

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO EN FORMA DE FIBRAS Y GRANOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.



Wendy Alejandra Perea Mejía
Ubeimar Danilo Jaramillo Panchalo

Trabajo de investigación

Director:
Ferne Quiñones Sinisterra
Doctor en Geotecnia

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Geotecnia
Línea de Investigación Pavimentos
Popayán, abril de 2019

Wendy Alejandra Perea Mejía
Ubeimar Danilo Jaramillo Panchalo

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO
EN FORMA DE FIBRAS Y GRANOS EN EL
COMPORTAMIENTO DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS
MODIFICADOS.

Trabajo de Investigación presentada a la facultad de ingeniería Civil de la Universidad del
Cauca para la obtención del título de Ingeniero Civil

Profesional en:
Ingeniería Civil

Director:
Ferney Quiñones Sinisterra
Doctor en Geotecnia

Popayán
Popayán, abril de 2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los Jurados han evaluado este documento, escuchando la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio, por lo cual autorizan a los egresados para que desarrollen las gestiones administrativas para optar al título de Ingeniera Civil.

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del director

Popayán, abril de 2019

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios porque es el que nos guía, nos da la fortaleza de seguir adelante, por habernos permitido realizar este sueño, superar las adversidades que se presentaron en el camino.

A nuestros padres Rubiela Mejía, Carlos Jesús Jaramillo y Celina Panchalo que siempre nos apoyaron principalmente en la parte moral y económica, que a pesar de las dificultades siempre nos acompañaron y confiaron en nosotros, a nuestros hermanos, hermanas, familiares y amigos en general por el apoyo que siempre brindaron día a día en el transcurso de nuestra carrera.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de trabajo de grado, el ingeniero Ferney Quiñones Sinisterra por ser uno de nuestros orientadores, por la paciencia y la dedicación con que nos acompañó a lo largo de la investigación. También por su confianza y el respaldo que depositó en nosotros para así lograr el título de ingeniero civil.

Al ingeniero Héctor Eduardo Adrada por contribuir con la adquisición de los materiales vitales para la realización del proyecto y la obtención de los resultados en la actividad realizada.

Al ingeniero Eugenio Chavarro, jefe de departamento por permitirnos el acceso a las instalaciones del laboratorio de materiales y facilitarnos la utilización de los equipos necesarios para la elaboración de nuestra labor.

Al geo-tecnólogo Camilo Sotelo por su acompañamiento en el proceso investigativo, por el gran aporte que nos proporcionó mediante sus conocimientos en la elaboración de ensayos y el respaldo constante en el proyecto.

A nuestros padres por ofrecernos nuestro sustento y ser nuestro respaldo moral, por darnos su cariño incondicional y hacer de nuestro camino más ameno con sus consejos y enseñanzas.

A nuestros hermanos por ser nuestros acompañantes incondicionales con su protección y cariño en este arduo y largo camino académico, que constituye uno de nuestros mayores logros y anhelos que hoy observa con agrado su materialización.

A nuestros amigos por apoyarnos cuando más lo necesitábamos, por extender su mano y proporcionarnos su ayuda sin importar las circunstancias, por su aprecio, amistad solidaridad para con nosotros.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a Dios por bendecirnos con el don de la vida, por ser nuestra guía durante este largo recorrido universitario, por abrigarnos bajo sus brazos y concedernos su cobijo y amparo en los diversos momentos de adversidad e incertidumbre y por último por ubicar a excelentes personas en nuestra vida que contribuyeron con nuestra formación, apoyándonos con su conocimiento, su dinero, compañía y comprensión, estando siempre presentes.

RESUMEN

La problemática ambiental producida por la cantidad de neumáticos fuera de servicio, que se genera a nivel mundial y su difícil disposición final, ha causado que el consumo de caucho de llantas recicladas se convierta en una práctica común en la construcción de carreteras y produzcan mejoras en el desempeño de la carpeta asfáltica.

Esta investigación, tiene como objetivo principal evaluar la influencia de la adición de caucho reciclado en forma de fibras y granos en el comportamiento de los ligantes asfálticos modificados; para esto, se ensayaron seis tipos de muestras con las siguientes características: asfalto 60-70 convencional, que fue el asfalto que se escogió por su uso común en la región; asfalto-caucho Tipo 1 (comercial), producido en planta con adición de caucho en forma de granos pasante del tamiz N° 30, con un porcentaje de caucho del 15 % y 4 mezclas de asfalto-caucho realizadas en laboratorio con un 16.7 % de adición caucho de llanta para cada una, que consisten en: mezcla 1 (asfalto 60-70 + tiras largas de caucho, entre 5 y 15 mm), mezcla 2 (Asfalto 60-70+ tiras cortas de caucho, menores de 5 mm, pasante del tamiz N°. 16 y retenido tamiz # 50); mezcla 3 (Asfalto 60-70 + tiras cortas de caucho menores de 5 mm, pasante del tamiz #30); y mezcla 4 (Asfalto 60-70 + granos de caucho pasa tamiz # 30), estas dos últimas presentan la misma gradación. Las mezclas se hicieron por vía húmeda a 280 rpm y a una temperatura entre 160-180 °C.

Al caucho adicionado a la mezcla se le realizaron ensayos físicos para cumplir con lo especificado en las normas del Instituto Nacional de Vías, a las muestras de ligante asfáltico se les realizaron ensayos de caracterización física y reológica consistentes en: peso específico, penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, ductilidad, recuperación elástica y la determinación de las propiedades reológicas mediante el reómetro de corte dinámico.

Los resultados de los ensayos mostraron que la adición de caucho al asfalto aumenta la consistencia del ligante, disminuye la susceptibilidad térmica y proporciona una mejor reacción elástica cuando este es sometido a esfuerzos, lo que puede representar una disminución en las deformaciones permanentes de la carpeta asfáltica, siendo la mezcla con adición de tiras cortas la que presenta un mejor comportamiento elástico al compararla con el resto de las muestras. Lo que evidencia que la forma del caucho de adición incide en el comportamiento del ligante asfáltico modificado.

ABSTRACT

The environmental problems caused by the amount of tires out of service, generated worldwide and their complexity for final disposal, have caused the use of recycled tire rubber to become a common practice in road construction and produce improvements in the performance of asphalt pavements.

The main objective of this research is to evaluate the influence of the addition of recycled rubber in the form of fibers and grains on the behavior of modified asphalt binders; for this purpose, six types of samples were tested with the following characteristics: conventional asphalt 60-70, which was the asphalt chosen for its common use in the region; asphalt-rubber Type 1 (commercial), produced in plant with addition of rubber in the form of grains passing through sieve No 30, with a percentage of rubber of 15% and 4 asphalt-rubber mixtures performed in the laboratory with 16.7 % addition of tire rubber for each one, consisting of: mixture 1 (asphalt 60-70 + long strips of rubber, between 5 and 15 mm), mixture 2 (Asphalt 60-70 + short strips of rubber, less than 5 mm, sieve pass No. 1, asphalt 60-70 + long strips of rubber, between 5 and 15 mm), mixture 2 (Asphalt 60-70+ short strips of rubber, less than 5 mm, sieve pass No. 1, asphalt 60-70 + long strips of rubber, between 5 and 15 mm), mixture 2 (Asphalt 60-70+ short strips of rubber, less than 5 mm, sieve pass No. 1, asphalt 60-70 + long strips of rubber, between 5 and 15 mm). 16 and retained sieve # 50); mixture 3 (Asphalt 60-70 + short strips of rubber smaller than 5 mm, through sieve #30); and mixture 4 (Asphalt 60-70 + grains of rubber pass sieve # 30), these last two possessed the same gradation. The mixtures were made by wet process at 280 rpm and a temperature of 160-180 °C.

The rubber added to the mixture was subjected to physical tests to comply with the specifications of the Colombian National Institution of Roads, "INVIAS". The samples of asphalt binder were subjected to physical and rheological characterization tests consisting of:

specific weight, penetration, softening point, Penetration Index, ductility, elastic recovery and the determination of rheological properties using the Dynamic Shear Rheometer (DSR).

The results of the tests showed that the addition of rubber to the asphalt increases the consistency of the binder, decreases the thermal susceptibility and provides a better elastic reaction when this one is loaded,, which could represent a reduction in the permanent deformations of the asphalt pavement, being the mixture with addition of short strips the one that presents a better elasticity behavior when compared with the rest of the samples; this shows that the shape of the addition rubber affects the behavior of the modified asphalt. binder

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Origen y Naturaleza del Asfalto.....	4
3.2 Asfalto.....	5
3.3 Propiedades Químicas del Asfalto	6
3.4 Propiedades físicas del asfalto.....	7
3.5 Reología del Asfalto.....	10
3.6 Reciclaje de llantas usadas.....	12
3.7 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	15
3.8 Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado	16
3.8.1 Proceso Ambiental	16
3.8.2 Proceso criogénico	17
3.8.3 Molienda Húmeda.....	18
3.9 Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas.....	18
3.9.1 Vía Húmeda	18
3.9.2 Proceso McDonald.....	19
3.9.3 Tecnología Continua.....	19
3.9.4 Tecnología Terminal.....	20
3.9.5 Vía Seca	20
3.10 Porcentaje de caucho óptimo de mezcla	21
4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	22
5 MATERIALES Y ENSAYOS.....	24
5.1 Clases de cauchos que se van a usar para la mezcla	24
5.2 Humedad del caucho de llanta reciclado.....	25
5.3 Gravedad específica del caucho de llanta reciclado.....	26
5.4 Contenido de metales no ferrosos	27
5.5 Contenido de metales ferrosos	27

5.6	Gradación del caucho	27
5.7	Realización de mezclas asfalto-caucho	32
5.8	Caracterización del bitumen.....	36
5.8.1	Densidad de los materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro).....	36
5.8.2	Penetración de los materiales bituminosos	38
5.8.3	Punto de Ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).....	39
5.8.4	Índice de penetración de los cementos asfálticos	40
5.8.5	Ductilidad de los materiales asfálticos.....	41
5.8.6	Método de ensayo para medir la Recuperación Elástica de materiales asfálticos utilizando el ductilómetro	43
5.8.7	Medición de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR, <i>Dynamic Shear Rheometer</i>).....	44
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
6.1	Caracterización del asfalto 60-70 y asfaltos modificados con caucho de llanta reciclado.....	50
6.1.1	Caracterización física y reológica.....	50
6.1.2	Resultados caracterización reológica.....	54
6.1.3	Análisis ensayo de penetración	57
6.1.4	Análisis del Punto de Ablandamiento.....	58
6.1.5	Análisis del Índice de Penetración.....	60
6.1.6	Análisis del ensayo de ductilidad.....	61
6.1.7	Análisis del ensayo de recuperación elástica	62
6.1.8	Análisis de la caracterización reológica.....	64
6.1.9	Análisis del parámetro $G^*/\sin(\delta)$	65
7	CONCLUSIONES	69
8	RECOMENDACIONES.....	72
9	BIBLIOGRAFÍA	73
10	ANEXO.....	76
10.1	Manual de manejo del reómetro de corte dinámico.....	76

Lista de tablas

Tabla 1. Características del caucho de llanta reciclado recomendadas	24
Tabla 2. Resultados del ensayo de humedad	26
Tabla 3. Distribución de los tamaños del caucho	28
Tabla 4. Gradación del caucho para la Mezcla 1 (Tipo A).....	28
Tabla 5. Gradación del caucho para la Mezcla 2 (Tipo B)	30
Tabla 6. Gradación de las Mezclas 3 y 4 (Tipo B)	32
Tabla 7. Masa de caucho retenida en cada tamiz para cada mezcla	34
Tabla 8. Ensayos de caracterización de asfaltos	36
Tabla 9. Resultados de los ensayos de caracterización asfalto 60-70 y asfalto tipo 1 (comercial producido en planta)	51
Tabla 10. Resultados de los ensayos de caracterización de las Mezclas 1, 2, 3 y 4	53
Tabla 11. Módulo de Corte Complejo (G^*) a frecuencia de 10 rad/s.....	55
Tabla 12. Módulo de Corte Complejo (G^*) a frecuencia de 0.6 rad/s.....	55
Tabla 13. Resultados Ángulo de Fase (δ) para una frecuencia de 10 rad /s	55
Tabla 14. Resultados Ángulo de Fase (δ) para una frecuencia de 0.6 rad /s	56
Tabla 15. Relación $G^*/\text{sen}(\delta)$ para una frecuencia de 10 rad /s	56
Tabla 16. Relación $G^*/\text{sen}(\delta)$ para una frecuencia de 10 rad /s	56

Lista de figuras

Figura 1. Representación Gráfica del Módulo de Corte Dinámico y el Ángulo de Fase (Asphalt Institute, The asphalt binder handbook, 2011), pág. 68).....	11
Figura 2. Esquema de deformaciones en el tiempo en un proceso de carga y descarga (Morea, 2011).	12
Figura 3. Tipos de Caucho que se usaron para las mezclas. A) Grano de Caucho Reciclado o GCR, B) Tiras de Caucho Reciclado	25
Figura 4. Horno usado para secar el caucho	26
Figura 5. Frascos de Le Chatelier antes y después de la inmersión del caucho (Densidad del Caucho).....	27
Figura 6. Curva granulométrica del caucho para la Mezcla 1; Error! Marcador no definido.	
Figura 7. Caucho usado en la Mezcla 1 (tiras largas, entre 5mm y 15mm).....	29
Figura 8. Curva granulométrica del caucho para la Mezcla 2	30
Figura 9. Caucho usado en la Mezcla 2 (tiras menores de 5 mm).....	30
Figura 10. Caucho usado en la Mezcla 3 (tiras menores de 5 mm, pasantes del tamiz No. 30)	31
Figura 11. Caucho usado para la Mezcla 4 (GCR pasante del tamiz N°. 30).....	31
Figura 12. Curva granulométrica Mezclas 3 y 4.....	32
Figura 13. Proceso de adición y mezcla del caucho de al asfalto.	35
Figura 14. Picnómetros antes y después de ser llenados con asfalto	37
Figura 15. Penetrómetro usado en los ensayos de penetración.....	39
Figura 16. Equipo para determinar el Punto de Ablandamiento en asfaltos (Anillo y Bola.). A) Anillos con asfalto sin enrasar, B) Montaje del equipo y realización del ensayo	40
Figura 17. Ductilómetro.....	42

Figura 18. Reómetro de Corte Dinámico	44
Figura 19. Muestra de asfalto-caucho para ensayo en el reómetro	45
Figura 20. Platos de 25 mm ubicados en el reómetro	45
Figura 21. Configuración de la muestra de asfalto	46
Figura 22. Funcionamiento DSR	47
Figura 23. Comportamiento Elástico y Viscoso	48
Figura 24. Comportamiento Viscoelástica.....	49
Figura 25. Resultados ensayo de penetración	57
Figura 26. Resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento	59
Figura 27. Resultados Índice de penetración	60
Figura 28. Resultado ensayo de ductilidad}	62
Figura 29. Resultados Recuperación Elástica.....	63
Figura 30. Línea de tendencia del Módulo de Corte Complejo G^* vs Temperatura a una frecuencia de carga de 10 rad/s.....	64
Figura 31. Modelación gráfica del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ vs Temperatura bajo una frecuencia de carga de 10 rad/s.....	66
Figura 32. Modelación gráfica del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ vs Temperatura bajo una frecuencia de carga de 0.6 rad/s.....	66

1 INTRODUCCIÓN

El asfalto es un material fundamental en los procesos de pavimentación en el país, comprender sus características son necesarias para garantizar un buen desempeño en su vida útil a corto y a largo plazo. Con la adición de polímeros u otros aditivos se busca mejorar las propiedades del ligante asfáltico para lograr un mejor desempeño y brindar un mejor servicio de la carpeta asfáltica.

A pesar que las llantas usadas no son catalogadas como un residuo peligroso, su lenta descomposición y el volumen que ocupan, hacen que se conviertan en un problema ambiental, para el cual en el país no se han generado los suficientes mecanismos para lograr una completa solución al problema. La reutilización en el área de la construcción, por ejemplo, en parques de juegos, pisos sintéticos, carreteras, entre otros se ha convertido en una buena solución para este problema.

Se ha demostrado que la adición de caucho de llanta reciclada al asfalto, aporta beneficios en el desempeño de la carpeta asfáltica y aunque en los últimos años en el país se han generado normativas que motivan a la utilización del asfalto-caucho en la construcción de carreteras, sin embargo aún no se alcanza la total reutilización de llantas para que se pueda dar una completa solución al problema ambiental que generan, pues una parte de estas terminan en depósitos o son incineradas a cielo abierto. Esto puede deberse a la escasez de especificaciones que controlan el manejo del asfalto-caucho en el país. Por esta razón la presente investigación busca analizar el comportamiento del ligante asfáltico cuando se lo modifica con caucho de llanta reciclada en forma de tiras y granos, así de esta manera averiguar cuál de las mezclas se comporta mejor para tener una mejor comprensión de su uso y funcionamiento.

Esta investigación se hizo con ligante asfáltico 60-70 y caucho en forma de tiras y granos, utilizando el proceso de mezcla húmeda, por medio de ensayos de laboratorio, de los que se espera obtener las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico convencional y las del ligante asfáltico modificado y compararlas entre ellas para saber cuál de las mezclas es la que mejor se comporta.

De esta manera se busca fomentar el uso del caucho de llanta reciclada y ayudar a entender el funcionamiento de la interacción entre el asfalto y el caucho de llanta en forma de tiras y granos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar la influencia de la adición de caucho reciclado en forma de fibras y granos en el comportamiento de los ligantes asfálticos modificados.

2.2 Objetivos específicos

- Hacer una recopilación de experiencias previas en cuanto a investigaciones referentes a la adición de GCR en pavimentos asfálticos
- Determinar las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico convencional.
- Obtención de caucho de adición en forma de GCR y en forma de fibras, y determinar sus propiedades físicas
- Realizar la mezcla por vía húmeda entre el ligante asfáltico y el caucho de adición, en las diferentes formas a evaluar
- Determinar las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico modificado con las diferentes adiciones de caucho.

3 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo muestra una recolección de la información relacionada con la investigación desarrollada, en el cual se encuentra información acerca de los materiales con los que se realizará la investigación, innovaciones, métodos, recomendaciones y normas técnicas, las cuales se usarán como guía para el desarrollo de la metodología de trabajo empleada y el posterior análisis de los resultados obtenidos.

3.1 Origen y Naturaleza del Asfalto

La palabra asfalto proviene del latín *asphaltus* (resina negra, betún sólido) y éste, a su vez del griego *asphaltos* (seguro, que evita la caída), llegó al castellano como *asphalto* que más tarde se derivó como *asfalto*, como se documentó desde el siglo XV. (Soca, 2004) En la antigüedad, era obtenido de forma natural en estanques y lagos de asfalto, los sumerios lo usaban para cerrar las juntas de la madera en sus embarcaciones y los egipcios para embalsamar, además en Babilonia y Asiria, por ejemplo, se empleaba como material de construcción. Indicios históricos muestran que su primer uso para la construcción de carreteras ocurrió en Babilonia, 625 A.C. (Soca, 2004)

Aunque en los primeros tiempos los materiales asfálticos eran naturales en su mayor parte provenientes de Palestina sobre todo del gran lago denominado por los griegos como Asfaltites actualmente conocido como mar muerto. Los depósitos naturales de asfalto suelen formarse en pozos o lagos a partir de residuos de petróleo acumulados en el interior de la tierra, que se abren paso hacia la superficie a través de fisuras en la corteza terrestre. Entre otros ejemplos de formaciones de este tipo se pueden citar los pozos de alquitrán Rancho La Brea, en Los Ángeles, California (conocido también por sus fósiles de flora y fauna de tiempos prehistóricos), el lago P

Pitch Lake, en la Isla Trinidad, y el lago de Guanoco también conocido como lago Bermúdez y que es el lago de asfalto más grande del mundo, ubicado al sureste del estado de Sucre en Venezuela. (Soca, 2004)

El asfalto se puede obtener de dos formas: la natural y la que proviene del derivado del petróleo, el natural se obtiene de depósitos dispuestos en la superficie terrestre o cerca de ella, y el asfalto precedente del petróleo se obtiene del crudo como subproducto de métodos de refinamiento, para lograr obtener el asfalto se separan las distintas fracciones del crudo de petróleo en los procesos de destilación que se realizan en las refinerías de petróleo. (Valera, 2014) (Asphalt Institute, 2011)

3.2 Asfalto.

(Asphalt institute, 1972), define el asfalto según la ASTM como, material aglomerado sólido o semisólido con color que varía de negro a pardo oscuro y se licua gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo, o combinaciones de estos entre sí.

También podemos definir el asfalto como un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinantes y de ductilidad; con tiene propiedades cementantes, viscoelástico a temperatura ambiente, que al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida, impermeable al agua y no es afectado por los ácidos, álcalis (bases) o las sales. Estos pueden tener dos orígenes: los derivados de petróleos producto de destilación a altas temperaturas o de origen natural presentes en la superficie de la tierra o cerca de ella.

3.3 Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfalto y los diseñadores de pavimentos han aprendido a identificar y caracterizar estas propiedades y a usarlas, para tener control de las propiedades físicas del asfalto y garantizar un buen funcionamiento de la pavimentación.

La estructura molecular afecta a las propiedades físicas y de envejecimiento del asfalto, así como también el modo en que las partículas de asfalto actúan entre sí y con el árido.

La composición química de los asfaltos básicamente está constituida por cadenas moleculares predominantes de hidrocarburos (átomos de hidrógeno y carbono), junto con otros componentes como azufre, nitrógeno y oxígeno, complejos de vanadio y níquel, hierro, calcio y magnesio. Estos componentes varían dependiendo del origen del petróleo crudo.

El cemento asfáltico consta de asfaltenos (nombre propuesto por Boussingault en 1937) y maltenos, a su vez los maltenos se componen de resinas y aceites. Los asfaltenos son los responsables de la viscosidad y las propiedades adhesivas del asfalto, además también proporcionan resistencia y rigidez; las resinas son oscuras y del tipo sólidos o semisólidos, con una viscosidad que se ve enormemente afectada con la temperatura, actúan como agentes que dispersan los asfaltenos en los aceites, estos aceites son líquidos de color claro o blanco.

Generalmente existe mayor proporción de maltenos que de asfaltenos cuando se habla de asfaltos, aunque en el proceso de oxidación o envejecimiento las resinas y aceites se convierten en asfaltenos.

La mejor manera de distinguir los asfaltenos de los maltenos es diluir el asfalto en heptano donde los asfaltenos (materiales pesados) son precipitados. Los maltenos también son solubles en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición, estos están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas.

El mayor contenido de maltenos es el que le da la calidad a un asfalto, esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos. (Salamanca Arce, 2017)

Para finalizar, el asfalto no está compuesto de elementos químicos simples, es una mezcla bastante compleja de moléculas orgánicas, sistemas de alta condensación llamados aromáticos. Los aromáticos constituyen entre en 40% y el 65% del asfalto. Son cadenas no polares insaturadas de bajo peso molecular y se caracterizan por su alta capacidad de disolver otras cadenas de hidrocarburos de alto peso molecular. (Sol Petroleo, 2010)

3.4 Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

Durabilidad: Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar el comportamiento del asfalto frente al envejecimiento en horno. Estas son la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). [Asphalt Institute; 1992]

Adhesión y Cohesión: Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como una relación con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

Susceptibilidad a la temperatura: Los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica

también es conocida la variación de viscosidad con respecto a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. (Salamanca Arce, 2017)

Es de muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto, ya que permite que las partículas logren un buen acomodo en el proceso de compactación y finalmente el ligante se deberá volver lo suficientemente viscoso a temperaturas ambiente para mantener unidas las partículas de agregado al momento de finalizar el proceso de construcción de la carpeta asfáltica. (Salamanca Arce, 2017)

Endurecimiento y envejecimiento: El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos o también conocido como fenómeno de oxidación, es decir las resinas y aceites se convierten en asfaltenos, alterando las propiedades fisicoquímicas del material y por ende la durabilidad de los pavimentos asfálticos, este fenómeno puede mostrarse por medio de fisuras en la carpeta asfáltica, separación del ligante y el agregado o migración del asfalto, dejando como consecuencia el deterioro de la carpeta asfáltica. (Orozco Terán, 2011)

El proceso de oxidación tiende a endurecer la consistencia del asfalto, debido al aumento de asfaltenos, el cual ocurre a altas temperaturas, generalmente en los procesos de mezcla, sobrecalentamiento en los tanques de almacenamiento, esto combinado con la película delgada que se genera cuando el agregado es cubierto de asfalto, demoras en el proceso de construcción. El endurecimiento del asfalto continúa aún después del proceso de construcción, este proceso puede ser retardado dejando una pequeña cantidad de vacíos, combinado con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas

en el pavimento terminado, lo que debilita la carpeta asfáltica ante las aplicaciones de carga. (Salamanca Arce, 2017)

3.5 Reología del Asfalto

Según su definición más común, la reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales bajo la aplicación de una carga, hace parte de la mecánica de fluidos continuos. En el área de pavimentos es generalmente usada para determinar criterios relacionados con el desempeño, dentro de las especificaciones SUPERPAVE, estas especificaciones relacionan las propiedades físicas, reológicas y condiciones de trabajo del asfalto, que permiten establecer un sistema de clasificación y selección del ligante. (E-asphalt, 2002)

Los asfaltos son materiales termoplásticos, lo que significa que su consistencia y propiedades reológicas cambian con las variaciones a la temperatura que este sufre (Morea,2011), para caracterizarlos la reología en asfaltos considera conceptos como el módulo de corte complejo G^* (pronunciado como “G-star”) y el ángulo de fase δ , entendiéndose también el G^* como una medida de la resistencia a la deformación, estos parámetros se pueden usar para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los ligantes asfálticos. El G^* y el δ dependen de la temperatura y la frecuencia de carga al que esté sometido el ligante, a altas temperaturas el asfalto tiende a tener un comportamiento viscoso, es decir $\delta=90^\circ$, por el contrario a muy bajas temperaturas el asfalto se comporta de una forma elástica, recuperándose por completo de la deformación, es decir $\delta=0^\circ$, a temperaturas y frecuencias de carga normales el asfalto tiene un comportamiento viscoelástico, por lo tanto $0^\circ < \delta < 90^\circ$, (Asphalt Institute, 2011)

Para dos asfaltos en iguales condiciones de evaluación, además $G^*_1 = G^*_2$ y $\delta_1 > \delta_2$, los comportamientos elástico y viscoso se pueden representar gráficamente (figura 1), donde podemos ver que el ligante 2 tiene un comportamiento más elástico que el ligante 1, lo que quiere decir que el ligante 2 recuperara mayor deformación generada por la carga aplicada que el ligante 1. También nos indica que es necesaria la combinación de los valores del G^* y el δ para determinar el comportamiento del material (Asphalt Institute, 2011)

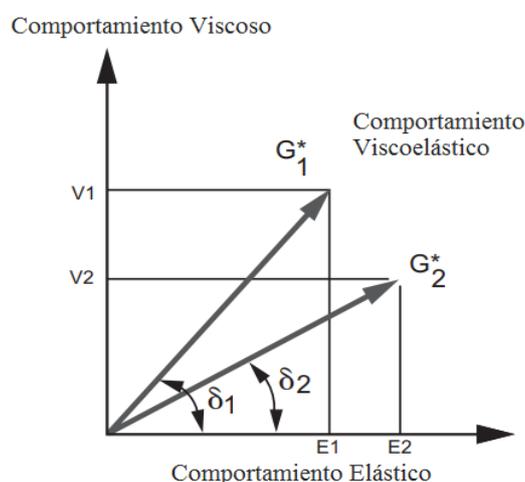


Figura 1. Representación Gráfica del Módulo de Corte Dinámico y el Ángulo de Fase (Asphalt Institute, The asphalt binder handbook, 2011), pág. 68)

Generalmente la relación $G^*/\text{sen}(\delta)$, es usada para realizar comparaciones con la susceptibilidad al ahuellamiento de un ligante asfáltico, esta relación es inversamente proporcional al trabajo disipado por la componente viscosa por ciclo de carga, consecuentemente la susceptibilidad al ahuellamiento también deberá disminuir. A través del análisis del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$, se llegó a la conclusión que la energía involucrada en el proceso de deformación se divide en 3 componentes, una componente elástica la cual genera una recuperación rápida, una componente viscoelástica retardada la cual depende del tiempo de aplicación de la carga y el estado de relajación del

material y una componente viscosa que es responsable de las deformaciones permanentes de la mezcla, la cual se puede representar gráficamente de la siguiente manera (figura 2). (Morea, 2011)

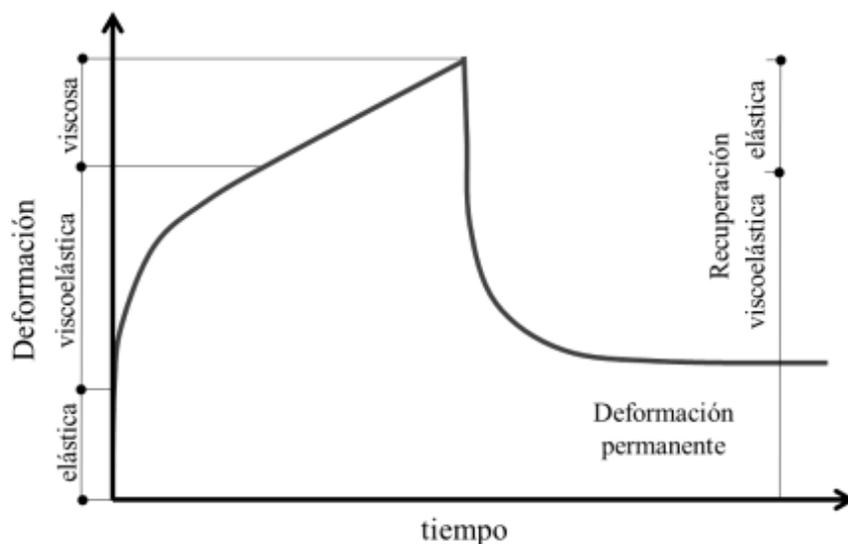


Figura 2. Esquema de deformaciones en el tiempo en un proceso de carga y descarga (Morea, 2011).

3.6 Reciclaje de llantas usadas.

En 1839 Goodyear descubrió la vulcanización del caucho, no obstante fue hasta 1887 que el veterinario y escritor escocés John Boyd Dunlop quien reinventó el neumático con cámara de aire para el triciclo de su hijo de nueve años de edad que usaba para ir a la escuela, el diseño fue rustico como eficiente, un año más tarde Dunlop registraría la patente que revolucionaría la rueda y en 1891 los hermanos André y Édouard Michelin inventan un neumático desmontable, lo que permitiría su adopción a la industria y revolucionaría el mercado de las llantas. (Agustín , 2012)

A mediados de 1970 países como Alemania y Japón iniciaron a utilizar las llantas como combustibles en hornos de cemento que, aunque no se reciclaban si se estaban eliminando.

Antes de 1985 en Estados Unidos el único propósito que se les daba a las llantas era recogerlas para almacenarlas en basureros y en algunos casos eran incineradas, Precisamente en este año el estado de Minnesota generó la primera ley que regulaba la disposición de las llantas usadas y fue a partir de esta, que se abrió la posibilidad de que se presentará un cambio en la forma de disponer de las llantas usadas en todo el país. En países como Alemania, España y Estados Unidos el reciclaje de las llantas está muy avanzado, estos han promulgado leyes muy serias acerca del reciclaje, por ejemplo, en España existen leyes que obligan a los productores a hacerse cargo de la recolección y gestión de los residuos conforme a los parámetros estipulados en la ley. Las leyes se basan en la metodología de las tres R, Reducir, Reutilizar y Reciclar, popularizada por Greenpeace. En otros países como en Canadá se reciclan el total de las llantas desechadas anualmente, esto se logra a través del método criogénico, que las congela y permite pulverizarlas de manera más sencilla, logrando separar sus componentes (caucho, acero y fibras) los cuales son comercializados por separado para que luego sean sometidos a procesos de reutilización. (Mejía Alzate, 2016)

Según el ministerio de ambiente en Colombia al año alrededor de 5.3 millones de llantas cumplen su vida útil, lo que equivale a cerca de 100.000 toneladas, de las cuales más del 50% se producen en Cundinamarca y Antioquia y alrededor de un 70% termina en rellenos sanitarios e incineradas para extraerles el acero, el resto son reutilizadas o recicladas. El reciclaje de llantas es un mercado que aún falta por explorar, pues en la mayoría de los casos las empresas solo llegan a comercializar entre un 50 y 60% de los materiales que procesan, debido a la baja demanda de estos productos y la no cultura de uso de materiales reciclados, en especial del caucho.

El gobierno a través del ministerio de medio ambiente, con la resolución 1326 de 2017 “por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones” y en la cual tiene como objetivo “establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar y mantener actualizados los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas con el fin de prevenir y controlar la degradación del ambiente” y en la cual se presentan metas para la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas, con las cuales se espera que en el informe de actualización y avances del año 2025 se cumpla con un total de 80% de llantas en el país. Buscando de esta manera reducir el impacto ambiental generado a causa de las llantas usadas en el país. (Resolución No.1326, 2017)

Se espera que aumente el consumo de caucho reciclado en el país gracias a la decisión tomada por la Vicepresidencia de la República, el Ministerio de Ambiente, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), de impulsar el uso de asfalto mejorado con grano de caucho reciclado en la pavimentación de corredores viales del país. La medida tomada desde 2016 incluye como requisito para los oferentes el compromiso de usar la mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado en no menos del 10 por ciento de la pavimentación del total de la vía y en una longitud continua en las vías nacionales y secundarias del país. (Gómez E, 2016)

3.7 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El GCR se obtiene mediante procesos de molienda de llantas de carros usadas, por lo general este tipo de desechos son situados en rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto entre otros, generando un problema ambiental de contaminación debido a su lenta descomposición y de esta manera ocupando grandes espacios, donde pueden proliferar insectos y bacterias.

Las llantas están compuestas principalmente por Estireno-Butadieno-Estireno (SBS, Styrene-Butadiene-Styrene), Caucho Estireno Butadieno (SBR, Styrene-Butadiene -Rubber), acero, textiles y aditivos, entre los que destacan el negro de humo, aceites, óxido de zinc activado con cadmio, sulfuro, sílice, resinas fenólicas y ácidos grasos. Para la obtención del GCR las llantas pasan por procesos de molienda y separación de los componentes que lo constituyen, principalmente el acero y las fibras; una vez disminuido su tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, por ejemplo: en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos

de parques, modificador en las mezclas asfálticas, entre otros. (Ramírez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramírez, 2014)

Cuando el CGR es adicionado al asfalto se ablanda y se expande a medida que va reaccionando con el asfalto. La adición de éste al asfalto produce un bitumen más espeso, lo cual tiene que ver con que se presente mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.8 Procesos de Obtención del Grano de Caucho Reciclado

Estos procesos de molienda tienen como objetivo llegar a un tamaño máximo de partícula de ¼ de pulgada. Además, estos se diferencian en cuanto a la forma y la textura del GCR. Cada proceso debe evaluarse según los costos, como también el que se garantice que las partículas de GCR se encuentren libres de acero, fibras y otros productos que afecten de manera negativa la calidad del producto. A continuación, se identifican tres diferentes formas de molienda de las llantas. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.8.1 Proceso Ambiental

El proceso ambiental también conocido como molienda a temperatura ambiente, tiene las siguientes actividades, separación del metal, separación de las fibras, reducción a polvo del GCR, empaquetado, pesado y transporte. Los metales son separados mediante imanes, los cuales están presentes a lo largo del proceso de producción y las fibras son separadas por medio de aspiración y de selección.

En el proceso se encuentran presentes varios pares de molinos, encargados de triturar el caucho, también se usa serie de tamices ubicados dentro de la máquina para controlar el tamaño de las partículas. Inicialmente el caucho está a temperatura ambiente, pero la fricción con los molinos hace que aumente de temperatura, el exceso

de calor puede degradar el caucho y, si no se enfría adecuadamente la combustión se puede producir mediante el almacenamiento. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.8.2 Proceso criogénico

Este proceso busca obtener las partículas en los tamaños mínimos esperados, utilizando un método para disminuir la temperatura del neumático a una temperatura muy baja. Se emplea nitrógeno u otros 27 materiales que disminuyan considerablemente la temperatura del neumático (-80 °F, -62°C aproximadamente).

Puede ser un sistema de cuatro fases, que incluye la reducción del tamaño inicial, enfriamiento, separación y molienda. Después de la reducción del tamaño el enfriamiento se puede realizar en túneles, sumergiendo el caucho en un baño de nitrógeno líquido para reducir su temperatura, posteriormente se muele en una unidad de reducción tipo impacto.

Para el caucho proveniente de llantas usadas, los metales se separan mediante imanes y las fibras mediante cribado (tela metálica fina).

En el proceso de molienda criogénico se hace uso de temperaturas criogénicas (conjunto de técnicas que son utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas más bajas), en donde se puede aplicar en cualquier etapa de la reducción del neumático. El material se puede enfriar en una cámara de estilo túnel, sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura del grano de caucho.

La molienda criogénica evita la degradación térmica del caucho, produce un alto rendimiento de producción, genera un GCR libre de casi toda la fibra y metales, también requiere de menor energía en el proceso de producción además de una mejor

calidad del producto final. Este proceso presenta un costo más elevado de operatividad debido al precio del nitrógeno líquido. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.8.3 Molienda Húmeda

Existen otros procesos de molienda en los cuales se desarrolla una molienda húmeda, siendo utilizadas para producir tamaño de granos finos (Tamiz 40 y 60) y muy finos (Tamiz 60) donde requiere de una segunda etapa de intensidad molienda.

Este proceso es conocido como micro molienda, es un proceso de molienda que está patentado en donde las partículas diminutas de caucho son reducidas a un tamaño menor por molienda entre dos ruedas muy juntas en un medio líquido, este medio líquido, en el mayor de los casos es agua. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.9 Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas.

La implementación del GCR a los pavimentos traen beneficios físico-mecánico; sin embargo, hay dos vías por las cuales se adicionan, las cuales se mencionan a continuación. Las características que adquiere el pavimento varían según el modo por el cual se va a adicionar al pavimento.

3.9.1 Vía Húmeda

En el proceso húmedo, el caucho actúa inicialmente modificando el asfalto, generando un producto conocido como asfalto-caucho, este es usado de la misma manera que un ligante para producir la mezcla asfáltica. Cuando el GCR y el asfalto son mezclados, el GCR reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose por absorción de aceites aromáticos, es decir el caucho sufre un cambio físico (Vega Zurita, 2016) Por otra parte, las altas temperaturas de mezclado hacen que el asfalto sufra un cambio tanto en su composición física como química. Este proceso de modificación aumenta la viscosidad del ligante, la plasticidad de la mezcla disminuye

a temperaturas altas, lo cual puede evitar el ahuellamiento, además en bajas temperaturas la flexibilidad de la mezcla aumenta, reduciendo la probabilidad de fisuración. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

En el proceso de adición hay varios factores decisivos en el resultado esperado de la mezcla asfalto-caucho. Estos factores son, el tamaño, textura, forma y proporción de adición del caucho, el tipo de cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezcla, grado de agitación en el proceso de realización de la mezcla, uso de aditivos, entre otros. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

Adicionalmente existen procesos de adición de caucho por vía húmeda, algunos de los cuales se describen a continuación.

3.9.2 Proceso McDonald

Este proceso consta de un tanque donde se mezcla el bitumen (asfalto) con el GCR con una serie de tornillos sin fin para asegurar la circulación de la mezcla, para que haya una reacción óptima entre estos dos materiales durante un periodo suficiente (por lo general el periodo de mezcla está entre los 45 y 60 minutos), paralelo a esto se calientan los agregados pétreos, para realizar una mezcla posterior con el asfalto-caucho y poder así ser transportado al lugar de construcción. En este transporte se debe mantener una temperatura específica que va desde los 160°C a los 190°C, para evitar problemas de manejabilidad del material en el campo y pérdidas de propiedades mecánicas. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.9.3 Tecnología Continua.

Conocida también como Florida Wet Process, fue desarrollada en Florida a finales de 1980. En este proceso, un GCR de tamaño máximo 0.18mm (tamiz No. 80) es mezclado con asfalto, además usa bajos porcentajes de adición de caucho (entre 8%

y 10%) en la mezcla, generando de esta manera un menor tiempo de reacción entre las partículas y el bitumen, acortando el tiempo de mezclado y los costos de producción. Este proceso no ha sido patentado. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.9.4 Tecnología Terminal.

Es un proceso húmedo que brinda la capacidad de mezclar o combinar el cemento asfáltico con el GCR y conservar el producto durante amplios periodos de tiempo. Este asfalto-caucho tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en la refinería donde se produce el cemento asfáltico por cualquiera de las dos tecnologías, Continua o por bachadas (Vega Zurita, 2016)

3.9.5 Vía Seca

El proceso de adición por vía seca es cualquier método en el cual el caucho es adicionado directamente a la mezcla asfáltica en caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el asfalto, es decir el caucho se usa como un agregado de la mezcla asfáltica (Vargas Jimenez & Rodríguez, 2014). A pesar de tener mayor potencial para reciclar más cantidad de caucho en comparación con el proceso por vía húmeda, este método es menos usado. Debido a la falta de estándares de calidad y la inconsistencia en el rendimiento han generado desconfianza en la aceptación de este método, tanto en investigadores como en profesionales los cuales no se inclinan a usar este método. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

A diferencia del proceso húmedo esta tecnología no requiere de equipo especial para desarrollar la mezcla. Este proceso solo requiere de un sistema de proporción que dosifique la cantidad adecuada de caucho a la mezcla, generalmente el caucho es usado como un sustituto del agregado fino, el cual puede estar entre 1% y 3% del total de los agregados en la mezcla. El caucho se adiciona y se mezcla en el momento en el que el

agregado alcance cierta temperatura. En algunos casos las partes más diminutas de caucho entran a modificar el asfalto. (Vargas Jimenez & Rodríguez, 2014)

Los dos métodos más comunes en Estados Unidos para la adición de caucho por vía seca son la tecnología PlusRide y la tecnología Genérica o sistema TAC. En España se desarrolló la tecnología Convencional, que emplea granulometrías convencionales, la cual ha sido aceptada en muchos países. (Vargas Jimenez & Rodríguez, 2014)

3.10 Porcentaje de caucho óptimo de mezcla

El Instituto Nacional de Vías en el (INV-Artículo-413, 2013), recomienda que la proporción de caucho en ligante modificado sea al menos del 15 % de la masa total de la mezcla de asfalto modificado con caucho. Otras investigaciones son más específicas en cuanto a este porcentaje recomendando un valor de 16.7 % en la masa total de la mezcla o de 25 % con respecto al peso del asfalto, con lo cual se genera una mayor resistencia al agrietamiento, disminución de la cantidad de asfalto en la mezcla y en el espesor de la capa, disminución de costos de mantenimiento, entre otras. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados en la investigación, se llevó a cabo la siguiente metodología de trabajo:

- a. Hacer una recopilación de las experiencias previas en cuanto a investigaciones referentes a la adición del caucho de llanta reciclado en pavimentos asfálticos y normas vigentes, con el propósito de conocer, analizar y escoger los métodos con los cuales se va a realizar la investigación, para obtener resultados confiables.
- b. Determinación de las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico convencional 60-70, se realizaron diferentes ensayos de caracterización física (gravedad específica, punto de ablandamiento, penetración, ductilidad y recuperación elástica) y reológica (módulo de corte dinámico y ángulo de fase) con el propósito de obtener los valores de los ensayos que me definen las propiedades del ligante para poder darle un uso eficiente en la preparación de las muestras de ensayo y además correlacionar las características del asfalto con las características de las mezclas elaboradas con el mismo.
- c. Para evaluar las propiedades físicas y reológicas del asfalto-caucho tipo 1 comercial producido en fábrica se llevaron a cabo los mismos ensayos de caracterización que se realizaron al asfalto convencional 60-70 con el propósito de determinar los parámetros que cambian después de la adición del caucho al bitumen para su correspondiente comparación, análisis y conclusión.
- d. Preparación y caracterización del caucho de llanta reciclado, la cual consistió en realizar ensayos de densidad, humedad, granulometría y retiro de materiales nocivos para la mezcla. Con esto se busca obtener los tipos de adición de caucho

con sus respectivas características, para evaluar la afectación en los procesos de mezcla y en los resultados finales.

- e. Incorporación del caucho al ligante asfáltico, la cual se realizó por vía húmeda en laboratorio, a temperatura y agitación recomendadas por normas e investigaciones referenciadas, con la cual se obtuvieron cuatro (4) mezclas homogéneas entre el caucho y el asfalto, las cuales consisten en: mezcla 1 asfalto 60-70 más adición de 16.7% de caucho en peso de la mezcla, en forma de tiras con tamaños comprendidos entre 5 y 15 mm, Mezcla 2 asfalto 60-70 más adición de 16.7 % de caucho en peso de la mezcla, en forma de tiras con tamaño menor de 5 mm pasante del tamiz No. 16 y retenido del tamiz No. 50, Mezcla 3 asfalto 60-70 más adición de 16.7 % de caucho en peso de la mezcla, en forma de tiras con tamaños de menores de 5 mm y pasantes del tamiz No. 30, Mezcla 4 asfalto 60-70 más adición de 16.7 % de caucho en peso de la mezcla, en forma de granos pasante del tamiz No. 30.
- f. Determinación los cambios en las propiedades físicas y reológicas del bitumen luego de la adición del caucho de llanta reciclado en las Mezclas 1, 2, 3 y 4 realizadas en el laboratorio, para la cual se realizaron los ensayos de peso específico, punto de ablandamiento, penetración, ductilidad, recuperación elástica, determinación del módulo de corte complejo y el ángulo de fase. con el propósito de relacionar resultados para realizar sus respectivos análisis y conclusiones.

5 MATERIALES Y ENSAYOS

Según las recomendaciones del (INV-Artículo-450, 2013), tabla 450-8 y con el propósito de utilizar en la investigación un asfalto de uso común en la región para evaluar la incidencia de la forma del caucho de llanta reciclado en el bitumen, se escogió un asfalto normalizado con penetración 60-70. Adicionalmente se usarán los materiales: asfalto-caucho tipo I (comercial) producido en planta (mezcla de asfalto 60-70, con 15 % de adición de GCR y pasante del tamiz No. 30), caucho de llanta reciclado en forma de tiras y en forma de granos, con los cuales se realizaron 4 mezclas de asfalto-caucho.

5.1 Clases de cauchos que se van a usar para la mezcla

Para la preparación y caracterización del caucho se tuvieron en cuenta las recomendaciones del (INV-Artículo-413, 2013), que recomienda un mínimo de 15 % de adición de caucho en la masa total de la mezcla, adicionalmente recomienda dos gradaciones para las mezclas de asfalto-caucho en el proceso de mezcla húmedo, también se cumplieron recomendaciones para la preparación del caucho usado en las mezclas realizadas en el laboratorio mostradas en la **Tabla 1**:

Tabla 1. Características del caucho de llanta reciclado recomendadas

CARACTERÍSTICA	REQUISITO
Humedad	- Máximo 0.75% de la masa total de la mezcla -El GCR debe fluir libremente
Gravedad específica	1.15 ± 0.05
Contenido de metales no ferrosos	No debe haber presencia visible
Contenido de metales ferrosos, en masa	Máximo 0.01%

Fuente: INVIAS, (INV-Artículo-413, 2013)



Figura 3. Tipos de Caucho que se usaron para las mezclas. A) Grano de Caucho Reciclado o GCR, B) Tiras de Caucho Reciclado

Con los cuales se llevaron a cabo los siguientes procesos de caracterización y preparación para uso en la mezcla:

5.2 Humedad del caucho de llanta reciclado

Se le determinó el contenido de humedad natural, colocando el caucho húmedo en un recipiente de masa conocida y se determinó la masa del conjunto (recipiente, caucho húmedo). Posteriormente se colocó en el horno a una temperatura de 105 ± 5 °C, según recomendación de la norma (ASTM-D6114, 1997), donde se secó aproximadamente por un tiempo de 16 horas antes de la primera lectura de masa, verificando cada hora hasta obtener una masa constante. Para concluir se determinó la diferencia entre la masa del caucho húmedo y la del espécimen seco, siendo esta el agua contenida originalmente del caucho, el porcentaje de agua se determinó dividiendo la masa del agua entre la masa seca del caucho y multiplicando por 100. Los resultados de los ensayos se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Resultados del ensayo de humedad

HUMEDAD DEL CAUCHO			
GCR		TIRAS	
Peso Húmedo + recipiente	192.2	Peso Húmedo + recipiente	227.4
Peso seco + recipiente	190.8	Peso seco + recipiente	225.7
peso del recipiente	69.3	peso del recipiente	73.1
peso Húmedo	122.9	peso Húmedo	154.3
Peso seco	121.5	Peso seco	152.6
humedad	1.152%	humedad	1.114%



Figura 4. Horno usado para secar el caucho

5.3 Gravedad específica del caucho de llanta reciclado.

Para la determinación de la gravedad específica del caucho de llanta reciclado, se empleó el ensayo de la (INV-E-307, 2013), DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO, La norma del INVIAS recomienda emplear kerosene o nafta, sin embargo, para uso práctico del ensayo se usó alcohol debido a que tiene una densidad menor que los antes mencionados, lo cual favorece la inmersión de las partículas de caucho generando mejores resultados.

El método consistió en llenar el frasco de Le Chatelier con Alcohol, Hasta un punto determinado tomando la lectura inicial de volumen a temperatura constante de 20°C, luego se le agregaron 25 g de caucho, posteriormente se liberó el aire contenido en las partículas rotando suavemente hasta que las burbujas asciendan a la superficie

del líquido, finalmente se le tomó la lectura del volumen desplazado en el frasco a la misma temperatura de la lectura inicial. Para el cálculo de la gravedad específica se dividió la masa de del caucho añadida por la diferencia de lecturas de volumen.



Figura 5. Frascos de Le Chatelier antes y después de la inmersión del caucho (Densidad del Caucho)

5.4 Contenido de metales no ferrosos

Para cada tipo de caucho se examinó visualmente y no se hicieron visibles metales no ferrosos, por lo tanto, cumplen con la recomendación de INVIAS.

5.5 Contenido de metales ferrosos

El caucho de llanta reciclado contenía pocos metales ferrosos, así que se procedió a retirarlos con un imán, agitándolo a través de la muestra, hasta que el momento en que el imán dejó de retirar partículas, concluyendo que el contenido de metales ferrosos era menor al 0.01%.

5.6 Gradación del caucho

En la **Tabla 3**, se presentan las granulometrías que recomienda INVIAS y las cuales se tuvieron en cuenta para la realización de las mezclas de asfalto-caucho que se evaluarán. Cumpliendo con las especificaciones se escogieron tres gradaciones para la

realización de 4 mezclas de asfalto-caucho, por medio de vía húmeda, las cuales tienen las características que se muestran a continuación características:

Tabla 3. Distribución de los tamaños del caucho

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO GCR						
Tipo de gradación	TAMIZ (mm/U.S. Standard)					
	2.38 No.8	2 No.10	1.19 No.16	0.59 No.30	0.3 No.50	0.075 No.200
	% PASA					
Tipo A	100	95-100	0-10			
Tipo B		100	65-100	20-100	0-45	0-5

Fuente: INVIAS, ART 413, 2013

- **Mezcla 1:** Mezcla asfalto-caucho, con el 83.3 % de asfalto 60-70 más un 16.7 % de caucho en forma de tiras con tamaños entre 5 y 15 mm, con gradación Tipo A con la siguiente granulometría y su respectiva curva granulométrica, cumpliendo la recomendación del (INV-Artículo-413, 2013).

Tabla 4. Gradación del caucho para la Mezcla 1 (Tipo A)

Asfalto + tiras largas, Gradación Tipo A, Mezcla 1				
Tamiz		Gradación recomendada para el Caucho por INVIAS		Gradación Utilizada
ASTM	Mm	Porcentaje Pasa		Porcentaje Pasa
No 8	2.38	95	100	100
No 10	2.0	0	10	97.5
No 16	1.18	-	-	0

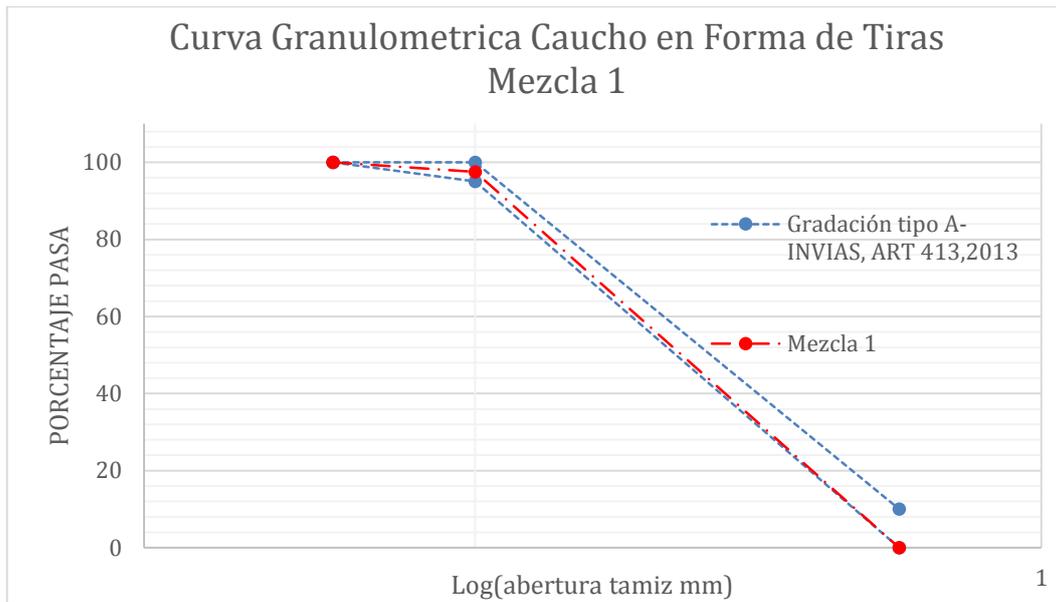


Figura 6. Curva granulométrica del caucho para la Mezcla 1



Figura 7. Caucho usado en la Mezcla 1 (tiras largas, entre 5mm y 15mm)

- **Mezcla 2:** Mezcla asfalto-caucho, con el 83.3 % de asfalto 60-70 más un 16.7 % de caucho en forma de tiras con tamaños menores de 5 mm, hasta el caucho retenido en el tamiz No 50, con gradación Tipo B con la siguiente granulometría y su respectiva curva granulométrica, cumpliendo la recomendación del (INV-Artículo-413, 2013).

Tabla 5. Gradación del caucho para la Mezcla 2 (Tipo B)

Asfalto + tiras cortas (Menores de 5 mm, retenido 50), Gradación Tipo B, Mezcla 2				
Tamiz		Gradación recomendada para el Caucho por INVIAS		Gradación Utilizada
ASTM	mm	Porcentaje Pasa		Porcentaje Pasa
No 10	2.0	100	100	100
No 16	1.18	65	100	100
No 30	0.6	20	100	40
No 50	0.3	0	45	0

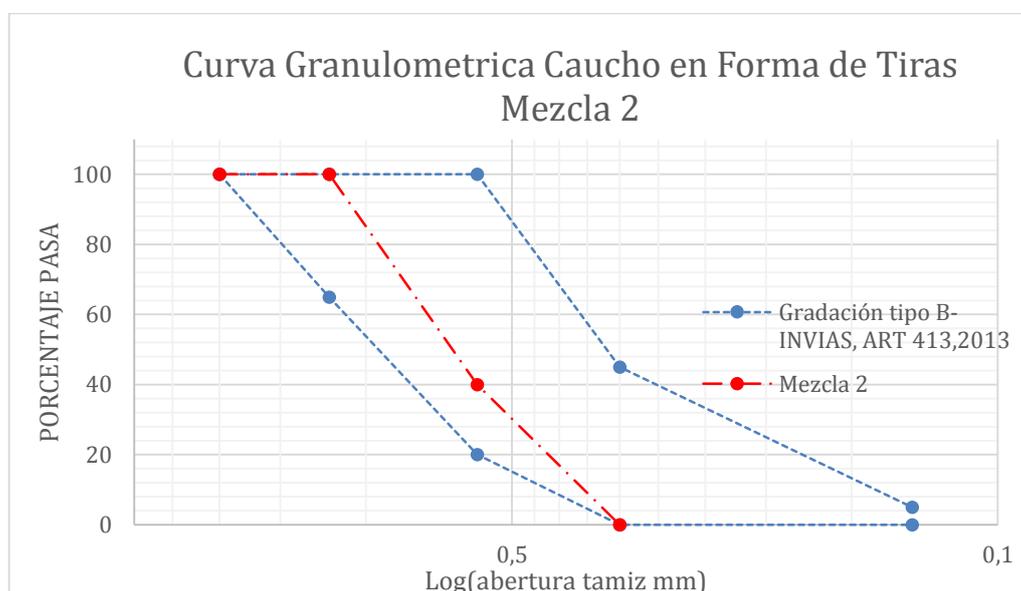


Figura 8. Curva granulométrica del caucho para la Mezcla 2



Figura 9. Caucho usado en la Mezcla 2 (tiras menores de 5 mm)

- **Mezcla 3:** Mezcla asfalto-caucho, con el 83.3 % de asfalto 60-70 más un 16.7 % de caucho en forma de tiras pasantes del tamiz No. 30, con tamaños menores de 5 mm, con gradación Tipo B y pasantes del tamiz No. 30 según (INV-Artículo-413, 2013), ver figura 12.

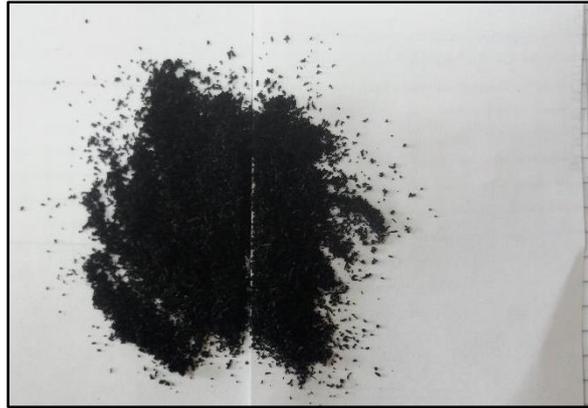


Figura 10. Caucho usado en la Mezcla 3 (tiras menores de 5 mm, pasantes del tamiz No. 30)

- **Mezcla 4:** Mezcla asfalto-caucho, con el 83.3 % de asfalto 60-70 más un 16.7 % de caucho en forma de granos pasantes del tamiz No. 30, con graduación Tipo B y pasantes del tamiz No. 30 según (INV-Artículo-413, 2013).



Figura 11. Caucho usado para la Mezcla 4 (GCR pasante del tamiz No. 30)

Las mezclas 3 y 4 se realizaron con la misma gradación, con el fin de realizar la comparación de forma, debido a que al realizar el tamizado del caucho se presentaron

tiras hasta el tamiz pasante No. 30 y retenido del tamiz No. 50, la gradación y su curva granulométrica se presentan a continuación.

Tabla 6. Gradación de las Mezclas 3 y 4 (Tipo B)

Asfalto + tiras pasa # 30 & Asfalto + granos pasa # 30, TIPO B				
Tamiz		Gradación recomendada para el Caucho por INVIAS		Gradación Utilizada
ASTM	Mm	Porcentaje Pasa		Porcentaje Pasa
No 10	2	100	100	100
No 16	1.18	65	100	100
No 30	0.6	20	100	100
No 50	0.3	0	45	30
No 200	0.075	0	5	2.5

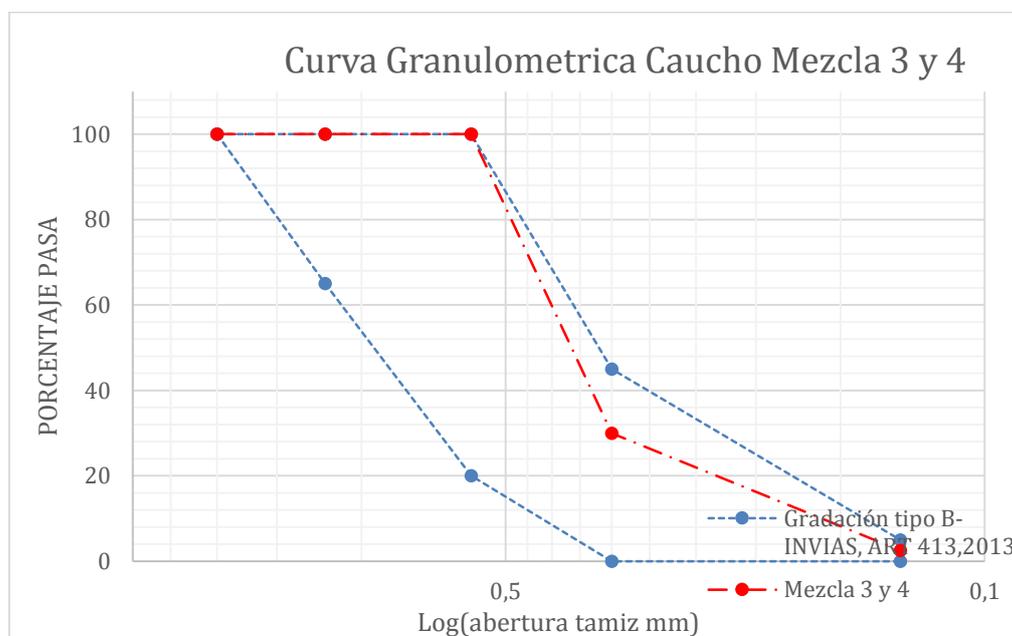


Figura 12. Curva granulométrica Mezclas 3 y 4

5.7 Realización de mezclas asfalto-caucho

Para la realización de las 4 mezclas asfalto-caucho en laboratorio, se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas por INVIAS y adicionalmente se utilizaron recomendaciones basadas en investigaciones anteriores. Según la (INV-E-701, 2013), la cantidad mínima de asfalto para ensayos rutinarios es de 1 kg, por lo tanto, se decidió que esa sería la cantidad total de mezcla entre asfalto y caucho, adicionalmente se

determinaron las cantidades de asfalto de 83.3 % equivalente a 833 g en cada una de las mezclas de asfalto-caucho y una cantidad de 16.7 % en la proporción del caucho, obteniendo las cantidades en cada tamaño de partícula como se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Masa de caucho retenida en cada tamiz para cada mezcla

MASA RETENIDA EN CADA TAMIZ PARA CADA MEZCLA									
TAMIZ No.	Mezcla 1 -Asfalto + Caucho en Tiras Largas (5- 15 mm)		Mezcla 2 -Asfalto + Caucho en Tiras Cortas (menores de 5 mm)		Mezcla 3 -Asfalto + Caucho en Tiras Cortas (menores de 5 mm) Pasante Tamiz No. 30		Mezcla 4 -Asfalto + GCR Pasante Tamiz No. 30		
	% Pasa	Masa Retenida (g)	% Pasa	Masa Retenida (g)	% Pasa	Masa Retenida (g)	% Pasa	Masa Retenida (g)	
8	100	0	0	0	0	0	0	0	0
10	97.5	4.175	100	0	100	0	100	0	0
16	0	162.825	100	0	100	0	100	0	0
30	0	0	40	100.2	100	0	100	0	0
50	0	0	0	66.8	30	116.9	30	116.9	116.9
200	0	0	0	0	2.5	45.925	2.5	45.925	45.925
Pasa 200	0	0	0	0	-	4.175	-	4.175	4.175

Con las anteriores características se realizaron las 4 mezclas de asfalto-caucho. En el proceso de mezcla se secó el caucho para controlar la humedad máxima recomendada, la temperatura del asfalto al momento de la adición del caucho se mantuvo entre 180 y 200 °C, después de la adición del caucho se mantuvo la mezcla durante 60 minutos, a una temperatura entre 160 y 180 °C como recomienda INVIAS en el (INV-Articulo-413, 2013), adicionalmente la agitación de mezclado según (Quiñones Sinisterra, 2014), debe mantenerse entre 250 y 300 rpm, siguiendo esta recomendación y por las características de la mezcladora las revoluciones se mantuvieron a 280 rpm.



Figura 13. Proceso de adición y mezcla del caucho de al asfalto.

Como la mezcladora no era diseñada para la mezcla de asfalto-caucho se decidió cubrir con papel aluminio para conservar la temperatura, además evitar que las corrientes de aire generadas por los extractores de olores del laboratorio interrumpieran el calentamiento de la mezcla, el cual por facilidad se hizo por medio de llama de gas.

También se observó que las mezclas de caucho con partículas grandes generaban mayor cantidad de gases y olores al momento de la mezcla, los cuales se fueron atenuando conforme disminuyó el tamaño de las partículas de caucho.

Después de terminado el tiempo de mezcla se procedió a vaciar el asfalto-caucho en recipientes de donde se extrajeron las muestras para cada ensayo de caracterización.

5.8 Caracterización del bitumen

Tanto al asfalto 60-70 normalizado como a las mezclas de asfalto-caucho se les realizaron los ensayos de caracterización mostrados en la **Tabla 8**:

Tabla 8. Ensayos de caracterización de asfaltos

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN ASFALTOS	NORMA INV-E
Densidad de los Materiales Bituminosos Sólidos y Semisólidos (Método del Picnómetro)	INV-E 707-13
Penetración de los Materiales Bituminosos	INV-E 706-13
Punto de ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola)	INV-E 712-13
Índice de Penetración de los Cementos Asfálticos	INV-E 724-13
Ductilidad de los Materiales Asfálticos	INV-E 702-13
Método de Ensayo para Medir la Recuperación Elástica de Materiales Asfálticos utilizando el Ductilómetro	INV-E 742-13
Medición de las propiedades Reológicas de los ligantes Asfálticos mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	INV-E 750-13

Fuente, Normas de INVIAS (INVIAS INV-2013)

5.8.1 Densidad de los materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro)

La gravedad específica es la relación entre la masa de un volumen dado de un material y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura, estos valores son usados generalmente para realizar conversión de unidades de volumen a masa. Este ensayo se le realizó a todos los ligantes asfálticos propuestos en el proyecto.

El procedimiento consiste en pesar cada picnómetro seco (A), llenar el picnómetro con agua destilada y llevarlo al baño de agua a 25 °C por 30 minutos, secar superficialmente y pesarlo nuevamente con agua (B), con el bitumen calentado a una temperatura no mayor a 110 °C y que alcance un estado de fluidez llenar las $\frac{3}{4}$ partes del picnómetro limpio, seco y previamente calentado a la misma temperatura que el bitumen, el vaciado debe hacerse evitando que el material entre en contacto con las partes del picnómetro por encima del nivel final, se deja enfriar por 30 minutos y se determina su masa (C), el volumen remanente en el picnómetro es completado con agua y llevado a baño de agua a 25 °C por 30 minutos, luego de secar superficialmente y se determina su masa (D). (INV-E-707, 2013)

La densidad se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Densidad Relativa} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

Adicionalmente se observó que para el asfalto-caucho es necesario llevarlo a temperaturas mayores que el asfalto convencional para evitar la generación de burbujas en el momento de vaciado en el picnómetro.

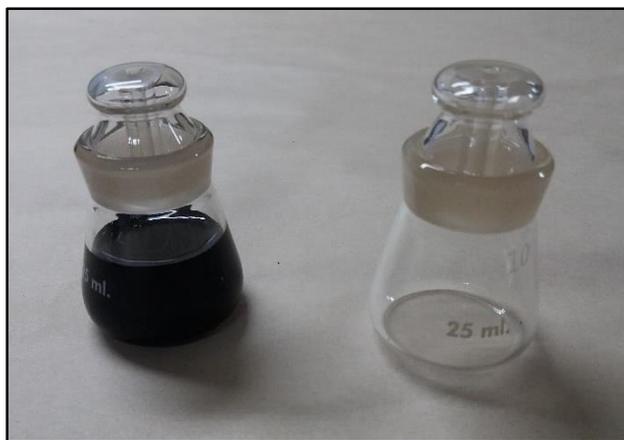


Figura 14. Picnómetros antes y después de ser llenados con asfalto

5.8.2 Penetración de los materiales bituminosos

La penetración es la consistencia de un material bituminoso expresada por medio de la distancia, en décimas de milímetro, hasta la cual penetra verticalmente una aguja normalizada en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25 °C (77 °F) durante un tiempo 5 segundos y con una carga móvil total. Incluida la aguja de 100 g, aunque se pueden emplear otras condiciones previamente definidas. (INV-E-706, 2013)

La prueba de penetración es un método para cuantificar la consistencia del asfalto, también utilizada como guía y para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos. Los ensayos de penetración fueron utilizados dentro de las primeras metodologías de clasificación de asfaltos y aun se siguen utilizando. (Salazar Delgado, 2011)

El ensayo se realiza en un recipiente con medidas estandarizadas por (INV-E-706, 2013) en el cual se vierte el ligante previamente fluido, este se debe dejar enfriar a temperatura entre 15 y 30 °C, por un tiempo entre 60 y 90 minutos, luego es llevado al baño de agua a temperatura de 25 ± 0.1 °C por un tiempo similar al de enfriamiento, finalmente se lleva al penetrómetro donde se lleva a cabo el proceso de penetración, y entre cada lectura se debe dejar un tiempo prudente en el que la temperatura se regule nuevamente , también se recomienda que haya el menor tiempo posible desde el momento en el que el recipiente es sacado del baño de agua hasta que se realiza la penetración.



Figura 15. Penetrómetro usado en los ensayos de penetración

5.8.3 Punto de Ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)

Es la temperatura (en grados Celsius) medida en el líquido del baño, en el instante en el que se produce el contacto entre la masa bituminosa y la placa de referencia, estos son materiales viscoelásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario fijo, pero definido que produzca resultados reproducibles y comparables.

El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También, puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento. (INV-E-712, 2013)

El método consiste en llevar el asfalto hasta un estado fluido en el cual pueda ser vaciado en los anillos de ensayo (desde ese momento hasta la terminación del ensayo

no deben pasar más de 4 horas), se deja enfriar un tiempo de 30 minutos y se realiza el enrase, se dejan pasar al menos 30 minutos después del enlace, luego hace el montaje de los equipos y se llena el recipiente de ensayo con el líquido apropiado (agua o glicerina) de 5 ± 1 °C por un tiempo de 15 minutos, una vez transcurrido este tiempo se centran las bolas (9.5 mm de diámetro o 3/8 de pulgada, con una masa de 3.5 ± 0.05 g) en los anillos y se procede a aumentar la temperatura a una tasa de 5 ± 0.5 °C por minuto, se anota como resultado del ensayo la temperatura en la cual el bitumen que rodea la bola toca el fondo de la placa (ubicada a 2.54 mm del nivel inferior del anillo). (INV-E-712, 2013)

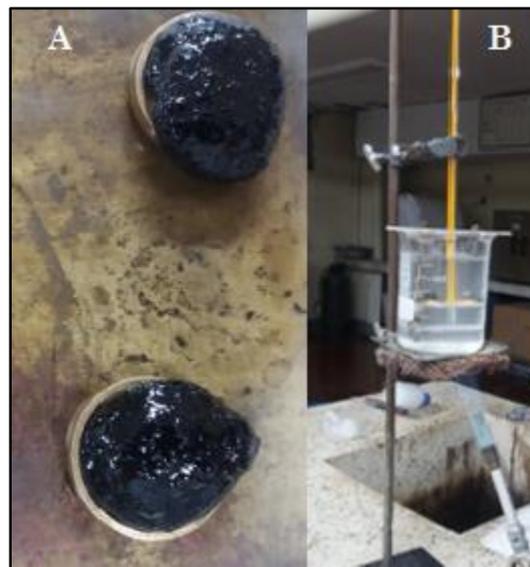


Figura 16. Equipo para determinar el Punto de Ablandamiento en asfaltos (Anillo y Bola.). A) Anillos con asfalto sin enrasar, B) Montaje del equipo y realización del ensayo

5.8.4 Índice de penetración de los cementos asfálticos

Este índice, concebido por Pfeiffer y Van Doormaal, se calcula a partir de los valores de penetración a 25° C y el punto de ablandamiento con anillo y bola y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales y de su comportamiento reológico.

El valor del **IP** se obtiene mediante la expresión:

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

Siendo:

$$f = \frac{50 \times \text{Log} \left[\frac{800}{P} \right]}{T_{AB} - 25}$$

Donde: T_{AB} : Punto de Ablandamiento, °C.

P: Penetración en 0.1 mm a 25 °C.

Con el índice de penetración, los asfaltos se pueden clasificar en tres grupos:

IP > +1: son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a este grupo.

IP < -1: son cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

IP entre +1 y -1: Características intermedias entre los dos anteriores, pertenecen a este grupo la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras. (INV-E-724, 2013)

5.8.5 Ductilidad de los materiales asfálticos

El ensayo de ductilidad se utiliza para medir la consistencia de un determinado betún asfáltico, midiendo su resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una parte de la probeta que lo contiene. (INV-E-702, 2013)

La ductilidad es la capacidad que tienen los betunes asfálticos de admitir grandes deformaciones sin perder su resistencia, siendo una característica importante de los cementos asfálticos.

Los betunes asfálticos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica. Por otra parte, los betunes asfálticos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura (ASTM-D113, 1999)

El procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad (5 ± 0.25 cm por minuto) y temperatura ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura. (INV-E-702, 2013)

Este ensayo muestra que, los ligantes que tienen mayor ductilidad son más adhesivos que los ligantes que no cuentan con esta característica. Este resultado es importante para conocer el comportamiento del ligante con el aditivo.



Figura 17. Ductilómetro

5.8.6 Método de ensayo para medir la Recuperación Elástica de materiales asfálticos utilizando el ductilómetro

Procedimiento que se usa para determinar la recuperación elástica de los materiales asfálticos mediante el uso del ductilómetro, el cual ejerce tracción sobre unas briquetas de ensayo preparadas.

Este ensayo se realiza a una temperatura de 25° C y a una velocidad de tracción de 5 cm/min, hasta obtener una elongación especificada, después, se corta en el punto medio entre los extremos y se espera una hora, luego se determina la longitud de contracción sufrida por la muestra y este resultado se expresa en porcentaje del valor inicial.

Tiene una peculiar aplicación en el estudio de las características elasto-plásticas de los ligantes modificados empleados en la fabricación de mezclas bituminosas para la construcción de vías.

Para determinar la recuperación elástica de los asfaltos Existen dos métodos:

- **Método A:** en este método se corta la probeta a una distancia de 10 ± 0.25 cm.
- **Método B:** en este método se corta la probeta a una distancia de 20 ± 0.25 cm.

(INV-E-706, 2013)

Debido a que el asfalto-caucho presentó una ductilidad menor a los 20 cm, buscando una repetitividad en los ensayos se decidió realizar todos los ensayos con el Método A.

5.8.7 Medición de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*)

El procedimiento se usa para medir el módulo de corte complejo (G^*) y el Ángulo de fase (δ) de ligantes asfálticos, usando un reómetro de corte dinámico (figura 18), mediante una configuración de ensayo de platos paralelos.



Figura 18. Reómetro de Corte Dinámico

La preparación de la muestra se lleva a cabo de la siguiente manera, inicialmente se precalienta la muestra de asfalto a una temperatura y tiempo donde alcance una consistencia fluida y se vierte sobre un molde de goma de silicona (figura 19), luego se seleccionan los platos con los cuales se realiza el ensayo, de los cuales uno se mantiene fijo (inferior) mientras el otro es oscilatorio (superior) (figura 20), (Asphalt Institute, 2011) recomienda usar los platos de 25 mm de diámetro, para asfaltos originales (sin envejecer) y una separación (gap) de prueba de 1000 μm de ensayo y para asfaltos

envejecidos en el ensayo de película delgada rotativo (RTFOT, *Rolling Thin Film Oven Test*) recomienda los platos de 8 mm de diámetro y una separación de prueba de 2 mm

(Asphalt Institute, 2014) Recomienda usar los platos de 8 mm para temperaturas de entre 3 a 46 °C y platos de 25 mm para temperaturas entre 46 a 88 °C, para este trabajo por recomendación tras experiencia de manejo, se usaron los platos de 25 mm en todas las pruebas realizadas.



Figura 19. Muestra de asfalto-caucho para ensayo en el reómetro



Figura 20. Platos de 25 mm ubicados en el reómetro

Una vez encendido el equipo e instalados los platos, se procede a calibrar el equipo, posteriormente se llevan los platos a una separación de 0 μ para garantizar una buena medición, después se calientan los platos a una temperatura adecuada con la cual

garantizamos una buena adherencia entre el bitumen y los platos, luego se coloca la muestra en el plato inferior procurando que la muestra se mantenga limpia, la muestra debe estar a temperatura ambiente, por lo cual se deben esperar algunos minutos para que se cumpla esta condición, tampoco debe transcurrir mucho tiempo desde el momento que es vaciada en el molde hasta que se pone en los platos, en algunos reómetros el plato superior puede ser removido sin que se afecte la medición de la separación cero (zero gap) con lo cual es posible la colocación de la muestra directamente sobre el plato, lo que ayuda a la adhesión entre el asfalto y el plato, pero puede generar excesos de material lo que dificulta el enrase, esto no sucede con el molde pues se genera menor desperdicio de muestra. (Asphalt Institute, 2011)

Una vez es colocada la muestra entre los platos se lleva a una separación de 1050 μm para los platos de 25 mm y de 2100 μm para los platos de 8 mm, se realiza el enrase y posteriormente se elimina la separación extra, llevando los platos exactamente a la separación deseada (1000 μm para platos de 25 mm y 2000 μm para platos de 8 mm), con este paso la muestra se hincha ligeramente en los extremos (figura 21), finalmente se lleva la muestra a la temperatura con la que se haga el ensayo. (Asphalt Institute, 2011)

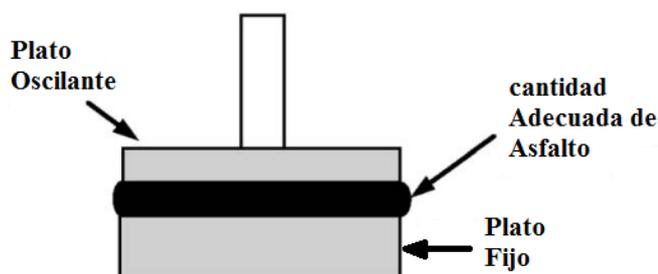


Figura 21. Configuración de la muestra de asfalto

El funcionamiento del DSR es relativamente sencillo, el plato superior oscila entre tres puntos (A, B y C, figura 22), inicialmente arranca desde el punto A hasta el punto B, luego retrocede pasando por A hasta llegar al punto C y se regresa nuevamente al punto A, esta oscilación es un ciclo, el número de ciclos completados en un segundo se conoce como la frecuencia de carga (ω), usualmente las especificaciones de DSR recomiendan usar una frecuencia de carga de 10 rad/s igual a 1.59 Hertz (Asphalt Institute, 2011), esta frecuencia es semejante a un vehículo circulando a una velocidad de 80 km/h. (Morea, 2011)

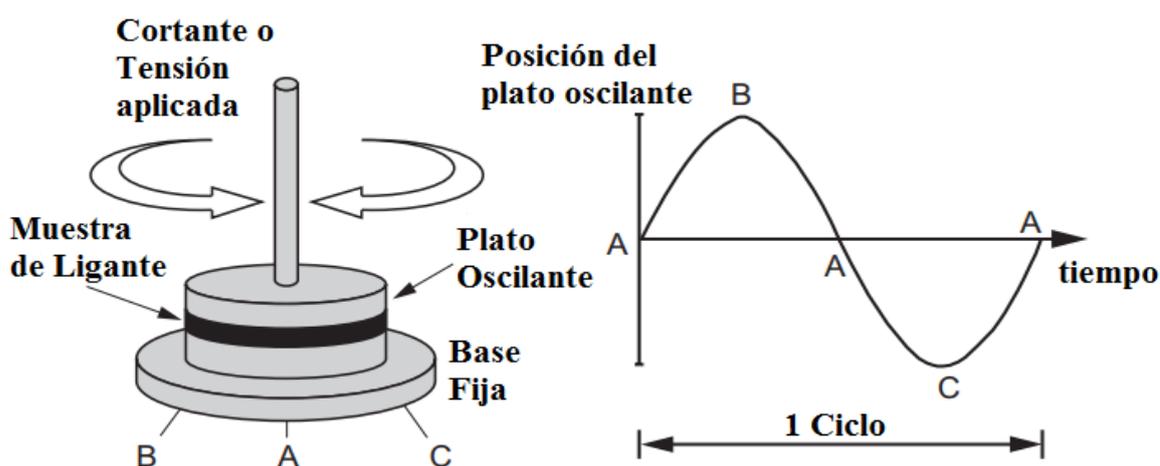


Figura 22. Funcionamiento DSR

Antes de iniciar con la prueba se debe seleccionar un valor de tensión de corte que se debe lograr durante la prueba, varía entre 1 y 12 % y dependen del estado del asfalto, para los ligantes sin envejecer se usan valores entre 10 y 12 % y para los ligantes envejecidos se usan valores del 1 %. Se debe tener cuidado en la asignación del porcentaje de tensión para que la respuesta del asfalto a la tensión (G^*) permanezca dentro del rango viscoelástico lineal, mientras esto suceda el G^* no será afectado por los cambios de deformación. Una vez inicia la prueba, el software controla la prueba

mientras proporciona la carga sinusoidal adecuada y mide la respuesta del asfalto. (Asphalt Institute, 2011)

El módulo de corte complejo (G^*), está definido como la relación entre el esfuerzo de corte total aplicado ($\tau_{\max} - \tau_{\min}$) y la deformación máxima experimentada ($\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$), el tiempo de reacción entre el cortante aplicado y la deformación resultante es relacionado con el ángulo de fase (figura 24). La reacción de un material completamente elástico es inmediata, esto quiere decir que su ángulo de fase es cero (figura 23), un material viscoso como el asfalto sometido a altas temperaturas tiene un retardado tiempo de reacción entre la carga y la respuesta, en este caso el ángulo se aproxima a los 90 grados (figura 23). (Asphalt Institute, 2011)

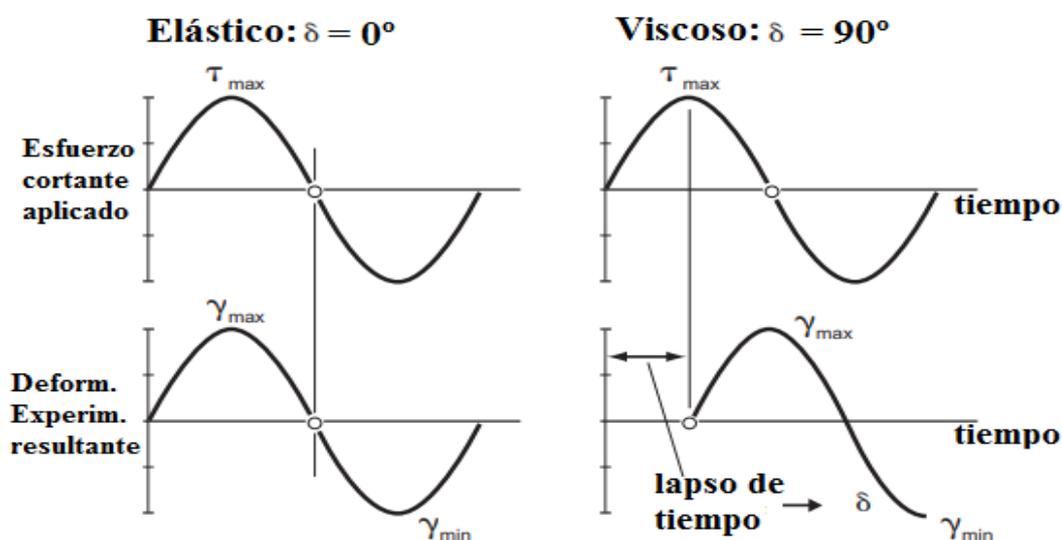
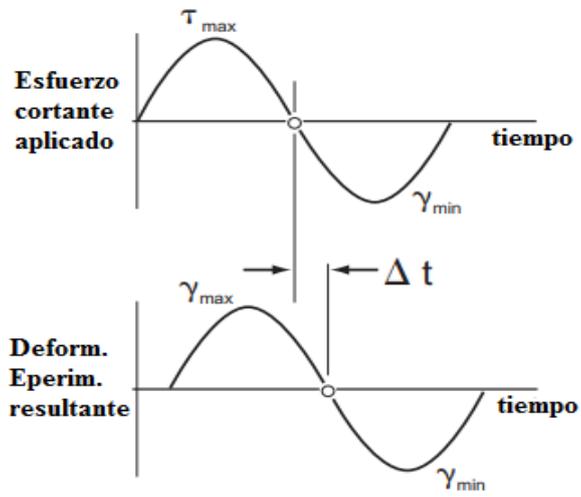


Figura 23. Comportamiento Elástico y Viscoso

Viscoelástico: $0^\circ < \delta < 90^\circ$



$$G^* = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

$$\Delta t = \frac{\text{Lapso de tiempo}}{\text{tiempo}} \rightarrow \delta$$

Figura 24. Comportamiento Viscoelástica

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, con motivo de la caracterización del ligante asfáltico con penetración 60-70 normalizado, caracterización del caucho de llanta reciclado en forma de tiras y granos, caracterización de la mezcla asfalto-caucho tipo 1 (comercial), Mezcla 1 (asfalto más caucho en forma de tiras con tamaños entre 5 y 15 mm, gradación Tipo A (INV-Artículo-413, 2013)), Mezcla 2 (asfalto más caucho en forma de tiras con tamaños menores de 5 mm, gradación Tipo B (INV-Artículo-413, 2013), Mezcla 3 (asfalto más caucho en forma de tiras con tamaños menores de 5 mm y pasantes del tamiz No. 30, gradación Tipo B) y Mezcla 4 (asfalto más caucho en forma de grano pasantes del tamiz No. 30, gradación Tipo B).

6.1 Caracterización del asfalto 60-70 y asfaltos modificados con caucho de llanta reciclado

Se realizaron diferentes ensayos de caracterización a cada uno de los ligantes asfálticos, los cuales permitieron determinar los cambios en su comportamiento y comprender el desempeño de las muestras ensayadas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los ligantes asfálticos empleados en el presente trabajo.

6.1.1 Caracterización física y reológica

Los ensayos de caracterización física y reológica fueron realizados en la facultad de Ingeniería Civil (laboratorio de materiales) de la Universidad del Cauca, ubicado en el sector Tulcán frente al Centro deportivo universitario.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados en el laboratorio a los ligantes asfálticos producidos en planta, asfalto 60-70 y asfalto-caucho tipo 1 que se usaron en esta investigación, con su correspondiente comparación con las especificaciones recomendadas por el INVIAS en los artículos (INV-Articulo-410, 2013) y (INV-Articulo-413, 2013) en el suministro de cementos asfálticos y asfaltos modificados con caucho respectivamente.

Tabla 9. Resultados de los ensayos de caracterización asfalto 60-70 y asfalto tipo 1 (comercial producido en planta)

CARACTERÍSTICA	UND	NORMAS DE ENSAYO	ASFALTO 60-70		RESULTADO 60-70	ASFALTO TIPO I (COMERCIAL)		RESULTADO TIPO1 (COMERCIAL)
			Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
Penetración (25 ° C, 100 g, 5 S)	0.1 mm	E-706	60	70	60	25	75	46
Punto de ablandamiento	°C	E-712	48	54	47.8	57	-	71.3
Índice de penetración	-	E-724	-1.2	0.6	-1.35	-	-	2.8
Ductilidad a 25 ° C	Cm	E-702	100	-	100	-	-	18.5
Recuperación Elástica	%	-	-	-	14	-	-	75
Medición de las propiedades Reológicas de los ligantes	-	-	-	-	-	-	-	-
Peso específico	Kg/m ³	E-707	-	-	1024.30	-	-	1031.60

Respecto del índice de penetración del asfalto 60-70 se obtuvo un valor menor que el mínimo especificado por la norma, que indica, que es más susceptible a los cambios de temperatura, sin embargo, se decidió usarlo pues no genera problemas en el desarrollo de la investigación.

La ductilidad en el asfalto 60-70 normalizado fue mayor a 100 el cual corresponde con el valor requerido por la especificación en la tabla 410-1 (Especificaciones del cemento asfáltico) del (INV-Artículo-410, 2013), este ligante presentó un comportamiento de alta ductilidad, esta característica normalmente es relacionada con buena adherencia, sin embargo, es más susceptible a cambios de temperatura. En el asfalto modificado con caucho tipo 1 (comercial) se presentó una ductilidad baja, lo que hace que se presente una mayor consistencia.

Respecto a la recuperación elástica se genera un aumento en el porcentaje de recuperación en la muestra de asfalto-caucho tipo 1 (comercial) de 74% con relación al asfalto 60-70 que fue del 14%, esta conducta es esperada, pues en la muestra asfalto-caucho tipo 1 comercial disminuyen las deformaciones plásticas

En el ensayo de peso específico también se vio reflejada la interacción del caucho con el asfalto, ya que el peso específico del asfalto 60-70 normalizado era de 1024.30 Kg/m^3 , y con la adición del caucho, el asfalto tipo 1 comercial aumentó a 1031.60 Kg/m^3 , esto se debe a que el caucho tiene una mayor gravedad específica (1.15 ± 0.05) que el asfalto y al momento de la adición se genera una combinación de gravedades específicas, la cual hace que aumente la densidad del ligante modificado.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados a las cuatro muestras de asfalto caucho realizadas en el laboratorio, adicionalmente se realiza la comparación con las especificaciones del (INV-Artículo-413, 2013)

Tabla 10. Resultados de los ensayos de caracterización de las Mezclas 1, 2, 3 y 4

CARACTERÍSTICA	UND	NORMAS DE ENSAYO	ASFALTO TIPO I		Asfalto + tiras largas, Tipo A Mezcla 1	Asfalto + tiras cortas (hasta retenido 50), Tipo B. Mezcla 2	Asfalto + tiras pasa # 30, Tipo B. Mezcla 3	Asfalto + granos pasa # 30, Tipo B. Mezcla 3
			Mín.	Máx.				
Penetración (25 ° C, 100 g, 5 S)	0.1 mm	E-706	25	75	27.3	25.0	24.7	28.3
Punto de ablandamiento	°C	E-712	57	-	76.6	81.7	83.4	82
Índice de penetración	-	E-724	-	-	2.39	2.89	3.08	3.20
Ductilidad a 25 ° C	Cm	E-702	-	-	11.9	11.2	14.8	12.5
Recuperación Elástica	%	-	-	-	84	86	84	79
Peso específico		E-707	-	-	1031.66	1032.09	1030.10	1033.35

Las cuatro mezclas de asfalto caucho que se realizaron en el laboratorio se clasificaron como asfalto tipo 1, ya que sus resultados cumplieron con los parámetros establecidos por el (INV-Artículo-413, 2013) tabla 413-3 del manual de INVIAS.

En los ensayos de penetración y punto de ablandamiento, las muestras presentaron el comportamiento esperado en donde la penetración se redujo y aumentó del punto de ablandamiento con la incorporación de caucho, es decir que cuando se le incorporó el caucho al ligante aumentó su consistencia.

La ductilidad en las mezclas de asfalto modificado con caucho reciclado es muy baja ya que al adicionarle caucho al ligante aumentan su consistencia y el asfalto se vuelve más rígido, esto hace que el asfalto sea poco dúctil;

6.1.2 Resultados caracterización reológica

La caracterización reológica se llevó a cabo bajo dos frecuencias de medición, una a 10 rad/s como especifica INVIAS para la caracterización reológica para todas las muestras ensayadas y otra de 0.6 rad/s, basada en los resultados de (Morea, 2011) para las mezclas de asfalto caucho, con la cual se tiene mayor sensibilidad en la relación $G^*/\sin(\delta)$ para los asfaltos combinados con polímeros.

A continuación, se muestran los resultados del módulo de corte complejo para la frecuencia de carga de 10 rad/s (tabla 11), aplicada a todos los ligantes asfálticos y los resultados del módulo de corte complejo para las mezclas de asfalto caucho a una frecuencia de carga de 0.6 rad/s (tabla 11):

Tabla 11. Módulo de Corte Complejo (G^*) a frecuencia de 10 rad/s

Tem. °C	Asfalto 60-70 Pa	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
25	1063307	-	-	-	-	-
32	243864	-	-	-	-	-
39	70354	-	-	-	-	-
46	19883	64503	116685	162308	160812	131872
52	7988	33167	62634	95258	90385	75246
58	-	17792	35555	58801	53010	44888
64	-	11590	22382	37410	32208	27712
70	-	6651	14156	24212	19964	17448

Tabla 12. Módulo de Corte Complejo (G^*) a frecuencia de 0.6 rad/s

Tem. °C	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
46	12079	25995	46294	41775	34980
52	6020	15235	27733	23478	20049
58	3123	9574	16523	13270	11577
64	1997	7127	9930	7449	6672
70	1087	4685	6256	4182	3873

Los siguientes son los resultados de las mediciones de los ángulos de fase para las diferentes temperaturas usadas y las dos frecuencias de corte aplicadas (tabla 13 y tabla 14):

Tabla 13. Resultados Ángulo de Fase (δ) para una frecuencia de 10 rad /s

Tem. °C	Asfalto 60-70 Pa	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
25	67.82	-	-	-	-	-
32	74.36	-	-	-	-	-
39	78.67	-	-	-	-	-
46	82.17	53.87	49.65	42.36	44.71	44.63
52	84.42	54.80	48.59	41.16	44.27	43.87
58	-	55.60	46.58	40.82	44.40	43.78
64	-	55.53	42.04	41.47	45.36	44.52
70	-	56.58	40.63	42.68	47.17	45.99

Tabla 14. Resultados Ángulo de Fase (δ) para una frecuencia de 0.6 rad /s

Tem. °C	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
46	53.95	43.90	39.49	42.83	42.05
52	55.38	40.44	40.30	44.30	43.37
58	57.09	37.44	42.01	47.04	45.72
64	58.20	31.66	42.23	50.37	48.42
70	60.38	30.23	39.46	52.97	50.29

Finalmente se muestran los resultados del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ (tabla 15) y tabla 16) para las diferentes condiciones de ensayo:

Tabla 15. Relación $G^*/\sin(\delta)$ para una frecuencia de 10 rad /s

Tem. °C	Asfalto 60-70 Pa	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
25	1148304	-	-	-	-	-
32	253244	-	-	-	-	-
39	71753	-	-	-	-	-
46	20070	79861	153109	240901	228598	187721
52	8026	40587	83517	144740	129475	108580
58	-	21562	48948	89948	75763	64876
64	-	14058	33427	56488	45262	39526
70	-	7968	21742	35714	27220	24262

Tabla 16. Relación $G^*/\sin(\delta)$ para una frecuencia de 10 rad /s

Tem. °C	Asfalto-caucho Comercial (Pa)	Mezcla 1 Pa	Mezcla 2 Pa	Mezcla 3 Pa	Mezcla 4 Pa
46	14939	37490	72800	61446	52231
52	7314	23485	42878	33614	29194
58	3720	15750	24688	18133	16170
64	2349	13580	14775	9673	8919
70	1250	9304	9844	5238	5035

6.1.3 Análisis ensayo de penetración

Este ensayo se le realizó a todos los ligantes usados en este proyecto, en la **figura 25** se compara el promedio de 3 penetraciones que se le hizo a cada ligante.

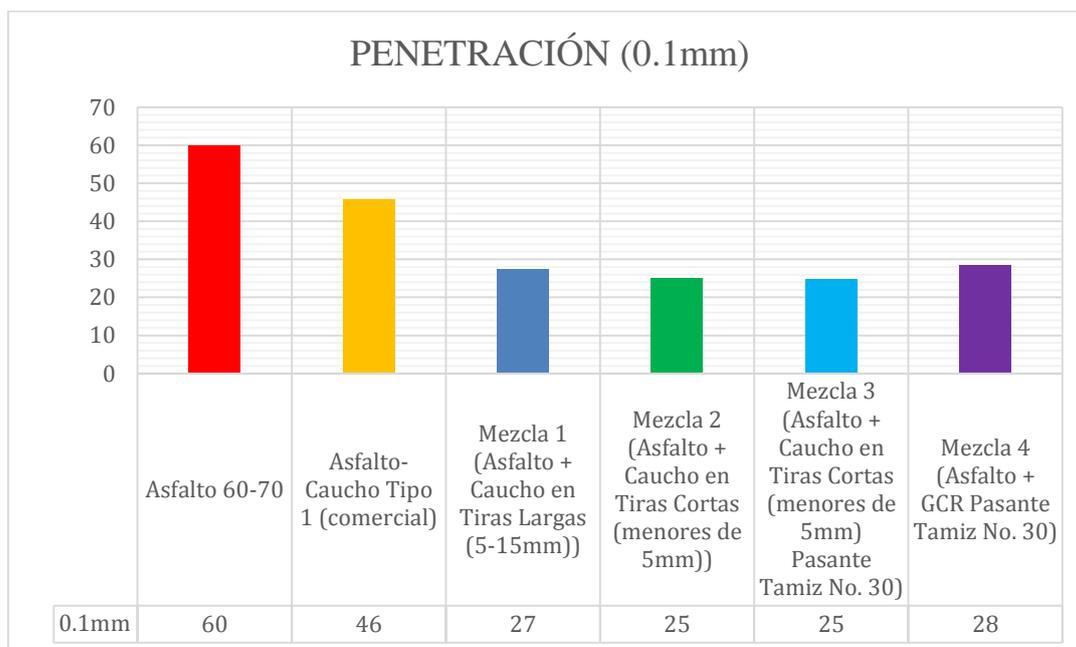


Figura 25. Resultados ensayo de penetración

El ensayo de penetración se le realizó al ligante 60-70 modificado con cuatro tipos de caucho de llanta reciclado, al ligante sin modificar y al asfalto modificado con GCR Tipo I (comercial). Estos seis tipos de asfalto presentaron diferente comportamiento, en los cuales se realizó el siguiente análisis.

Como se puede observar en la gráfica, el ensayo de penetración en el asfalto 60-70 es más alto que en los asfaltos modificados con caucho, es decir que la adición del caucho en el ligante hizo que aumentara su consistencia.

La penetración en la mezcla 1 es más alta que la de la mezcla 2 y 3, a pesar que en los tres casos se usó caucho en forma de tiras, esta disminución de la dureza del ligante está relacionada con el hecho que las fibras largas usadas en la mezcla 1 no se

incorporen completamente con el asfalto, disminuyendo la interacción asfalto-caucho y se comporten de manera separada, obteniendo así una consistencia menor, con respecto a las otras mezclas.

La mezcla 2 y 3 tienen la misma penetración, este es un efecto generado porque en las dos mezclas se usaron tiras menores de 5 mm con diferente gradación una de la otra, con los parámetros de la granulometría Tipo B del (INV-Artículo-413, 2013), de modo que la variación del tamaño de las partículas dentro de la misma especificación granulométrica no afecta la penetración de la mezcla, si se usan tiras de tamaños semejantes.

Las mezclas 3 y 4 tienen la misma gradación, aunque difieren en la forma de las partículas, la mezcla 4 obtuvo una penetración mayor que la mezcla 3, lo que indica que el caucho en forma de tiras vuelve más consistente la mezcla de asfalto-caucho, esto podría influir en la disminución de deformaciones permanente en la carpeta asfáltica.

La muestra de asfalto-caucho Tipo I (comercial) la cual tiene una adición de caucho en forma de granos del 15 %, presentó mayor penetración que la mezcla 4 con adición de granos del 16.7 %, esto indica que con mayor proporción de caucho en la mezcla se genera una mayor consistencia en el ligante.

6.1.4 Análisis del Punto de Ablandamiento

El ensayo de punto de ablandamiento se realizó al ligante 60-70 modificado con los cuatro tipos de caucho, al ligante sin modificar y al asfalto modificado con

GCR tipo 1 (comercial). Los resultados se muestran a continuación en la Figura 26

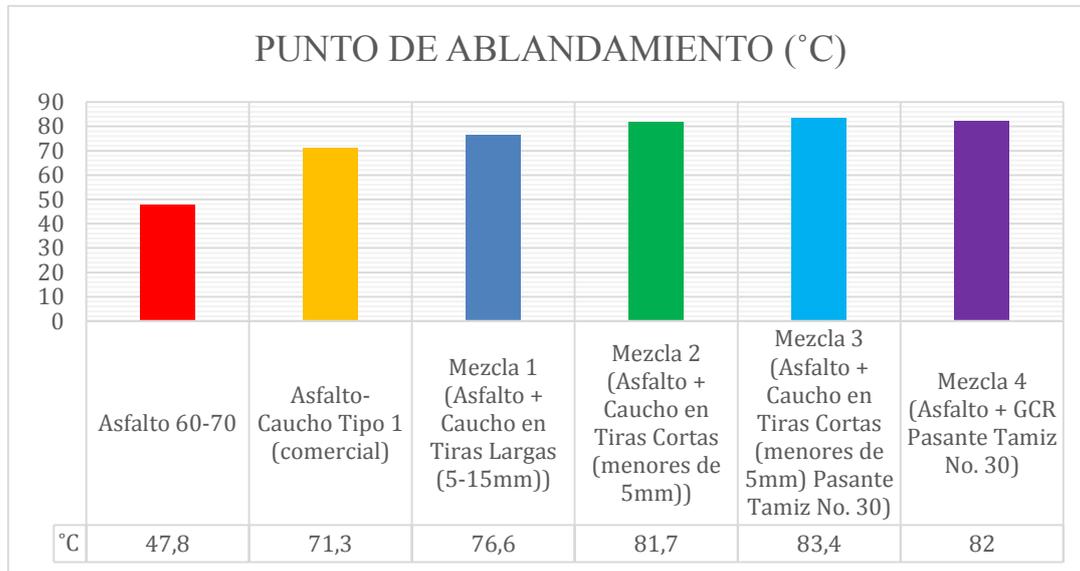


Figura 26. Resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento

Este ensayo presenta el comportamiento esperado, puesto que, al adicionarle el caucho aumentó la temperatura a la cual el ligante asfáltico obtiene una consistencia fluida, ósea que su punto de ablandamiento fue mayor, este fenómeno está relacionado al hecho que la adición de caucho aumenta la consistencia del ligante. Adicionalmente el ligante sufre un proceso de envejecimiento debido a las altas temperaturas que es sometido en el momento de realizar la modificación con caucho.

En el ensayo de punto de ablandamiento, la mezcla con tiras entre 5 y 15mm (Mezcla 1), obtuvo una consistencia fluida a una temperatura menor que las otras mezclas modificadas con caucho en forma de tiras (mezcla 2, 3,) , lo que muestra que las fibras con mayor tamaño puede que no tengan una buena interacción con el ligante asfáltico.

La mezcla 3 necesitó más temperatura para empezar a fluir, esto quiere decir que es la menos susceptible a los cambios de temperatura, con lo cual durante su vida de servicio puede mantener un comportamiento apropiado, presentando menos fallas

por los cambios de temperatura. Esta ganancia de consistencia y aumento del punto de ablandamiento, pueden ser beneficiosos para reducir la deformación permanente de las mezclas confeccionadas con asfalto caucho.

A pesar que las mezclas 2, 3 y 4 tuvieron resultados diferentes, estos presentaron una gran cercanía, la razón de esto puede ser que en las tres mezclas se usó la misma granulometría, y pese a que la mezcla 3 y 4 son de diferente forma, este parámetro no lo afectó en gran valor el punto de ablandamiento de los dos ligantes.

6.1.5 Análisis del Índice de Penetración

El índice de penetración se calcula a partir de los valores de la penetración a 25° C y del punto de ablandamiento el cual proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales.

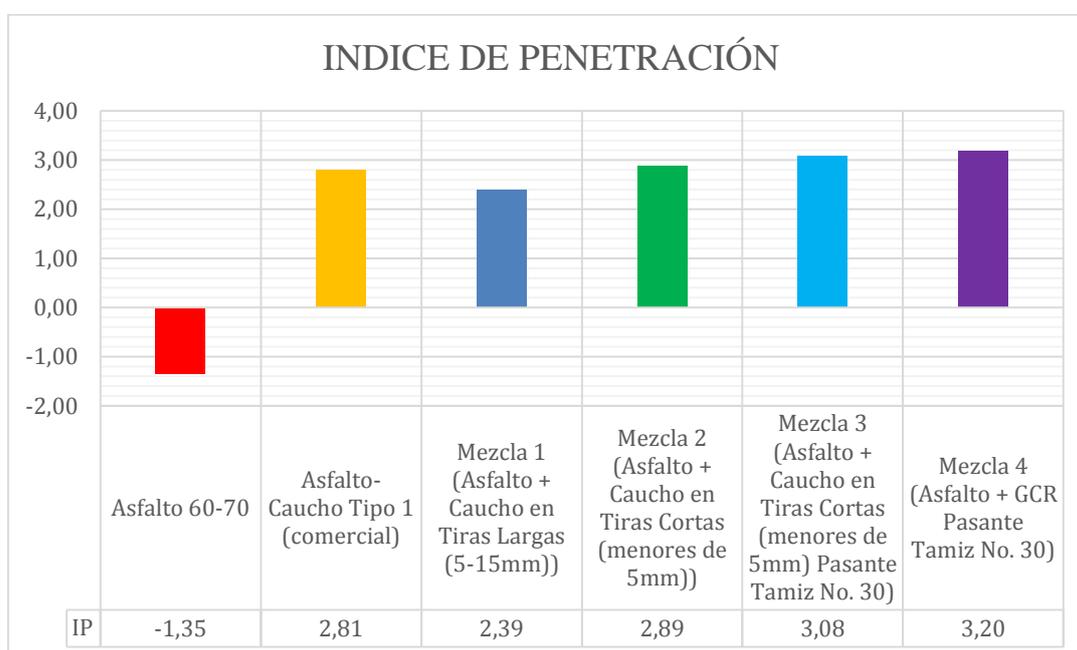


Figura 27. Resultados índice de penetración

Como se puede observar en la figura 27, el índice de penetración del asfalto 60-70 fue menor que -1.2, esto muestra que no cumple con el valor requerido por la especificación en la tabla 410-1 “Especificaciones del cemento Asfáltico” del (INV-

Artículo-410, 2013) para la pavimentación de carreteras, y que presenta una alta susceptibilidad térmica, rico en resinas y probablemente con comportamiento más viscoso.

Las mezclas modificadas con caucho muestran un alto aumento del índice de penetración, y sus resultados dieron mayores de 1, esto quiere decir que la presencia del caucho en el ligante hace que tenga una menor susceptibilidad térmica, presentando cierta elasticidad y disminución en la viscosidad y la resistencia. Esto hace que en un futuro contribuya a un mejor rendimiento del revestimiento asfáltico frente a las oscilaciones térmicas.

Las mezclas 3 y 4 arrojaron valores más altos que las otras muestras lo que indica que la adición de partículas de caucho con menor tamaño le genera menor susceptibilidad térmica al material, generando beneficios con respecto a las deformaciones permanentes y por ende reducción a los costos de mantenimiento, pero a la vez puede generar alza en los costos de mezcla.

6.1.6 Análisis del ensayo de ductilidad

En la Figura 28 se muestran los resultados de los ensayos de ductilidad realizados a cada uno de los ligantes evaluados en esta investigación:

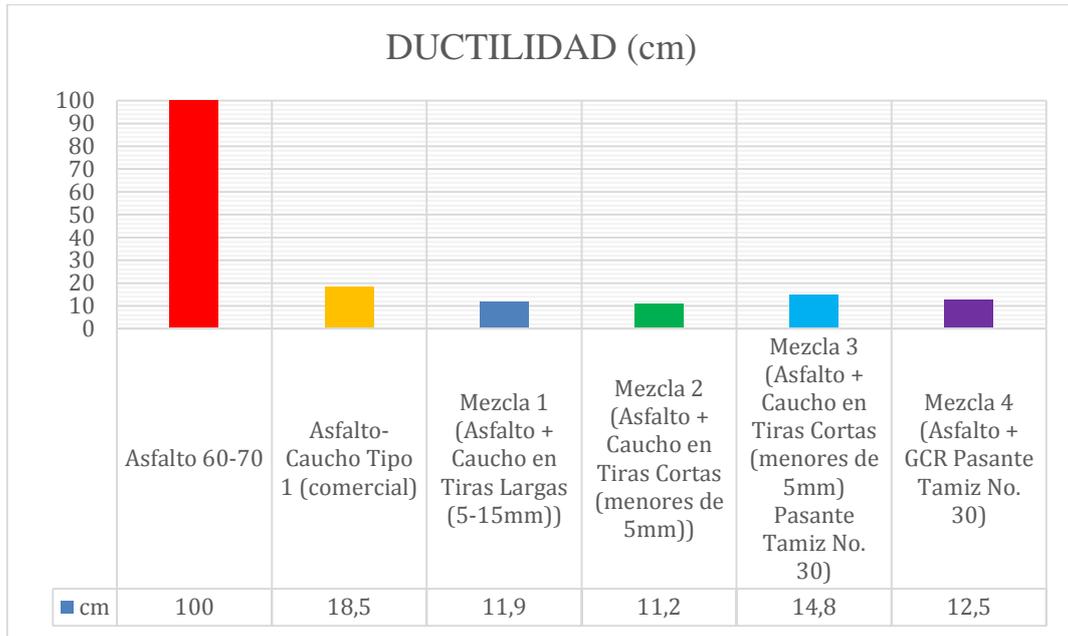


Figura 28. Resultado ensayo de ductilidad}

La gráfica muestra que el único ligante asfáltico que midió más de 100 cm fue el ligante 60-70 y cumple con las especificaciones del INVIAS, pero al adicionarle caucho el ligante pierde ductilidad, lo que evidencia el aumento de la consistencia que torna al asfalto caucho menos deformable.

6.1.7 Análisis del ensayo de recuperación elástica

Se le hizo el ensayo de recuperación elástica a las 6 mezclas, las cuales mostraron los resultados esperados.

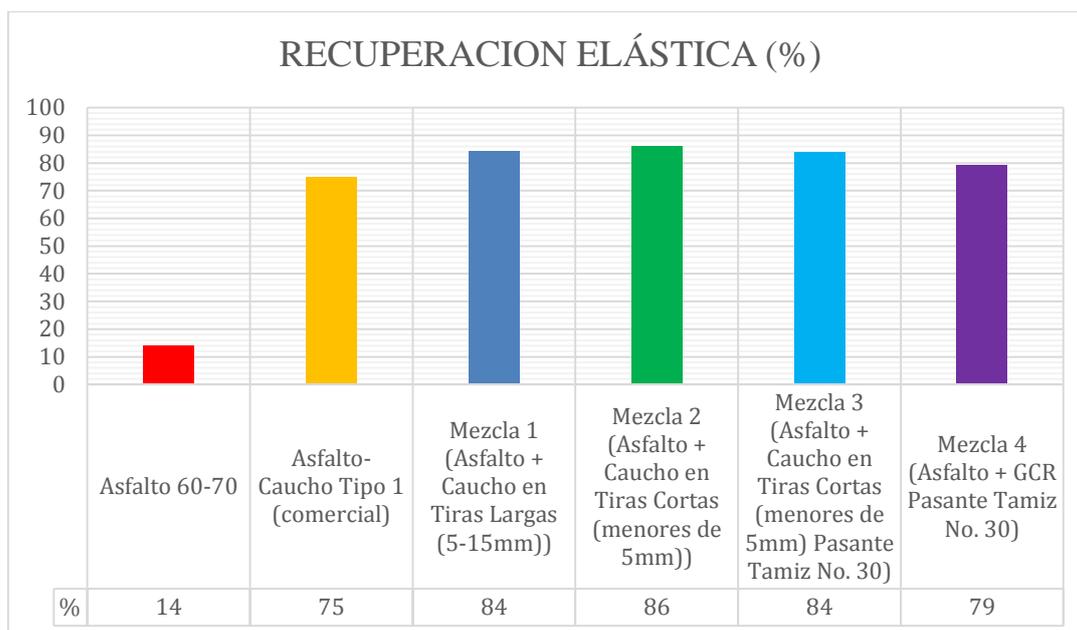


Figura 29. Resultados Recuperación Elástica

Los resultados arrojados por los ensayos de recuperación elástica son favorables a las mezclas de asfalto-caucho, pues estas, aunque presentaron una menor ductilidad muestran un gran incremento en los porcentajes de recuperación elástica después de ser sometidas a esfuerzos de tracción.

Tanto la muestra de asfalto-caucho tipo 1 (comercial) como las realizadas en laboratorio presentaron alto porcentaje de recuperación elástica, se puede observar en la Figura 29 que se presentó un mejor comportamiento en las mezclas de caucho en forma de tiras, lo cual se puede representar en disminuciones en las deformaciones plásticas de las carpetas asfálticas.

Al comparar las mezclas 3 y 4, las cuales presentan la misma gradación, pero con adiciones de caucho con diferente forma, fibras y granos respectivamente, se observa que la mezcla 3 obtuvo una mayor recuperación elástica.

6.1.8 Análisis de la caracterización reológica

A continuación, se muestran la proyección gráfica de la caracterización reológica realizada en el DSR para los diferentes ligantes asfálticos ensayados en el desarrollo de este trabajo:

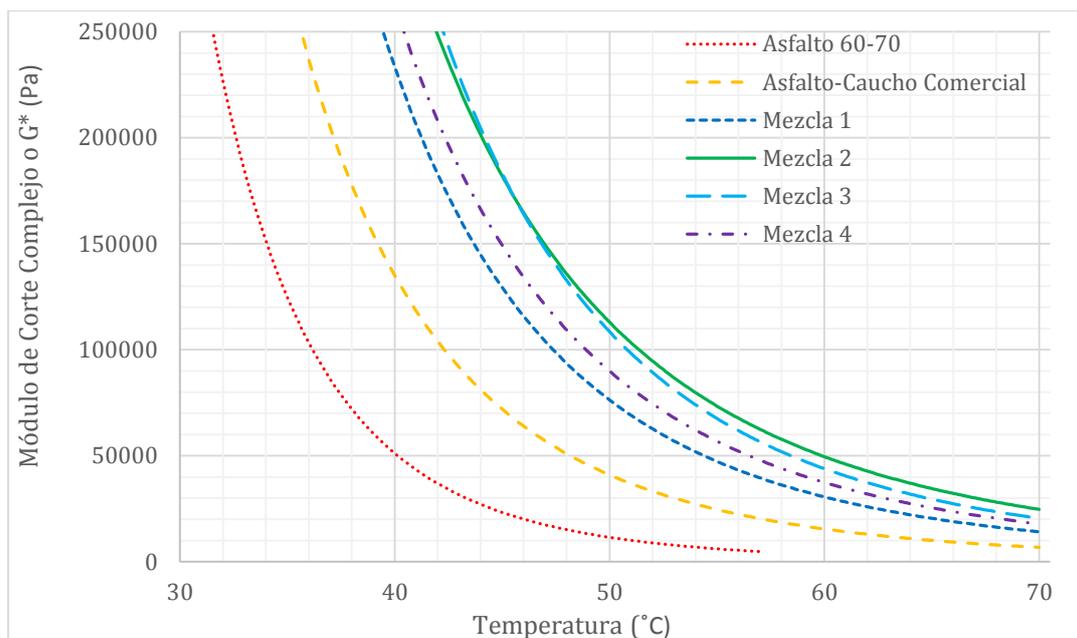


Figura 30. Línea de tendencia del Módulo de Corte Complejo G^* vs Temperatura a una frecuencia de carga de 10 rad/s

En la Figura 30, muestra que, al adicionarle caucho reciclado al ligante asfáltico este le genera un aumento en el módulo complejo con respecto al asfalto sin adición de caucho reciclado, lo cual es favorable, pues esta propiedad genera mayor resistencia a la deformación cuando el ligante se encuentra sometido a esfuerzos de carga.

Al analizar el comportamiento del asfalto-caucho Tipo 1 comercial (con 15 % de adición de caucho) y la mezcla 4 (con 16.7 % de adición de caucho) las cuales tienen la misma forma y granulometría (GCR, pasante del Tamiz # 30), el asfalto tipo 1 comercial tuvo una menor respuesta a la deformación causada por los esfuerzos de

carga aplicada, esto se le atribuye al porcentaje de adición de caucho, se puede decir que a mayor cantidad de caucho aumentan los valores del módulo complejo. Además de esto presentó gran similitud en la trayectoria de sus gráficas, esto quiere decir que los dos mantienen un comportamiento semejante del módulo de corte complejo con respecto a la variación de temperatura, lo cual es un reflejo de la semejanza en la forma y gradación del caucho que se le adiciono.

Puede verse que la mezcla 1 tienen menores valores de módulo de corte complejo con respecto a las otras mezclas de caucho con la misma proporción en adición de caucho, lo que indica que, a mayor tamaño de partículas de caucho, se generan menores valores de resistencia al esfuerzo, sin embargo, es claro que mejora los valores del módulo complejo con respecto al asfalto 60-70 sin adición de caucho.

Como se puede evidenciar en la Figura 30 a pesar que las mezclas 3, y 4 tienen la misma granulometría en la adición de caucho pero con diferente forma, la mezcla 3 (con adición de caucho en forma de tiras menores de 5 mm, pasante del tamiz No. 30) presentan mayores valores de módulo de corte complejo que la mezcla 4 (con adición de GCR), esto representa, que la adición de caucho en forma de tiras cortas proporciona mayor resistencia a la deformación generada por los esfuerzos aplicados al bitumen que la adición en forma de granos.

6.1.9 Análisis del parámetro $G^*/\sin(\delta)$

Para realizar este análisis se tuvieron en cuenta dos frecuencias de carga ($\omega_1 = 10 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 0.6 \text{ rad/s}$), los resultados de los ensayos se graficaron para tener una mejor comprensión del comportamiento de los ligantes ensayados, las cuales se muestran en las Figura 31 y 32 respectivamente.

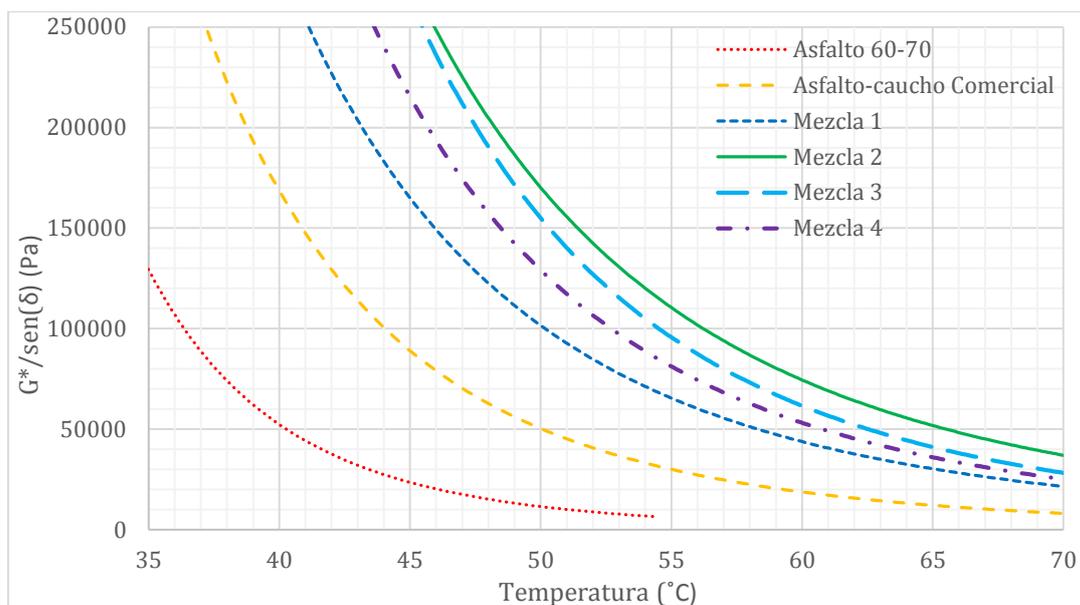


Figura 31. Modelación gráfica del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ vs Temperatura bajo una frecuencia de carga de 10 rad/s

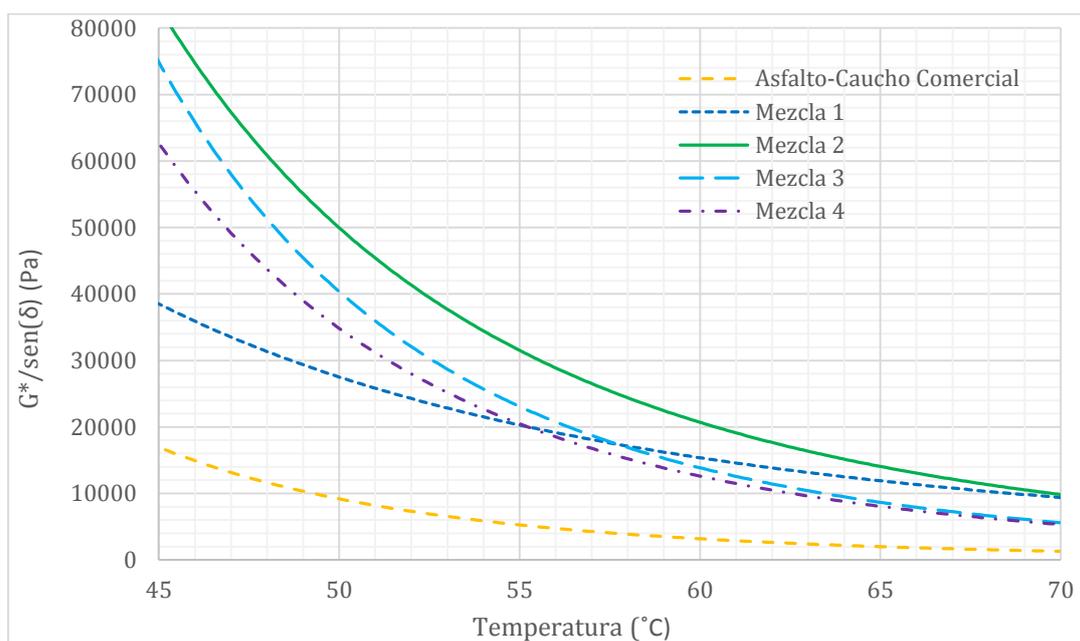


Figura 32. Modelación gráfica del parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ vs Temperatura bajo una frecuencia de carga de 0.6 rad/s

Comparando las curvas de las Figuras 31 y 32, en la mezcla 1 el comportamiento viscoelástico del ligante cambia dependiendo de la velocidad de carga aplicada, esta

variación era esperada, pues en investigaciones anteriores (Oliver & Tredea, 1998), (Morea, 2011) se demostró que una velocidad de carga de 0.6 rad/s genera mejor relación con respecto a las deformaciones permanentes con los ligantes asfálticos combinados con polímeros.

Según la Figura 31, la adición de caucho en general, mejora la capacidad elástica del ligante asfáltico, pues los valores de la relación $G^*/\sin(\delta)$ para el asfalto 60-70 se presentan muy por debajo de las curvas generadas por las demás muestras ensayadas, esto indica que la adición de caucho ayuda a la reducción de las deformaciones permanentes generadas por el tráfico vehicular, independientemente de la forma que tenga.

la figura 32 muestra que las mezclas 3 y 4 las cuales tiene la misma gradación con diferente forma del caucho, indican que a temperaturas bajas la mezcla 3 (caucho en forma de tiras menores de 5 mm, pasantes del tamiz No. 30) tienen un comportamiento más elástico que la mezcla 4 (con adición de GCR), lo que demuestra que la adición de caucho en forma de tiras genera una mayor recuperación elástica a bajas temperaturas, pero a altas temperaturas tiende a comportarse de manera similar al ligante con adición de caucho en forma de granos.

De acuerdo a lo presentado en las Figuras 31 y 32, la mezcla 2 tiene un comportamiento más elástico que el resto de las muestras ensayadas, pues presenta mayores valores en la relación $G^*/\sin(\delta)$, este resultado concuerda con los resultados del ensayo de recuperación elástica, pues la mezcla 2 también fue la que presentó un mayor porcentaje de recuperación, además a menores temperaturas tiende a acercar su comportamiento al de la mezcla 3 la cual también tiene caucho en forma de tiras cortas

en su granulometría, lo que quiere decir que la adición de tiras cortas menores de 5 mm con diferente gradación mejora el nivel de recuperación de las deformaciones permanentes en la carpeta asfáltica y consecuentemente se producirá menor susceptibilidad al ahuellamiento en la carpeta asfáltica, pues se genera una recuperación instantánea y retardada mayor que en el resto de las muestras.

En la Figura 32, la mezcla 1 tiene un comportamiento diferente con respecto a la Figura 31; presenta un cambio notorio en el comportamiento viscoelástico. esto indica que bajas temperaturas el ligante tiene un comportamiento más viscoso con respecto a las demás muestras con la misma proporción de caucho, este fenómeno se presenta en las dos gráficas; pero a una velocidad de carga menor y a temperaturas altas presenta un cambio de comportamiento, pues en este caso tiende a comportarse de manera más elástica que las mezclas 3 y 4 las cuales tienen adición con partículas de caucho pasantes del tamiz No. 30, lo que puede indicar que a esa velocidad y temperaturas el asfalto tiende a perder sus propiedades elásticas y se genera una activación de las propiedades elásticas del caucho en fibras largas (5 a 15mm), lo que reduce la susceptibilidad al ahuellamiento en el pavimento cuando la frecuencia de carga es lenta y la temperatura de trabajo es alta.

Comparando el comportamiento del asfalto-caucho tipo I (comercial) con la mezcla 4, los cuales presentan similitud en la forma (granos) y gradación (pasantes del tamiz No. 30) del caucho adicionado, pero que tienen diferente proporción de adición sobre la masa total de la mezcla (15 y 16.7 % respectivamente), puede decirse que la mezcla que contiene mayor cantidad de caucho genera mayor eficiencia para recuperarse a las deformaciones permanentes, pues hay un aumento en la capacidad elástica del material.

7 CONCLUSIONES

De acuerdo con los estudios que se le realizaron al asfalto con penetración 60-70, al ligante tipo 1 comercial y a las 4 mezclas con adición de caucho reciclado antes mencionadas en este proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- Con base en los estudios realizados podemos concluir que, al adicionarle caucho al ligante, éste mejora algunas de sus propiedades, esto se observó en los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, recuperación elástica y ductilidad; realizando un promedio entre las mezclas de asfalto-caucho con respecto al asfalto 60-70 sin adición de caucho dice que con respecto al ensayo de penetración, disminuyó un 56 %, por otra parte también se vio un aumento en el punto de ablandamiento de 69.3 %, los cuales produjeron un aumento en el índice de penetración, adicionalmente se notó una reducción de la ductilidad de 87.4 %, lo que refleja un aumento en la consistencia y una reducción de la susceptibilidad térmica al adicionarse caucho al ligante asfáltico, también se notó un aumento en la recuperación elástica del 494 %, lo que evidencia un aumento de la elasticidad en los ligantes cuando se adiciona caucho, independientemente de la forma de las partículas.
- Con los resultados de los ensayos que se hicieron a las 4 muestras con adición de caucho realizadas en el laboratorio, la mezcla 1 (Asfalto más caucho con forma de tiras largas (5-15 mm)) es menos eficiente que las mezclas 2, 3 y 4, las cuales tienen partículas con menores tamaños, esto se puede evidenciar especialmente en los ensayos reológicos, donde presentó un comportamiento inusual en comparación de las otras mezclas, lo que pudo ser generado porque

las partículas de mayores tamaños no logran una buena interacción con el asfalto, haciendo que haya menos eficiencia cuando trabajan en conjunto.

- Basados en los ensayos de recuperación elástica y caracterización reológica, realizados a todas las muestras, se pudo evidenciar que las muestras que generaron mejor comportamiento frente a la recuperación de deformaciones fueron las mezclas 2 y 3, las cuales se realizaron con adición de caucho en forma de tiras menores de 5 mm, obteniendo en estos ensayos una pequeña diferencia favorable a la mezcla 2, la cual presenta mayor presencia de tiras en su granulometría, por lo que podemos concluir que la adición de caucho en forma de tiras cortas puede tener una mejor respuesta a las deformaciones permanentes, lo que se puede ver reflejado en una reducción del ahuellamiento en las carpetas asfálticas.
- Evaluando los resultados de los ensayos realizados a la mezcla 3 (adición de caucho en forma de tiras) y a la mezcla 4 (adición de GCR) muestra que la forma de las partículas si altera el comportamiento de la mezcla asfalto-caucho, aunque en los ensayos de punto de ablandamiento, penetración e índice de penetración, la diferencia es mínima, lo que evidencia que tienen una consistencia y susceptibilidad a la temperatura semejantes. Pero en los ensayos de recuperación elástica y caracterización reológica con el DSR se presentan diferencias favorables a la mezcla con adición de caucho en forma de tiras (mezcla 4), se concluye que, manteniendo una misma gradación y proporción de caucho, si se agrega el caucho en forma de tiras cortas, se mejoran las propiedades elástica instantánea y elástica retardada responsables de la

recuperación de las deformaciones generadas al momento que el material es sometido a esfuerzos.

- Al utilizar el caucho de llantas usadas disminuye el efecto que estas causan al medio ambiente, por ende, se encontró una manera viable de usar este material, pues si se combina con el ligante, trae mejoras en las características de la carpeta asfáltica y así mismo ayuda a solucionar el problema de la disposición final de ellos, disminuyendo la contaminación que genera el mal manejo de las llantas usadas en el país.

8 RECOMENDACIONES.

- Para encontrar la gravedad específica en cauchos, se recomienda que se realice con el frasco de Le Chatelier, usando como líquido de ensayo alcohol, pues por su densidad permite que las partículas de caucho no queden flotando en la superficie del líquido.
- Se recomienda ampliar esta investigación realizando pruebas a la mezcla asfáltica, para confirmar los resultados de la caracterización del ligante asfáltico realizados en la presente investigación, adicionalmente se puede realizar el ensayo de Recuperación Elástica Para Diferentes Esfuerzos (MSCR, Multiple Stress Creep Recovery) el cual se encuentra especificado bajo la norma (AASHTO-TP70, 2013), para asfaltos envejecidos y con adición de polímeros.
- Debido al comportamiento inusual del ángulo de fase presentado en todas las pruebas realizadas al asfalto-caucho con adición de tiras largas entre 5 y 15 mm (mezcla 1) se recomienda realizar una investigación que corrobore los resultados obtenidos en esta investigación a diferentes temperaturas y frecuencias de carga el cual se puede observar en las tablas 13 y 14, donde el ángulo de fase presenta un comportamiento inverso al esperado al aumentarse la temperatura, con mayor proporción a bajas frecuencias de carga.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Resolución No.1326. (2017). *Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, República de Colombia.
- AASHTO-TP70. (2013). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. United States.
- Agustín , E. (14 de Septiembre de 2012). Historia de la Llanta. *El comercio*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/deportes/carburando/historia-llanta.html>
- Asphalt institute. (1972). *Manual del Asfalto*. (M. Velásquez, Trad.) Bilbao, España: Ediciones Urano.S:A.
- Asphalt Institute. (2011). *The asphalt binder handbook* (1st edition ed.). United States: Asphalt institute.
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt binder testing* (3ra Edición ed.). United States: Asphalt Institute.
- ASTM-D113. (1999). *Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials*. Estados Unidos: AASHTO.
- ASTM-D6114. (1997). *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. Estados Unidos: AASHTO.
- Díaz Claros, M., & Castro Celis, L. C. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*. Trabajo de grado para el título de Ingeniero Civil, Universidad Santo Tomás, Ingeniería civil, Bogotá.
- E-asphalt*. (2002). Obtenido de El site de asfaltos en internet: <https://www.e-asphalt.com/superpave/index.html>
- Gómez E, L. (16 de Enero de 2016). Comienza la era de vías que se harán con llantas usadas. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16483926>
- INV-Articulo-410. (2013). *Suministro de cemento asfáltico*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-Articulo-413. (2013). *Suministro de cemento Asfáltico modificado con grano de caucho reciclado*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-Articulo-450. (2013). *Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.

- INV-E-307. (2013). *Densidad del Cemento Hidráulico*. Colombia: Instituto nacional de Vías.
- INV-E-701. (2013). *Toma de muestras de materiales Bituminosos*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-E-702. (2013). *Ductilidad de los materiales asfálticos*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-E-706. (2013). *Penetración de los materiales bituminosos*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-E-707. (2013). *Densidad de materiales bituminosos, sólidos y semisólidos (método del picnómetro)*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-E-712. (2013). *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- INV-E-724. (2013). *Índice de Penetración de los materiales bituminosos*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- Mejía Alzate, J. A. (2016). *Caracterización y análisis de posibilidades tecnológicas para la apropiación del caucho a partir de llantas usadas en el desarrollo de nuevos productos*. Trabajo de grado especialización en gestión de la innovación tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de ingenierías, Medellín-Colombia.
- Morea, F. (6 de Septiembre de 2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas, Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga*. Tesis Presentada para el grado de Doctor en ingeniería, Universidad Nacional de la plata, Buenos Aires-Argentina.
- Oliver, J. W., & Tredea, P. F. (1998). *Relationship between Asphalt Rut Resistance and Binder Rheological Properties*. United States.
- Orozco Terán, R. (2011). *Evaluación de la oxidación del asfalto mexicano*. Departamento de Asfaltos de Quimikao, México. Obtenido de http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/13.pdf
- Quiñones Sinisterra, F. (2014). *Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas*. Tesis doctoral, Universidad de Brasília, Brasília-Brasil.
- Ramírez Villamizar, A., Ladino Rubio, I. L., & Rosas Ramírez, J. P. (2014). *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED en la ciudad de Bogotá*. Trabajo de Grado Especialización en Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Salamanca Arce, G. J. (2017). *Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos*. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

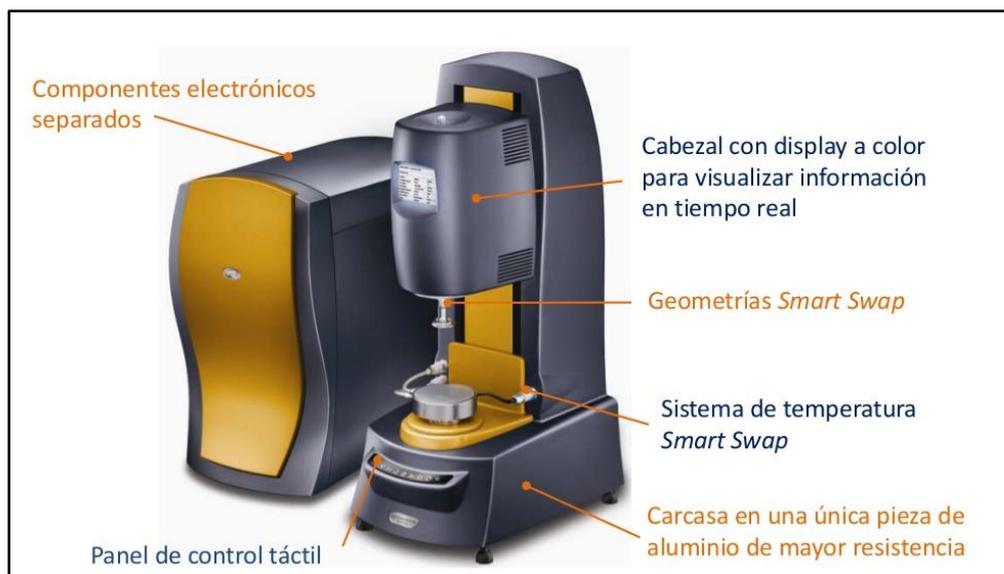
- Salazar Delgado, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano. *LanammeUCR*.
- Soca, R. (2004). *La fascinante historia de las palabras*. Titivilus.
- Sol Petroleo*. (2010). Obtenido de Fisicoquímica del Asfalto:
www.solpetroleo.com/fisico-quimica-del-asfalto
- Valera, J. (12 de marzo de 2014). *Venelogia*. Obtenido de Como se produce el asfalto:
<https://www.venelogia.com/archivos/9685/>
- Vargas Jimenez, N. E., & Rodríguez, F. A. (2014). *Diagnóstico de las condiciones superficiales y evaluación del comportamiento estructural del pavimento de las vías construidas por el instituto de desarrollo urbano con asfalto modificado con caucho reciclado de llanta (GCR), en las localidades de Fontibó*. Tesis de Pregrado, Universidad militar de nueva Granada, Facultad de ingeniería civil, Bogotá.
- Vega Zurita, D. S. (2016). *Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico*. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero Civil, Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador.

10 ANEXO

10.1 Manual de manejo del reómetro de corte dinámico.

10.1.1 Partes del reómetro

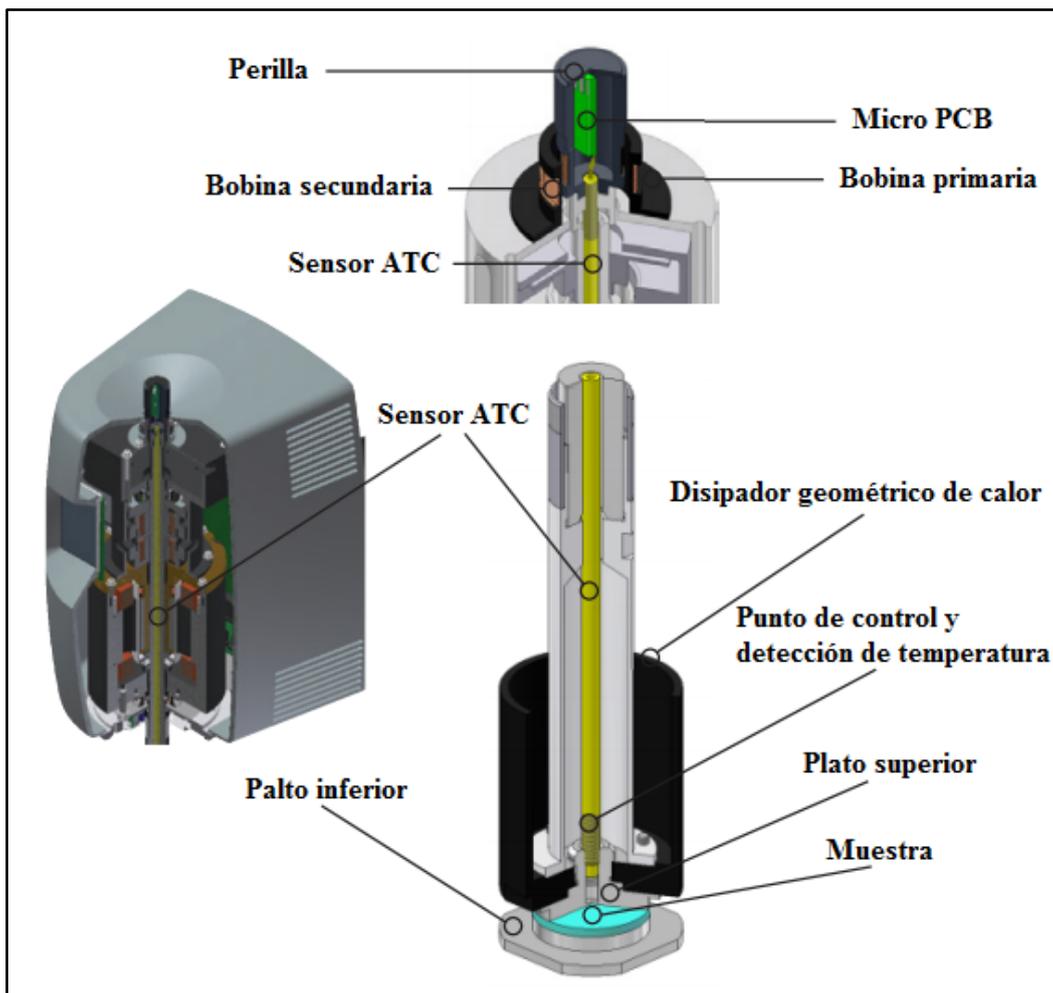
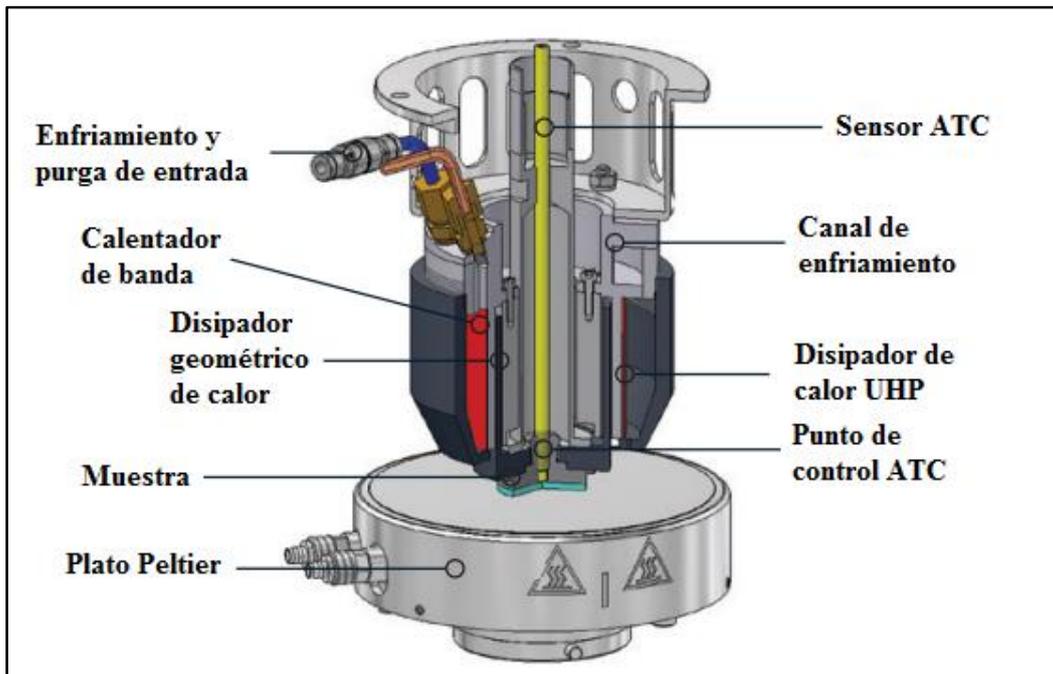
Partes generales del reómetro:



Como el reómetro tiene muchas funciones, para el análisis reológico se no se usa la geometría smart swap sino un mecanismo regulador de temperatura superior que controla la temperatura conocido por sus siglas en ingles como UHP, el cual se muestra a continuación:



El inferior (plateado) es conocido como plato Peltier y se encarga de regular la temperatura del plato inferior, el UPH (negro) se muestra en detalle a continuación:



10.1.2 Como prender el equipo.

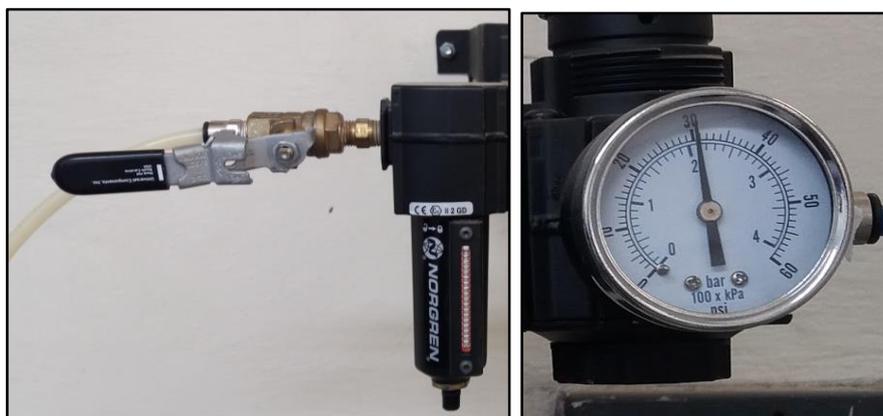
1. Conectar el compresor a un enchufe de 220 V
2. Prender el compresor, se deja perilla en AUTO (si la presión se encuentra a más de 5 PSI el compresor no va a cargar al instante que se prende)



3. Abrir la llave de presión Azul que está en el compresor



4. Abrir la llave de presión negra (rápidamente) y esperar a que esta se estabilice en 30 PSI antes de prender el reómetro



5. Revisar el nivel y color del agua (si es necesario completar o cambiar el agua por una nueva con adición de líquido anti algas) antes de prender el thermo cube.



El thermo cube inicialmente reporta la temperatura ambiente del agua que contiene.

- Se puede controlar la temperatura a la que se desea mantener el agua para que sea menor que la temperatura de ensayo, subiéndola o bajándola con los botones *up* o *down*.

➤ Una vez señalada la temperatura de enfriamiento el thermo cube seguirá marcando la temperatura del agua en su interior, para lograr bajarla se debe presionar el botón *start/stop*, en ese momento al inicio de la pantalla aparecerá el signo (–, menos) que indica que la temperatura está bajando, mientras el símbolo sea un (*, asterisco) la temperatura no está siendo modificada por el regulador de temperatura.

➤ Cuando se alcanza la temperatura de ensayo se puede volver a presionar el botón *start/stop*, pues ya no es necesario que enfrié el agua

Nota: para lograr bajas temperaturas (5 °C) es aconsejable adicionar alcohol al agua del thermo cube, para temperaturas menores a esta es recomendable usar nitrógeno líquido como enfriador.

6. Quitar el seguro del regulador de temperatura superior (UHP) del reómetro.



7. Aflojar la perilla de la parte superior del cabezal del Reómetro 1/4 de giro para evitar que el reómetro genere error cuando se conecta con el software.

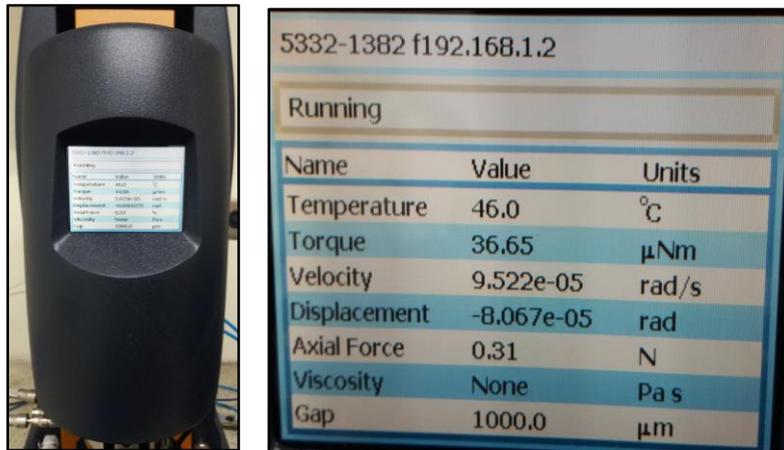


El tornillo de la parte superior también se debe aflojar para poder subir el cabezal del reómetro en los casos cuando no responde a la orden de subir.

8. Prender el reómetro de la parte de atrás de la unidad central de proceso.



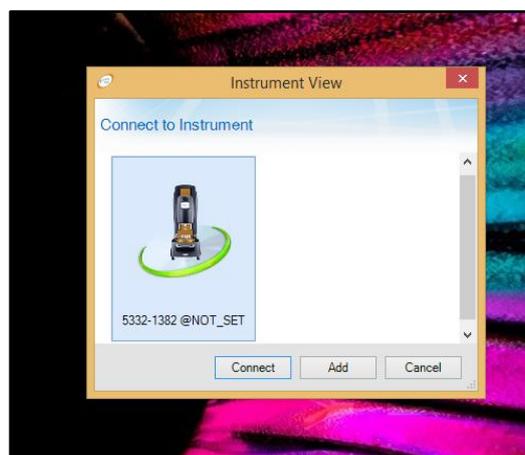
9. Esperar a que prenda el display y verificar que no genere error, sino se apaga y se vuelve a encender el equipo, verificando que la perilla superior del cabezal esté floja.



10. prender el monitor
11. Para manejar el reómetro abrimos el software TRIOS, ubicado en el escritorio.



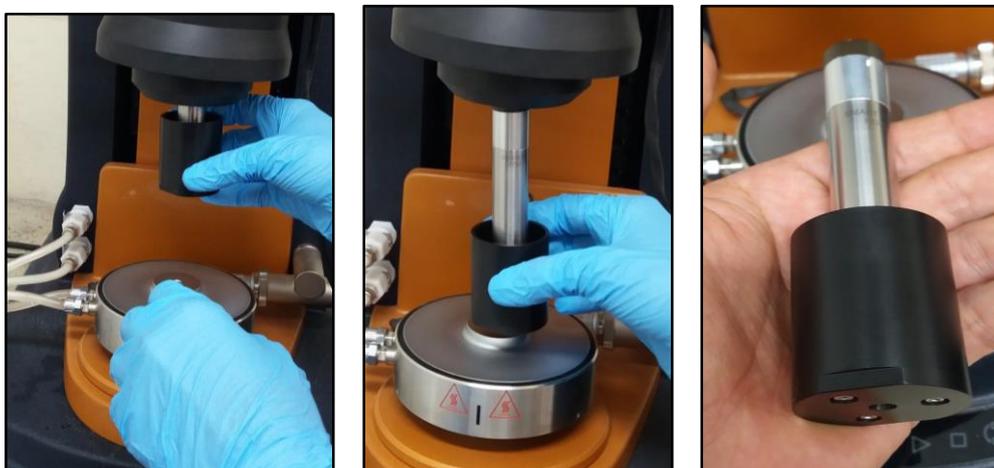
12. En ese instante despliega una interfaz donde damos clic en la opción *connect*.



10.1.3 Calibración del instrumento.

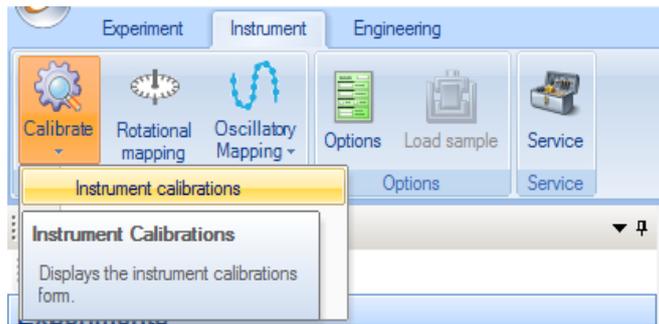
Lo descrito a continuación solo se realiza cuando se quita el disipador de calor geométrico que está atornillado al cabezal (para realizarle la limpieza o por otro motivo), de lo contrario se omite la calibración de instrumento y se procede a realizar la calibración geométrica descrita en el ítem 10.1.4. El cilindro se debe retirar cuidadosamente sin tocar las paredes que lo rodean, pues esto puede dañar los sensores del equipo, por tal razón debe salir completamente de manera vertical antes de realizar movimientos horizontales, es recomendable asentarlo en el plato Peltier y se sube el cabezal.

Para realizar esta calibración se debe atornillar el disipador geométrico de calor en el cabezal sin los platos superior e inferior (chequear que este completamente apretado).

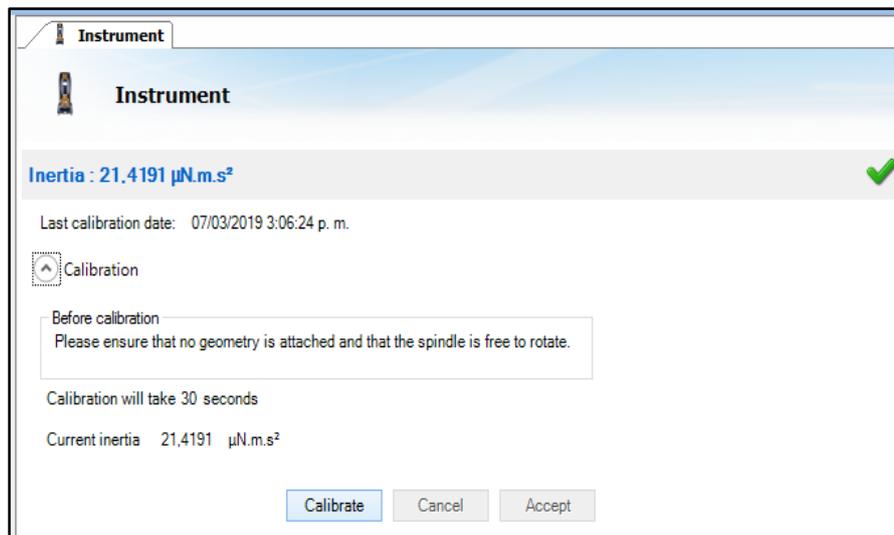


La realización de la calibración del instrumento se hace así:

1. Ir a la opción *Instrument*.
2. Luego se dirige la opción *calibrate*.
3. Se da clic en la barra *instrument calibrations*.



4. A continuación, aparecen las siguientes opciones de calibración donde nos dirigimos a *inertia*.
5. Se despliega el contenido oculto en la opción *calibration* dando clic en la flecha desplegable.
6. Posteriormente se da clic en la opción *calibrate* y se espera mientras realiza el proceso sin los platos (30 s).



7. Comprobar que haya menos de 1 % entre la última lectura y la lectura actual, de lo contrario aceptar el resultado y volver a realizar el ensayo.

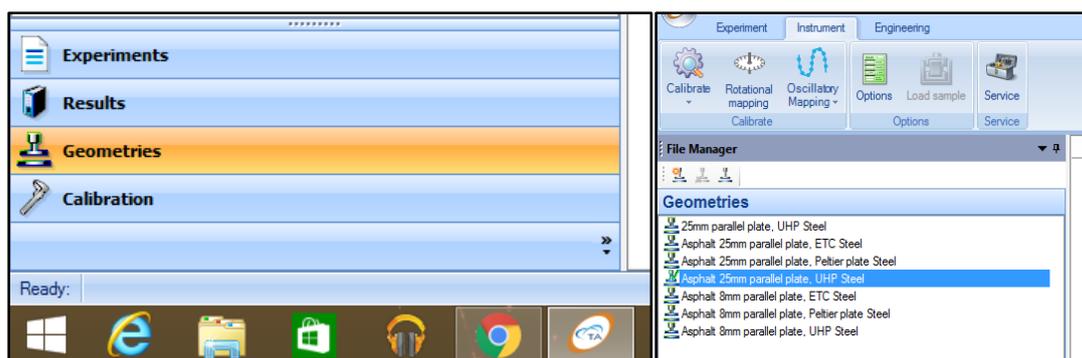
10.1.4 Calibración geométrica

Siempre se debe hacer la calibración geométrica, independientemente si se hace o no la calibración del instrumento, para esto realizamos

1. Una vez terminada la calibración del instrumento (si era necesario) se deben seleccionar los platos con los que se va a realizar el ensayo y se colocan en el reómetro.



2. Después se da clic en *geometries*, con lo cual se abren las opciones de geometría de los platos que se pueden usar.



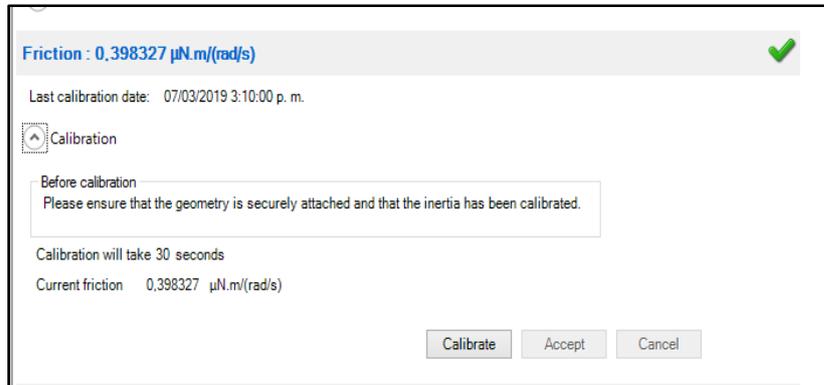
Nota: Los platos que tiene el reómetro de la Universidad del Cauca son:

Asphalt 25 mm parallel plate, UHP steel & Asphalt 8 mm parallel plate, UHP steel.

3. Se calibra primero la inercia (*inertia*), dando clic en el botón *calibrate*, el nuevo resultado no debe de variar en más del 1% respecto a la inercia actual (*current inertia*), se aceptan los resultados (*accept*) y en caso de una diferencia mayor se realiza una nueva calibración, se chequea y se aceptan los resultados nuevamente.

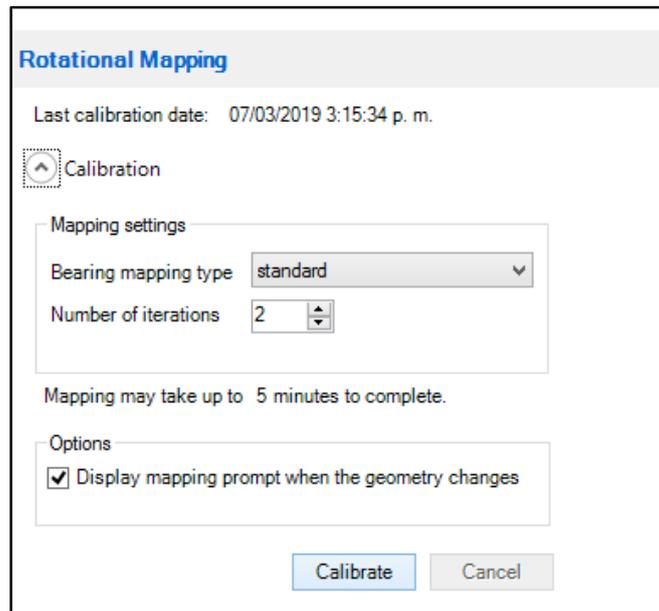


4. Se realiza la calibración de la fricción, igual que en proceso anterior el resultado de la nueva fricción (*new friction*) tampoco deben generar un error mayor del 1% respecto a la fricción actual (*current friction*), se aceptan los resultados y en caso de superar el 1% se realiza una nueva calibración, se chequea y se aceptan los datos.

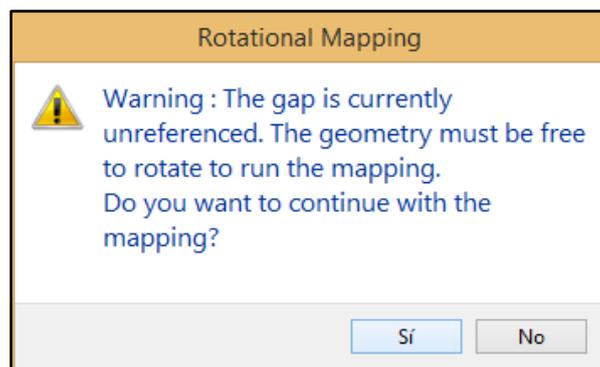


No se realiza calibración en *gap temperature compensation* y se avanza al siguiente paso.

5. Vamos a *rotational mapping*, desplegamos el contenido oculto y damos clic en *calibrate* (este proceso tarda 5 minutos).

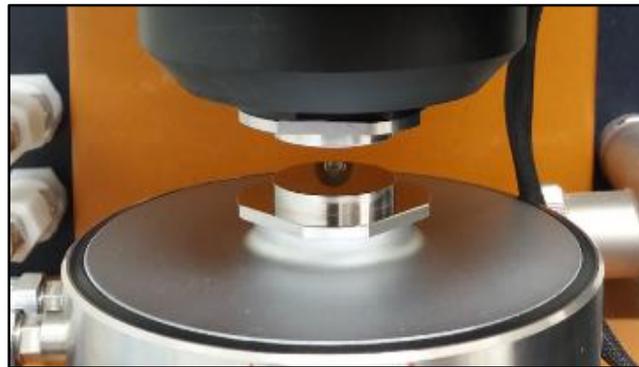
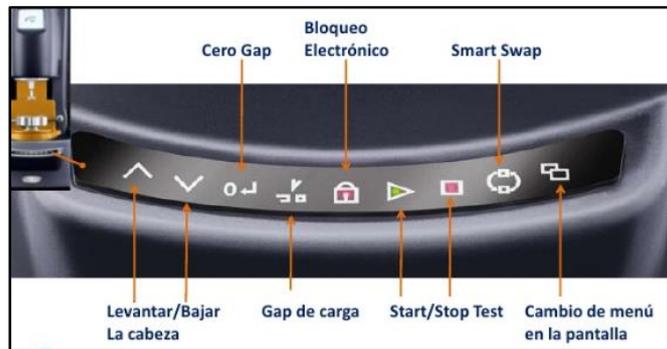


6. A continuación, se abre una nueva ventana, se da clic en sí, de esta manera se termina la calibración geométrica.

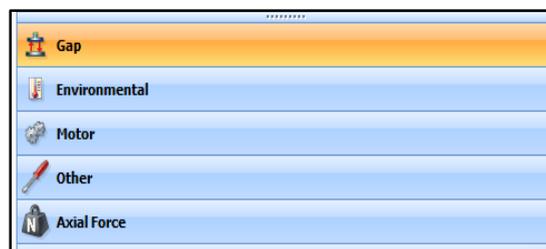


10.1.5 Lectura de zero gap (separación cero)

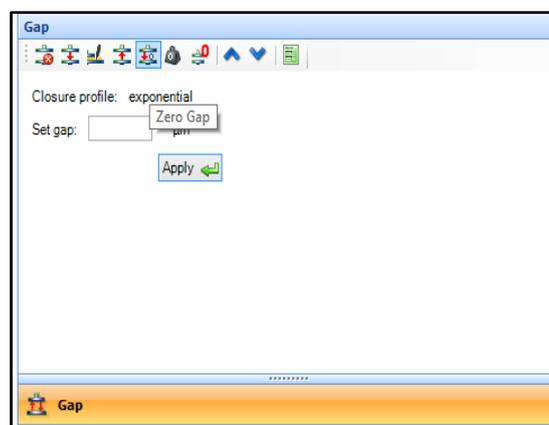
1. Inicialmente, con ayuda de los comandos del reómetro se baja el plato superior hasta una distancia cercana.



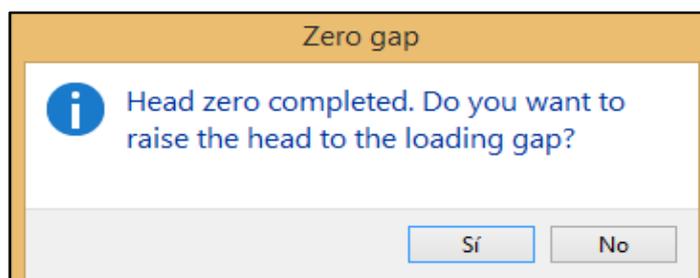
2. Luego se da clic en la opción gap en la parte inferior derecha de la pantalla.



3. Se modifican las opciones superiores y se busca opción *zero gap* (separación cero) y se da clic.



4. Se espera hasta que termine de determinar la separación cero entre los platos y aparece una nueva ventana.
5. Se da clic en *sí* y automáticamente sube el plato superior.



10.1.6 Preparación de la muestra

La muestra se debe calentar a una temperatura a la cual alcance un estado fluido, para que se pueda vaciar fácilmente en el molde (se recomienda no sobrepasar en más de 110 grados el punto de ablandamiento), después de realizado el vaciado en el molde se espera a que la muestra alcance temperatura ambiente sin que pase un tiempo prolongado, pues se pueden generar errores en los resultados.

10.1.7 Colocación de la muestra en el reómetro

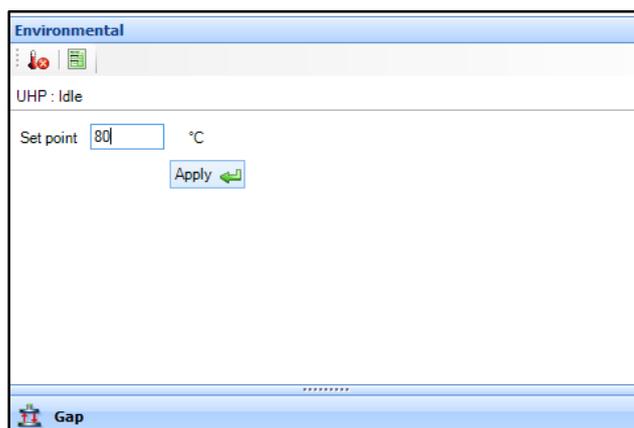
Después de determinar la separación cero entre los platos, se va a la opción *environmental*.



1. Donde se asigna una temperatura para que los platos y el ligante tengan una buena adherencia, (para asfaltos modificados se recomienda 80 °C y para asfaltos sin

modificar 60 °C); estas temperaturas dependen de la susceptibilidad a la temperatura y del tipo de asfalto que se esté trabajando.

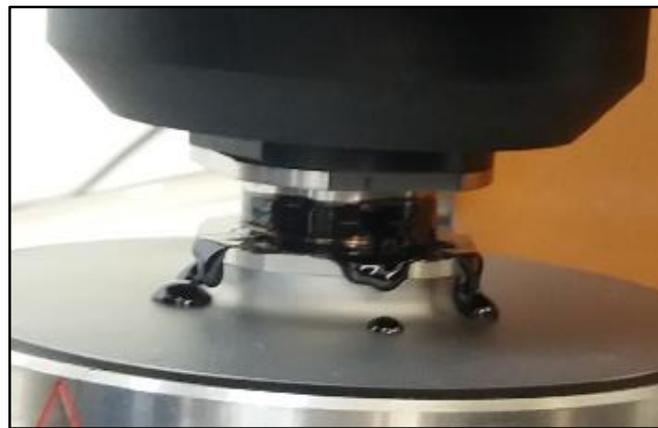
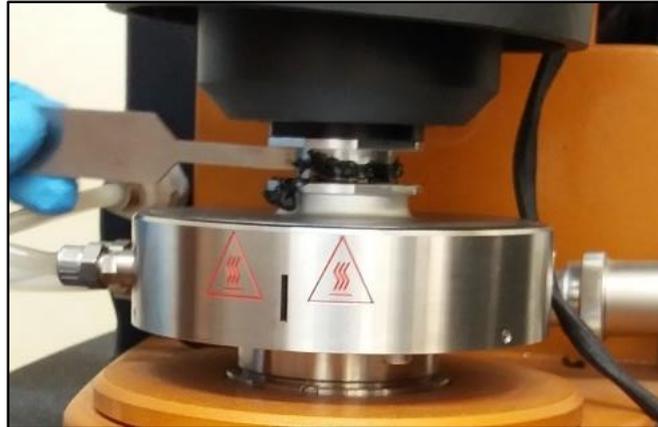
2. Se señala la temperatura y dando clic en *Apply* se inicia a modificar la temperatura de los platos.



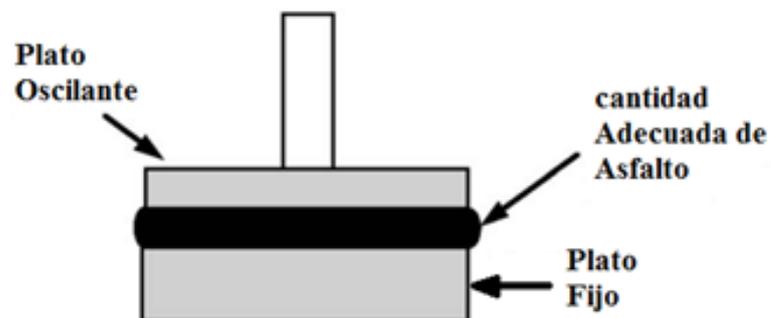
3. se espera a que llegue a la temperatura indicada.
4. Después se coloca la muestra entre los platos.
5. Se regresa a la opción *gap* donde se señala el espesor de engrase para la muestra o la separación entre los platos (para los platos de 25 mm se usa un espesor de 1050 micras y para los platos de 8 mm se usa un espesor de 2100 micras).
6. Se da clic en aplicar y el reómetro inicia a acercar el plato superior a la muestra.

10.1.8 Enrase

1. Para realizar el engrase se debe calentar la espátula de engrase y se verifica si los platos ya tienen la separación de engrase indicada anteriormente
2. luego se pasa la espátula caliente por el borde de la muestra ubicada entre los platos, cuidando que esta quede completamente horizontal para no generar errores en la medición de datos y entrega de resultados.



3. Finalizado el ensayo se elimina el exceso en la separación (*gap*), llevando los platos a la separación deseada para el ensayo (1000 μm para platos de 25 mm y 2000 μm para platos de 8 mm), con esto la muestra se hincha en los extremos obtenido de esta manera una muestra adecuada para el ensayo, pues las mediciones cambian si se hacen con otras condiciones.

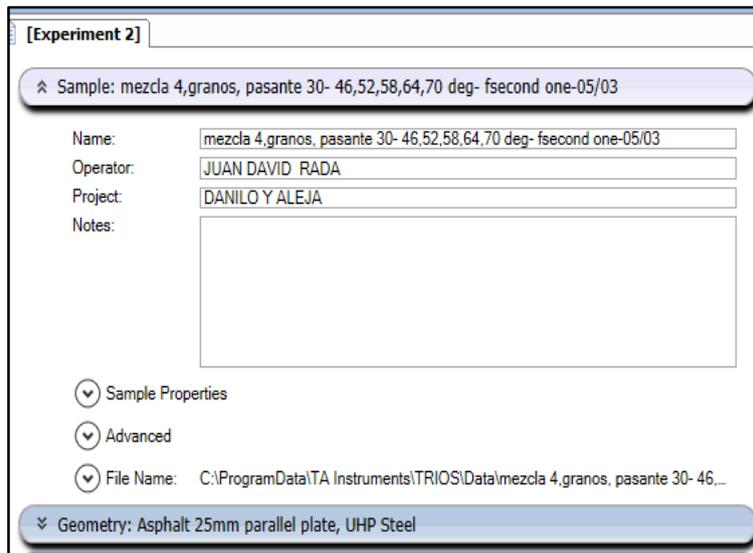


4. Se baja el cilindro (negro) para que rodee los platos con la muestra y evitar alteraciones por el ambiente.
5. Se lleva la muestra a la temperatura de inicio del ensayo en la opción *environmental*, siguiendo el procedimiento descrito en el **item 10.1.7**. Para esto se debe activar el thermo cube.



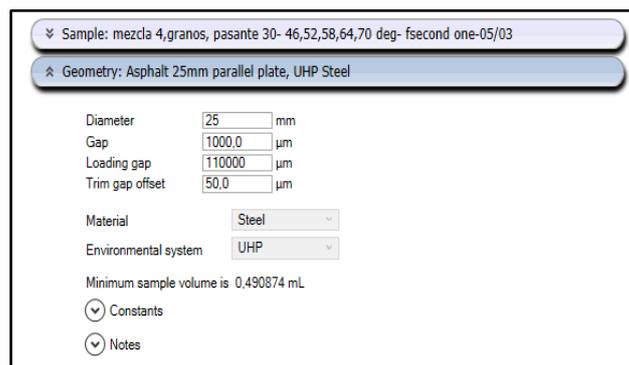
10.1.9 Insertar parámetros de ensayo.

1. Para ingresar los parámetros del experimento se entra en la opción *experiments*, inicialmente el programa abre el ultimo archivo en el que se trabajó, por lo tanto, se despliega la primera pestaña (*sample*), después se procede a:
 - Cambiar el nombre del ensayo (*Name*).
 - Cambiar el nombre del operador (*Operator*).
 - Especificar el proyecto que se va a realizar (*Project*).
 - Si se desea se adicionan notas.
 - Se quiere se cambia la ubicación donde se guardará el archivo en la opción *file name*.



2. Luego se pasa a la siguiente pestaña (*geometry*) donde se cambian si se quiere los siguientes parámetros:

- En la primera casilla se indica el diámetro (*diameter*) del plato que se esté usando en el ensayo
- En la segunda casilla se coloca la distancia (*gap*) a la cual se realiza el ensayo, en este caso para el plato de 25mm se pone a 1000 micras y con los platos de 8mm 2000 micras. Las otras casillas no cambian.

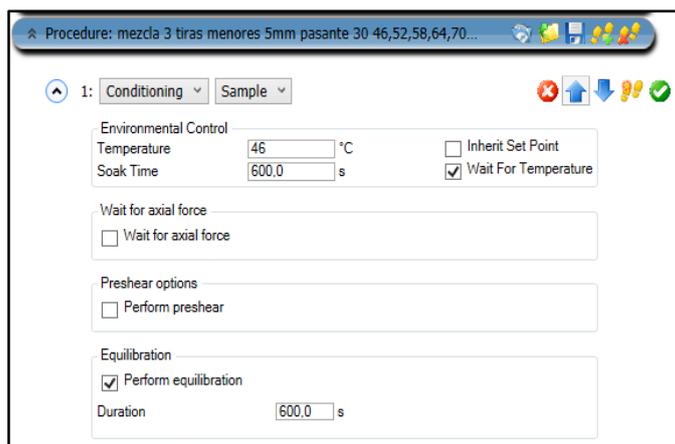


Luego se despliega la pestaña *procedure* donde se cambian los siguientes parámetros:

3. Paso 1, *conditioning sample* (Condiciones de la muestra)

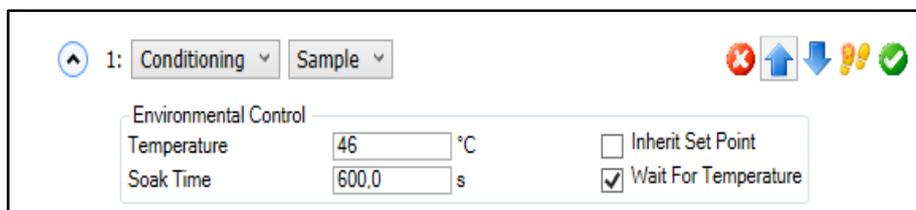
En este paso se estabilizan las condiciones de la muestra de ensayo, para esto se modifican los siguientes parámetros:

➤ Desplegamos la casilla *conditioning* e inmediatamente se abre la siguiente interfaz:

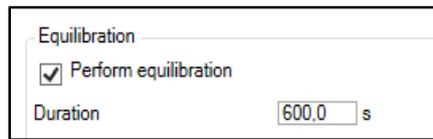


➤ En la primera casilla de temperatura (*Temperature*), ponemos la temperatura a la que se va a realizar el ensayo, y se activa la opción *Wait For Temperature*, para que el reómetro inicie la operación al momento que alcance la temperatura deseada.

➤ En la casilla *soak time*, usamos un tiempo de 600 s, para lograr una estabilización de la temperatura toda de la muestra de ensayo, para tener resultados confiables.



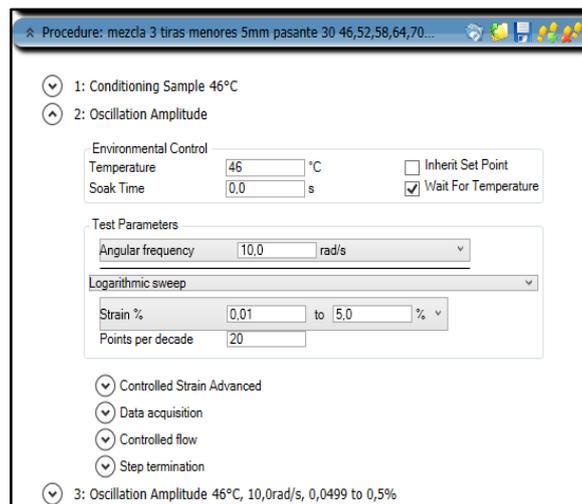
➤ En la opción *equilibration* se habilita la opción *perform equilibration* y se asigna una duración de 600 s, para que toda la muestra de ensayo tenga una temperatura equilibrada y no se generen errores por cambios de temperatura dentro de la muestra.



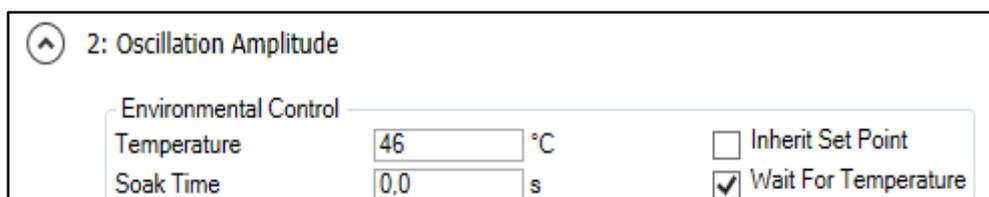
4. Paso 2, *Oscillation Amplitude I* (primera oscilación de amplitud, %)

En este paso el reómetro realiza una variación de la amplitud (%) para determinar en qué rango puede variar amplitud (o tensión de corte) en la que los valores de módulo complejo no varían, es decir la muestra llega al límite elástico:

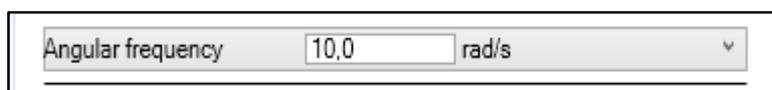
➤ Primero desplegamos la opción *Oscillation Amplitude* e inmediatamente se despliega la siguiente interfaz:



➤ En la primera opción *environmental control* se indica la temperatura a la que se va a realizar el ensayo, como ya se realizó el control de las condiciones de ensayo la opción *soak time* se deja en ceros y se activa la opción *wait for temperature*

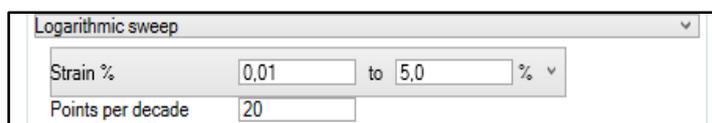


➤ En la tercera casilla *Angular frequency* se pone 10 rad/s que es la que especifica la norma INVIAS, la cual en este paso se mantiene constante.



A screenshot of a software interface showing a control for 'Angular frequency'. The text 'Angular frequency' is on the left, followed by a text input field containing the value '10,0', and then the unit 'rad/s'. A small downward arrow is visible on the right side of the control.

- En la siguiente opción se indica un valor de tensión de corte en el que se desea que se realice el procedimiento, para determinar el rango elástico lineal, donde el módulo complejo no será afectado por las variaciones de tensión, en asfaltos sin envejecer el máximo puede estar entre 10 y 12 %, en asfaltos modificados se deben usar diferentes valores, dependiendo de las propiedades del ligante modificado, el cual se usa bajo criterio del operador.



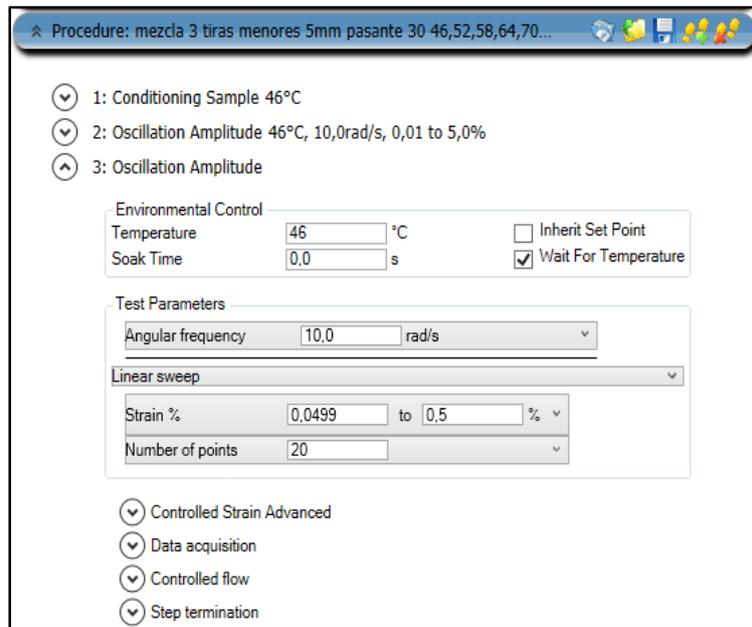
A screenshot of a software interface titled 'Logarithmic sweep'. It contains two rows of controls. The first row is 'Strain %' with a text input field containing '0,01', the word 'to', another text input field containing '5,0', and a percentage symbol with a dropdown arrow. The second row is 'Points per decade' with a text input field containing '20'.

- Y en la quinta casilla (*points per decade*), se indica la cantidad de puntos para los cuales se desea obtener los resultados.

5. Paso 3, *oscillation amplitude II* (segunda oscilación de amplitud)

En este paso se determina el valor del módulo complejo y el ángulo de fase en el estado elástico lineal a una frecuencia de 10 rad/s, con un promedio mínimo para 10 puntos como exigen las especificaciones INVIAS en la norma INV E 750 – 2013.

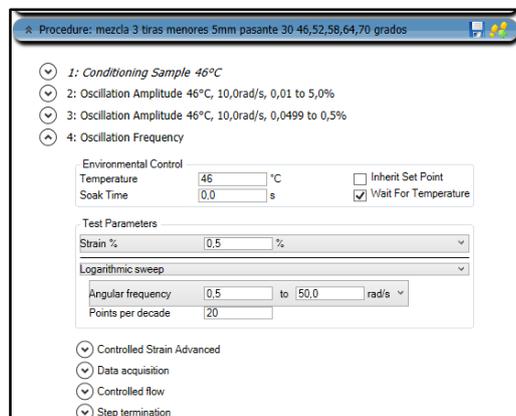
- En este paso se conservan los parámetros del anterior paso, exceptuando los valores de la tensión de corte (*Stain %*) y también, si se desea el número de puntos, la tensión de corte se debe mantener dentro del rango elástico lineal determinado en el paso anterior.



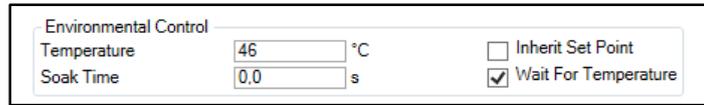
6. Paso 4, *Oscillation Frequency* (oscilación en la frecuencia o velocidad de carga de carga)

En este paso hace un barrido de frecuencias para determinar cómo se afectan las propiedades del ligante, con los resultados de este proceso se puede determinar la curva maestra del asfalto a diferentes temperaturas y adicionalmente se puede comparar el comportamiento del material a diferentes frecuencias de carga.

- Se despliega la opción *Oscillation Frequency* e inmediatamente se despliegan la siguiente interfaz:



- Se mantienen los parámetros de temperatura y tiempo.



Environmental Control

Temperature	46 °C	<input type="checkbox"/> Inherit Set Point
Soak Time	0,0 s	<input checked="" type="checkbox"/> Wait For Temperature

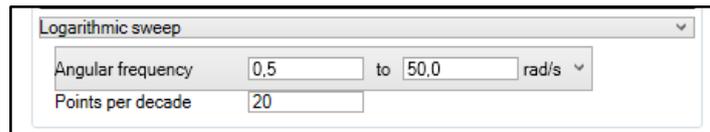
- Se da un valor de tensión de corte (*Strain %*) que este dentro del rango elástico lineal, el cual se mantendrá constante.



Test Parameters

Strain %	0,5 %
----------	-------

- Luego se da valores de inicio y final de oscilación de la frecuencia angular o frecuencia de carga (*Angular frequency*), estos son puestos a criterio del operador o dependen de las exigencias del propietario.

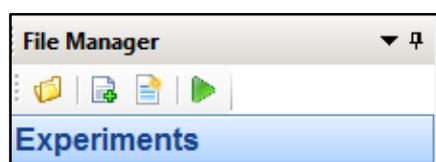


Logarithmic sweep

Angular frequency	0,5	to	50,0	rad/s
Points per decade	20			

A menos que la muestra falle (muestre valores ilógicos, raros o entre muy rápido al campo inelástico) en el paso 2 (*Oscillation Amplitude*), las pruebas se pueden repetir para la determinación de las características reológicas del asfalto. La eliminación, ubicación, duplicación y activación de los procesos se pueden hacer mediante estas opciones  , permitiendo modificar los parámetros de medida a una sola muestra, generalmente se hace para realizar mediciones a diferentes temperaturas. En caso de fallar la muestra se deberá repetir el ensayo usando un menor límite de amplitud.

Una vez determinados los parámetros de medición de las propiedades reológicas a seguir se da clic en el botón *play* (verde) para dar inicio a la medición de resultados.

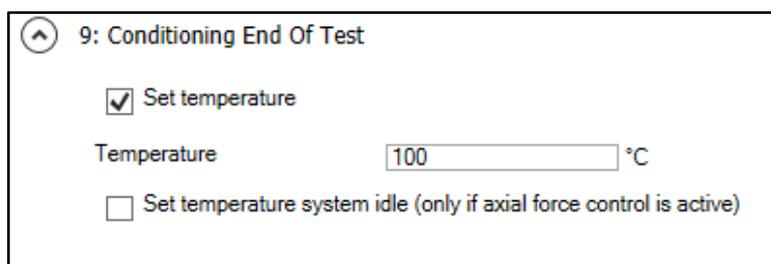


Con esto el programa nos lleva a la opción *results*, donde se puede hacer seguimiento a la evolución de la muestra en cada paso.

Nota: los parámetros de cada paso se pueden cambiar después haber iniciado el ensayo, siempre y cuando el paso que se vaya a modificar no haya sido realizado o se esté realizando, en este caso se bloquean y no se pueden modificar, lo que se puede evidenciar si su título tiene un color más claro. Para realizar el cambio de parámetros es necesario volver a la opción *experiments* ubicada en la esquina inferior izquierda de ventana que se abre en el centro de la pantalla.

7. Ultimo paso, *conditioning end of test*

Después de realizar la toma de datos a diferentes temperaturas, el paso final consiste en llevar la muestra a una temperatura alta, donde se pueda retirar fácilmente de los platos usando servilletas.

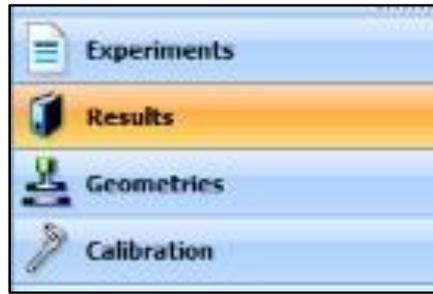


The screenshot shows a software window titled "9: Conditioning End Of Test". It contains three main elements: a checked checkbox labeled "Set temperature", a text input field for "Temperature" with the value "100" and a "°C" unit indicator, and an unchecked checkbox labeled "Set temperature system idle (only if axial force control is active)".

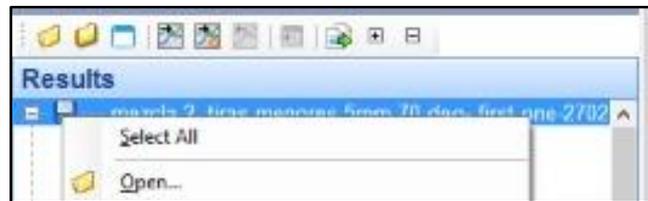
10.1.10 Lectura de resultados

Los resultados se guardan automáticamente en el lugar donde se seleccione en el paso 1. Para visualizar los resultados de una o varias pruebas:

1. Se abre a la opción *results*.



2. Luego vamos damos clic en abrir (*open*) que nos lleva al almacenamiento del equipo y se busca el lugar donde se hayan guardado los resultados.

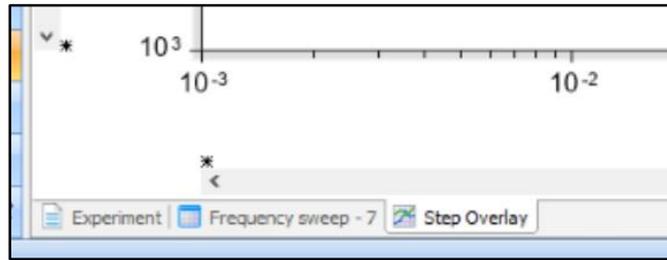


3. Una vez seleccionados los ensayos requeridos se da clic en aceptar y se despliegan los resultados de cada ensayo realizado.

4. Después del anterior paso se abren los datos de cada ensayo, los cuales se abren dando clic en el resultado que se desee mirar.

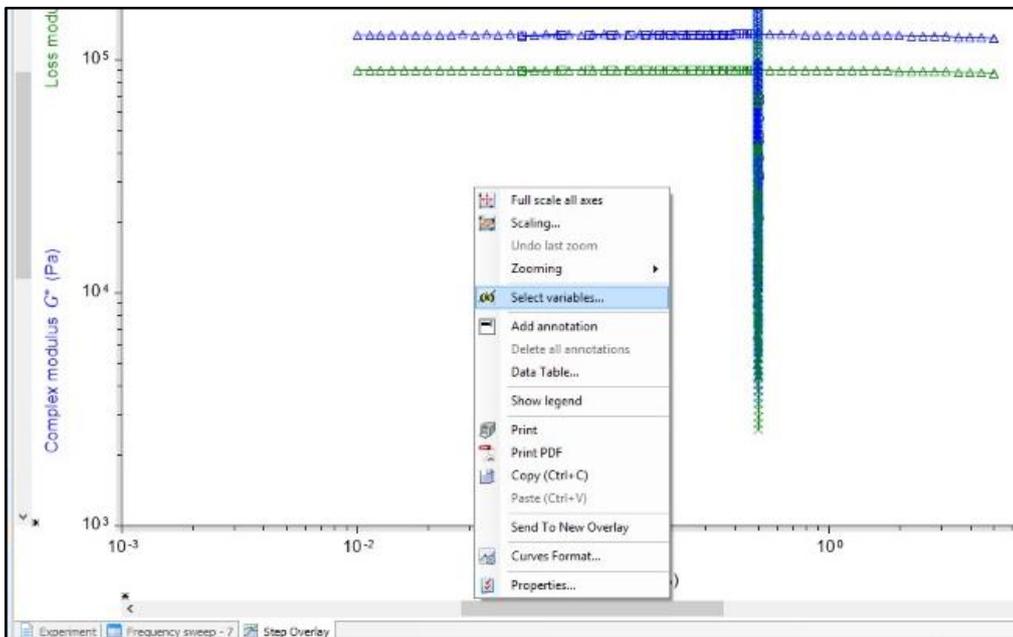


La lectura de los resultados se muestra en tablas o gráficas, las cuales se pueden ver cambiando de posición en la parte inferior izquierda: de la ventana central que abre el programa:

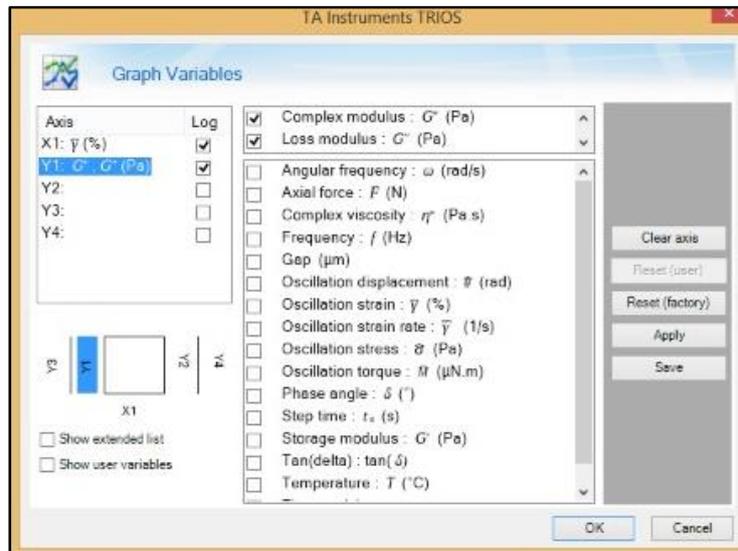


Donde se puede seleccionar que valores y parámetros se desea ver, para esto:

5. Dar clic derecho sobre la ventana.
6. Vamos a la opción *select variables*.



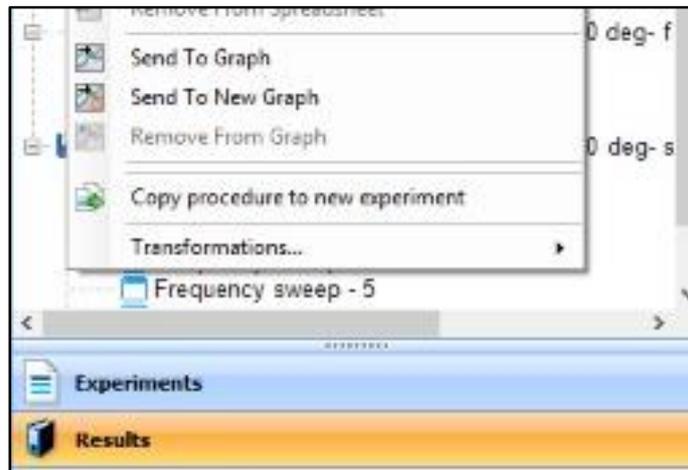
Cuando se está visualizando una gráfica se abre la siguiente ventana:



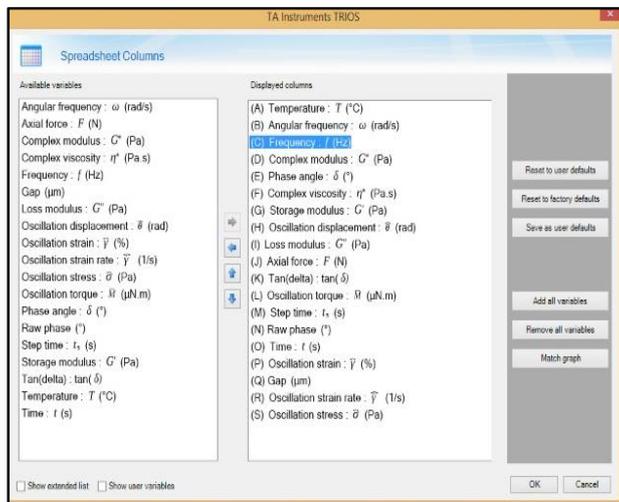
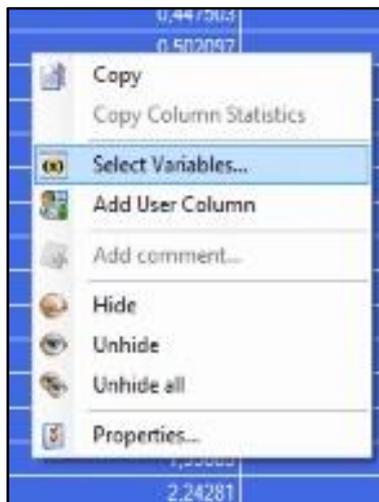
Donde se puede seleccionar la variable y el eje en el cual deseamos graficarla. Una vez seleccionadas las variables en su respectiva opción de eje, damos clic en ok para obtener la representación gráfica.

Para visualizar los resultados de varios ensayos, por ejemplo, los graficas de un mismo ligante en diferentes pruebas a una misma temperatura, para esto nos ubicamos en la barra de resultados de ensayos y:

1. Se selecciona el ensayo que se desea visualizar.
2. se da clic derecho sobre los experimentos.
3. Si es la primera grafica que se va a abrir se selecciona la opción *send to graph*.
4. Si es la gráfica adicional seleccionamos en la opción *send to new graph*.



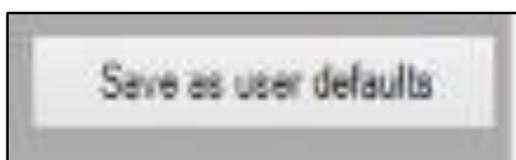
Si se están visualizando los resultados en una tabla, igual que al estar en la opción grafica damos clic derecho sobre la tabla y vamos a la opción *set variables*, la cual nos abre la siguiente ventana:



Donde podemos escoger cuales variables se muestran en la tabla, puede ser uno a uno o todos a vez, además con las flechas ubicadas en el centro de la ventana se puede modificar el orden en el cual se mostrarán en la tabla:

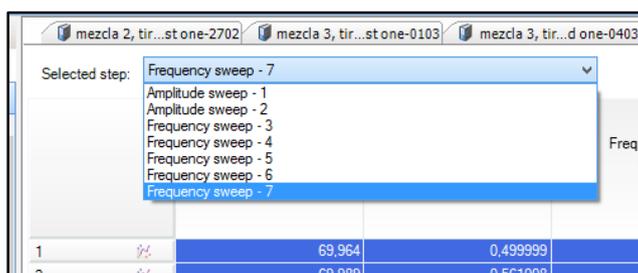


esto se puede guardar para que siempre aparezcan por defecto en ese orden si se lo desea, dando clic en la opción *save as user defaults*:



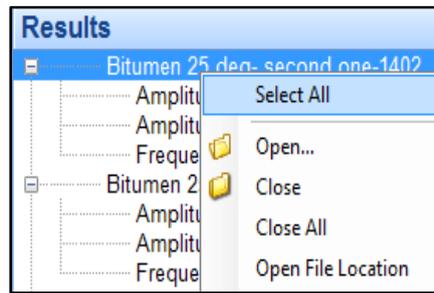
finalmente se da clic en el botón *ok* y aparecen los valores en la tabla en el orden indicado.

Se pueden seleccionar los resultados de la prueba realizada en cada ensayo que se desea mirar, seleccionándolo en la barra desplegable *selected step*.

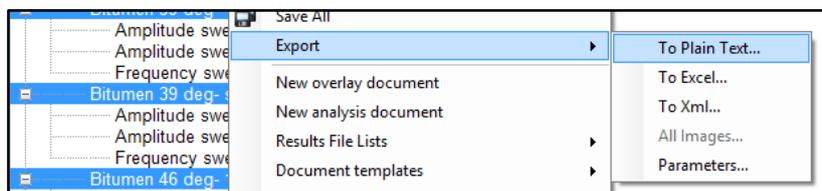


10.1.11 Exportación de datos.

para realizar el proceso de exportación de datos se puede usar dos métodos, el primero consiste en seleccionar todos los ensayos que se deseen exportar seleccionando un ensayo y dando click derecho indicando la opción *select all*:



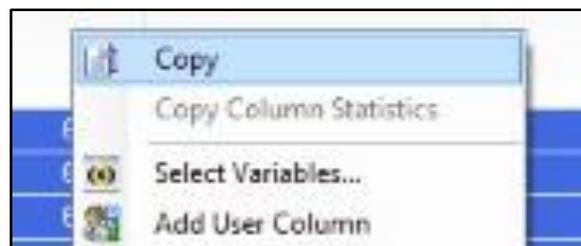
Después de esto se da clic derecho e indicar a la opción *export*:



Donde da la opción del archivo que se desea crear con los resultados de los ensayos.

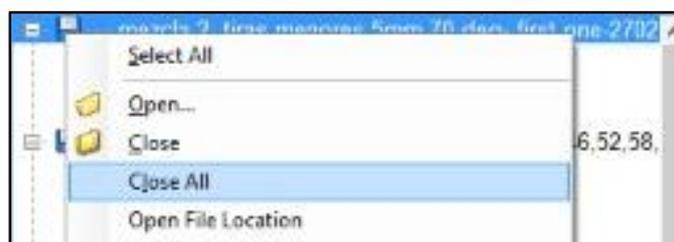
La otra opción con la que se pueden exportar los datos es:

1. Visualizar la tabla de resultados
2. Seleccionar las columnas que se desee exportar.
3. Dar clic derecho sobre la sección y seleccionar la opción *copy*
4. Ir al sitio que se desee copiar los datos y pegarlos.



10.1.12 Cerrar resultados de ensayos.

1. Seleccionamos el ensayo que se desee cerrar.
2. damos clic derecho y seleccionamos la opción *close*, si se desea cerrar todos los ensayos presentados se selecciona *close all*,



10.1.13 Cerrar el programa y apagar el equipo

1. Se chequea que la temperatura de los platos limpios sea baja, para poder quitarlos con facilidad.
2. Se cierra el programa, si hay uno o varios archivos abiertos el programa pregunta si desea guardar los cambios, se da clic en *yes* si hay uno o en *yes to all* si hay varios archivos abiertos.



3. Se retiran cuidadosamente los platos
4. Se apaga el reometro y se pone la tapa seguro en el cilindro oscilante.
5. Se apaga el thermo cube.
6. Se cierra la perilla del regulador de temperaturas.
7. Se apaga y desconectan el compresor y el regulador de corriente.