

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ DEL BITUMEN EN  
ASFALTOS PRODUCIDOS EN REFINERÍA Y MODIFICADOS CON POLÍMEROS  
(SBS)**

**LUIS CARLOS SUÁREZ ORTIZ  
NELSON FABIAN HERNANDEZ MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ DEL BITUMEN EN  
ASFALTOS PRODUCIDOS EN REFINERÍA Y MODIFICADOS CON POLÍMEROS  
(SBS)**

**LUIS CARLOS SUÁREZ ORTIZ  
NELSON FABIAN HERNANDEZ MARTINEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director de Proyecto  
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN  
Ingeniero Civil, Msc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi padre Marco Fidel y a mi madre Luz Amparo porque me han dado la vida y siempre han creído en mí.

A todos mis hermanos Marco Julián, Edna Rocío y Laura Milena por ser una familia muy unida y que me han apoyado en mis decisiones, aprendizaje y prosperidad.

A toda mi familia por ser tan especiales y que me han enseñado todos los valores en el crecimiento como ser humano.

A mi compañero de tesis Nelson que ha sido una gran persona y que en las buenas y en las malas hemos salido vencedores.

A todas las personas que en el transcurrir de mi vida han aportado un gran valor para ser una buena persona con los demás.

Y por último a Dios por darme la capacidad de querer, amar y respetar a todas las personas en este mundo.

Gracias a todos...

Los quiero...

## DEDICATORIA

A Dios: por bendecir mi vida con personas maravillosas, guiar cada uno de mis pasos por el sendero de lo justo y lo responsable y por regalarme cada día una nueva oportunidad de demostrar que puedo ser mejor persona y profesional.

A mis queridos madre y padre, Anayibe y Orlando: por regalarme la vida, por su apoyo infinito y esfuerzo incondicional para lograr de mí una persona exitosa, enseñarme que con esfuerzo y esmero ninguna meta es inalcanzable, abrir ante mí un mundo lleno de posibilidades, de metas por alcanzar, de siempre querer llegar más alto regido por los valores de honradez y respeto hacia los demás que siempre me inculcaron, y sobre todo por enseñarme a amar lo que se hace, a colocar toda la pasión y todo el empeño en cualquier actividad por pequeña sea, ya que de la semilla más pequeña puede crecer el árbol más grande.

A mis Hermanos: Jonathan y Anigie: por estar siempre a mi lado dando aliento y animo en los momentos difíciles, ayudándome cuando estaba cayendo en un error y haciéndome sentir bien en los momentos de gozo, un Gracias es poco para retribuir todo lo que me han dado, pero describe muy bien el sentimiento encontrado.

A todas las personas, familiares o amigos que estuvieron a mi lado caminando por este sendero, dando de su apoyo, sus consejos o una muestra de cariño, necesarios para hacer de este sueño, algo real.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser el motor que pone en marcha nuestras vidas.

A nuestros padres y familiares por brindarnos la oportunidad de vivir esta experiencia en la universidad, y por enseñarnos que con esfuerzo, trabajo y constancia todo es posible.

Al Dr. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón por depositar en nosotros la confianza para la realización de este proyecto, haber dedicado su tiempo y compartido sus conocimientos para hacer de este sueño una realidad.

A nuestros maestros, porque a pesar de las dificultades que trae la vida en su transcurrir, siempre están ahí para enseñarnos a ser cada vez mejores personas y profesionales.

A los laboratoristas de la escuela de ingeniería Civil, por dedicar su tiempo y su esfuerzo en el buen transcurso del proyecto.

A nuestra querida Universidad Industrial de Santander en especial a la Sede Málaga por brindarnos una formación integral y de calidad.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. ESTADO DEL ARTE .....	18
2. ETODOLOGIA .....	22
2.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....	22
2.2. PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	25
3. CARACTERIZACION DE MATERIALES .....	31
3.1. AZUFRE.....	31
3.2. ASFALTO AC 60-70 .....	31
3.3. POLÍMERO (STYRENE/BUTADIENE/STYRENE) SBS. ....	32
4. RESULTADOS.....	34
4.1. MUESTRAS CILÍNDRICAS “MC” Y MUESTRAS PARALELEPÍEDAS “MP”	34
5. CONCLUSIONES .....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40
ANEXOS .....	42

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Denominación de Muestras en el Laboratorio. ....	23
Tabla 2. Propiedades físicas del Azufre. ....	31
Tabla 3. Caracterización Asfalto 60/70. Fuente: Ecopetrol.....	32
Tabla 4. Propiedades de SBS. Fuente: VECTOR 8508 de Dexco polymers LP.....	33

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Insumos y equipo para la modificación de asfalto a nivel de laboratorio.	23
Figura 2. Método experimental utilizado para la modificación de asfalto 60-70 en el laboratorio. ....	24
Figura 3. (a) División de probetas cilíndricas en capas de asfalto dependiendo de la viscosidad. (b) Elaboración de muestras paralelepípedas Fuente: Elaboración Propia. ....	25
Figura 4 (a) Muestra cilíndrica después del desmoldado. (b) Pegado de la muestra en el plato de la máquina. (c) Muestra cilíndrica lista para ser ensayada. ....	27
Figura 5. Vista esquemática de la muestra cargada .....	28
Figura 6. Esquema del sistema de flexión por tres puntos para medir el comportamiento esfuerzo - deformación.....	28
Figura 7 (a) Muestra paralelepípeda en molde. (b) Muestra paralelepípeda después del desmoldado. (c) Muestra paralelepípeda lista para ser ensayada. Fuente: Archivo Personal.....	30
Figura 8. Curva reologica Asfalto 60/70 .....	32

## LISTA DE GRAFICAS

Pág.

Grafica 1. Angulo de fase ( $\delta$ ), esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ) y deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ ) entre la curva esfuerzo y la de deformación,.....	26
Grafica 2. Comparación curvas maestras del Módulo de Young en las “MC” M3, M2, M1 y AC 60-70 .....	36
Grafica 3. Comparación curvas maestras del Módulo de Young en las “MP” M3, M2, M1 y AC 60-70 .....	36
Grafica 4. Comparación curvas maestras del Angulo de Fase en las “MC” M3, M2, M1 y AC 60-70 .....	38
Grafica 5. Comparación curvas maestras del Angulo de Fase en las “MP” M3, M2, M1 y AC 60-70 .....	38

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

Anexo A. Módulo de Young y Angulo de fase.....	42
--	----

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ DEL BITUMEN EN ASFALTOS PRODUCIDOS EN REFINERÍA Y MODIFICADOS CON POLÍMERO (SBS)\*

**AUTORES:** LUIS CARLOS SUÁREZ ORTIZ, NELSON FABIAN HERNANDEZ MARTINEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Asfalto, modificación de asfalto, SBS, Rigidez, Modulo de Young, Angulo de Fase.

La presente investigación propone trabajar en la caracterización y análisis de las propiedades elásticas en probetas compuestas de asfaltos bituminosos refinados y modificados con polímero (SBS), cuyo objeto es realizar una comparación entre el asfalto inalterado y el ya modificado, Se investigaron varios procedimientos para la modificación del ligante asfáltico, seleccionando un método que presenta condiciones de mezclado de alto corte y temperatura relativamente fáciles de recrear en el laboratorio, proponiendo una variación en el porcentaje de polímero con base en el volumen de ligante del 1%, 2% y 3%, El asfalto empleado en el estudio se clasifica según el grado de penetración, como AC 60-70.

Se utilizaron dos tipos de probetas, cilíndricas y paralelepípedas, de las cuales se extrajeron dos probetas de asfalto estándar y dos testigos por cada tipo de modificación realizada, de los cuales se evaluaron principalmente sus propiedades mecánicas como rigidez y ángulo de fase, para luego poder realizar un paralelo de los resultados del modificado con respecto a los resultados arrojados por el asfalto AC 60-70.

Se compararon las propiedades elásticas de los betunes modificados e inalterados, de los cuales se puede concluir que la resistencia mecánica de los ligantes asfálticos modificados con polímeros de tipo SBS, son mayores en comparación con los convencionales, incrementando la rigidez del material a altas temperaturas y su elasticidad a bajas temperaturas, proporcionando el polímero al asfalto propiedades para hacerlo poco susceptible a la temperatura y al desgaste, optimizando las inversiones en el mejoramiento de las carpetas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad De Físico Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Director. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

## ABSTRACT

**TITLO:** CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF THE RIGIDITY OF BITUMEN ASPHALT PRODUCED IN REFINERY AND POLYMER MODIFIED (SBS)<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** LUIS CARLOS SUAREZ ORTIZ HERNANDEZ MARTINEZ FABIAN NELSON<sup>\*\*</sup>

**KEY WORDS:** Asphalt, asphalt binder modification, SBS, polymer, Stiffness, Young's modulus, Phase angle.

This research proposes to work on the characterization and analysis of elastic properties in samples composed of refined bituminous asphalt and modified with polymer (SBS), which aims to make a comparison between unaltered and modified asphalt. Several procedures were investigated for asphalt binder modification, selecting a method that offers easy mixing and temperature conditions to recreate in the laboratory, proposing a variation in the polymer percentage based on 1%, 2% and 3% of binder volume. The Asphalt used in the study it is classified according to the penetration degree as AC 60-70.

Two types of samples were used, cylindrical and parallelepiped. Two standard asphalt samples and two specimens were extracted for each type of modification made, which their mechanical properties were evaluated primarily, to then compare versus the obtained results of the asphalt AC 60-70.

The elastic properties of the modified and unaltered bitumens were compared, of which it can be conclude that the mechanical resistance of the modified asphalt binders with SBS type polymers are higher in comparison to the conventional ones, increasing the stiffness of the material at high temperature and elasticity at low temperatures, the polymer provides properties to the asphalt to make it little susceptible to temperature and wear, optimizing investments in improving pavement structures.

---

<sup>\*</sup>Grade work

<sup>\*\*</sup>Faculty of Physical Mechanics. School of Civil Engineering. Director. Eduardo Alberto Pinzon Castañeda

## INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de los volúmenes de tránsito, la magnitud de las cargas en las vías nacionales y la necesidad de optimizar en las inversiones para el mejoramiento de estas, causa que en algunos casos las propiedades definidas para los asfaltos convencionales resulten insuficientes ante el problema de eliminar el ahuellamiento especialmente en condiciones de altas temperaturas, cuestión que se puede solventar adoptando asfaltos más duros, pero con el riesgo de que este se fisure por efectos térmicos a temperaturas bajas.

La técnica de modificar asfalto convencional adicionando polímeros con el fin de mejorar las características mecánicas de resistencia a la deformación frente a grandes cargas de tráfico y a cambios bruscos de temperatura, es cada vez más tomada en cuenta para trabajos de mejoramiento en el diseño de pavimentos en las diferentes vías del mundo, logrando tener un mejor aprovechamiento de la capa del ligante en la pavimentación.

Los polímeros más empleados para el mejoramiento del asfalto son los Elastómeros (SBS y SBR), ya que poseen los requerimientos estructurales óptimos para modificar efectivamente al asfalto, elevando la vida útil de este de dos a tres veces, con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Sin embargo con el empleo de catalizadores que unen químicamente el polímero al asfalto se reduce la cantidad de material polimérico utilizado.

En este trabajo se focaliza la atención en el estudio de betunes modificados con SBS radial en presencia de azufre. El estudio tiene como objetivo caracterizar y analizar la influencia del polímero en la rigidez del betún, haciendo una evaluación de las propiedades mecánicas del mismo, cambiando las condiciones de

temperatura y frecuencia. Las mezclas betún-SBS han sido preparadas utilizando diferentes porcentajes en peso de polímero respecto del contenido de asfalto. Se han determinado las propiedades físicas, tales como Modulo de Young [E] y Angulo de Fase [ $\delta$ ]. Finalmente los resultados obtenidos son discutidos.

## 1. ESTADO DEL ARTE

Aunque en el diseño de pavimentos el asfalto comprende apenas un porcentaje del 5% de la mezcla, este material determina en gran medida las propiedades mecánicas de la estructura de pavimento.

La incorporación de polímeros es el proceso más utilizada para la modificación del asfalto, los más empleados para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los ligantes son los copolímeros Tipo I de estireno/butadieno (styrene/butadiene/styrene *SBS* y styrene/butadiene/rubber *SBR*)<sup>1</sup>.

El proceso apropiado de modificación es variable de acuerdo al tipo de polímero utilizado, los Tipo I como el *SBS* requieren largas etapas de molienda, a continuación se mencionan de manera general las etapas importantes del método de modificación con *SBS*.

Etapas I. Evaluar el asfalto base.

Etapas 2. Incrementar la temperatura del asfalto.

Etapas 3. Proceso de molienda y/o homogenización asfalto-polímero. Se requiere un molido de alto corte.

Etapas 4. Controlar la calidad a través de microscopía óptica.

---

<sup>1</sup> ARIAS, Lourdes; ROJAS, Ingrid y JOSKOWICZ, Pablo. Modificación de asfalto venezolano con polímero. 5to congreso Venezolano del Asfalto Marzo de 2009 [En Línea], [Citado el 9 de Junio de 2014] Disponible en: [http://www.inveas.org.ve/data/documentos\\_inveas/boletines/T01.%20Arias,%20Jockoviz,%20et%20al.%20Asfalto%20Modificado%20con%20Pol%C3%ADmero.pdf](http://www.inveas.org.ve/data/documentos_inveas/boletines/T01.%20Arias,%20Jockoviz,%20et%20al.%20Asfalto%20Modificado%20con%20Pol%C3%ADmero.pdf)

Etapa 5. Finalización de la reacción. Control de calidad realizando corrida de pruebas físicas para asfaltos modificados después de 24 horas de reacción.

Las temperaturas de mezclado oscilan entre 180° y 190° y el tiempo varía dependiendo de la dispersión del polímero<sup>2</sup>.

Se sabe que en las aplicaciones para pavimentos de carreteras los niveles de concentración de polímeros son relativamente bajos: del 2 al 3% cuando se usa el (Styrene-Butadiene-Styrene)<sup>3</sup>.

El efecto inmediato que produce el modificador en el asfalto, es el incremento de la viscosidad, elasticidad, adherencia y cohesión, disminución de la susceptibilidad térmica, obteniendo mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento y mezclas más flexibles a bajas temperaturas reduciendo la figuración, ofrece mayor resistencia a la deformación permanente, reduce el efecto de envejecimiento y la oxidación del material<sup>4</sup>.

La adición de SBS produce diferencias significativas entre los sistemas preparados, siendo posible observar que el enriquecimiento de las mezclas en el betún da lugar a un endurecimiento de las mezclas asfalto-SBS que presentan valores más bajos de la penetración, y más elevados de la viscosidad y temperatura de reblandecimiento. Factores que repercuten negativamente en la

---

<sup>2</sup>WULF R, Fernando A; Análisis de Pavimento Asfáltico modificado con Polímero; Valdivia, Chile; (2008); [en línea] [citado 09 de marzo de 2015] disponible en: [http://www.academia.edu/6999391/Escuela\\_de\\_Construcci%C3%B3n\\_Civil\\_AN%C3%81LISIS\\_DE\\_PAVIMENTO\\_ASF%C3%81LTICO\\_MODIFICADO\\_CON\\_POL%C3%8DMERO](http://www.academia.edu/6999391/Escuela_de_Construcci%C3%B3n_Civil_AN%C3%81LISIS_DE_PAVIMENTO_ASF%C3%81LTICO_MODIFICADO_CON_POL%C3%8DMERO)

<sup>3</sup> RODRÍGUEZ, Rogelio; CASTAÑO, Víctor; MARTÍNEZ, Miguel; HERNÁNDEZ, Genoveva. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule, (2001). [en línea] [citado 10 de marzo de 2015] disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt160.pdf>

<sup>4</sup>VARGAS H, María; SÁNCHEZ S, Antonio; MANERO B, Octavio; Comportamiento reológico y estabilidad térmica de asfalto modificado con polímeros tribloque (SBS, SBS-G-MA, SEBS); (30-05-2009); [en línea] [citado 11 de marzo de 2015] disponible en: [http://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n2/07Articulo.pdf](http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n2/07Articulo.pdf)

puesta en servicio de este tipo de betunes, incrementándose la temperatura de distribución de la mezcla a 145°C por su rápido endurecimiento<sup>5</sup>.

Daquan et al. (2006) prepararon asfaltos modificados con SBS por medios físicos y químicos, realizaron ensayos de estabilidad al almacenamiento, llevaron a cabo análisis reológicos empleando un reómetro de corte dinámico (DSR). Los resultados indicaron que no sólo la estabilidad en el almacenamiento, sino las propiedades reológicas del asfalto con SBS-modificado eran más estables cuando el asfalto modificado es el resultado de una verdadera reacción química. La adición de un agente de entrecruzamiento dio como resultado mejores características mecánicas de la mezcla asfáltica preparada<sup>6</sup>.

Debido a la diferencia de parámetros de solubilidad y de densidad entre el SBS y el asfalto, la mezcla SBS-betún no es estable cuando es mantenida a elevadas temperaturas y a largos periodos de tiempo. Con el fin de mejorar su estabilidad es muy común añadir azufre durante el proceso de preparación, ya que actúa como agente vinculante, reaccionado con los dobles enlaces existentes en los bloques de butadieno y generando entrecruzamientos químicos que mejoran la estabilidad de la mezcla SBS-betún<sup>7</sup>.

A temperaturas más altas, por encima del punto de ablandamiento del asfalto, el SBS se mantiene sólido formando una malla circundante que contiene y aglutina al fluido manteniendo la consistencia de la mezcla, evitando que se presente flujo

---

<sup>5</sup> AGUIRRE; MASEGOSA, Rosa; VIÑAS, María; SÁNCHEZ, Marta; SALOM, Catalina; GONZÁLEZ, Margarita; PÁEZ, Antonio; BARCELÓ, Francisco; CONTRERAS, Verónica. Compatibilidad de betunes modificados con SBS en función de la estructura del betún, 17 noviembre 2013. [en línea] [citado 15 de marzo de 2015] disponible en: <http://oa.upm.es/25777/>

<sup>6</sup> FIGUEROA, Ana; FONSECA, Elsa y REYES, Fredy. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado, (junio de 2009). en línea [citado 12 de marzo de 2015] [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-21262009000100003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262009000100003)

<sup>7</sup> I. Aguirre de Carcer, R. M. Masegosa, M.T. Viñas, M. Sanchez-Cabezudo, C. Salom, M. G. Prolongo, A. Páez, F. Barceló, V. Contreras; Compatibilidad de betunes modificados con SBS en función de la estructura del betún, (2013), . [en línea] [citado 11 de marzo de 2015] disponible en: [http://oa.upm.es/25777/1/INVE\\_MEM\\_2013\\_160725.pdf](http://oa.upm.es/25777/1/INVE_MEM_2013_160725.pdf)

viscoso. Además, a temperaturas muy bajas, en el que el asfalto se comportaría como un sólido frágil el SBS brinda elasticidad a la mezcla<sup>8</sup> [8].

Estudios realizados relacionados con asfaltos modificados, denotan que los valores para una temperatura de 58°C de muestras con SBS presentan módulos entre 3.4 y 4.6 Kpa, y ángulos de fase que presentan valores entre los 68° y 69°, estimaciones cercanas a las presentadas por el asfalto de Barranca 70-90 y 80-100.

Mostrando que el ligante con SBS presenta menor susceptibilidad al envejecimiento a largo plazo<sup>9</sup> [9].

---

<sup>8</sup>UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas-pista de prueba, alcaldía mayor de Bogotá D.C. (Bogotá D.C. Diciembre de 2005).

<sup>9</sup>POTTI, Juan José; Asfalto y Pavimentación, Volumen V; Primer semestre 2015

## **2. ETODOLOGIA**

Para determinar los cambios en la rigidez del asfalto con la adición de SBS en esta investigación se determinaron las propiedades mecánicas elásticas de un asfalto convencional AC 60-70 y la modificación de este con un elastómero polimérico de tipo I (SBS).

Con esta finalidad se elaboraron probetas que posteriormente fueron ensayadas a cargas de compresión-tracción y flexión.

### **2.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

Para la modificación de asfalto, se adicione un elastómero termoplástico (SBS) y azufre como agente vinculante en las cantidades que se describen en la Tabla 1.

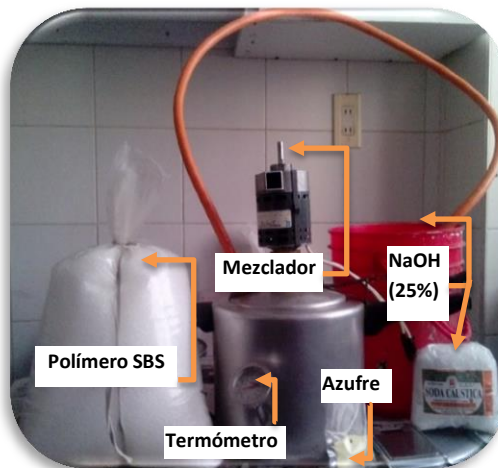
Se empleó un mezclador elaborado artesanalmente compuesto de un recipiente a presión y un motor eléctrico de 1625 rpm, con el fin de recrear condiciones ideales de alto corte para una buena incorporación polímero/asfalto. El proceso se dividió en 2 fases: en la primera, cuando el asfalto adquirió una temperatura de 150 °C se mezcló con azufre por 90 minutos, cumplido este tiempo se procedió a adicionar el polímero SBS, mezclándolo durante 270 minutos para terminar el proceso. La temperatura fue de 180 °C con una frecuencia de agitación de 1625 rpm. Ver Figura 1.

**Tabla 1. Denominación de Muestras en el Laboratorio.**

Tipos de Muestras realizadas en el Laboratorio			
Tipo	Asfalto Base	SBS (%)	Azufre (%)
M1	AC 60-70	1	0.3
M2	AC 60-70	2	0,5
M3	AC 60-70	3	0,8

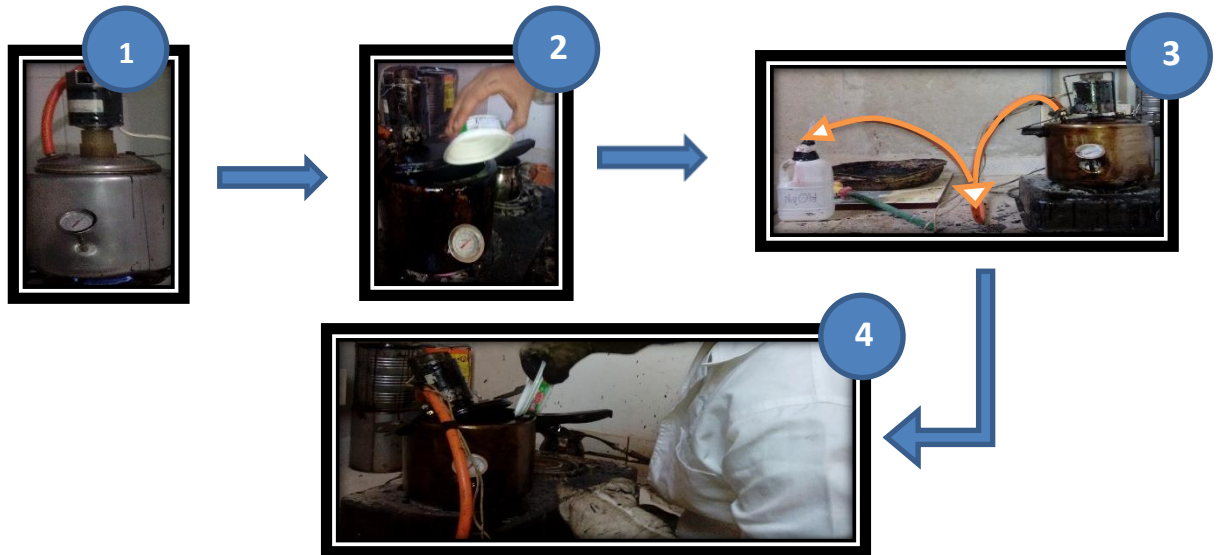
En las figura 1 se muestran los equipos e insumos utilizados durante la modificación de asfalto AC 60-70 en el laboratorio.

**Figura 1. Insumos y equipo para la modificación de asfalto a nivel de laboratorio.**



El método empleado para la modificación de asfalto convencional con azufre como agente compatibilizante y polímero SBS como agente modificador es esquematizado en la Figura 2.

**Figura 2. Método experimental utilizado para la modificación de asfalto 60-70 en el laboratorio.**



1. Precalentamiento del Asfalto.
2. Adición del Azufre al recipiente con el Asfalto caliente y encendido del mezclador.
3. Sellado del sistema para canalización de los vapores de H<sub>2</sub>S por la manguera a un tambor de hidróxido de sodio y neutralizarlos durante la reacción.
4. Luego se adiciona el Polímero y se

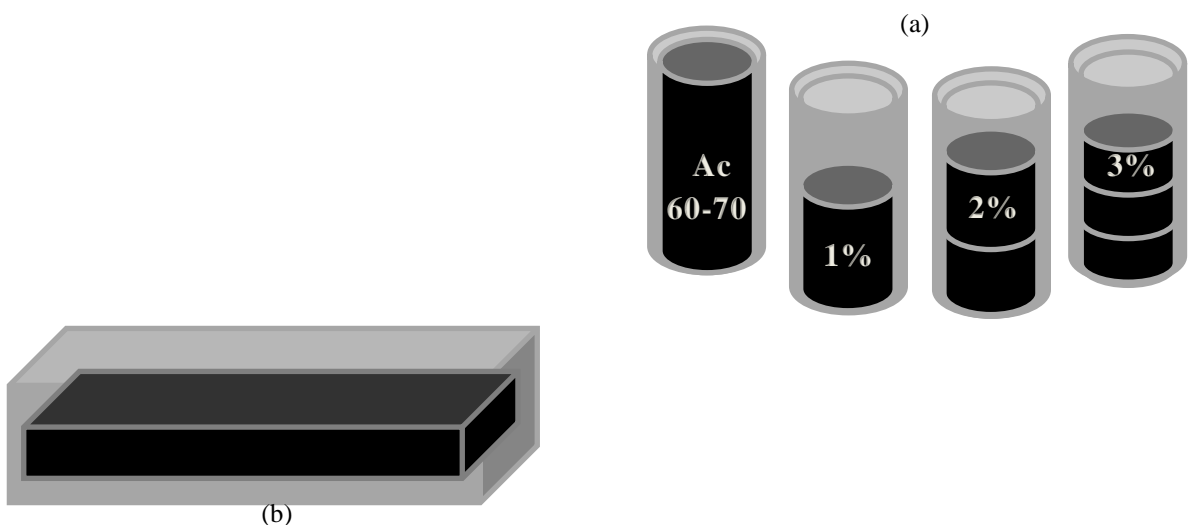
### **Fabricación de Probetas**

Las muestras se fabrican mediante el vertido de asfalto en caliente (170 °C), en moldes de forma cilíndrica de 30.5 mm de altura y 14.5 de diámetro y paralelepípedas de 80 mm de largo, 20 mm de ancho y 10 mm de altura.

El vaciado del asfalto en los moldes cilíndricos se realiza en capas de igual dimensión, siendo el espesor de los estratos más delgado cuando el porcentaje de polímero en el ligante es mayor Figura 3 (a). En las probetas de forma cubica se realiza el vertido del betún en dos capas de igual espesor independientemente de

la cantidad de polímero utilizado en la modificación Figura 3 (b). Cada capa debe ser compactada aplicando continuamente pequeñas vibraciones, evitando la aparición de vacíos en la probeta. Se deja en proceso de enfriamiento hasta que llegue a la temperatura ambiente con el fin de tener una superficie plana y finalmente la parte superior se esparce con una espátula caliente. La muestra es almacenada con el molde a baja temperatura (-5 °C) hasta que se realiza el experimento.

**Figura 3. (a) División de probetas cilíndricas en capas de asfalto dependiendo de la viscosidad. (b) Elaboración de muestras paralelepípedas**  
**Fuente: Elaboración Propia.**



## 2.2. PROTOCOLO EXPERIMENTAL.

### Medida Modulo de Young

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo " $\sigma$ " y el cambio correspondiente a la deformación unitaria " $\epsilon$ " (1), dicho incremento es una indicación de la rigidez del material. Si el esfuerzo es una tensión o una compresión, el módulo se denomina módulo de Young y tiene el mismo valor para

ambos tipos de carga. El hecho de que la variación de deformación unitaria sea directamente proporcional a la variación de esfuerzo, siempre que no se sobrepase el límite elástico, se conoce como ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_{max}} \quad (1)$$

El esfuerzo puede calcularse como:

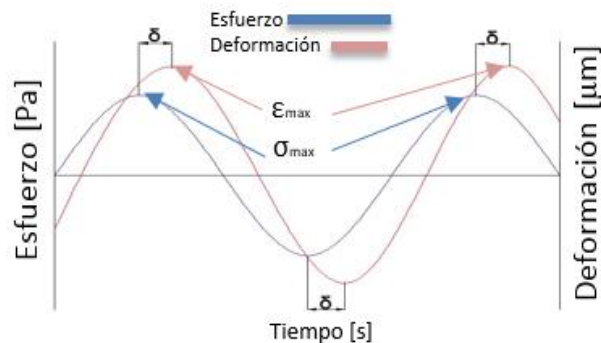
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Siendo  $P$  la carga aplicada y  $A$  el área de la sección transversal de la muestra. Finalmente para la determinación de  $E$ , la deformación se calculará como:

$$\epsilon = \frac{\Delta}{l} \quad (3)$$

Donde  $\Delta$  es el desplazamiento de la muestra y  $l$  la longitud inicial de la misma. De este modo podemos obtener la curva esfuerzo-deformación. (Ver Grafica 1)

**Grafica 1. Angulo de fase ( $\delta$ ), esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ) y deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ ) entre la curva esfuerzo y la de deformación,**



El comportamiento visco elástico se puede aproximar por la variación del módulo de rigidez en función de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga.

Con este fin se seleccionaron los siguientes valores de frecuencias 1 / 3 / 5 / 10 y 20 Hz, en cuantos al rango de temperaturas, se establecieron en 21 / 30 / 35 / 40 y 45 °C para las muestras cilíndricas y de 21 / 30 y 40 °C para las paralelepípedas.

### **Tracción - compresión sobre muestras cilíndricas “MC”.**

Se aplica carga senoidal en tracción-compresión sobre especímenes cilíndricos pegados a dos placas circulares, Figura 4, tomando en cuenta que este tipo de carga causa menos deterioro al material ya que las deformaciones no se van acumulando durante el ensayo, cosa que sí ocurre cuando la carga es de compresión, Figura 6. Es muy importante mantener el nivel de deformaciones lo más bajo posible en este ensayo, procurando no superar los  $\pm 35 \mu\text{m}$ , de lo contrario, podríamos entrar en el rango de comportamiento no lineal del material, dañando al mismo tiempo la probeta por fatiga.

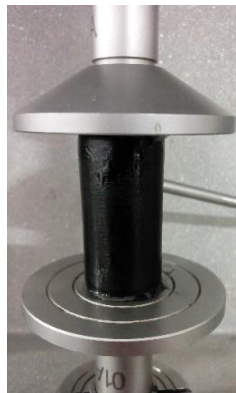
**Figura 4 (a) Muestra cilíndrica después del desmoldado. (b) Pegado de la muestra en el plato de la máquina. (c) Muestra cilíndrica lista para ser ensayada.**



(a)

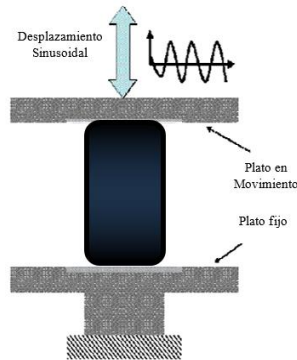


(b)



(c)

**Figura 5. Vista esquemática de la muestra cargada**

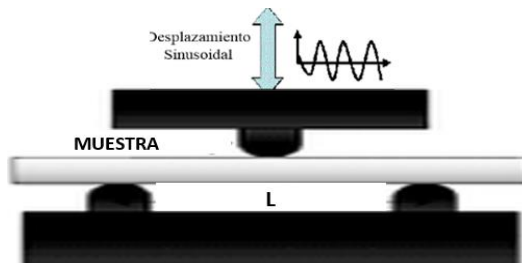


La medida de la rigidez en este tipo de ensayos se realiza teniendo en cuenta las ecuaciones (1, 2, 3) mencionadas anteriormente.

**Ensayo a flexión sobre muestras Paralelepípedas “MP”.**

En las muestras de forma rectangular se aplica carga senoidal en flexión a tres puntos, Figura 6.

**Figura 6. Esquema del sistema de flexión por tres puntos para medir el comportamiento esfuerzo - deformación.**



La probeta se coloca sobre dos soportes, con una fuerza aplicada en la parte superior, en el centro del espécimen (Generándose en este punto el momento máximo de flexión) Figura 7. Cuando la muestra se carga en flexión se está

sometiendo a una combinación de fuerzas de compresión (en la cara superior) y de tracción (que actúan por la cara opuesta).

Utilizando la teoría de flexión de vigas y asumiendo que la muestra de asfalto tiene un comportamiento elástico lineal, calcularemos el esfuerzo y la deformación en un ensayo de flexión en tres puntos del siguiente modo (4, 5, 6):

$$\sigma = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (4)$$

La deformación en el centro de la viga se calcula mediante la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{6\Delta h}{l^2} \quad (5)$$

El valor del módulo de Elasticidad para una viga rectangular a flexión en tres puntos, se calcula reemplazando los valores de esfuerzo (4) y deformación (5) en la ecuación general (1):

$$E = \frac{Pl^3}{4\Delta bh^3} \quad (6)$$

Donde:

E: Modulo de Young [MPa].

$\sigma$ : Máxima tensión a flexión [MPa].

$\varepsilon$ : Máxima deformación a flexión [mm/mm]

P: Carga aplicada [N]

l: Distancia entre los soportes [mm].

b: Ancho de la viga [mm].

h: Altura de la viga [mm].

$\Delta$ : Desplazamiento de la muestra [mm].

**Figura 7 (a) Muestra paralelepípeda en molde. (b) Muestra paralelepípeda después del desmoldado. (c) Muestra paralelepípeda lista para ser ensayada.**  
**Fuente: Archivo Personal.**



(a)



(b)



(c)

### 3. CARACTERIZACION DE MATERIALES

Las propiedades de los elementos empleados en el trabajo se describen a continuación:

#### 3.1. AZUFRE

Se utilizó el azufre elemental en polvo como agente entrecruzante entre asfalto y polímero, en la “Tabla 2”, se muestra las propiedades físicas del azufre.

**Tabla 2. Propiedades físicas del Azufre.**

Punto de Fusión(°C)	Punto de Ebullición (°C)	Temperatura Crítica (°C)	Cristal	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
115,2	444,7	1041	Polisulfuro, rómbico, monoclinico (Inestable)	Líquido ≈ 2

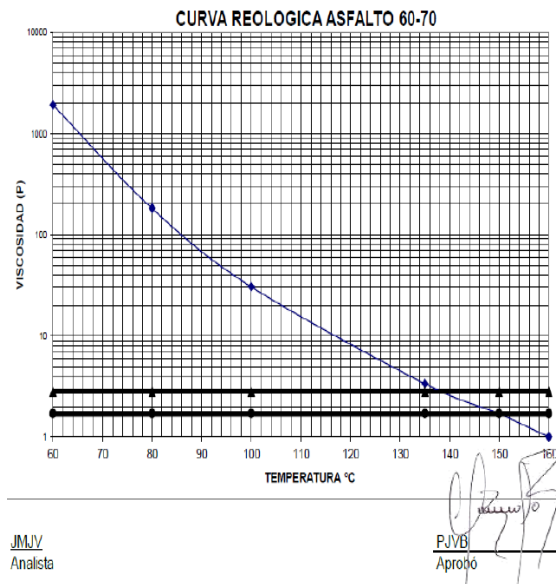
#### 3.2. ASFALTO AC 60-70

En el estudio se utilizó ligante asfáltico de penetración grado 60/70, las propiedades físicas y reológicas de este tipo de betún se describen en la “Tabla 3” y “Figura 8”.

**Tabla 3. Caracterización Asfalto 60/70. Fuente: Ecopetrol**

Características	Unidades	Métodos	Mínimo	Máximo
Ductibilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100	
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	60	70
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55
Punto de inflamación	°C	D 92	232	
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99	
Pérdida de masa	g/100	D 2872		1,0

**Figura 8. Curva reologica Asfalto 60/70**



### 3.3. POLÍMERO (STYRENE/BUTADIENE/STYRENE) SBS.

El agente modificante utilizado en el ensayo de modificación es SBS de tipo granulado que contiene el 30% en peso de estireno y el 70 % en peso de butadieno. Punto de fusión 160-200°C. (Ver Tabla 4)

**Tabla 4. Propiedades de SBS. Fuente: VECTOR 8508 de Dexco polymers LP.**

PROPIEDADES	MÉTODO	UNIDAD	VALORES
Estireno	Dexco	% en peso	29
Contenido Dibloque	Dexco	% en peso	<1
Índice de Fluidez	ASTM D 1238	dg / min	12
Viscosidad	ASTM D 2196	cps	400
Volátiles	Dexco	% en peso	0.4
Ceniza	ASTM D 1416	% en peso	0.8
<b>Propiedades físicas</b>			
Resistencia a la Tracción	ASTM D 412	PSI (Mpa)	4800 (33.1)
Módulo	ASTM D 412	PSI (Mpa)	630 (3.7)
Alargamiento a la rotura	ASTM D 412	%	1100
Dureza	ASTM D 2240	Shore A	65
Peso específico	ASTM D 792		0.94

## 4. RESULTADOS

Con estos resultados se quiere hacer un análisis comparativo de la rigidez del asfalto AC 60-70 y su modificación con diferentes cantidades de SBS.

### 4.1. MUESTRAS CILÍNDRICAS “MC” Y MUESTRAS PARALELEPÍEDAS “MP”

Con base en los resultados de rigidez (ver Anexo), se modelaron curvas maestras del Módulo de Young y del Angulo de Fase ajustadas a una temperatura de 21°C, con el fin de hacer una comparación de dichos valores.

#### **Curvas Maestras.**

Para facilitar el análisis del efecto que tiene la temperatura en el módulo de Young de los ligantes asfálticos, se desarrolló el concepto de la curva maestra [10]. En la Figura 13 se muestra el módulo de Young medido en una probeta bituminosa a diferentes temperaturas y frecuencias, reflejándose en los datos la susceptibilidad de este material respecto a ambas variables, temperatura y frecuencia, lo cual permite al ingeniero tomar en cuenta además de las temperaturas propias de la zona donde se está diseñando el pavimento, la velocidad de los vehículos, en la respuesta estructural que la mezcla asfáltica puede brindar.

Téngase en cuenta que una extensión o una compresión de la escala temporal implica un desplazamiento en la escala logarítmica, y por eso los conjuntos de módulos medidos a las diferentes temperaturas pueden desplazarse horizontalmente hasta converger en una única curva, la curva maestra. Ésta es, en definitiva, el módulo dinámico de la mezcla bituminosa a una temperatura de referencia. Se han propuesto diferentes expresiones para la misma, si bien la más

ampliamente aceptada es la expresión sigmoïdal reflejada en la ecuación [1]. Nótese que la frecuencia reducida es, simplemente, el resultado de aplicar el principio de correspondencia tiempo-temperatura a la frecuencia real.

$$\log lE^*l = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma * \log(fred)}} \quad (7)$$

Donde:

Fred: frecuencia reducida

$\delta$ : Valor mínimo de E

$\delta + \alpha$ : Valor máximo de E

$\beta$  Y  $\gamma$ : parámetros del modelo que describen la forma de la función sinusoidal.

$$\log(fred) = \log(f) - \log(a_T) \quad (8)$$

La magnitud del ajuste o desplazamiento de cada dato de temperatura requerido para formar la curva maestra describe la dependencia del material con la temperatura. Esta magnitud se ve afectada por un factor de ajuste, el cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$a_T = \frac{-c_1 * (T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (9)$$

F: frecuencia (Hz)

$a_T$ : factor de correspondencia tiempo-temperatura;

$C_1$ ,  $C_2$ : Constantes del modelo.

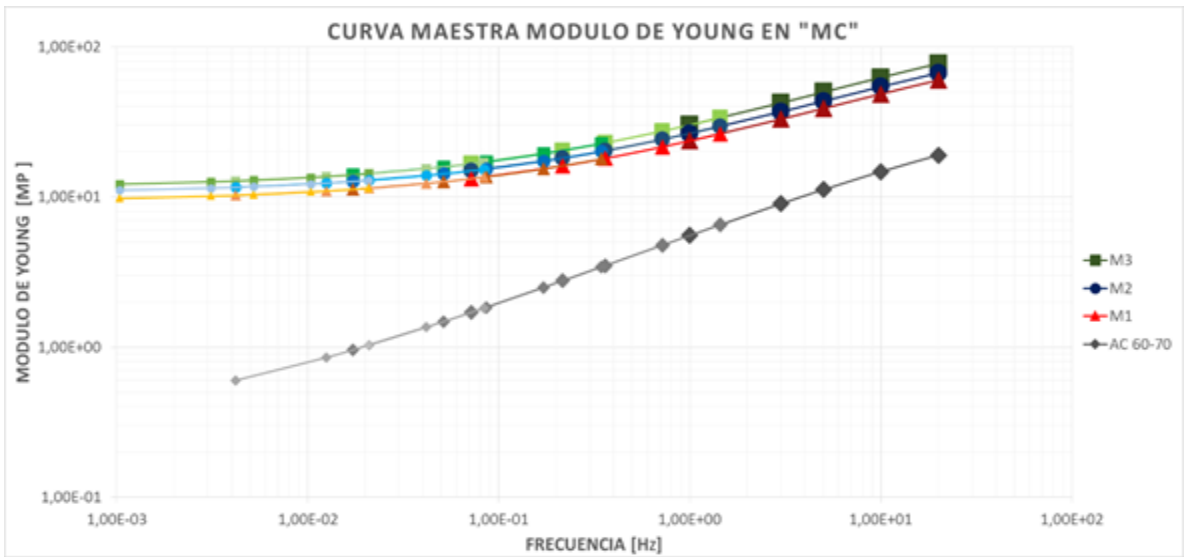
T: Temperatura experimental.

$T_r$ : Temperatura de referencia.

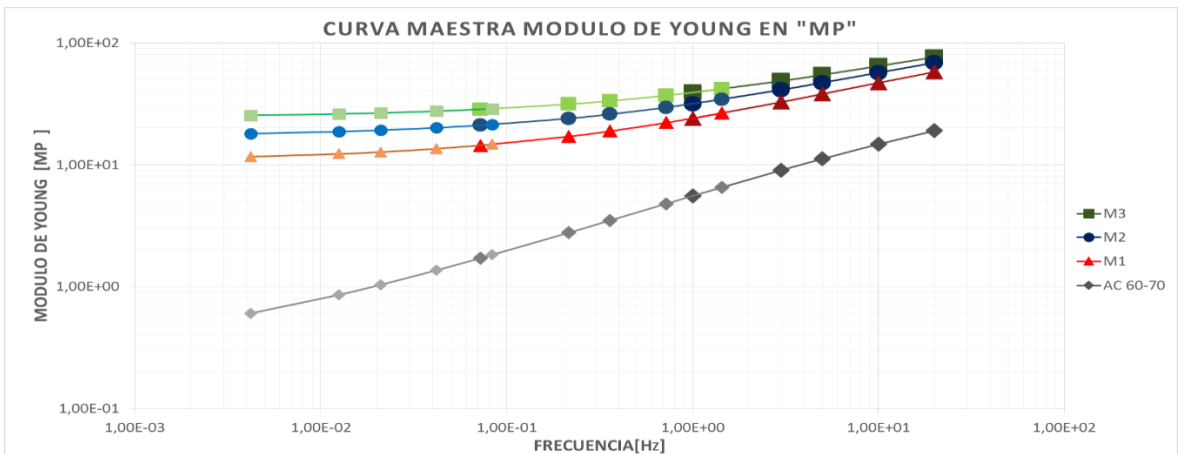
Nota: log se refiere a logaritmo decimal

En las figuras 2, 3, 4 y 5 se puede apreciar el comportamiento del asfalto convencional AC 60-70 y el modificado con diferentes dosificaciones de polímero SBS, donde se tiene la relación entre la frecuencia, el módulo de Young y el ángulo de fase a varios cambios de temperatura.

**Grafica 2. Comparación curvas maestras del Módulo de Young en las “MC” M3, M2, M1 y AC 60-70**



**Grafica 3. Comparación curvas maestras del Módulo de Young en las “MP” M3, M2, M1 y AC 60-70**



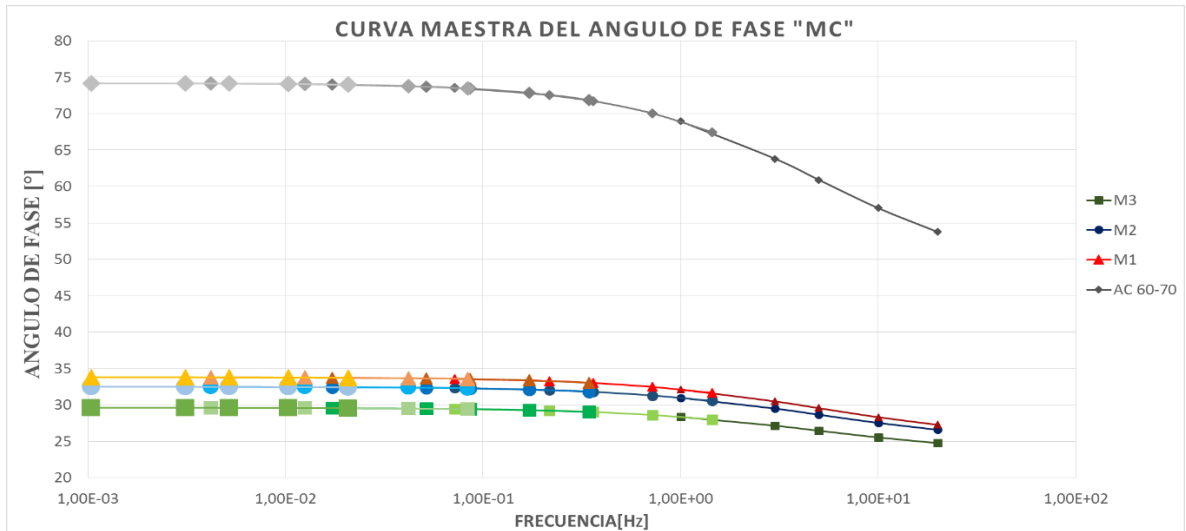
En las Gráficas 4 y 5 se puede apreciar que las muestras de asfalto convencional son más susceptibles a la temperatura, teniendo un cambio promedio de Modulo de Young del 74% a un incremento progresivo de 5°C, mientras las muestras con asfalto modificado tienen un cambio del 29 al 34% en el módulo frente a la misma variación, siendo las probetas M1, M2 y M3 un 40% menos susceptibles a cambios en el módulo elástico frente a la variación de temperatura.

La modificación del asfalto con este tipo de elastómero generó materiales con mayor rigidez, lográndose aumentar en: 193% el módulo elástico de la muestra M1, 227% el de M2 y 279% el de la muestra con 3% de SBS, a 21°C. Con 40°C de temperatura se mantuvo esta tendencia en las muestras M1, M2 y M3 con una rigidez 30, 34 y 37 veces mayor respectivamente, con respecto a la observada en el asfalto sin modificar AC 60-70.

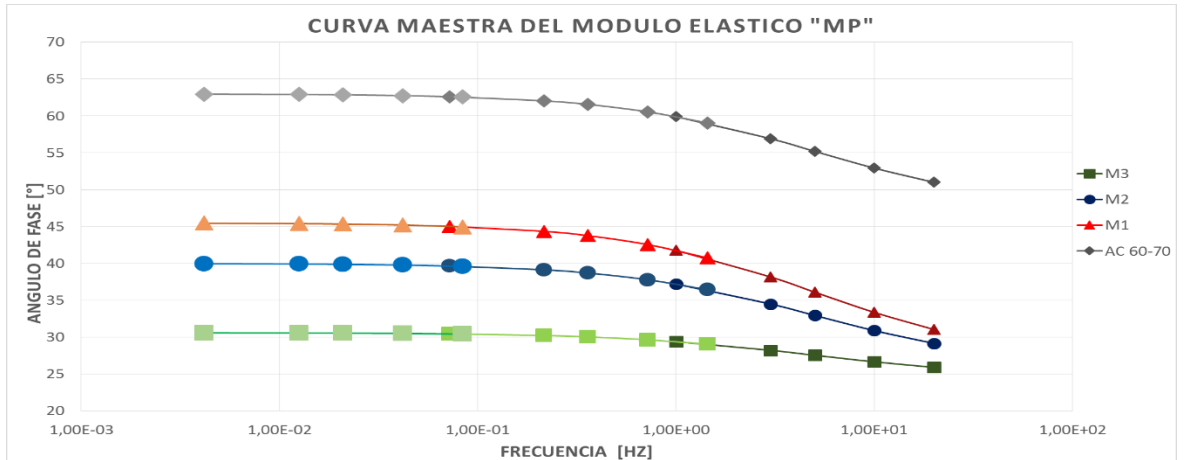
Correlacionando los datos obtenidos se puede observar que la muestra M1 (1% SBS – 0,3% S) a 30°C ofrece valores similares de rigidez que la muestra M3 (3% SBS – 0,8% S) a 40 °C, con apenas un 4% de variación entre los datos de M1 con los de M3, esta relación también se observa en las mezcla M2 30°C y AC 60-70 21°C con las muestras M3 a 35°C y 45°C respectivamente.

Los resultados obtenidos en los ensayos de evaluación de la rigidez en Tracción–Compresión como en flexión, describen valores similares en el módulo de elasticidad, siendo las rigideces en las muestras cilíndricas apenas un 5% mayor que las obtenidas en flexión.

**Grafica 4. Comparación curvas maestras del Angulo de Fase en las “MC” M3, M2, M1 y AC 60-70**



**Grafica 5. Comparación curvas maestras del Angulo de Fase en las “MP” M3, M2, M1 y AC 60-70**



En cuanto al ángulo de fase, se logró una reducción del 55,4% respecto al valor presentado por el Asfalto convencional.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las muestras con algún grado de polímero ofrecen valores más altos en la rigidez que el asfalto sin modificar, permitiendo disminuir el espesor de la capa de rodadura, con capacidad estructural equivalente a las de una capa gruesa con asfalto convencional.

El aumento de la rigidez del asfalto modificado respecto del convencional, es de aproximadamente 279%, indicando esto que una mezcla compuesta por un ligante modificado con polímeros SBS tendrá un mejor comportamiento mecánico, siendo más resistente a efectos de desgaste y ahuellamiento.

Las muestras bases de asfalto 60-70 demuestran mayor susceptibilidad al cambio de temperatura, caso contrario en las probetas ensayadas con un grado de polímero (M1, M2 y M3), que frente a dichos cambios evidencian variaciones mucho menores en su rigidez, lo cual nos indica que en una mezcla asfáltica con asfalto modificado el comportamiento mecánico de esta sería similar a altas como a bajas temperaturas.

Los estudios realizados describen que al adicionarle SBS al asfalto, hay mejoría en sus propiedades. Dichas mejoras se ven reflejadas en el incremento del componente elástico ( $E'$ ) del asfalto reduciendo el componente viscoso ( $E''$ ), como es descrito en la literatura por (Stangl, y otros 2007; Lucena, y otros 2004; Burak, y otros 2007; Jian-Shiuh, y otros 2002). Brindando una mejor recuperación elástica después de retirar un esfuerzo.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE; MASEGOSA, Rosa; VIÑAS, María; SÁNCHEZ, Marta; SALOM, Catalina; GONZÁLEZ, Margarita; PÁEZ, Antonio; BARCELÓ, Francisco; CONTRERAS, Verónica. Compatibilidad de betunes modificados con SBS en función de la estructura del betún, 17 noviembre 2013. [en línea] [citado 15 de marzo de 2015] disponible en: <http://oa.upm.es/25777/>

ARIAS, Lourdes; ROJAS, Ingrid y JOSKOWICZ, Pablo. Modificación de asfalto venezolano con polímero. (5to congreso Venezolano del Asfalto, Marzo de 2009. [en línea] [Citado el 9 de Junio de 2014], disponible en: [http://www.inveas.org.ve/data/documentos\\_inveas/boletines/T01.%20Arias,%20Jockoviz,%20et%20al.%20Asfalto%20Modificado%20con%20Pol%C3%ADmero.pdf](http://www.inveas.org.ve/data/documentos_inveas/boletines/T01.%20Arias,%20Jockoviz,%20et%20al.%20Asfalto%20Modificado%20con%20Pol%C3%ADmero.pdf)

FIGUEROA, Ana; FONSECA, Elsa y REYES, Fredy. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado, junio de 2009. [en línea] [citado 12 de marzo de 2015] [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-21262009000100003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262009000100003)

I. Aguirre de Carcer, R. M. Masegosa, M.T. Viñas, M. Sanchez-Cabezudo, C. Salom, M. G. Prolongo, A. Páez, F. Barceló, V. Contreras; Compatibilidad de betunes modificados con SBS en función de la estructura del betún, 2013, [en línea] [citado 10 de marzo de 2015] Disponible en: [http://oa.upm.es/25777/1/INVE\\_MEM\\_2013\\_160725.pdf](http://oa.upm.es/25777/1/INVE_MEM_2013_160725.pdf)

MÚNERA O, Juan C; modificación polimérica de asfaltos; 2012; [en línea] [citado 11 de marzo de 2015] disponible en:

[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/700/JuanCamilo\\_MuneraOssa\\_2012.pdf;jsessionid=B8B9F24787799A5ABBFC7BD89D69FF35?sequence=1](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/700/JuanCamilo_MuneraOssa_2012.pdf;jsessionid=B8B9F24787799A5ABBFC7BD89D69FF35?sequence=1)  
POTTI, Juan José; Asfalto y Pavimentación, Volumen V; Primer semestre 2015

RODRÍGUEZ, Rogelio; CASTAÑO, Víctor; MARTÍNEZ, Miguel; HERNÁNDEZ, Genoveva. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule, 2001.[en línea] [citado 10 de marzo de 2015] disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt160.pdf>

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas-pista de prueba, alcaldía mayor de Bogotá D.C. (Bogotá D.C. Diciembre de 2005).

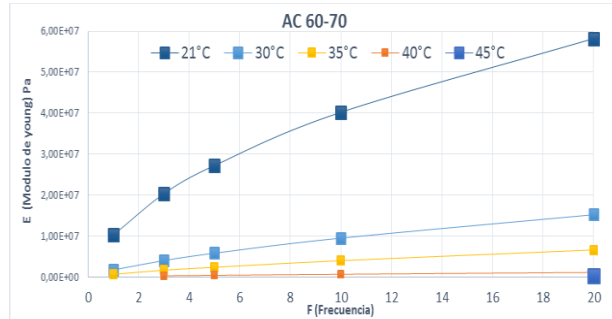
VARGAS H, María; SÁNCHEZ S, Antonio; MANERO B, Octavio; Comportamiento reológico y estabilidad térmica de asfalto modificado con polímeros tribloque (SBS, SBS-G-MA, SEBS); 30-05-2009; [en línea] [citado 11 de marzo de 2015] disponible en: [http://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n2/07Articulo.pdf](http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v6-n2/07Articulo.pdf)

WULF R, Fernando A; Análisis de Pavimento Asfáltico modificado con Polímero; Valdivia, Chile; 2008; [en línea] [citado 09 de marzo de 2015] disponible en: [http://www.academia.edu/6999391/Escuela\\_de\\_Construcci%C3%B3n\\_Civil\\_AN%C3%81LISIS\\_DE\\_PAVIMENTO\\_ASF%C3%81LTICO\\_MODIFICADO\\_CON\\_POL%C3%8DMERO\\_](http://www.academia.edu/6999391/Escuela_de_Construcci%C3%B3n_Civil_AN%C3%81LISIS_DE_PAVIMENTO_ASF%C3%81LTICO_MODIFICADO_CON_POL%C3%8DMERO_)

## ANEXOS

### Anexo A. Módulo de Young y Angulo de fase

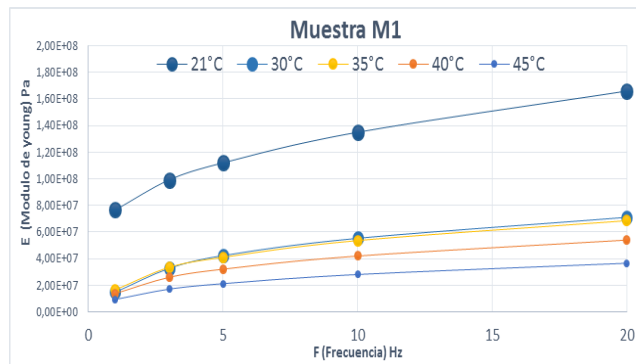
#### Muestra Asfalto AC 60-70



#### Variación del Angulo de fase en la Muestra Asfalto AC 60-70

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 35°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)	$\delta$ a 45°C (°)
1	58.9	71.4	71.2	NR	NR
3	54.5	67.4	71.7	72.1	NR
5	52.5	65.6	69.9	72.7	NR
10	49.9	63.4	67.8	73	NR
20	47.6	60.4	65.3	69.9	74.2

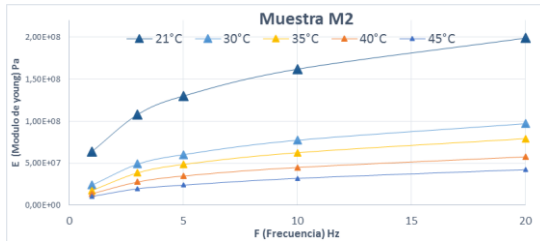
#### Muestra M1- 1% SBS y 0,3% Azufre



### Variación del Angulo de fase en la Muestra M1- 1% SBS y 0,3% Azufre.

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 35°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)	$\delta$ a 45°C (°)
1	22.4	22.5	24	26.6	29.4
3	23.6	29.8	29.9	31.3	33.6
5	23.7	30.5	30.4	31.6	33.8
10	23.6	30.5	30.7	31.9	34
20	23.5	30.3	30.4	31.6	33.6

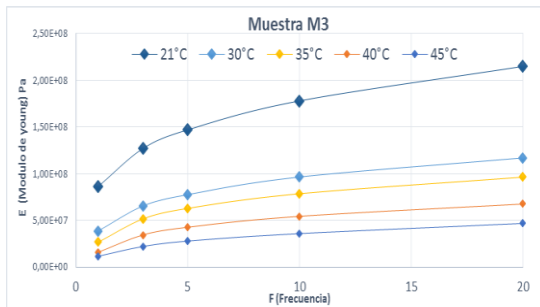
### Muestra M2 - 2% SBS y 0,5% Azufre



### Variación del Angulo de fase en la Muestra M2 - 2% SBS y 0,5% Azufre.

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 35°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)	$\delta$ a 45°C (°)
1	18.9	20.8	19.8	24.3	27.2
3	26.2	27.5	28	30.2	32.3
5	26.8	28.1	28.9	31	32.5
10	26.9	28.3	29.1	31.1	31.8
20	26.7	28.1	29	30.8	32

### .Muestra M3 - 3% SBS y 0,8% Azufre

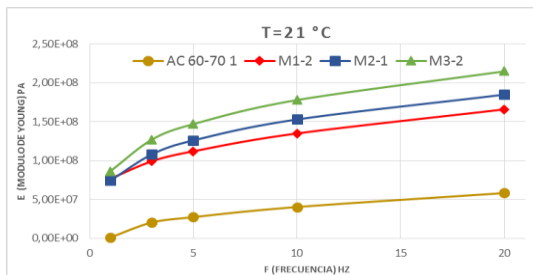


### Variación del Angulo de fase en la Muestra M3 - 3% SBS y 0,8% Azufre.

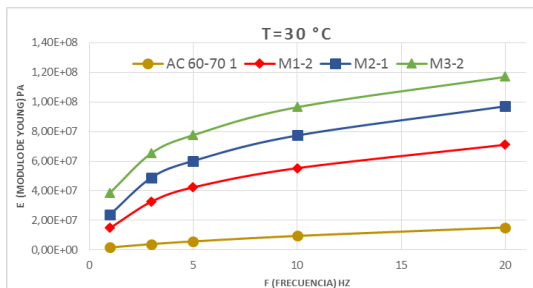
Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 35°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)	$\delta$ a 45°C (°)
1	22.5	21.1	19.6	18.2	23
3	23.8	24.3	24.9	26.3	28.5
5	24	24.6	25.4	27.2	29.6
10	24	24.8	25.7	27.4	28.7
20	24.2	24.7	25.7	26.7	29

### Comportamiento Elástico de las muestras con la Temperatura.

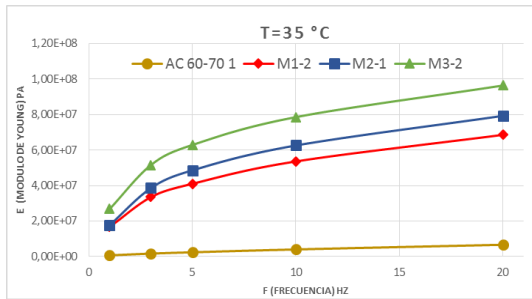
#### Muestras cilíndricas AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 21°C.



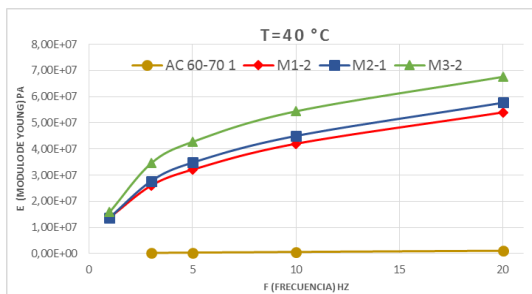
#### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 30°C



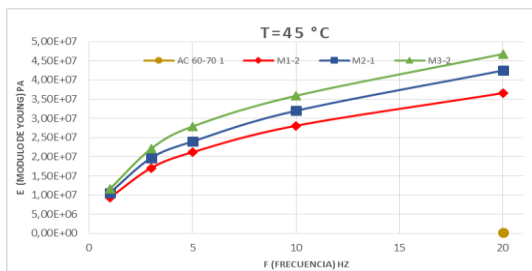
### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 35°C



### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 40°C



### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 45°C.

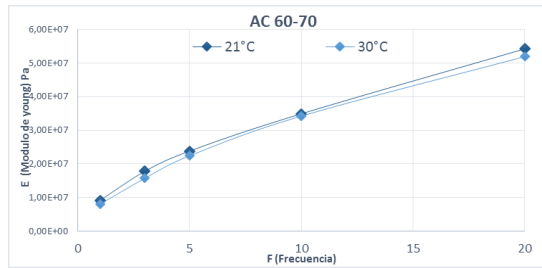


## Modulo elástico de las Muestras Cilíndricas ensayadas en el laboratorio con respecto a Temperatura y Frecuencia.

		E a 1 hz	E a 3 hz	E a 5 hz	E a 10 hz	E 20 hz
21 °C	AC 60-70	1,02E+07	2,03E+07	2,72E+07	4,02E+07	5,82E+07
	M-1	7,24E+07	9,92E+07	1,12E+08	1,35E+08	1,66E+08
	M-2	7,43E+07	1,08E+08	1,26E+08	1,53E+08	1,85E+08
	M-3	8,63E+07	1,27E+08	1,47E+08	1,78E+08	2,15E+08
30 °C	AC 60-70	1,70E+06	3,99E+06	5,79E+06	9,47E+06	1,52E+07
	M-1	1,48E+07	3,27E+07	4,23E+07	5,53E+07	7,11E+07
	M-2	2,39E+07	4,90E+07	6,02E+07	7,74E+07	9,71E+07
	M-3	3,87E+07	6,55E+07	7,76E+07	9,65E+07	1,17E+08
35 °C	AC 60-70	6,34E+05	1,64E+06	2,36E+06	3,96E+06	6,60E+06
	M-1	1,35E+07	3,16E+07	4,10E+07	5,36E+07	6,86E+07
	M-2	1,76E+07	3,86E+07	4,86E+07	6,26E+07	7,93E+07
	M-3	2,67E+07	5,16E+07	6,29E+07	7,86E+07	9,64E+07
40 °C	AC 60-70	NR	2,82E+05	3,87E+05	6,54E+05	1,11E+06
	M-1	1,33E+07	2,60E+07	3,21E+07	4,20E+07	5,40E+07
	M-2	1,38E+07	2,77E+07	3,48E+07	4,50E+07	5,77E+07
	M-3	1,59E+07	3,45E+07	4,27E+07	5,44E+07	6,76E+07
45 °C	AC 60-70	NR	NR	NR	NR	2,67E+05
	M-1	9,34E+06	1,71E+07	2,12E+07	2,81E+07	3,66E+07
	M-2	1,06E+07	1,97E+07	2,40E+07	3,20E+07	4,25E+07
	M-3	1,16E+07	2,21E+07	2,79E+07	3,59E+07	4,68E+07

## Comportamiento Elástico de las muestras individuales.

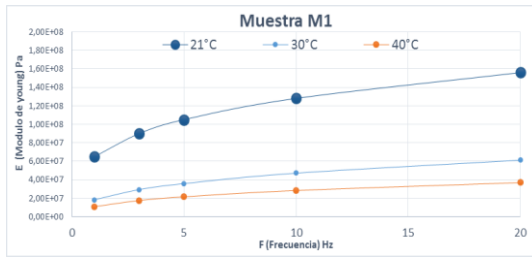
### Muestra Asfalto AC 60-70



### Variación del Angulo de fase en la Muestra Asfalto AC 60-70

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)
1	56.7	63	NR
3	52.6	62.3	NR
5	51	59	NR
10	48.6	56.6	NR
20	47.4	50.3	NR

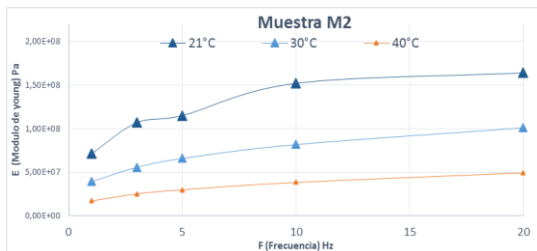
### Muestra M1- 1% SBS y 0,3% Azufre



### Variación del Angulo de fase en la Muestra M1- 1% SBS y 0,3% Azufre

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)
1	29.1	37	45.5
3	28.1	35.7	37.9
5	27.8	35	36.9
10	27.3	34.2	36.3
20	26.7	33.2	35.1

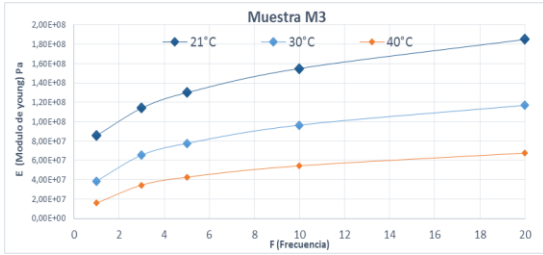
### Muestra M2 - 2% SBS y 0,5% Azufre



### Variación del Angulo de fase en la Muestra M2 - 2% SBS y 0,5% Azufre

Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)
1	30.1	31.2	31
3	29.1	29.7	34.2
5	28.7	29.3	33.4
10	28.2	28.8	33
20	27.6	28.3	32.4

### Muestra M3 - 3% SBS y 0,8% Azufre

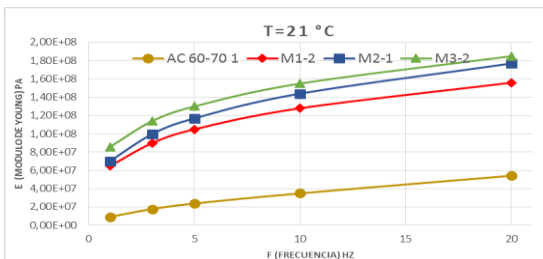


### Variación del Angulo de fase en la Muestra M3 - 3% SBS y 0,8% Azufre

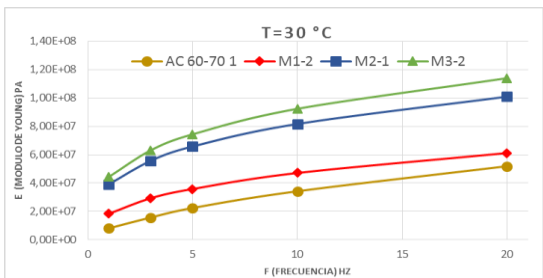
Fr (hz)	$\delta$ a 21°C (°)	$\delta$ a 30°C (°)	$\delta$ a 40°C (°)
1	25.8	30.6	30.6
3	25.2	29.7	30.5
5	25.1	29.2	30.5
10	24.8	28.8	30.1
20	24.5	28.3	29.5

### Comportamiento Elástico de las muestras con la Temperatura.

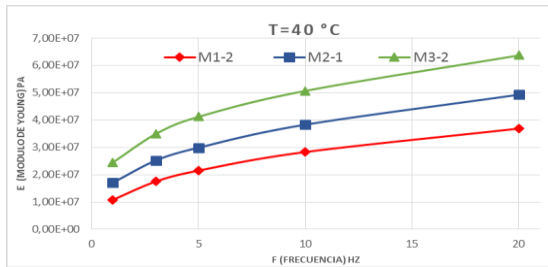
#### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 21°C



#### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 30°C



### Muestras AC 60-70, M1, M2 y M3 a Temperatura de 40°C



### Modulo elástico de las Muestras Paralepípedas ensayadas en el laboratorio con respecto a Temperatura y Frecuencia.

		E a 1 hz	E a 3 hz	E a 5 hz	E a 10 hz	E 20 hz
21 °C	AC 60-70	9,18E+06	1,78E+07	2,38E+07	3,49E+07	5,42E+07
	M-1	6,48E+07	8,99E+07	1,05E+08	1,28E+08	1,56E+08
	M-2	7,02E+07	9,98E+07	1,17E+08	1,44E+08	1,77E+08
	M-3	8,57E+07	1,14E+08	1,30E+08	1,55E+08	1,85E+08
30 °C	AC 60-70	8,04E+06	1,57E+07	2,24E+07	3,42E+07	5,19E+07
	M-1	1,83E+07	2,93E+07	3,58E+07	4,71E+07	6,12E+07
	M-2	3,91E+07	5,57E+07	6,58E+07	8,17E+07	1,01E+08
	M-3	4,43E+07	6,31E+07	7,44E+07	9,24E+07	1,14E+08
35 °C	AC 60-70	NR	NR	NR	NR	NR
	M-1	1,08E+07	1,75E+07	2,15E+07	2,83E+07	3,69E+07
	M-2	1,71E+07	2,52E+07	2,99E+07	3,83E+07	4,93E+07
	M-3	2,45E+07	3,49E+07	4,12E+07	5,07E+07	6,37E+07