52,5	52,7
2%	47,6	47,2	47,4
5%	42,5	41,8	42,15
10%	38,6	38,6	38,6

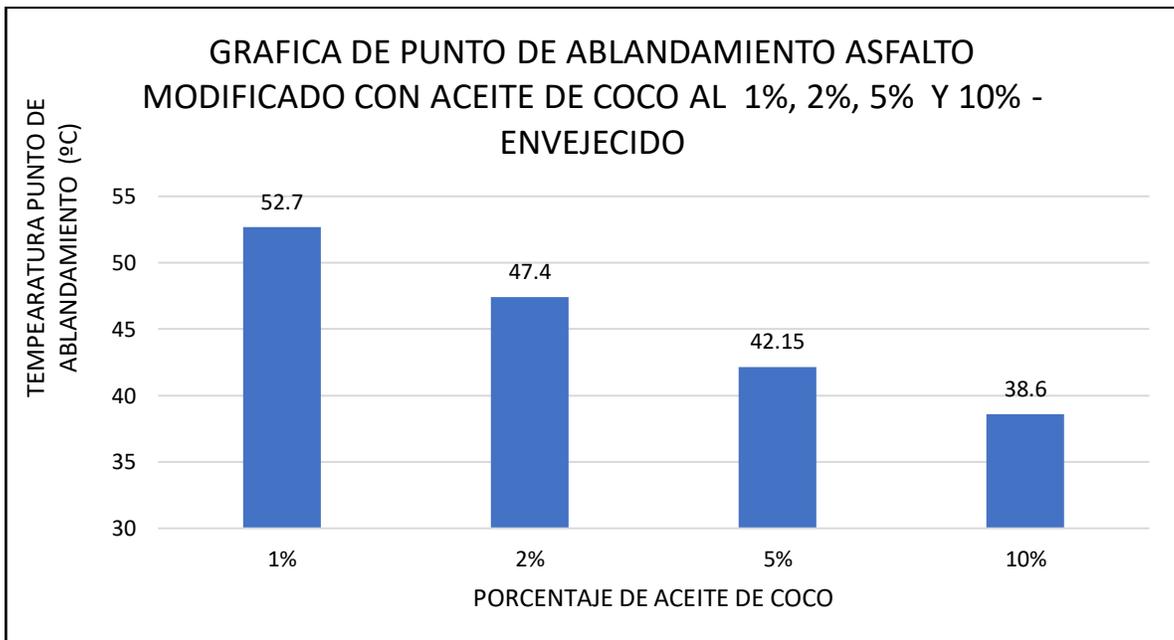


Ilustración 4 Punto de Ablandamiento del Asfalto Modificado con Aceite de Coco Sin Envejecer.

En la siguiente grafica (Ilustración 5) se toma como punto de comparación la Penetración del asfalto convencional 60 – 70 (Línea Naranja) y las penetraciones obtenidas de los asfaltos modificados sin envejecer. A partir de este se ve como se rigidizaron los asfaltos a causa del envejecimiento a corto plazo causado por el RTFOT, envejecimiento que permanece relativamente constante, excepto por el asfalto envejecido con un 5% de CCO, porcentaje en el cual la Penetración en ambas muestras es similar, comportamiento que se estudiara más a fondo en el presente documento.

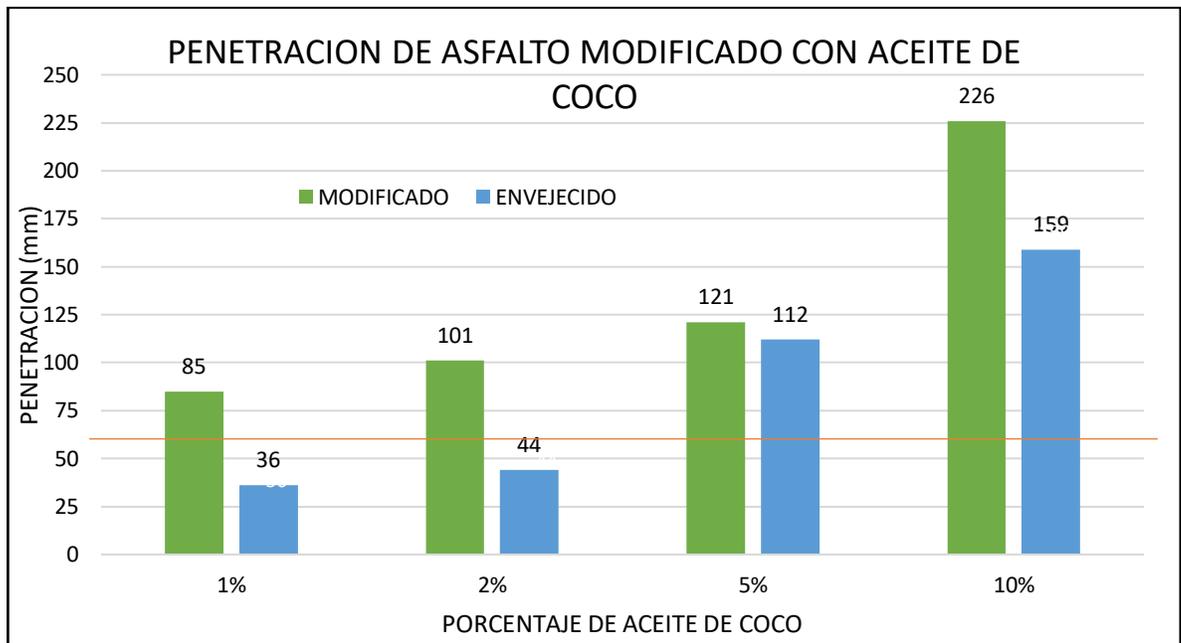


Ilustración 5 Penetración del Asfalto Modificado con Aceite de Coco Sin Envejecer y Envejecido.

En la Tabla 8, y en la Ilustración 6, se ve como el CCO afecta la rigidez del Cemento Asfáltico, es claro, como a medida que se adiciona mayor % de CCO, la rigidez disminuye, haciéndolo mucho más blando que el asfalto convencional.

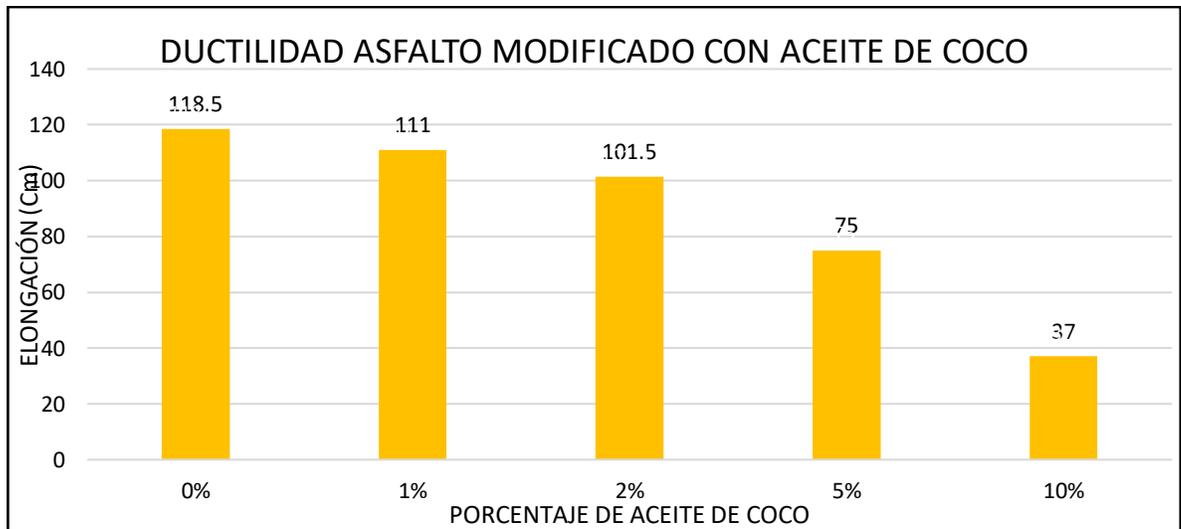


Ilustración 6 Penetración del Asfalto Modificado con Aceite de Coco Sin Envejecer y Envejecido.

Tabla 8 Ductilidad de Materiales Asfálticos Modificados con CCO Envejecidos INV E 702 - 13

DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS INV E 702 - 13			
Porcentaje (%)	PROBETA N°1 (cm)	PROBETA N°2(cm)	PROMEDIO
Convencional	117	120	118,5
1%	112	110	111
2%	100	103	101,5
5%	75	75	75
10%	36	38	37

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la pérdida de masa pos-envejecimiento artificial en el horno rotatorio de película delgada RTFO. El envejecimiento se realizó a una temperatura de 163 °C, temperatura a la cual el asfalto puede perder volátiles, sin embargo, se obtuvieron pérdidas menores al 1 % en todos los asfaltos, cantidad que no representa una pérdida de masa significativa. Sin embargo, como se ve en la Ilustración 6, a mayor porcentaje de Aceite de Coco - % CCO, la pérdida de masa disminuye aún más, haciendo que estas pérdidas de volátiles del Cemento Asfáltico sean poco considerables. Lo anterior, se puede deber a un aumento en las Ceras debido a la Modificación con CCO, se recomienda realizar una cromatografía SARA que permita identificar el comportamiento de los Contenidos de las fracciones de Saturados, Aromáticos y Resinas al ser adicionado Aceite de Coco al bitumen.

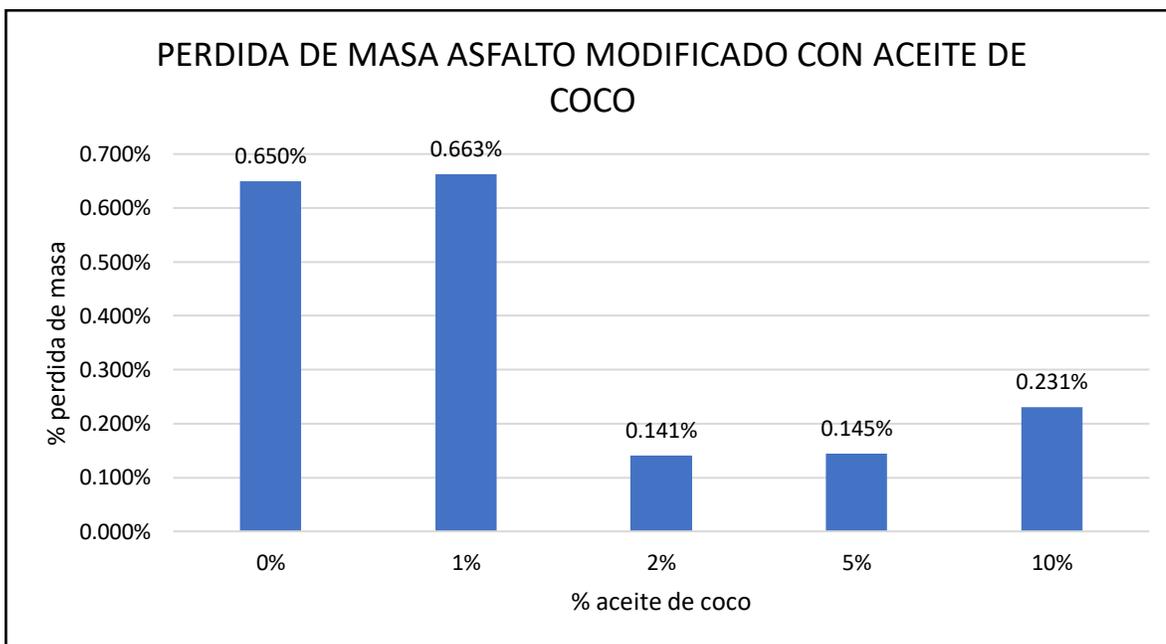


Ilustración 7 Pérdida de Masa - Asfalto Modificado con Aceite de Coco



Tabla 9 Ensayo en el Horno de Lamina Asfáltica Delgada en Movimiento INV E 720 - 13

ENSAYO EN EL HORNO ROTATORIO DE LAMINA ASFÁLTICA DELGADA INV E 720 - 13		
MODIFICADO	PERDIDA DE MASA(gr)	PERDIDA DE MASA(%)
Convencional	ASTM D-2872	0,650%
1% CCO	0,23	0,663%
2% CCO	0,05	0,141%
5% CCO	0,05	0,145%
10% CCO	0,08	0,231%

4.2.2. Caracterización Reológica

4.1.3.1. *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*. En la Ilustración 8 se presentan los resultados del ensayo MSCR donde se relaciona la deformación vs. Tiempo, en este caso se toman tiempos acumulados 1 segundo para la carga y 9 segundos para la recuperación en cada ciclo. Este ensayo es un parámetro que puede simular con mayor certeza la respuesta del material ante deformaciones permanentes en pavimentos ya que al pasar un vehículo queda un tiempo variable para que el material se recupere antes de que pase la siguiente carga por el mismo punto. El ensayo se realizó a una temperatura de 60°C, valor cercano al límite de la clasificación PG a temperaturas altas para los asfaltos modificados.

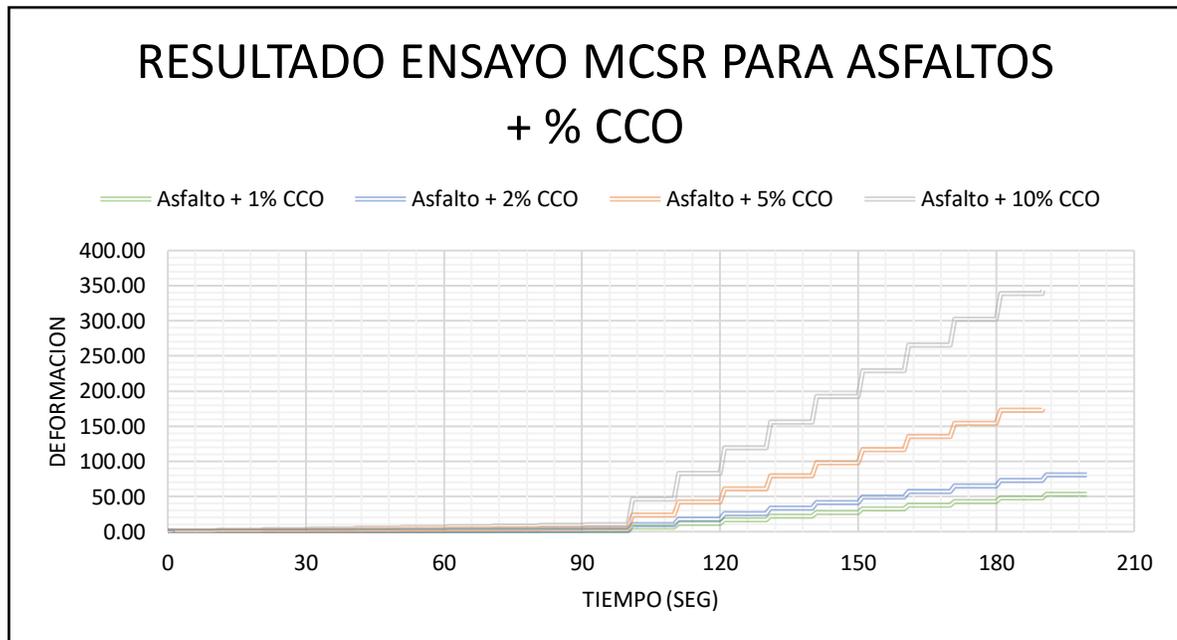


Ilustración 8 Resultados ensayo MCSR para los Asfaltos Modificados con Aceite de Coco

En la Ilustración 8 se observa que la deformación (a diferentes ciclos de carga) es mayor a medida que se aumenta el % de Aceite de Coco. Estos resultados son coherentes con los resultados mediante la caracterización física del asfalto. En este sentido, el asfalto que presentó una menor deformación fue el modificado con 1% de CCO, mostrando una excelente recuperación elástica ante aplicaciones de carga-descarga.

4.1.3.2. *Jnr*: Este parámetro es un valor que se determina en el asfalto envejecido por RTFO, el cual depende de la intensidad y velocidad del tráfico. En este sentido, el parámetro *Jnr* Es la deformación permanente resultante al aplicar una unidad de esfuerzo mediante el MSCR. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del MSCR, mostrando explícitamente las Deformaciones Total, Plástica y Elástica de los Asfaltos modificados, adicionalmente se muestra el % de recuperación de las muestras y el parámetro JNR.

Tabla 10 Resultados MSCR.

RESULTADOS MSCR					
% CCO	DEFORMACIÓN TOTAL	DEFORMACIÓN ELÁSTICA	DEFORMACIÓN PLÁSTICA	% DE RECUPERACION	JNR
1%	2,753	0,089	2,664	3,24%	26,64
2%	4,123	0,085	4,038	2,06%	40,38
3%	9,634	0,060	9,574	0,62%	95,74
10%	18,768	0,000	18,768	0,00%	187,68

En la Ilustración 9 se ve como a medida que aumenta el porcentaje (%) de CCO, el porcentaje (%) de recuperación del bitumen modificado disminuye, haciendo que las cargas generen deformaciones permanentes, es crítico, ver cómo con un 10% de Aceite de Coco el Bitumen no presenta recuperación ante las cargas. Adicionalmente, en la Ilustración 10, se ve como el Parámetro JNR aumenta a medida que se incrementa el % de CCO, lo cual se puede entender como a mayor es JNR, mayor será la deformación permanente en el asfalto.

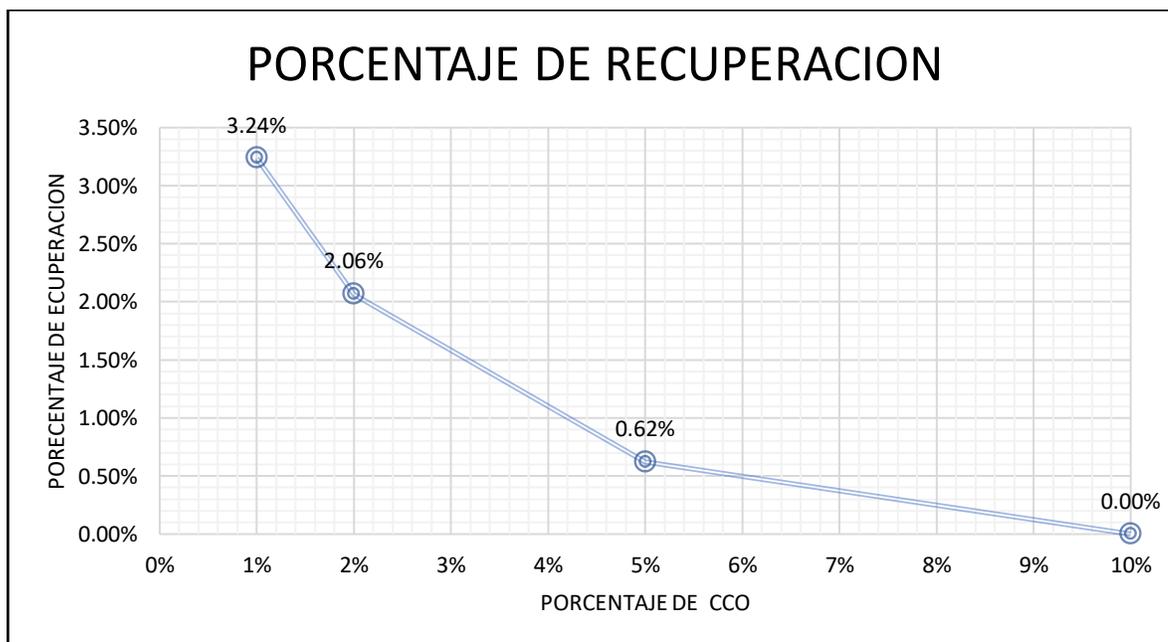


Ilustración 9 Porcentaje (%) de Recuperación de los Asfaltos Modificados con Aceite de Coco.

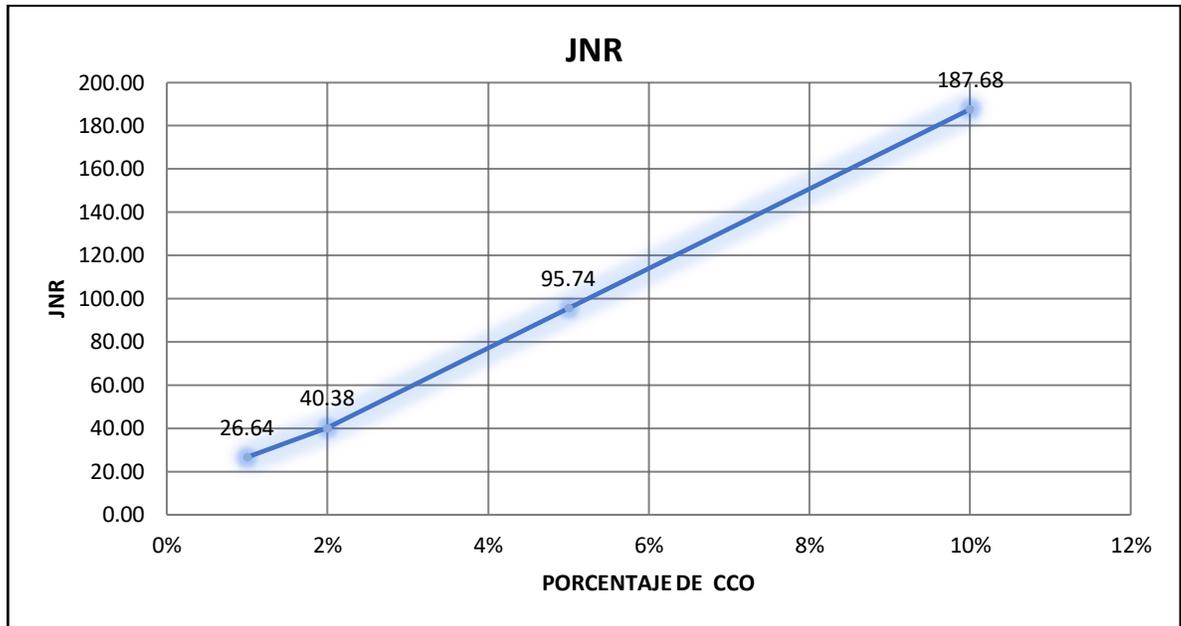


Ilustración 10 Parámetro JNR de los Asfaltos Modificados con Aceite de Coco.

4.1.3.3. Barrido de Frecuencias (Frequency Sweep)

En la Ilustración 11 se presentan los resultados del barrido de frecuencia de todos los asfaltos modificados con Aceite de Coco, se les realizó un envejecimiento artificial a presión (PAV). El proceso se realizó a 20 °C, a esta temperatura, el asfalto con un 1% de CCO fue el que demostró un mejor comportamiento ante una mayor cantidad de ciclos de carga.

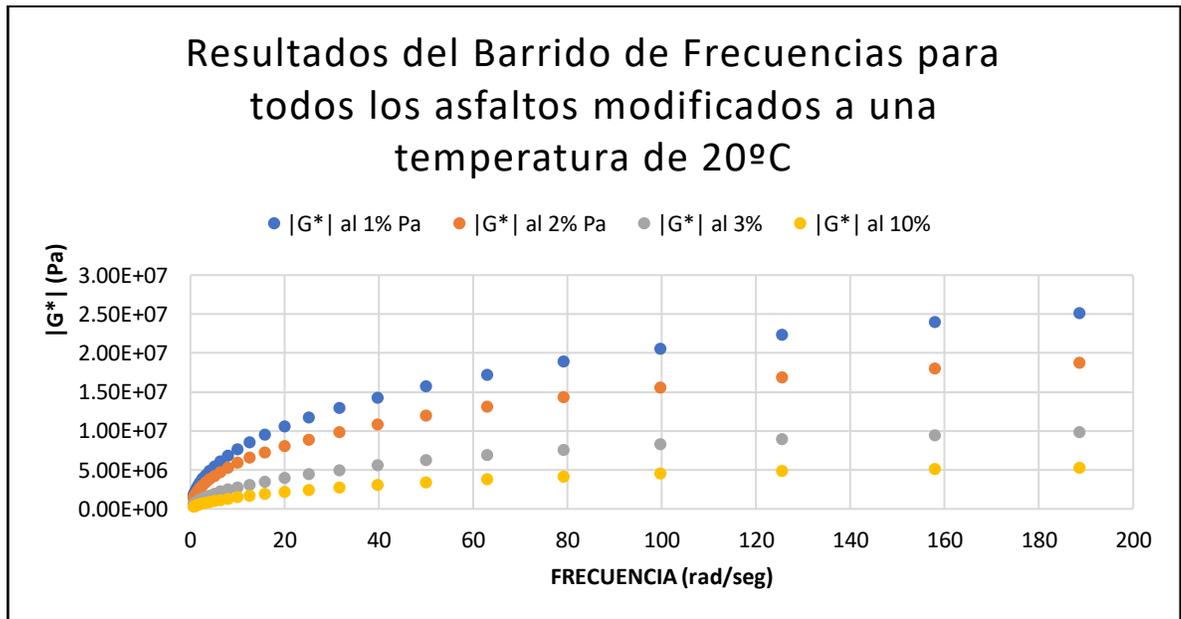


Ilustración 11 Resultados del Barrido de Frecuencias para todos los asfaltos a una temperatura de 15 oC.

4.1.3.4. *Clasificación de Grado de Desempeño (PG) a Temperaturas Altas:* A continuación, se presentan los resultados de la clasificación del grado de desempeño PG, se obtiene el parámetro de control para deformación permanente $|G^*|/\sin(\delta)$, con el fin para evaluar su comportamiento en cada temperatura.

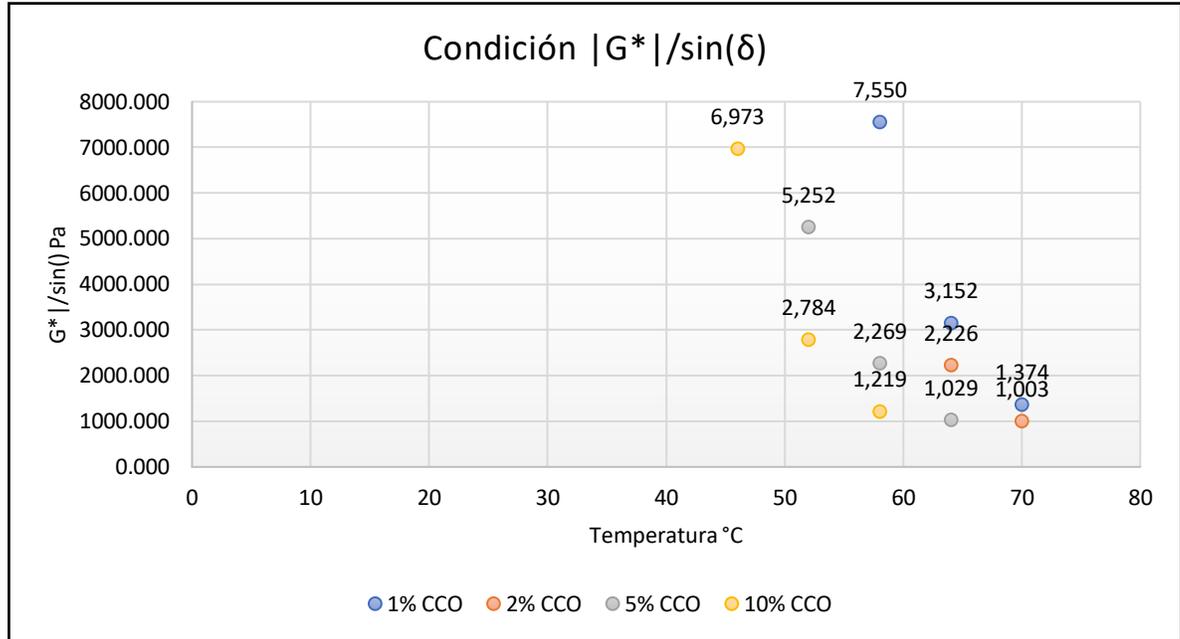


Ilustración 12 Clasificación PG de los Asfaltos + %CCO envejecidos, a temperaturas altas.

En la Ilustración 12 se observan los resultados de los Asfaltos Modificados con CCO, en condiciones envejecidas, se evidencia que para las tres temperaturas evaluadas (46°C, 52°C, 58°C, 64°C y 70 °C), el parámetro de control de ahuellamiento $|G^*|/\sin(\delta)$, que es dependiente del módulo complejo y del ángulo de fase, debe cumplir con la condición $|G^*|/\sin(\delta) > 2.2$ KPa, en este sentido, el asfalto modificado con un 10% de CCO cumple para una temperatura de 52°C, el modificado con 5% cumple en una temperatura del 58°C y por último, los asfaltos modificados con un 1% y 2% de CCO cumplen para una temperatura del 64°C. De esta forma se define el límite superior del grado de desempeño (PG) de los asfaltos estudiados.

En las Ilustraciones 13 y 14 se presentan los valores del módulo complejo y ángulo de fase de los asfaltos modificados con Aceite de Coco envejecidos, se puede observar que el módulo complejo G^* alcanza sus valores máximos en la menor temperatura sobre la cual se analizó el asfalto, demostrando que es inversamente proporcional a la temperatura.

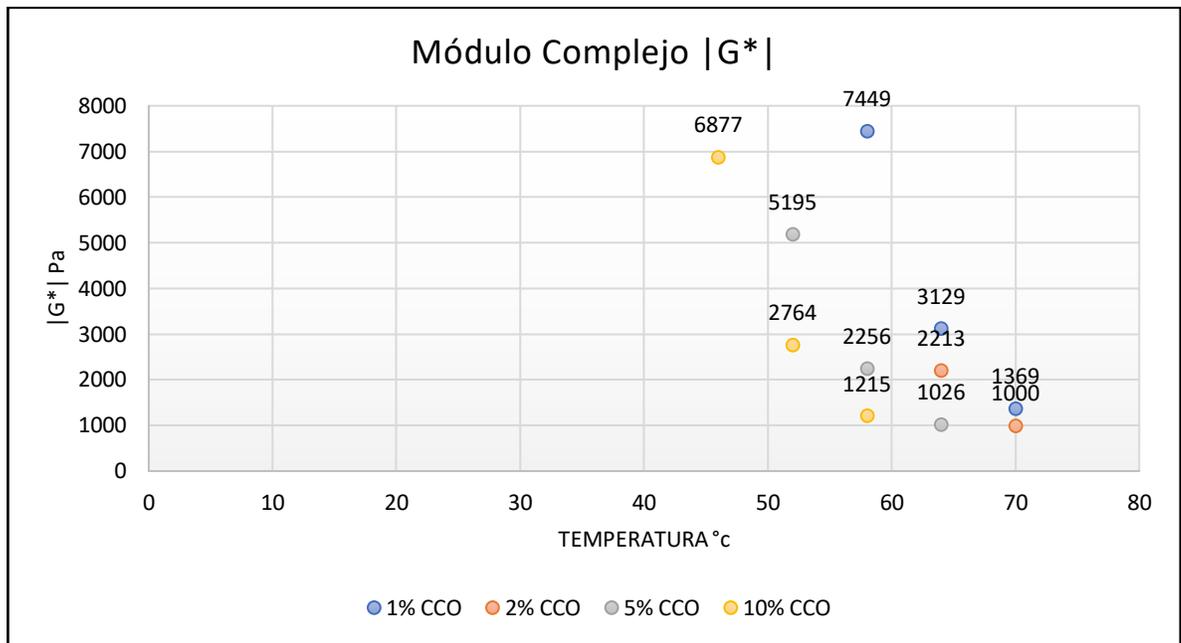


Ilustración 13 Valores del módulo complejo G^* de todos los Asfaltos + %CCO envejecidos.

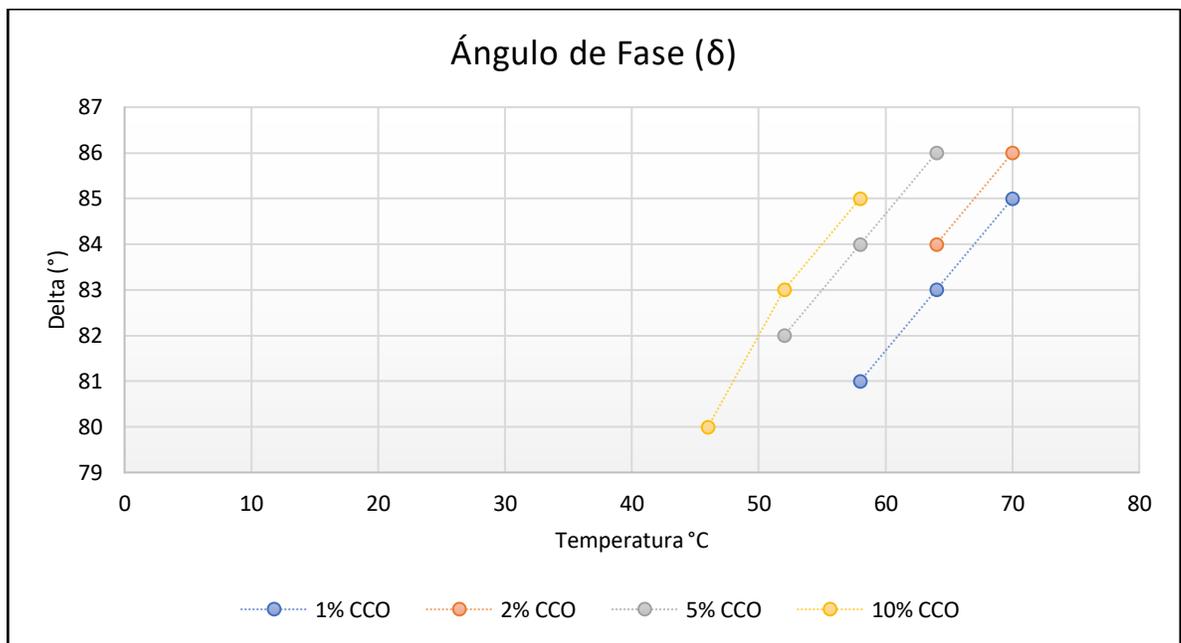


Ilustración 14 Valores del ángulo de fase δ para todos los Asfaltos envejecidos.

4.1.3.5. *Clasificación de Grado de Desempeño (PG) a Temperaturas Intermedias:* A continuación, presentan los resultados de la clasificación del grado de desempeño PG a temperaturas intermedias (menores a 25°C), del ensayo antes señalado se obtiene el parámetro de control de fatiga $|G^*| \sin(\delta)$, con el fin para evaluar su comportamiento en cada temperatura. En la Ilustración 15 se observan los resultados de los Asfaltos Modificados con CCO, en condiciones envejecidas, se evidencia que para las temperaturas evaluadas, el parámetro de control de ahuellamiento $|G^*| \sin(\delta)$, que es dependiente del

módulo complejo (G^*) y del ángulo de fase (δ), es evidente que a medida que aumenta el porcentaje (%) de Aceite de Coco – CCO el asfalto se comporta de manera más plástica, haciendo posible que existan deformaciones permanentes, es por esta razón que a se evaluaron a temperaturas menores a medida que aumenta el % CCO.

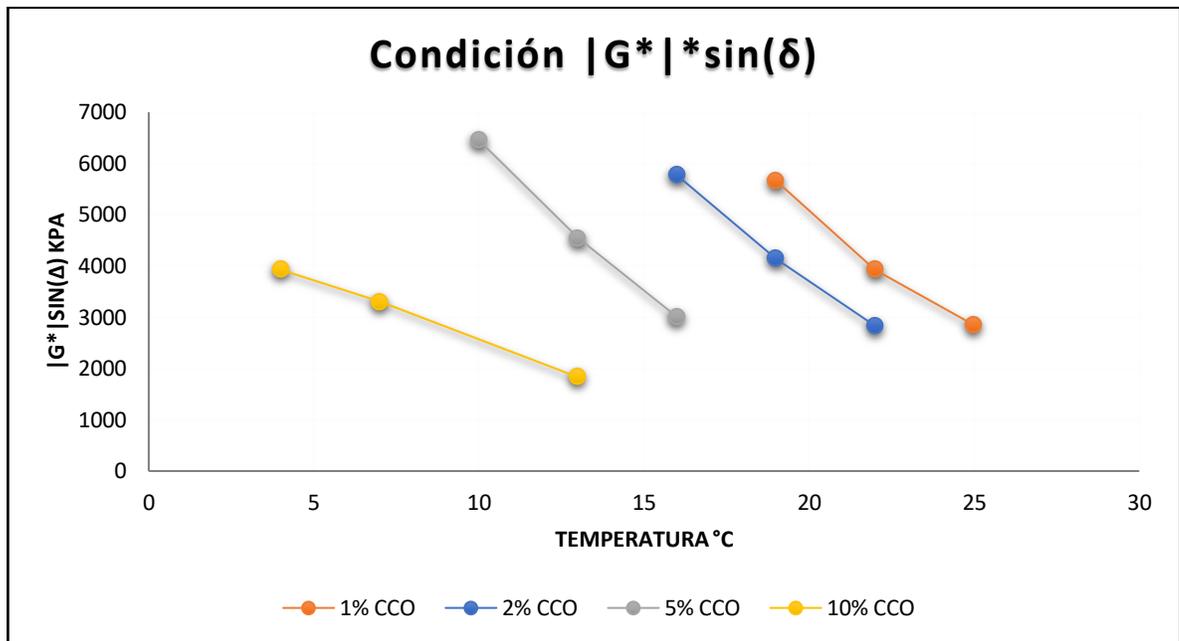


Ilustración 15 Clasificación PG de los Asfaltos + %CCO envejecidos, a temperaturas Intermedias.

Evaluando el parámetro de control de fatiga $|G^*| \sin(\delta)$, este debe cumplir la siguiente condición $|G^*| \sin(\delta) < 5000$ KPa. A partir de lo anterior, se observó que el asfalto modificado con 1% de CCO tendría un mejor comportamiento a los 22°C, el modificado con 2% de CCO tendría un mejor comportamiento a los 19°C, el modificado con 5% de CCO tendría un mejor comportamiento a los 13°C, y por último, el modificado con 10% de CCO tendría un mejor comportamiento a los 4°C.

En las Ilustraciones 16 y 17 se presentan los valores del módulo complejo y ángulo de fase de los asfaltos modificados con Aceite de Coco envejecidos, se puede observar que el módulo complejo G^* alcanza sus valores máximos en la menor temperatura sobre la cual se analizó el asfalto, adicionalmente, se puede apreciar que se buscó mantener constante el ángulo de fase (δ), para de esta forma poder analizar el comportamiento del parámetro del ahuellamiento.

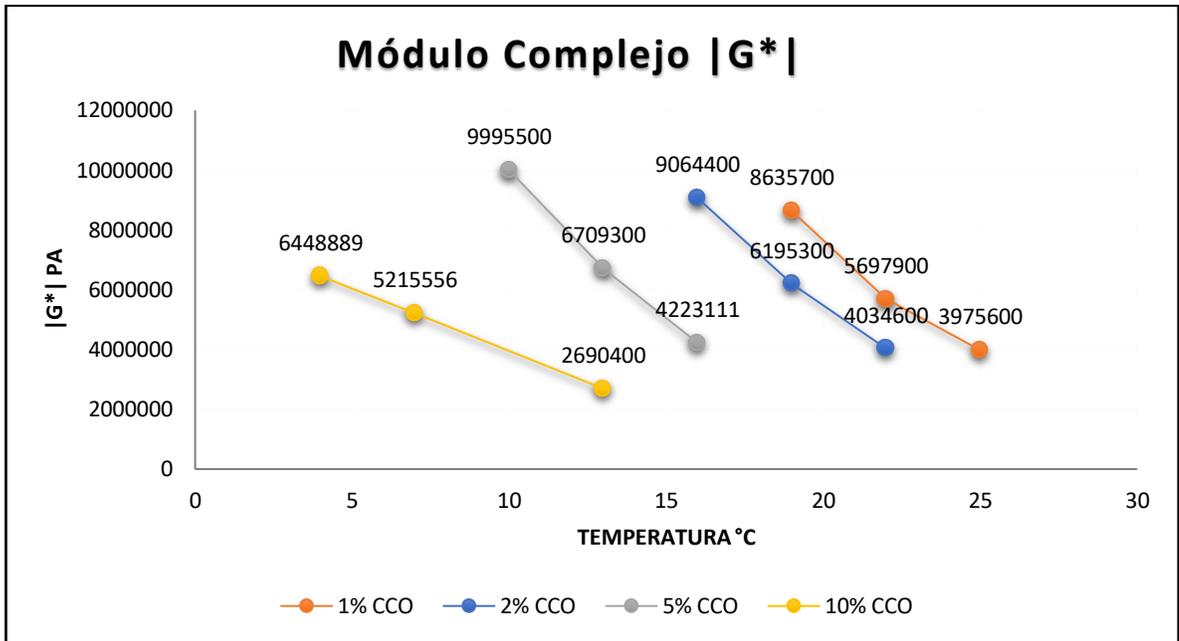


Ilustración 16 Valores del módulo complejo G^* de todos los Asfaltos + %CCO envejecidos.

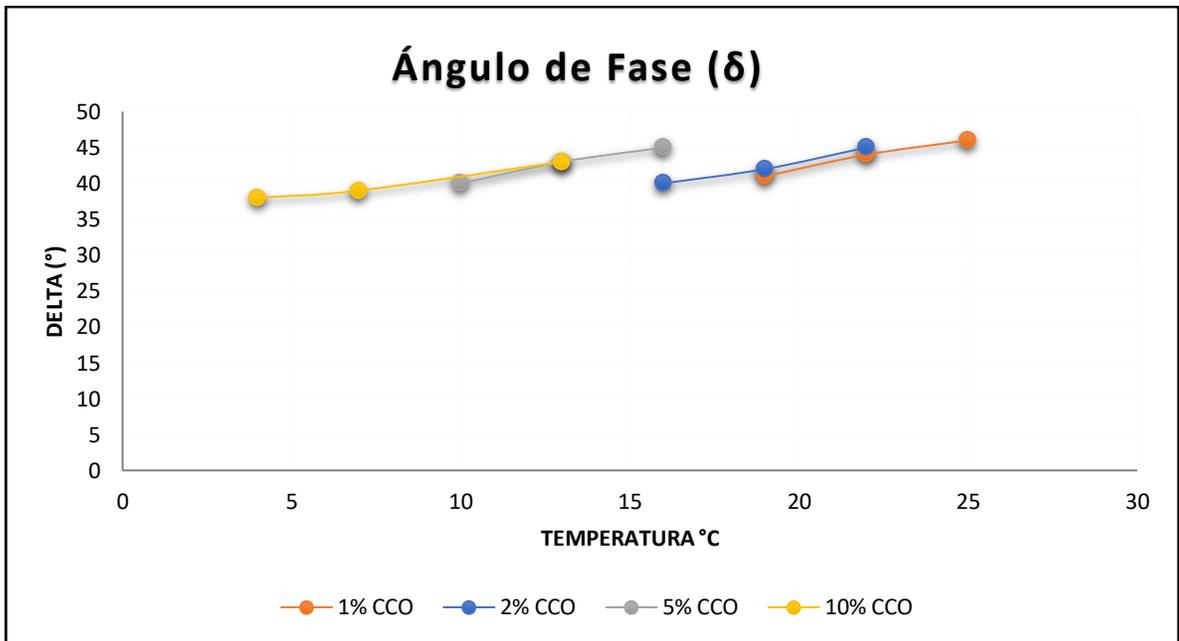


Ilustración 17 Valores del ángulo de fase δ para todos los Asfaltos sin envejecer.

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de la caracterización PG de los diferentes asfaltos modificados con Aceite de Coco, y se compara con el estudio realizado al asfalto convencional realizado por Rubio Haasler & Martínez Acosta en el año 2014, en el cual, caracterizaron el asfalto convencional con un PG 58-22.



Tabla 11 Caracterización PG.

CARACTERIZACIÓN PG.	
PORCENTAJE CCO (%)	GRADO PG
Convencional	58 - 22
1%	64 - 22
2%	64 - 19
5%	58 - 13
10%	52- 4

4.1.3.6. *Curvas Maestras.* Las curvas maestras fueron confeccionadas considerando el betún asfáltico en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario o (PAV). Los barridos de frecuencias fueron realizados para temperaturas desde los 10°C hasta los 40°C, en intervalos de 10°C. Por ende, abarcando tanto altas como bajas temperaturas promedio de Colombia. Se consideró un rango de frecuencias que no implicara un riesgo para el DSR y que permitiera obtener resultados sin que el equipo se viera expuesto a errores de medición. A continuación, se muestran las curvas maestras de los diferentes asfaltos modificados con CCO.

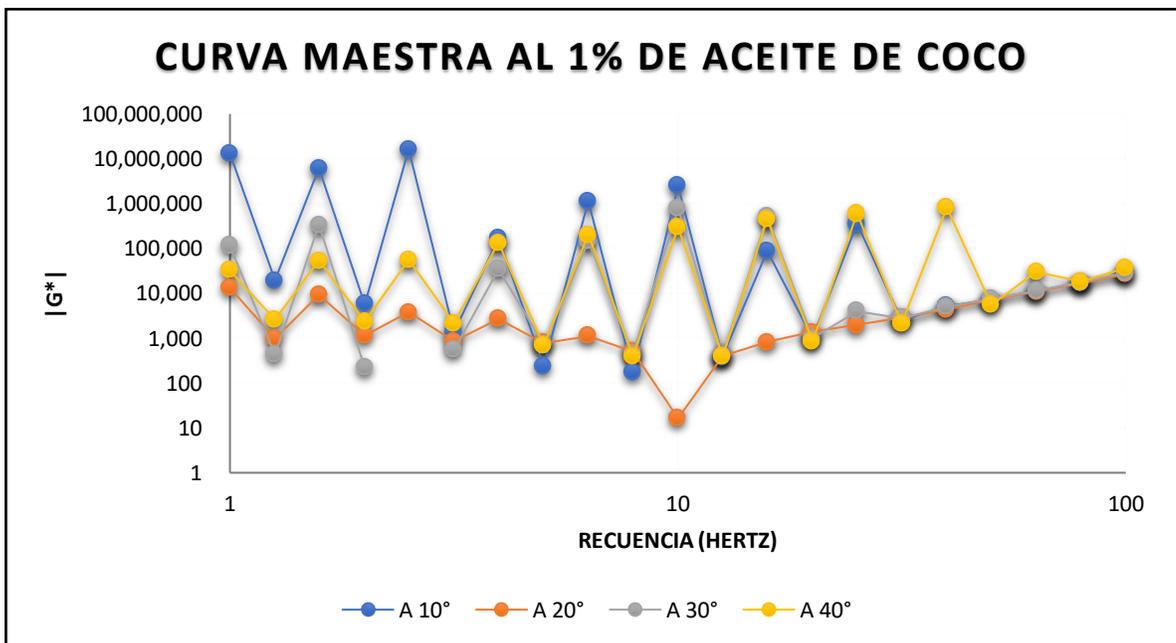


Ilustración 18 Curva Maestra del Asfalto Modificado con 1% de Aceite de Coco

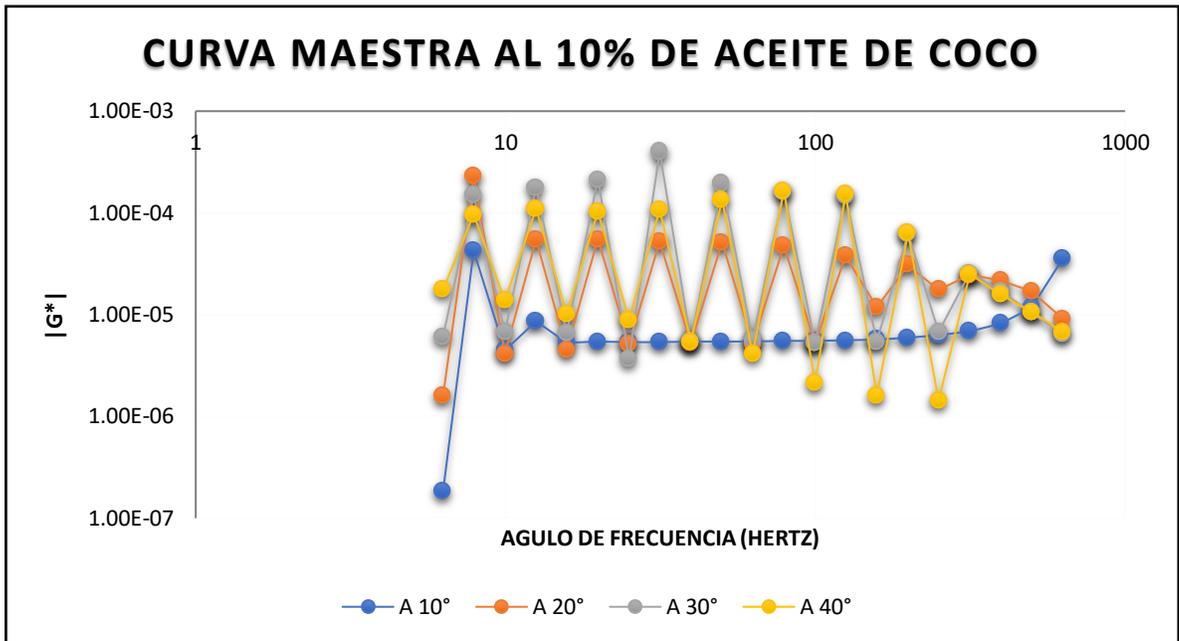


Ilustración 19 Curva Maestra del Asfalto Modificado con 2% de Aceite de Coco

Con relación a las Curvas Maestras obtenidas para los asfaltos modificados con el 1% v el 2% de Aceite de Coco (Ilustraciones 18 v 19), se destaca que los resultados fueron incongruentes, presentando mucho ruido y de este modo no generando Curvas que permitan entender el comportamiento del Bitumen.

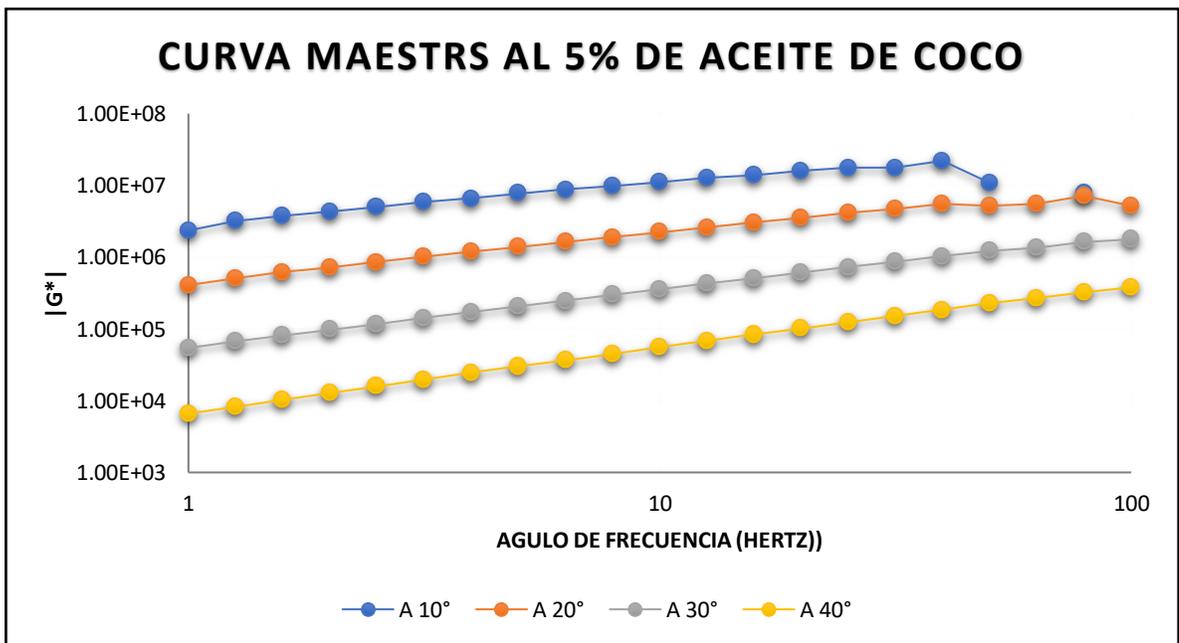


Ilustración 20 Curva Maestra del Asfalto Modificado con 5% de Aceite de Coco

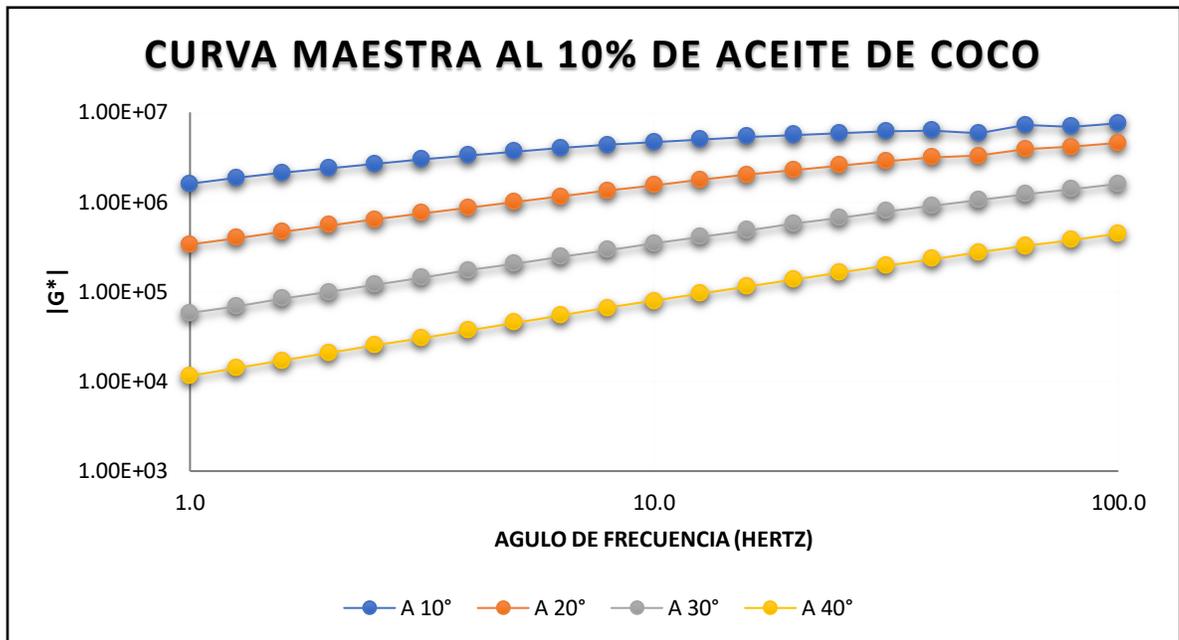


Ilustración 21 Curva Maestra del Asfalto Modificado con 10% de Aceite de Coco

Contrario a lo mostrado anteriormente, las ilustraciones 20 v 21 muestran los asfaltos modificados con el 5% v 10% de CCO, los cuales presentan un comportamiento similar entre sí, dichos asfaltos tienen un comportamiento similar, obteniéndose valores de G^* muy parecidos en todas las temperaturas analizadas.

El envejecimiento Causado por el RTFOT v el PAV, provoca un aumento en la rigidez de los betunes asfálticos, lo cual se aprecia en el aumento del módulo complejo de corte G^* .

4.3. Comparación características físicas y reológicas del asfalto convencional y los asfaltos modificados con aceite de coco.

Tabla 12 Comparación características físicas y reológicas asfaltos estudias Vs Asfalto original.

ENSAYO	TIPO DE ASFALTO	UND	RESULTADO
Ensayos sobre el Asfalto Original			
Penetración	Asfalto Convencional	0,1 mm	65
	Asfalto + 1% CCO		85
	Asfalto + 2% CCO		101
	Asfalto + 5% CCO		121
	Asfalto + 10% CCO		226
Índice de Penetración	Asfalto Convencional	-	-
	Asfalto + 1% CCO		-2,2
	Asfalto + 2% CCO		-2,3
	Asfalto + 5% CCO		-2,7
	Asfalto + 10% CCO		-2,1
Ductilidad	Asfalto Convencional	cm	118,5
	Asfalto + 1% CCO		111



ENSAYO	TIPO DE ASFALTO	UND	RESULTADO
	Asfalto + 2% CCO		101,5
	Asfalto + 5% CCO		75
	Asfalto + 10% CCO		37
Punto de Ablandamiento	Asfalto Convencional	°C	50
	Asfalto + 1% CCO		38,6
	Asfalto + 2% CCO		36,75
	Asfalto + 5% CCO		33,85
	Asfalto + 10% CCO		30,75
Ensayos sobre el Asfalto Envejecido			
Penetración	Asfalto + 1% CCO	0,1 mm	36
	Asfalto + 2% CCO		44
	Asfalto + 5% CCO		112
	Asfalto + 10% CCO		159
Punto de Ablandamiento	Asfalto + 1% CCO	°C	52,7
	Asfalto + 2% CCO		47,4
	Asfalto + 5% CCO		42,15
	Asfalto + 10% CCO		38,6
Pérdida de Masa	Asfalto Convencional		0,650%
	Asfalto + 1% CCO		0,663%
	Asfalto + 2% CCO		0,141%
	Asfalto + 5% CCO		0,145%
	Asfalto + 10% CCO		0,231%
Grado PG	Asfalto Convencional	-	58 - 22
	Asfalto + 1% CCO		52 - 22
	Asfalto + 2% CCO		58 - 19
	Asfalto + 5% CCO		64 - 13
	Asfalto + 10% CCO		64 - 4

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El principal efecto a simple vista causado con la modificación del bitumen asfáltico con Aceite de Coco, es un cambio en su viscosidad, haciendo un material más blando y susceptible a la temperatura.
- El comportamiento del módulo complejo de corte (G^*) tiene mayores variaciones a frecuencias bajas y tiende a mantenerse a frecuencias altas.
- El envejecimiento de los betunes provoca un aumento en la rigidez de los betunes asfálticos, lo cual se aprecia en el aumento del módulo complejo G^* .
- El ensayo MSCR permitió evidenciar que al momento de modificar el Bitumen con Aceite de Coco CCO, mejoraba la manejabilidad del Asfalto al hacerlo más Blando, pero aumentaban las deformaciones permanentes, razón por la cual la instalación de este material se recomienda en climas fríos.
- Se recomienda realizar un estudio de cromatografía SARA para analizar el posible aumento de las Ceras del Asfalto al ser Modificado con Aceite de Coco.
- Con relación a las Curvas Maestras obtenidas para los asfaltos modificados con el 1% y el 2% de Aceite de Coco (Ilustraciones 18 y 19), se destaca que los resultados fueron incongruentes, presentando mucho ruido y de este modo no generando Curvas que permitan entender el comportamiento del Bitumen.
- los asfaltos modificados con el 5% y 10% de CCO, presentan un comportamiento similar entre sí, dichos asfaltos tienen un comportamiento similar, obteniéndose valores de G^* muy parecidos en todas las temperaturas analizadas.
- El envejecimiento Causado por el RTFOT y el PAV, provoca un aumento en la rigidez de los betunes asfálticos, lo cual se aprecia en el aumento del módulo complejo de corte G



6. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, S., Castro, A., Negrin, J., Fernández, A., Escobar, G., & Piscitelli, V. (2007). Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: the rosary-typ structure. *Energy Fuels*, 2165–2175.
- Al-Mansob, R., Ismail, A., Algorafi, M., Hafezi, M. H., & Baghini, M. S. (2013). Comparison between Mixtures of Asphalt with Palm Oil Shells and Coconut Shells as Additives. *Jurnal Kejuruteraan*, 25-31.
- Asphalt Institute. (2001). *Superpave Mix Design*. Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Bahia, H., Zhai, H., Bonnetti, K., & Kose, S. (1999). Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. *Assoc Asphalt Paving Technol*, 1.
- Botella, R., Pérez-Jimenez, F., & Miró, R. (2012.). *Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders*; . Barcelona, Spain,.
- Cárdenas, D. C. (2017). *Evaluación de la resistencia mecánica de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con aceites lubricantes usados*. Manizales - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Castro López, W. A., Rondón Quintana, H. A., & Barrero Calixto, J. C. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista Ingeniería*, 7-18.
- Corbett, L. (1969). Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution–adsorption chromatography, and densimetric characterization. . *Analytical Chemistry (ACS Publications)*, 41(4):576–9.
- Corbett, L. W., & Merz, R. E. (1975). Asphalt Binder Hardening In The Michigan Test Road After 18 Years Of Service. *Transportation Research Board*, 27-34.
- DeDene, C. D. (2011). Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed. *Michigan Technological University*.
- Golalipour, A. (2013). *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical*. Madison: University of Wisconsin.
- Halstead, W. J., & Zenewitz, J. A. (1961). Changes in asphalt viscosities during thin-film oven and microfilm durability tests. *Public Roads*, 211-218.
- I.N.V.E–720, I. (2007). *Ensayo en el Horno de Lámina Asfáltica Delgada en Movimiento*. Bogota: INVIAS.
- I.N.V.E–751–07. (07). *Método de Envejecimiento Acelerado de Ligantes Asfálticos Utilizando Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV)*. Bogota: Manual del INVIAS.
- INVIAS. (2007). *I.N.V.E-750–07 Medición de Propiedades Reologicas de los Ligantes Asfálticos Mediante el Reómetro de Corte Dinámico*. Bogotá: INVIAS.
- Invias. (2013). Norma INV E-702-07 Ductilidad. En Invias, *Manual de pavimentos asfálticos*. (págs. 1-5). Colombia.
- Invias. (2013). Norma INV E-712-07 Punto de ablandamiento. En Invias, *Manual de pavimentos asfálticos* (págs. 1-7). Colombia.



- Invias. (2013). Norma INV E-712-07 Punto de inflamación. En Invias, *Manual de pavimentos asfálticos* (págs. 1-13). Colombia.
- Invias. (2013). Norma INV E-717-07 Viscosidad. En Invias, *Manual de pavimentos asfálticos*. (págs. 1-5). Colombia.
- Invias. (2013). Norma INV E-724-07 Índice de Penetración. En Invias, *Manual de pavimentos asfálticos* (págs. 1-2). Colombia.
- Invias. (2013). Norma INV E-751-07 Método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando cámara de envejecimiento a presión PAV. En Invias. Bogotá.
- Jeffry, S. N., Jaya, R. P., Manap, N., Miron, N. A., & Hassan, N. A. (2016). The Influence of Coconut Shell as Coarse Aggregates in Asphalt Mixture. *Key Engineering Materials*, 227-237.
- Lopera, H. (2011). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (Elaeis quineensis)*. Medellín - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Lu, X., & Isacson, U. (2002). Effect of aging on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, 15-22.
- Navarro, F., Partal, P., Martínez-Boza, F., & Gallegos, C. (2004). Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel*, 41-48.
- Petersen JC, R. R. (1994). Binder characterisation and evaluation, Test method. . En *SHRP-A-370*. . Washington, DC; : Strategic highways research program. Technical report, .
- Prada, O., Rondón, H., González, G., & Reyes, F. (2010). Comportamiento de dos mezclas asfálticas venezolanas en caliente, modificadas con desecho de policloruro de vinilo. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 119-124.
- Qian, Q., Schabron, J. F., Boysen, R. B., & Farrar, M. J. (2013.). Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging. *Fuel Vol 121*, Pages 86-94.
- Rangel, A. (2003). Evaluación del perfil de oxidación en asfaltos modificados. *XIV Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*. Popayan.
- Reyes Ortiz, O. (2011). Studying asphalt binder fatigue pattern by using a dynamic shear rheometer. *Ingeniería e Investigación*.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1996). *HOT MIX ASPHALT MATERIALS, MIXTURE DESIGN AND CONSTRUCTION*. Lanham, MD United States: National Academy of Sciences.
- Rubio Haasler, M. R., & Martínez Acosta, D. J. (2014). *Nanotubos de Carbono para el Mejoramiento de la Mezcla Asfáltica MDC-2 y del Asfalto Colombiano 60/70*. Bogotá: Tesis, Pontificia Universidad Javeriana.
- Shurvell, S. H. (2012). *Waste engine oil residue in asphalt cement*. Kingston-Canada: Queen's University.
- Sierra Hernández, C. A., & Mejía Umbarila, C. A. (2017). *Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio Universidad de Bogotá D.C.* Bogotá D.C.



- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación Vol. 30*, 27-44.
- Villanueva, A., Ho, S., & Zanzotto, L. (2008). Asphalt modification with used lubricating oil. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 148-157.
- Wen, H., Bhusal, S., & Wen, B. (2013). Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based, Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1432-1437.
- Woo, W., Prapaitrakul, N., Chowdhury, A., & Glover, C. (2008). Asphalt binder oxidative hardening in Minnesota and Texas pavements as a function of depth below the surface. *Transport Research Board*.
- Zoorob, S., Castro-Gomes, J., Pereira, L., & Connell, J. (2012). *Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test*. Pretoria, South Africa,.