

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO NORMAL Y ASFALTO
MODIFICADO CON CAUCHO POR MEDIO DE ENSAYOS DINÁMICOS

LIZSAN ESTEFHANY OROZCO ZAMBRANO
ALBERT MAURICIO ALFONSO FLÓREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO NORMAL Y ASFALTO
MODIFICADO CON CAUCHO POR MEDIO DE ENSAYOS DINÁMICOS

LIZSAN ESTEFHANY OROZCO ZAMBRANO

ALBERT MAURICIO ALFONSO FLÓREZ

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

PhD. M.Sc. Ing. Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

En primer lugar agradezco a Dios por iluminar mi camino cuando todo parecía perdido, por darme la paciencia, el conocimiento y el valor para luchar por alcanzar mi meta.

En segundo lugar, agradezco a mi madre, Ludy Inés Zambrano Guerrero, porque a lo largo de mi vida la he visto crecer, ser un modelo para mí, por su lucha incansable, sus enseñanzas, su apoyo incondicional y su amor sincero; por ser más que mi mamá, mi amiga y mi padre también.

A mi hermana, María Paula Hernández Zambrano, le agradezco por acompañarme en mis noches de desvelos, en los arduos días del trabajo de grado, por alentarme en los momentos difíciles y darme su cariño siempre.

A Rosbel Leandro Andrés Bohórquez Cárdenas por su apoyo, su ayuda y compañía en cada momento de mi carrera y mi vida, por ser la persona paciente y cariñosa que me ha tendido la mano a pesar de la dificultad de las circunstancias.

A mis abuelitos y toda mi familia por sus buenos deseos y dar sabor a mi vida con su alegría.

Finalmente, mi eterna gratitud al Doctor Eduardo Castañeda Pinzón por su orientación durante el desarrollo de este proyecto y a los auxiliares del laboratorio de la escuela de ingeniería civil por su ayuda y colaboración.

*Gracias a todos por su aporte a este trabajo y a mi vida.
Lizsan Estefhany Orozco Zambrano.*

DEDICATORIA

A Dios por darme fortaleza, sabiduría y salud durante toda mi vida y permitirme culminar este trabajo de grado.

A mis padres por su apoyo y colaboración en todo momento.

A mi abuela Cenobia por constante deseo de verme convertido en profesional.

A mi familia por estar en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mis amigos por su grata compañía.

Al Doctor Eduardo Alberto Castañeda por su acompañamiento y dedicación que hizo posible la terminación de este trabajo de grado.

Gracias.

Albert Mauricio Alfonso Flórez

CONTENIDO

pág.

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 2. OBJETIVOS..... | 17 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL | 17 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 17 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 18 |
| 3.1. ASFALTO..... | 18 |
| 3.2. CAUCHO DE LLANTAS..... | 18 |
| 3.3. MEZCLA DEL ASFALTO-CAUCHO | 19 |
| 3.4. PROCESO DE MODIFICACIÓN DEL ASFALTO | 22 |
| 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 23 |
| 4.1. MATERIALES | 23 |
| 4.1.1. Asfalto 60-70..... | 23 |
| 4.1.2. Caucho reciclado de llantas de camión..... | 24 |
| 4.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS | 25 |
| 4.3. ENSAYO DE RIGIDEZ..... | 25 |
| 4.3.1. Ensayo a tracción-compresión..... | 27 |
| 4.3.2. Ensayo a flexión..... | 29 |
| 5. RESULTADOS..... | 31 |
| 5.1. MÓDULOS DE YOUNG PARA LA PRUEBA A TRACCIÓN- COMPRESIÓN..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 5.2. MÓDULOS DE YOUNG PARA LA PRUEBA A FLEXIÓN. | 35 |
| 6. CONCLUSIONES | 38 |
| REFERENCIAS | 40 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 42 |
| ANEXOS..... | 44 |

LISTA DE TABLAS

pág.

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Composición de las llantas. | 19 |
| Tabla 2. Características físicas del asfalto 60-70..... | 24 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Reacción del caucho con el asfalto..... | 20 |
| Figura 2. Estructura del asfalto modificado con caucho..... | 21 |
| Figura 3. Ángulo (δ) de desfase entre la curva de esfuerzo y la curva de deformación | 27 |
| Figura 4. Esfuerzo y deformación de una probeta cilíndrica. | 28 |
| Figura 5. Ensayo a tracción-compresión..... | 29 |
| Figura 6. Esquema de la prueba a flexión..... | 29 |
| Figura 7. Ensayo a flexión..... | 30 |
| Figura 8. Módulos de Young a temperatura ambiente (20,7°C) para ensayo a tracción-compresión..... | 31 |
| Figura 9. Módulos de Young a 30°C para ensayo a tracción-compresión. | 32 |
| Figura 10. Módulos de Young a 40°C para ensayo a tracción-compresión. | 33 |
| Figura 11. Variación de la rigidez del asfalto con contenido en caucho en porcentaje | 34 |
| Figura 12. Módulos de Young a temperatura ambiente (20,7°C) para ensayo a flexión | 36 |
| Figura 13. Rigideces para los ensayos a flexión y a tracción-compresión para 19% y 20% de contenido de caucho a temperatura ambiente | 37 |

LISTA DE ANEXOS

pág.

| | |
|--|----|
| ANEXO. RESULTADOS COMPLEMENTARIOS..... | 44 |
|--|----|

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO NORMAL Y ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO POR MEDIO DE ENSAYOS DINÁMICOS*.

AUTORES: LIZSAN ESTEFHANY OROZCO ZAMBRANO, ALBERT MAURICIO ALFONSO FLOREZ**.

PALABRAS CLAVES: Asfalto, Asfalto Modificado, Caucho, Vía Húmeda.

DESCRIPCIÓN:

La modificación de los materiales empleados en la industria de la construcción permite alterar sus propiedades específicas y lograr cambios significativos en sus características iniciales. Este trabajo se orientó a estudiar una alternativa eco-amigable que permita dar solución a la problemática ambiental y las falencias que presenta el cemento asfáltico que se utiliza regularmente en la pavimentación de vías; se presenta, entonces, un estudio donde se evalúan las variaciones en la rigidez del ligante al modificarse con la adición de caucho, con el fin de aportar una nueva información relevante en la caracterización del asfalto-caucho y su posible contribución a la reducción de la contaminación que producen la cantidad de llantas que son desechadas y a los problemas que sufre el asfalto en su estado original, como el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento.

Para la elaboración de las muestras que serán objeto de estudio, además de definirse un detallado procedimiento para la preparación de la mezcla, se determinan también los criterios que afectan directamente el producto final, como lo son la temperatura de mezclado, el tamaño de la partícula de caucho y el contenido de caucho en cada espécimen.

En este caso, se modificó asfalto 60-70 con diferentes cantidades de caucho y se valora los cambios en la rigidez del ligante en diferentes niveles de sollicitación variando frecuencia de cargas y temperatura.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil, Director PhD. M. Sc. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

ABSTRACT

TITLE: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO NORMAL Y ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO POR MEDIO DE ENSAYOS DINÁMICOS*.

AUTHORS: LIZSAN ESTEFHANY OROZCO ZAMBRANO, ALBERT MAURICIO ALFONSO FLOREZ**.

KEY WORDS: Asphalt, Modified Asphalt, Rubber, Wet process.

DESCRIPTION:

The modification of the materials employed in the construction industry allows altering its specific properties and making significant changes in their initial features. This work oriented to study an eco-friendly alternative that allows to solve environmental problems and weaknesses present in the asphalt cement that is regularly used in road paving; it presents, then, a study evaluating variation stiffness of the binder to be modified with rubber, the purpose is to provide new relevant information on the characterization of asphalt-rubber and its potential contribution to reducing the pollution due to the number of tires that are discarded and the problems facing the asphalt in its original state as rutting, fatigue and aging.

For the preparation of samples that will be studied, besides defining a detailed procedure for the preparation of the mixture, the criteria that directly affects the final product is also determined, as the mixing temperature, the particle size rubber and the rubber content in each specimen.

In this case, 60-70 asphalt was modified with different quantity of rubber; it assesses changes in binder stiffness at different levels of stress varying loading frequency and temperature.

* Undergraduate work.

** Physics-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: PhD. M. Sc. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

INTRODUCCIÓN

El asfalto es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción para pavimentar caminos y servir de impermeabilizante, debido a las propiedades que posee para resistir los cambios de clima y las cargas impuestas por los vehículos; sin embargo, las condiciones ambientales extremas y el aumento del volumen del tránsito ponen al límite las características mecánicas de este material, situación que demanda el incremento de la calidad de los asfaltos y su competitividad, así como mejorar sus propiedades y prolongar su vida útil.

Por otra parte, se tiene el problema de las llantas que se desechan anualmente, que representan un grave problema al ambiente y a la salud pública, puesto que promueven la proliferación de diferentes plagas y el inicio de incendios, debido al inadecuado manejo que se le da a este tipo de desechos.

Desde hace décadas se ha venido mezclando el asfalto con diferentes materiales para alterar su comportamiento, a estas mezclas se les conoce como “Asfaltos Modificados” ^[1]. El caucho es un material que se ha considerado útil para modificar la reología del asfalto porque reduce su sensibilidad a los cambios de temperatura aportando mayor consistencia y durabilidad al pavimento.

Aunque el asfalto mezclado con caucho fue empleado por primera vez en 1930 como sellador de juntas, fue hasta 1950 que en California, USA, se utilizó como material de pavimentación, y desde entonces se empezaron a desarrollar estudios al respecto. En este trabajo se estudian los cambios en la rigidez del bitumen (mediante ensayos de carga dinámica) por la adición del caucho ^[2].

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Recientemente la humanidad ha demostrado grandes avances en cortos lapsos de tiempo, pero paralelamente a éste desarrollo crecen las necesidades, es así como se busca un mejoramiento en la calidad de vida, y amortiguar el fuerte impacto ambiental que el avance trae consigo, y una forma de alcanzar dichas metas es la creación de estructuras más cómodas, estéticas, económicas y ecológicamente amigables.

Por otra parte, se sabe que los materiales para las obras civiles, sin importar su uso o finalidad son altamente contaminantes, en su gran mayoría, además de costosos y de limitada resistencia; aun así, la calidad de vida se mide por la calidad de la vivienda, servicios y vías de comunicación, incentivando de esta manera la investigación de nuevos materiales que permitan la creación de mejores estructuras a costos más bajos y con mayores factores de seguridad.

Obedeciendo a las exigencias actuales del mundo, la academia entra a desempeñar un rol importante en la investigación, desarrollo y obtención de nuevas tecnologías, materiales, métodos y sistemas que permitan continuar el progreso de una manera segura y sostenible; no obstante, este tipo de estudios se basan prácticamente en la observación y comparación con resultados anteriores, pues los productos serán puramente experimentales; sin embargo, dichos productos de la investigación abrirán las puertas a las posibilidades de ampliar el gama de herramientas existente para el ingeniero, para la sociedad en general.

En conclusión, el objetivo particular de este proyecto es permitir realizar un estudio detallado al asfalto modificado con caucho en comparación con el asfalto normal, para posteriormente determinar las características mecánicas que varían y las que permanecen constantes entre los materiales que son objeto de estudio, y finalmente dar una respuesta certera a la incógnita de la posible utilidad de este nuevo material basando los argumentos en pruebas científicas reales.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo del comportamiento mecánico del asfalto normal y el asfalto modificado con partículas de caucho.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Definir el proceso de modificación que se va a emplear en la fabricación del asfalto - caucho.
- ✓ Elaborar las probetas de asfalto y asfalto modificado con las respectivas especificaciones.
- ✓ Caracterizar por medio de la prueba de carga dinámica el asfalto 60 – 70 producido por Ecopetrol.
- ✓ Caracterizar por medio de la prueba de carga dinámica el asfalto 60 – 70 modificado.
- ✓ Establecer las diferencias entre las propiedades mecánicas que poseen el material modificado y sin modificar una vez realizados los ensayos.
- ✓ Determinar la conveniencia de utilizar asfalto modificado con caucho para la elaboración de pavimentos.

3. MARCO TEORICO

Las propiedades del asfalto modificado depende tanto de las características propias de cada uno de los componentes que se emplean en la elaboración de la mezcla, como de la interacción entre ellos.

3.1. ASFALTO

El asfalto es un material aglomerante, viscoso, impermeable, adhesivo y resistente de color negro, puede proceder de yacimientos naturales o de la refinación de crudos de petróleo, aunque en la actualidad más del 90% de los asfaltos que se utilizan en la pavimentación se obtienen por destilación fraccionada del petróleo crudo ^[3].

El asfalto se caracteriza por la *susceptibilidad térmica* propiedad que se presenta por su condición termoplástica y esto a su vez se manifiesta mediante una amplia variación de su consistencia con los cambios de temperatura; así, puede ser solido o semisólido a temperatura ambiente y líquido a altas temperaturas ^[4].

3.2. CAUCHO DE LLANTAS

Las llantas están compuestas principalmente de caucho natural, caucho sintético, acero y fibra textil, además se le agregan otros materiales que mejoran sus propiedades como los son: oxido se Zinc y de Magnesio, y negro de humo.

El caucho natural brinda maleabilidad, resistencia mecánica y adherencia, mientras el sintético prolonga su vida útil, y el negro de humo hace el material más resistente a la rotura y a la abrasión ^[5].

Tabla 1. Composición de las llantas

| MATERIAL | AUTOMOVILES Y CAMIONETAS | CAMIONES Y MICROBUSES |
|--|--------------------------|-----------------------|
| Caucho natural | 14% | 27% |
| Caucho sintético | 27% | 14% |
| Negro de humo | 28% | 28% |
| Acero | 14-15% | 14-15% |
| Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc. | 16-17% | 16-17% |
| Peso promedio | 8,6 Kg | 45,4 Kg |
| Volumen | 0,06 m ³ | 0,36 m ³ |

Fuente: Tesis Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos ^[6]

3.3. MEZCLA DE ASFALTO CAUCHO

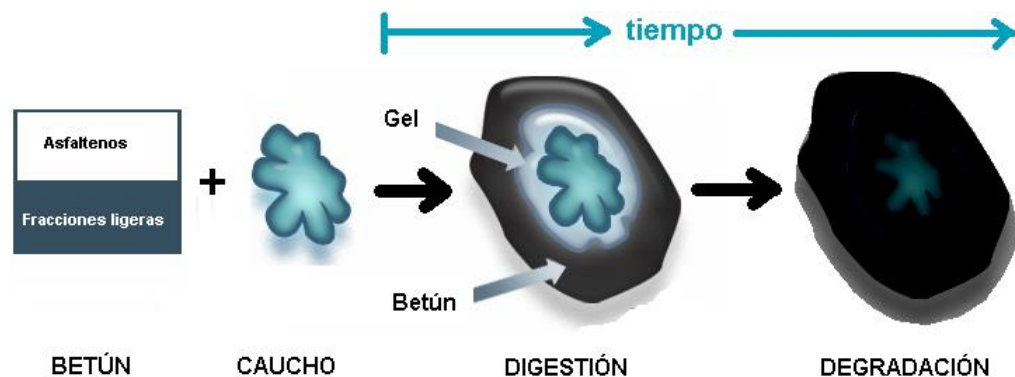
La adición de materiales al asfalto busca mejorar las propiedades químicas, mecánicas y reológicas del bitumen, como lo son la rigidez, la susceptibilidad térmica y la resistencia bajo carga monotónica, asimismo se pretende dar solución a los problemas típicos de este material, como el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento.

Para el caso de la modificación del asfalto con caucho, aunque se ha probado con varios tamaños de grano y con cauchos de diferentes orígenes, el mejor resultado se ha obtenido con polvo de caucho obtenido por trituración ambiental, debido a que la partícula posee una mayor superficie específica y esto la hace más reactiva ^[7].

El cemento asfáltico modificado (asfalto-caucho) es el resultado de la interacción del caucho con el ligante, donde la reacción que ocurre entre los dos no es una reacción de tipo química. Cuando son mezclados, el caucho reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos. El grado de modificación del ligante depende de muchos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción del caucho, tipo del cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla, el componente aromático del cemento de asfáltico, y el uso de otros aditivos.

El polvo del caucho interacciona con el asfalto, en un proceso llamado *digestión*, mediante el cual el caucho capta partes de las fracciones más volátiles del bitumen. La digestión prolifera desde la superficie de la partícula hacia el interior, convirtiendo entonces, al caucho en un modificador del bitumen, razón por la cual el tiempo de reacción y la temperatura de mezclado son menores cuando se emplea grano fino de caucho ^[8].

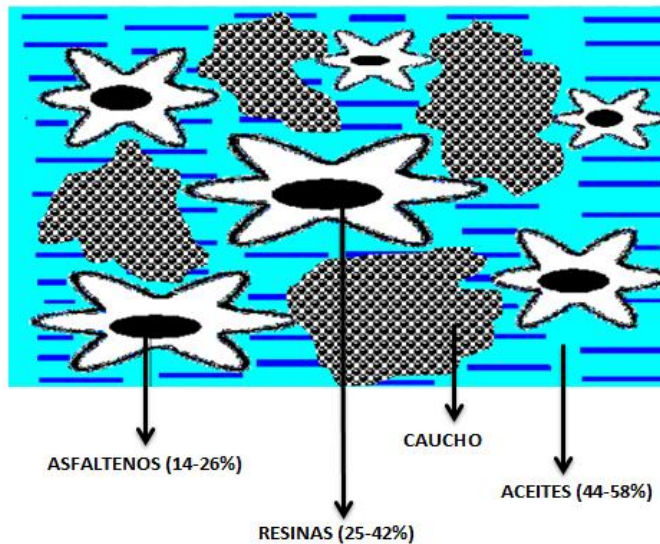
Figura 1. Reacción del caucho con el asfalto.



Fuente: Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia española en la conservación de carreteras.

La estructura del asfalto se modifica con inclusiones de partículas finas de caucho, un modelo de la estructura se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Estructura del asfalto modificado con caucho.



Fuente: Manufacturas y procesos industriales MPI ^[9]

Algunas ventajas y desventajas que presenta el asfalto-caucho son ^[10]:

- No es soluble, debido a que no se altera dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
- Cuando se mezcla a temperaturas elevadas con el asfalto, atrae componentes livianos de éste, produciendo una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto de asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.
- Le proporciona a la mezcla asfalto-caucho mayor resistencia a la humedad y al calor debido a la vulcanización de la llanta.

- Aumenta la elasticidad de la mezcla haciéndola más resistente a el ahuellamiento debido a que incrementa su capacidad de recuperación.
- Se requiere de maquinaria especial para la elaboración del asfalto-caucho.
- Para la producción de asfalto-caucho está limitada a la cantidad de caucho reciclado disponible en el mercado.

3.4. PROCESO DE MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

Para la incorporación del caucho a las mezclas asfálticas existen dos métodos ^[11]:

• **Proceso por vía seca:** En este proceso el caucho es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente por ser un proceso en el que no se modifica completamente el ligante, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el caucho como agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el uno y tres por ciento del peso total de los agregados de la mezcla. Para este método existen dos tecnologías muy comunes: PlusRide y tecnología Genérica.

• **Proceso por vía húmeda:** En el proceso por vía húmeda, el caucho es mezclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada asfalto-caucho que es usada de la misma manera que un ligante modificado, en este caso la proporción de grano de caucho se encuentra usualmente entre el 14% y el 20%, de acuerdo a las especificaciones requeridas. Las tecnologías más usadas para el proceso húmedo son: mezclado por batchadas o McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental, se divide en tres etapas, la selección de los materiales, la elaboración de las probetas y el ensayo de las mismas.

4.1. MATERIALES

Los materiales que se emplearon en el desarrollo de este estudio fueron:

- Asfalto 60-70
- Caucho reciclado triturado de llantas de camión.

4.1.1. Asfalto 60–70. El asfalto que se empleó proviene del complejo industrial de Ecopetrol de Barrancabermeja; es una mezcla de fondo de vacío de base nafténica y fondos de vacío de base intermedia, ajustando la penetración, punto de ablandamiento y punto de chispa, mediante la adición de distintas cantidades de gasóleo. A continuación se muestran sus principales características físicas.

Tabla 2. Características físicas del asfalto 60-70

| ENSAYO | METODO DE ENSAYO (ASTM) | VALORES PROMEDIO |
|---|-------------------------|------------------|
| PESO ESPECÍFICO a 25°C / 25°C | D 70 | 1,0141 |
| PENETRACIÓN, 100 g, 5 seg, a 25°C, (0,1 mm) | D 5 | 64,75 |
| PUNTO DE CHISPA, (°C) | D 92 | 335 |
| DUCTILIDAD a 25°C, (cm) | D 113 | (+100) |
| PUNTO DE ABLANDAMIENTO (Anillo y Bola)(°C) | D 36 | 45,2 |
| VISCOSIDAD CINEMÁTICA, 135°C, (cSt) | D 2170 | 303,01 |
| VISCOSIDAD ABSOLUTA a 60°C (Poises) | D 2171 | 1370,64 |
| EQUIVALENTE HEPTANO - XILENO | NLT - 135 | (5-10) |

Fuente: ECOPETROL – IPC

4.1.2. Caucho reciclado de llantas de camión. El caucho empleado en la modificación del asfalto se obtiene de llantas de camión recicladas, porque tienen alto contenido de caucho natural que le brinda consistencia a la mezcla, éste se tritura y criba en un tamiz No. 80 (tamaño aproximado: 0,180 mm) para luego ser almacenado en un lugar libre de humedad.

4.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

- ✓ El asfalto se calienta a 155°C de temperatura, parámetro que fue seleccionado siguiendo las especificaciones dadas en los documentos consultados, donde se definía un rango que iba desde 150°C hasta 190°C ^[12].

- ✓ Se agrega el caucho de una manera uniforme mezclando a una velocidad y temperatura constantes durante un tiempo de 30 minutos, tiempo recomendado para la correcta digestión en un proceso de mezclado a pequeña escala.

- ✓ De acuerdo a la cantidad de asfalto que se emplee para realizar la mezcla, se pesa la cantidad de caucho correspondiente. Los porcentajes a utilizar son 0%, 15%, 18%, 19% y 20%.

- ✓ Se vierte la mezcla en los moldes y se deja en reposo a temperatura ambiente durante 10 minutos; luego se refrigera para poderla desmoldar.

- ✓ Después de desmoldar, las probetas permanecen refrigeradas hasta el momento del ensayo.

4.3. ENSAYO DE RIGIDEZ

Los ensayos de rigidez son procedimientos que se realizan para determinar las características propias del material como su módulo de elasticidad o de Young y deformación. Y consisten en aplicar un esfuerzo a una probeta con dimensiones fijadas y así medir la deformación que sufre después de cierto tiempo.

Las cargas dinámicas u oscilatorias se efectúan para caracterizar las propiedades elásticas y viscosas de un material. El experimento se realiza aplicando un esfuerzo sinusoidal a un espécimen, con temperatura y frecuencia de carga dadas. Así se mide la recuperación de la deformación y se determina indirectamente, por medio de cálculos, la característica que se desea conocer. Las expresiones matemáticas que mejor muestran su comportamiento son (1) y (2).

$$\sigma = \sigma_0 * \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2)$$

En donde:

σ : Esfuerzo dinámico

ε : Deformación dinámica

σ_0 : Esfuerzo dinámico inicial

ε_0 : Deformación dinámica inicial

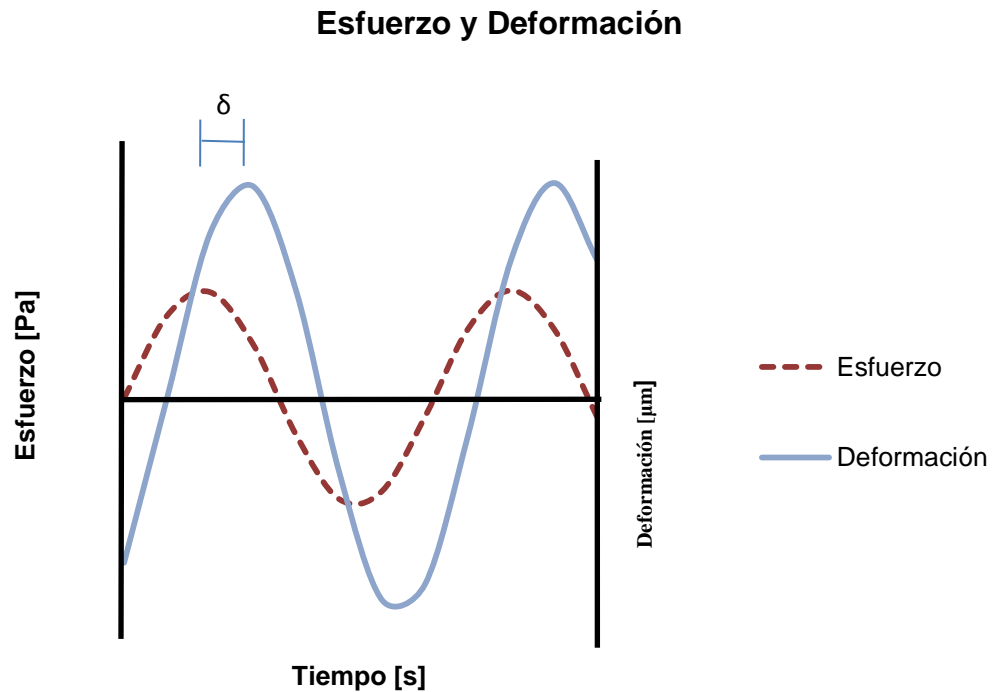
ω : Frecuencia angular

t : Tiempo

δ : Ángulo de desfase

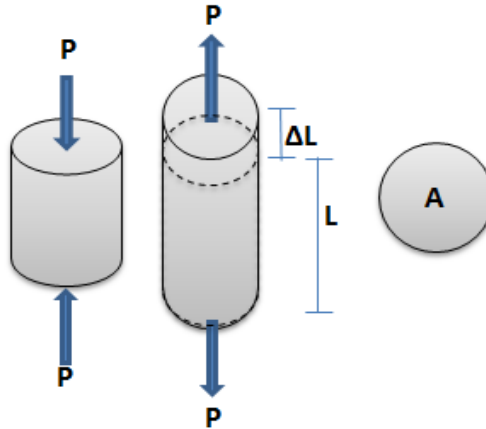
Al comparar la curva de esfuerzo con la curva de deformación en función del tiempo, véase Figura 3, aparece un desfase debido a que el asfalto modificado con caucho es un material visco-elástico, esto quiere decir que su comportamiento está regido por la ley de Hooke para materiales elásticos y la Ley de Newton para materiales viscosos.

Figura 3. Ángulo (δ) de desfase entre la curva de esfuerzo y la curva de deformación.



4.3.1. Ensayo a tracción-compresión. Este ensayo dinámico se realizó con probetas de forma cilíndrica (alto: 30 mm y diámetro: 15 mm), las cuales se sometieron a un esfuerzo axial sinusoidal y una deformación dinámica de 0,0001m a unas frecuencias de carga de 1, 3, 5, 10 y 25 Hertz y a las temperaturas de 20,7°C (temperatura ambiente en el laboratorio), 30°C, 35°C, 40°C y 45°C.

Figura 4. Esfuerzo y deformación de una probeta cilíndrica.



A continuación se muestran las ecuaciones que permiten calcular el valor del módulo de Young:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3) \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4) \quad E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (5)$$

Dónde:

σ : Esfuerzo (Pa)

ε : Deformación unitaria (m/m)

P : Carga aplicada (N)

A : Área de la sección de la muestra (m^2)

Δl : Deformación de la probeta (m)

l : longitud inicial (m)

σ_{max} : Esfuerzo máximo (Pa)

ε_{max} : Deformación unitaria máxima (m/m)

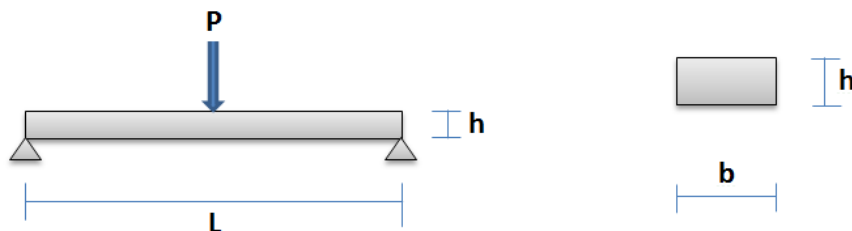
E : módulo de elasticidad (Pa)

Figura 5. Ensayo a tracción-compresión.



4.3.2. Ensayo a flexión. La prueba dinámica a flexión consistió en cargar una viga simplemente apoyada con una fuerza aplicada en el punto medio de su longitud, a una temperatura y frecuencia conveniente (las mismas frecuencias y temperaturas usadas en el ensayo de tracción-compresión), de esta forma al medir la deflexión que sufre la viga se puede determinar el valor del módulo de Young.

Figura 6. Esquema de la prueba a flexión.



Para analizar el comportamiento del material realizando el ensayo a flexión, se tienen las expresiones matemáticas (6), (7), (8), (9) y (10).

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (6) \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad (7) \quad E = \frac{PL^3}{4bh^3\delta} \quad (8) \quad \sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (9) \quad \varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (10)$$

Dónde:

δ : deflexión de la viga al medio de la luz (mm)

P : carga (N)

L : Longitud de la luz (mm)

E : módulo de elasticidad (MPa)

I : momento de inercia

b : ancho de la viga (mm)

h : espesor de la viga (mm)

σ : máxima tensión a flexión (MPa)

ε : máxima deformación a flexión (mm/mm)

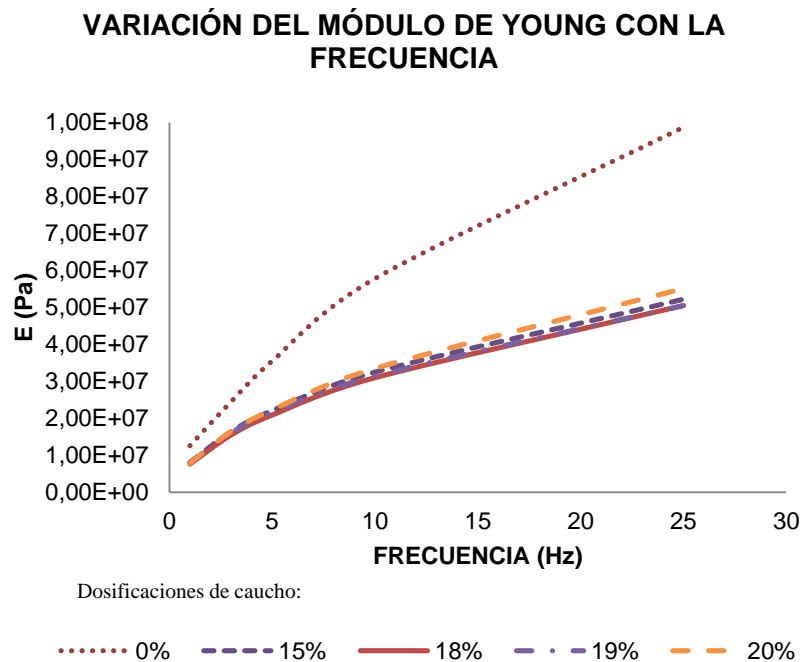
Figura 7. Ensayo a flexión.



5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la rigidez medida en probetas elaboradas en asfalto-caucho.

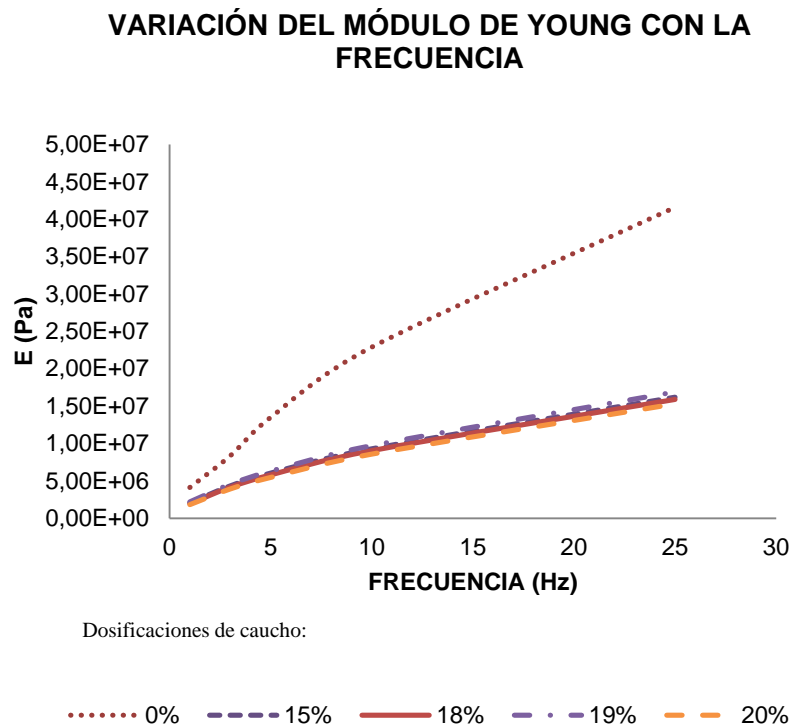
Figura 8. Módulos de Young a temperatura ambiente (20,7°C) para ensayo de tracción-compresión.



Para la temperatura ambiente (20,7°C), la muestra de asfalto original presenta mayor rigidez que las de asfalto-caucho, esta situación se podría explicar si se acepta la estructura mostrada en 2.1 en la que a temperaturas, no muy elevadas, el asfalto pudiera ser más rígido que las inclusiones de caucho y estas aportarían flexibilidad a la mezcla. Los valores del módulo están en el rango de 7,87MPa a

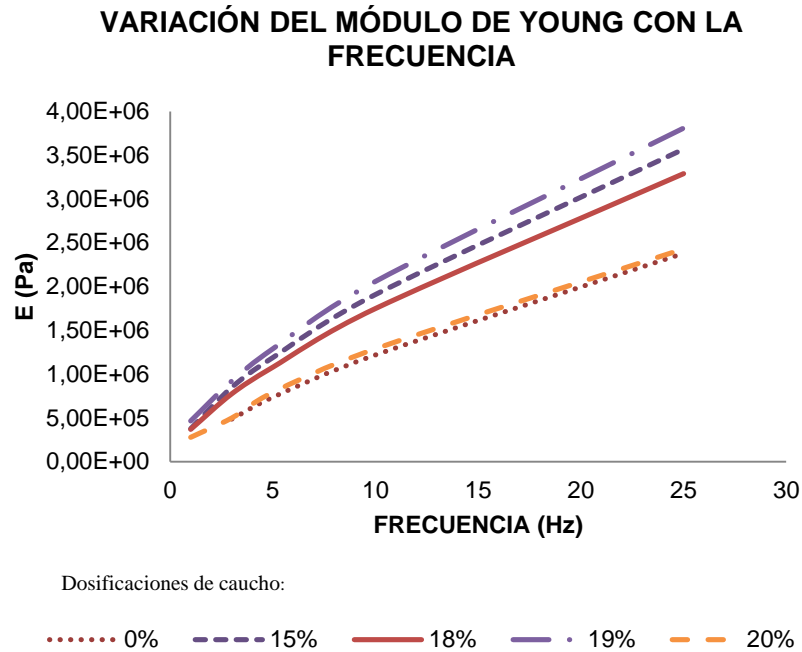
7,97MPa para frecuencias bajas (1Hz), y de 52,2MPa a 98,7MPa para frecuencias altas (25Hz). Como lo muestra la Figura 8.

Figura 9. Módulos de Young a 30°C para ensayo de tracción-compresión.



A temperatura de 30°C el asfalto normal sigue mostrando mayor rigidez, que el asfalto con algún contenido de caucho, solo que ésta vez su rango de valores ya no es tan alto como los anteriores, ahora son de 1,82MPa hasta 4,12MPa para frecuencias bajas, y de 15,3MPa hasta 41,6MPa para frecuencias altas. (Véase Figura 9)

Figura 10. Módulos de Young a 40°C para ensayo de tracción-compresión.



Tras el análisis de los especímenes ensayados a 40°C, se evidencia, que a diferencia de las temperaturas inferiores, el asfalto modificado con caucho es el que manifiesta mayores valores del Módulo de Young, particularmente la probeta con 19% de caucho presenta el módulo más alto. En este caso las inclusiones de caucho por tener una menor susceptibilidad a la temperatura ya aportan rigidez a una fase de asfalto reblandecida por el calor.

5.1. MÓDULOS DE YOUNG PARA LA PRUEBA DE TRACCIÓN-COMPRESIÓN

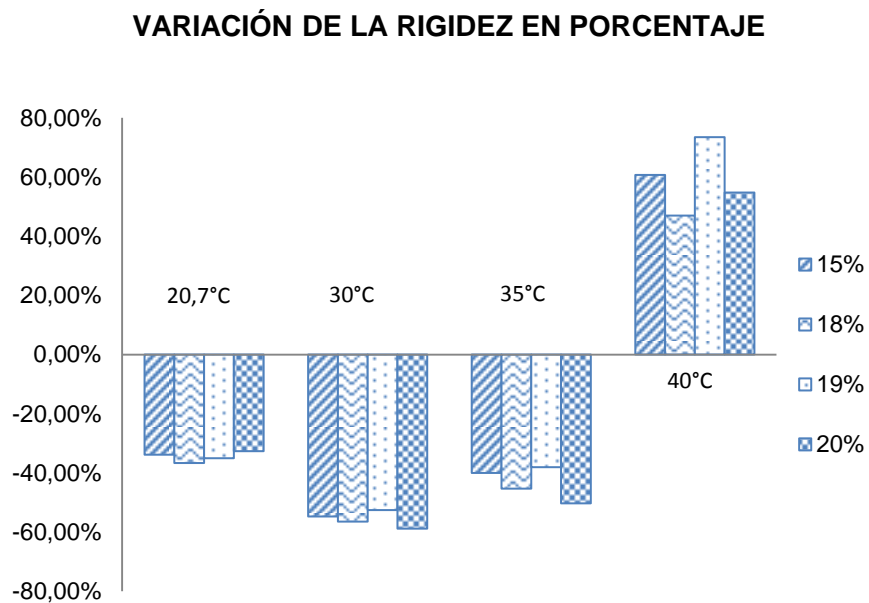
En las gráficas se puede apreciar el comportamiento del Módulo de Young (E) del asfalto normal 60-70 y el asfalto modificado con diferentes dosificaciones de caucho en función de la frecuencia, cada figura corresponde al ensayo a tracción-compresión realizado a una temperatura específica.

Se observa que los valores del módulo de Young para todas las muestras decrecieron a medida que aumentaba la temperatura, esto ocurre debido a la susceptibilidad térmica del material.

A elevadas temperaturas el asfalto-caucho es más rígido que el asfalto base, pero a temperaturas inferiores a 30°C es más flexible.

En la siguiente figura se ilustra sobre la variación en la rigidez del material producida por la adición de caucho. El porcentaje se calculó tomando como referencia los valores de rigidez del asfalto base y a partir de éste se determinó el porcentaje de incremento o decremento que presentaron las diferentes muestras. (Ver Figura 11).

Figura 11. Variación de la rigidez del asfalto con el contenido de caucho.



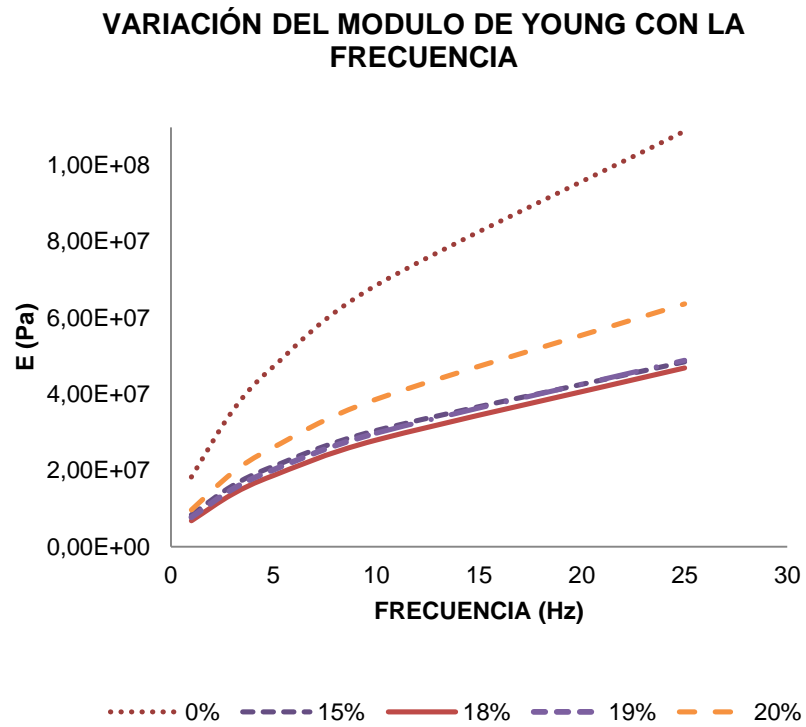
La figura 11 confirma que el caucho aporta rigidez a la mezcla cuando se somete a temperaturas por el orden de 40°C, en temperaturas inferiores (20°C, 30°C y 35°C) aumenta la flexibilidad del material, produciendo así una rigidez menor a la del asfalto original.

5.2. MÓDULOS DE YOUNG PARA LA PRUEBA A FLEXIÓN

Las probetas en forma de paralelepípedo, presentan mayor deformación frente al aumento de temperatura debido a sus dimensiones y a las propiedades visco-elásticas del material, situación que impidió el correcto desarrollo de los ensayos a flexión.

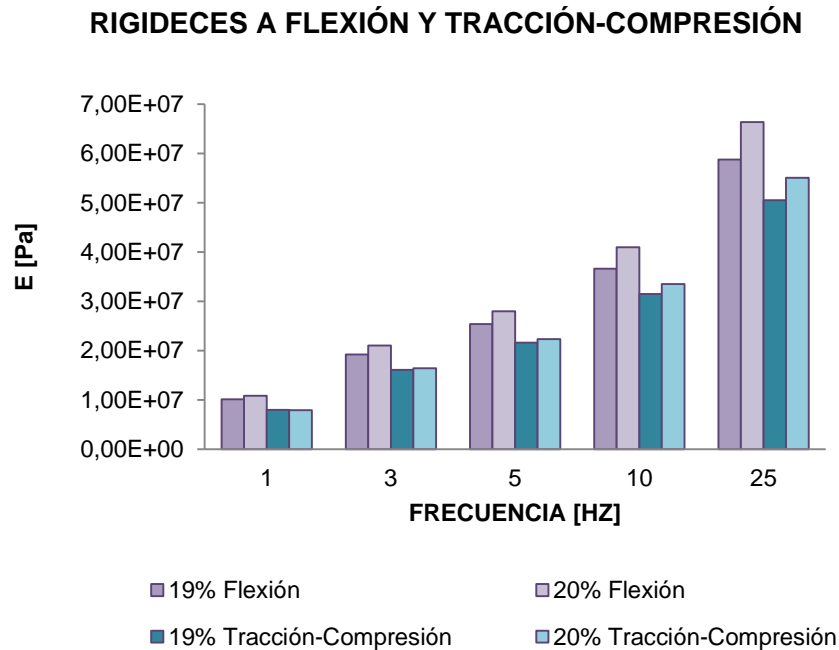
Aunque los especímenes con mayores cantidades de caucho presentaron menor deflexión, los valores obtenidos no son confiables debido a la alteración que se produjo en las probetas durante la estabilización de la temperatura, asimismo no se pudo realizar a cabalidad todos los ensayos a las temperaturas seleccionadas.

Figura 12. Módulos de Young a temperatura ambiente (20,7°C) para ensayo de flexión.



En la Figura 13, se muestra que los valores de la rigidez para las probetas con forma de paralelepípedo, ensayadas a flexión, a temperatura ambiente, son similares a los de las probetas cilíndricas.

Figura 13. Rigideces para los ensayos de flexión y tracción-compresión para 19% y 20% de contenido de caucho a temperatura ambiente.



La comparación entre los resultados de los ensayos efectuados, flexión y tracción-compresión, se realizó con las probetas de 19% y 20% de caucho, debido a que estos especímenes presentaron menor deformación; aunque los módulos de rigidez que se obtuvieron de las probetas paralelepípedas fueron mayores, están muy cercanos a los valores de las probetas cilíndricas, y a pesar de esta variación, en los dos casos se presenta la misma tendencia ascendente con el aumento de las frecuencia del ensayo.

La conveniencia de usar asfalto-caucho para la elaboración de pavimentos depende de la solicitud y de los recursos que se tienen, debido a que se requiere de un equipo especial de mezclado, personal calificado y grandes cantidades de materia prima.

6. CONCLUSIONES

- Los asfaltos modificados con caucho presentan rigidez similar a la de los asfaltos base en temperaturas como 20,7°C y 30°C, y en temperaturas superiores muestran menor susceptibilidad a reducir su rigidez.
- El incremento de la rigidez en temperaturas superiores a 40°C debe producir el aumento de la resistencia al ahuellamiento en los pavimentos modificados con caucho. Mientras que en temperaturas inferiores a 30°C se produce mayor flexibilidad y resistencia a la fatiga.
- Las dificultades que se presentaron para los ensayos a flexión, si bien impidieron la comparación entre los datos de las diferentes pruebas, permitieron apreciar el cambio en la consistencia del bitumen al ser modificado con caucho, se evidenció mayor estabilidad de las probetas en altas temperaturas.
- El contenido de caucho que presentó mejores resultados fue del 19%. El incremento en la rigidez del asfalto-caucho fue cercano al 73% en temperatura de 40°C, se confirma entonces que los porcentajes óptimos de caucho para la mezcla está entre 15% y 20%, valores que se establecieron en la revisión bibliográfica.
- Mientras los valores de rigidez del ligante asfáltico obtenidos con el proceso de modificación con caucho alcanzaron valores de 2,06 MPa (a temperatura de 40°C y frecuencia de 10 Hertz), los valores de rigidez que se pueden obtener

modificando el asfalto con polímeros es del orden de 50 MPa, lo que indica que si se quiere aumentar la rigidez de la mezcla, el caucho no es la mejor opción.

REFERENCIAS

- [1] Asfaltos Modificados. Disponible en: <http://www.e-asphalt.com/modificados/modificados.htm> [citado 27 de Diciembre de 2014]
- [2] ONTARIO TIRE STEWARDSHIP, Rubber Modified Asphalt, 2013, p. 7.
- [3] ECOPETROL – ICP, Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos, 1999, 51 p.
- [4] Biblioteca Digital. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf> [citado el 22 de abril de 2015]
- [5] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas - pista de prueba [Informe final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2005.
- [6] ANGULO Ricardo & DUARTE José. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos [Tesis de pregrado] Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.

[7] Interempresas.net Disponible en:

<http://www.interempresas.net/Automocion/Articulos/113169-Betunes-mejorados-y-modificados-con-caucho-por-via-humeda.html> [citado el 20 de abril de 2015]

[8] GALLEGO MEDINA Juan & PRIETO MUÑOZ Jorge N. Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia española en la conservación de carreteras. [Estudio] Universidad Politécnica de Madrid. 2003.

[9] HERNANDEZ AGUDELO Leonel A. Asfalto modificado con grano de caucho reciclado de llanta. Presentación curso MPI. 2015.

[10] RONDÓN QUINTANA Hugo Alexander. Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (GCR): Estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia. [Tesis]. Santa Fe de Bogotá, 2011.

[11] OCAMPO M., Caicedo B. & González D. Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas usadas. [Tesis], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2005.

[12] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002.

BIBLIOGRAFIA

ANGULO RODRÍGUEZ, Ricardo Alberto; DUARTE AYALA, José Luis.
Modificación de un Asfalto con Caucho Reciclado de Llanta para su Aplicación en Pavimentos. [Proyecto de grado]. Bucaramanga, Colombia. 2005.

ECOPETROL – ICP, Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. Bogotá. 1999. 51 p.

GALLEGO MEDINA Juan & PRIETO MUÑOZ Jorge N. Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia española en la conservación de carreteras. [Estudio] Universidad Politécnica de Madrid. 2003.

GLAINI, Bachir; VAN DE VEN, Martin; MERBOUH, M'hamed; CHAILLEEUX, Emmanuel; YUCEFI, Abdelkader. *Thermal Fatigue with Freeze-thaw Cycles of Polymer Modified Bitumen* [en línea]. Algeria:Bechar University; Netherlands: Laboratory of Road and Railway Engineering; France: Central Laboratory of Bridges and Pavements, Road of Bouaye; Algeria: Laboratory of Rheology . 2011. [Consulta: 10 Julio 2014]. Disponible en:
<http://scialert.net/qredirect.php?doi=jas.2011.1012.1018&linkid=pdf>

RODRÍGUEZ TALAVERA, Rogelio; CASTAÑO MENESES, Víctor Manuel; MARTÍNEZ MADRID, Miguel; HERNÁNDEZ PADRÓN, Genoveva. *Desarrollo de Aditivos para Asfaltos Modificados con Bajos Contenidos de Hule*. [Publicación técnica]. México. 2001.

RONDÓN QUINTANA Hugo Alexander. Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (GCR): Estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia. [Tesis]. Santa Fe de Bogotá, 2011.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas - pista de prueba [Informe final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2005.

ANEXOS

ANEXO

RESULTADOS COMPLEMENTARIOS

Tabla 3. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 0% de contenido de caucho a temperatura ambiente.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| TEMPERATURA | | 20,7 |
| PORCENTAJE DE CAUCHO | | 0% |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,14E+07 | 100,00% |
| 3 | 2,41E+07 | 100,00% |
| 5 | 3,33E+07 | 100,00% |
| 10 | 5,03E+07 | 100,00% |
| 25 | 8,33E+07 | 100,00% |
| | | 100,00% |

Tabla 4. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 15% de contenido de caucho a temperatura ambiente y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| TEMPERATURA | | 20,7 |
| PORCENTAJE DE CAUCHO | | 15% |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 7,74E+06 | 67,89% |
| 3 | 1,60E+07 | 66,39% |
| 5 | 2,18E+07 | 65,47% |
| 10 | 3,28E+07 | 65,21% |
| 25 | 5,46E+07 | 65,55% |
| | | 66,10% |

Tabla 5. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 18% de contenido de caucho a temperatura ambiente y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| TEMPERATURA | | 20,7 |
| PORCENTAJE DE CAUCHO | | 18% |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 7,64E+06 | 67,02% |
| 3 | 1,55E+07 | 64,32% |
| 5 | 2,09E+07 | 62,76% |
| 10 | 3,10E+07 | 61,63% |
| 25 | 5,05E+07 | 60,62% |
| | | 63,27% |

Tabla 6. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 19% de contenido de caucho a temperatura ambiente y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| TEMPERATURA | | 20,7 |
| PORCENTAJE DE CAUCHO | | 19% |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 7,97E+06 | 69,91% |
| 3 | 1,61E+07 | 66,80% |
| 5 | 2,16E+07 | 64,86% |
| 10 | 3,15E+07 | 62,62% |
| 25 | 5,05E+07 | 60,62% |
| | | 64,97% |

Tabla 7. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 20% de contenido de caucho a temperatura ambiente y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|-----------------------------|----------|-------------------|
| TEMPERATURA | | 20,7 |
| PORCENTAJE DE CAUCHO | | 20% |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 7,87E+06 | 69,04% |
| 3 | 1,64E+07 | 68,05% |
| 5 | 2,23E+07 | 66,97% |
| 10 | 3,35E+07 | 66,60% |
| 25 | 5,51E+07 | 66,15% |
| | | 67,36% |

Tabla 8. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 0% de contenido de caucho a temperatura de 30°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|----------|--------------|
| %CAUCHO | | 0,00% |
| TEMPERATURA | | 30,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 4,12E+06 | 100,00% |
| 3 | 8,36E+06 | 100,00% |
| 5 | 1,35E+07 | 100,00% |
| 10 | 2,29E+07 | 100,00% |
| 25 | 4,16E+07 | 100,00% |
| | | 100,00% |

Tabla 9. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 15% de contenido de caucho a temperatura de 30°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|----------|---------------|
| %CAUCHO | | 15,00% |
| TEMPERATURA | | 30,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 2,08E+06 | 50,49% |
| 3 | 4,33E+06 | 51,79% |
| 5 | 6,04E+06 | 44,74% |
| 10 | 9,29E+06 | 40,57% |
| 25 | 1,62E+07 | 38,94% |
| | | 45,31% |

Tabla 10. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 18% de contenido de caucho a temperatura de 30°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|----------|---------------|
| %CAUCHO | | 18,00% |
| TEMPERATURA | | 30,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,95E+06 | 47,33% |
| 3 | 4,15E+06 | 49,64% |
| 5 | 5,80E+06 | 42,96% |
| 10 | 9,05E+06 | 39,52% |
| 25 | 1,59E+07 | 38,22% |
| | | 43,54% |

Tabla 11. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 19% de contenido de caucho a temperatura de 30°C y variación con respecto al asfalto original.

| %CAUCHO | | 19,00% |
|--------------------|----------|---------------|
| TEMPERATURA | | 30,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 2,19E+06 | 53,16% |
| 3 | 4,55E+06 | 54,43% |
| 5 | 6,30E+06 | 46,67% |
| 10 | 9,72E+06 | 42,45% |
| 25 | 1,69E+07 | 40,63% |
| | | 47,46% |

Tabla 12. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 20% de contenido de caucho a temperatura de 30°C y variación con respecto al asfalto original.

| %CAUCHO | | 20,00% |
|--------------------|----------|---------------|
| TEMPERATURA | | 30,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,82E+06 | 44,17% |
| 3 | 3,92E+06 | 46,89% |
| 5 | 5,46E+06 | 40,44% |
| 10 | 8,58E+06 | 37,47% |
| 25 | 1,53E+07 | 36,78% |
| | | 41,15% |

Tabla 13. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 0% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| %CAUCHO | | 0,00% |
|--------------------|----------|--------------|
| TEMPERATURA | | 35,00 |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,78E+06 | 100,00% |
| 3 | 4,03E+06 | 100,00% |
| 5 | 5,82E+06 | 100,00% |
| 10 | 9,43E+06 | 100,00% |
| 25 | 1,72E+07 | 100,00% |
| | | 100% |

Tabla 14. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 15% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 15,00% | |
| TEMPERATURA | 35,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,12E+06 | 62,92% |
| 3 | 2,50E+06 | 62,03% |
| 5 | 3,50E+06 | 60,14% |
| 10 | 5,47E+06 | 58,01% |
| 25 | 9,79E+06 | 56,92% |
| | | 60,00% |

Tabla 15. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 18% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 18,00% | |
| TEMPERATURA | 35,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,06E+06 | 59,55% |
| 3 | 2,20E+06 | 54,59% |
| 5 | 3,15E+06 | 54,12% |
| 10 | 4,97E+06 | 52,70% |
| 25 | 9,00E+06 | 52,33% |
| | | 54,66% |

Tabla 16. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 19% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 19,00% | |
| TEMPERATURA | 35,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 1,28E+06 | 71,91% |
| 3 | 2,49E+06 | 61,79% |
| 5 | 3,53E+06 | 60,65% |
| 10 | 5,50E+06 | 58,32% |
| 25 | 9,77E+06 | 56,80% |
| | | 61,90% |

Tabla 17. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 20% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 20,00% | |
| TEMPERATURA | 35,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 9,48E+05 | 53,26% |
| 3 | 2,02E+06 | 50,12% |
| 5 | 2,85E+06 | 48,97% |
| 10 | 4,53E+06 | 48,04% |
| 25 | 8,30E+06 | 48,26% |
| | | 49,73% |

Tabla 18. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 0% de contenido de caucho a temperatura de 40°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|--------------|------------|
| %CAUCHO | 0,00% | |
| TEMPERATURA | 40,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | | |
| 3 | 4,87E+05 | 100,00% |
| 5 | 7,36E+05 | 100,00% |
| 10 | 1,22E+06 | 100,00% |
| 25 | 2,38E+06 | 100,00% |
| | | 100,00% |

Tabla 19. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 15% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 15,00% | |
| TEMPERATURA | 40,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 3,77E+05 | |
| 3 | 8,50E+05 | 174,54% |
| 5 | 1,19E+06 | 161,68% |
| 10 | 1,91E+06 | 156,56% |
| 25 | 3,57E+06 | 150,00% |
| | | 160,70% |

Tabla 20. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 18% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 18,00% | |
| TEMPERATURA | 40,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 3,70E+05 | |
| 3 | 7,76E+05 | 159,34% |
| 5 | 1,08E+06 | 146,74% |
| 10 | 1,75E+06 | 143,44% |
| 25 | 3,29E+06 | 138,24% |
| | | 146,94% |

Tabla 21. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 19% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 19,00% | |
| TEMPERATURA | 40,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 4,66E+05 | |
| 3 | 9,22E+05 | 189,32% |
| 5 | 1,29E+06 | 175,27% |
| 10 | 2,06E+06 | 168,85% |
| 25 | 3,81E+06 | 160,08% |
| | | 173,38% |

Tabla 22. Rigideces ensayos a tracción-compresión para 20% de contenido de caucho a temperatura de 35°C y variación con respecto al asfalto original.

| | | |
|--------------------|---------------|------------|
| %CAUCHO | 20,00% | |
| TEMPERATURA | 40,00 | |
| FRECUENCIA | E | %VARIACIÓN |
| 1 | 2,79E+05 | |
| 3 | 5,00E+05 | 102,67% |
| 5 | 1,33E+06 | 180,71% |
| 10 | 2,11E+06 | 172,95% |
| 25 | 3,87E+06 | 162,61% |
| | | 154,73% |

Tabla 23. Rigideces ensayos a flexión para 0% de contenido de caucho a temperatura de ambiente.

| | |
|--------------------|--------------|
| TEMPERATURA | 20,70 |
| %CAUCHO | 0,00% |
| FRECUENCIA | E |
| 1 | 1,83E+07 |
| 3 | 3,56E+07 |
| 5 | 4,73E+07 |
| 10 | 6,86E+07 |
| 25 | 1,09E+08 |

Tabla 24. Rigideces ensayos a flexión para 15% de contenido de caucho a temperatura de ambiente.

| | |
|--------------------|---------------|
| TEMPERATURA | 20,70 |
| %CAUCHO | 15,00% |
| FRECUENCIA | E |
| 1 | 8,38E+06 |
| 3 | 1,60E+07 |
| 5 | 2,11E+07 |
| 10 | 3,05E+07 |
| 25 | 4,85E+07 |

Tabla 25. Rigideces ensayos a flexión para 18% de contenido de caucho a temperatura de ambiente.

| | |
|--------------------|---------------|
| TEMPERATURA | 20,70 |
| %CAUCHO | 18,00% |
| FRECUENCIA | E |
| 1 | 6,82E+06 |
| 3 | 1,38E+07 |
| 5 | 1,87E+07 |
| 10 | 2,80E+07 |
| 25 | 4,69E+07 |

Tabla 26. Rigideces ensayos a flexión para 19% de contenido de caucho a temperatura de ambiente.

| | |
|--------------------|---------------|
| TEMPERATURA | 20,70 |
| %CAUCHO | 19,00% |
| FRECUENCIA | E |
| 1 | 7,74E+06 |
| 3 | 1,51E+07 |
| 5 | 2,02E+07 |
| 10 | 2,98E+07 |
| 25 | 4,89E+07 |

Tabla 27. Rigideces ensayos a flexión para 20% de contenido de caucho a temperatura de ambiente.

| | |
|--------------------|---------------|
| TEMPERATURA | 20,70 |
| %CAUCHO | 20,00% |
| FRECUENCIA | E |
| 1 | 9,66E+06 |
| 3 | 1,94E+07 |
| 5 | 2,61E+07 |
| 10 | 3,87E+07 |
| 25 | 6,37E+07 |

Tabla 28. Tabla de incrementos y decrementos para el ensayo de tracción-compresión.

| TEMPERATURA [°C] | % CAUCHO | %RIGIDEZ (EN PORCENTAJE DE LA RIGIDEZ DEL ASFALTO ORIGINAL) | VARIACIÓN |
|-------------------------|-----------------|--|------------------|
| 20 | 0 | 100,00% | |
| | 15 | 66,10% | -33,90% |
| | 18 | 63,27% | -36,73% |
| | 19 | 64,97% | -35,03% |
| | 20 | 67,36% | -32,64% |
| 30 | 0 | 100,00% | |
| | 15 | 45,31% | -54,69% |
| | 18 | 43,54% | -56,46% |
| | 19 | 47,46% | -52,54% |
| | 20 | 41,15% | -58,85% |
| 35 | 0 | 100,00% | |
| | 15 | 60,00% | -40,00% |
| | 18 | 54,66% | -45,34% |
| | 19 | 61,90% | -38,10% |
| | 20 | 49,73% | -50,27% |
| 40 | 0 | 100,00% | |
| | 15 | 160,70% | 60,70% |
| | 18 | 146,94% | 46,94% |
| | 19 | 173,38% | 73,38% |
| | 20 | 154,73% | 54,73% |

