

**OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ EN UN LIGANTE BITUMINOSO MODIFICADO
CON CAUCHO RECICLADO VARIANDO SU TAMAÑO, PORCENTAJE EN
MASA Y TIEMPO DE MEZCLADO**

FERNANDO ANDRES MANTILLA MENDOZA

EMERSON JAIR OTERO BARTAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE ESCUELAS FÍSICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

**OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ EN UN LIGANTE BITUMINOSO MODIFICADO
CON CAUCHO RECICLADO VARIANDO SU TAMAÑO, PORCENTAJE EN
MASA Y TIEMPO DE MEZCLADO**

FERNANDO ANDRES MANTILLA MENDOZA

EMERSON JAIR OTERO BARTAN

Trabajo de grado modalidad Investigativa

Para optar por el título de:

Ingeniero Civil

Director

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

Ph.D. en Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE ESCUELAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Este libro va dedicado en primera instancia a Dios, quien es el principal arquitecto de mi vida y quien me guía en el camino, a mi querida y hermosa madre, Zoraída Mantilla, la mujer que ha sido mi motor, mi fuente de inspiración y la que siempre ha estado a mi lado en los momentos más difíciles, gracias por siempre creer en mí.

Fernando A. Mantilla M

Este libro va dedicado en primera instancia a Dios, quien es el principal arquitecto de mi vida y quien me guía en el camino, a mi querida y amada familia, mi madre María Bartán, mi padre Jairo Otero y mi hermano Andrés Otero quienes han sido mi motor, mi fuente de inspiración y los que siempre han estado a mi lado en los momentos más difíciles, gracias por siempre creer en mí.

Emerson J. Otero B

GRACIAS

AGRADECIMIENTOS

A Dios pues sin él, nada de esto hubiera sido posible.

A nuestros padres, por el apoyo incondicional que siempre nos han brindado.

A nuestro director de proyecto por la guía y el conocimiento brindado para llevar a cabo este proyecto.

A nuestra familia, que siempre estuvieron presentes y pendientes de nosotros durante todo este largo camino universitario.

A nuestros amigos por todos los momentos vividos durante esta linda etapa.

A todos los docentes que compartieron sus conocimientos con nosotros y por todo lo aportado en nuestro aprendizaje.

A todas y cada una de las personas que de alguna u otra forma estuvieron involucrados en nuestro proceso de aprendizaje y dejaron su huella de forma positiva.

CONTENIDO

INTRODUCCION	14
OBJETIVOS.....	16
OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1. MARCO TEORICO	17
1.1. ASFALTO.	17
1.1.1. Tipo de asfalto utilizado.....	17
1.2. CAUCHO RECICLADO.	17
1.3. INFLUENCIA DEL CAUCHO RECICLADO DE LLANTA EN EL ASFALTO MODIFICADO.....	18
1.4. RIGIDEZ EN MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS.	18
2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	20
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCHO GRANULADO.	20
2.2. PORCENTAJE EN MASA DE LA MEZCLA.....	21
2.3. TIEMPO DE MEZCLADO.	21
2.4. ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....	21
2.5. ENSAYO DE CARGA UNIAXIAL (METRAVIB).	24
3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	26
3.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO.	26
3.2. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO SU TIEMPO DE MEZCLADO.....	27
3.3. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO SU TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	29

3.4. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO EL PORCENTAJE EN MASA.....	31
3.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES VISCO- ELÁSTICAS CON RESPECTO A LA RIGIDEZ.	33
4. CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	37
BIBLIOGRAFIA.....	38
ANEXOS.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de tamizado.	21
Figura 2. Caucho Granulado Dosificado.	22
Figura 3. Mezcla Asfalto-Caucho.	23
Figura 4. Proceso de Mezclado.	23
Figura 5. Espécimen de Asfalto-Caucho.	24
Figura 6. Ensayo en la METRAVIB.	25
Figura 7. Resultados de un espécimen ensayado a tracción-compresión en la maquina METRAVIB.	26
Figura 8. Comportamiento de la rigidez variando el tiempo de mezclado.	28
Figura 9. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición variando el tiempo de mezcla.	29
Figura 10. Comportamiento típico de la rigidez variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho.	30
Figura 11. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho.	31
Figura 12. Comportamiento típico de la rigidez variando el porcentaje en masa de caucho en la mezcla.	32
Figura 13. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el porcentaje en masa del gránulo de caucho reciclado en la mezcla.	33
Figura 14. Grafico Cole-Cole de los especímenes de mayor y menor rigidez junto con los especímenes de control.	34

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Características de los 31 especímenes.....	39
Anexo B. Calculo del Módulo Complejo.....	40
Anexo C. Comportamiento de la rigidez variando el tiempo de mezclado del asfalto-caucho.....	46
Anexo D. Comportamiento de la rigidez variando el tamaño de partícula del caucho.	50
Anexo E. Comportamiento de la rigidez variando porcentaje en masa de caucho granulado de la mezcla asfalto- caucho.....	54
Anexo F. Grafico Cole-Cole de los 27 especímenes mezclados junto con los 4 especímenes de control.....	58

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ EN UN LIGANTE BITUMINOSO MODIFICADO CON CAUCHO RECICLADO VARIANDO SU TAMAÑO, PORCENTAJE EN MASA Y TIEMPO DE MEZCLADO.*

AUTORES: FERNANDO ANDRES MANTILLA MENDOZA
EMERSON JAIR OTERO BARTAN**

PALABRAS CLAVES: Rigidez, Ligante Asfáltico, Cargas Cíclicas, METRAVIB.

DESCRIPCIÓN:

En el artículo se obtuvo el módulo de rigidez a diferentes frecuencias de un ligante bituminoso modificado mezclado con gránulo de caucho reciclado de llanta variando determinados componentes en la mezcla tales como el tamaño de partícula del granulo de caucho, porcentaje en masa en relación mezcla-cantidad de caucho y el tiempo empleado para la elaboración de los especímenes mezclados.

Para llevar a cabo el proyecto, se obtuvo material de gránulo de caucho reciclado sin separación previa y un determinado tipo de ligante asfáltico, luego se procedió a clasificar el caucho por tamización en diferentes tipos de tamaños y éstos se mezclaron con el cemento asfáltico modificado previamente dosificado manteniendo la temperatura en la etapa de elaboración de la mezcla en un rango establecido durante varios tiempos determinados para así conseguir varios especímenes mezclados de características únicas y diferentes cada una en su composición. Luego estos especímenes fueron colocados a bajas temperaturas para efectos conservación y finalmente estos fueron sometidos a cargas cíclicas uniaxiales de tracción-compresión a temperatura ambiente en la maquina METRAVIB con el fin de obtener valores registrados para la temperatura de ensayo, constante de rigidez, ángulo de desfase y módulo de rigidez para siete valores establecidos de frecuencias.

*Trabajo de Investigación.

**Facultad de ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Eduardo Castañeda.

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING THE STIFFNESS IN A MODIFIED BITUMINOUS BINDER WITH RECYCLED RUBBER VARYING ITS SIZE, PERCENTAGE IN MASS AND MIXING TIME.*

AUTHORS: FERNANDO ANDRES MANTILLA MENDOZA
EMERSON JAIR OTERO BARTAN**

KEYWORDS: Stiffness, Asphaltic Binder, Cyclic Loads, METRAVIB.

DESCRIPTION:

The current article was pretended to obtain the stiffness from a modified bituminous binder mixed with recycled rubber granule varying determined components in the mixture such as the recycled rubber granule's size of particle, percentage in mass related to recycled rubber granule's mixture-quantity and the time used to make the mixture.

To bring out the project, material of recycled rubber granule without previous separation and a determined sort of modified asphaltic binder were obtained, thus the rubber was classified in three different sizes by sieving and mixed along with the asphaltic cement previously dosed keeping the temperature between a stablished rank during several determined times to get several specimens of different characteristics in their composition. These specimens were tested under traction-compression uniaxial cyclic loads in the METRAVIB machine at an average temperature to finally obtain certain parameters that help to determine the stiffness as test temperature, stiffness constant, offset angle and stiffness modulus for seven set frequency values.

*Work research

**Faculty of physical-mechanics science, Civil Engineering School, Director: Eduardo Castañeda.

INTRODUCCION

En el mundo actual, la acumulación y el exceso de residuos sólidos tales como el caucho, el cual es un material abundante que se utiliza en variadas industrias al nivel global, representan un peligro para cualquier ecosistema y controlar la cantidad de estos residuos se convierte en una actividad muy laboriosa y contaminante. El caucho está compuesto principalmente por látex, sustancia natural que se puede encontrar generalmente en plantas tropicales en diferentes regiones del mundo. Uno de los factores claves para el uso del caucho es que al reciclarse o reutilizarse, el material no pierde las principales propiedades y características mecánicas, lo cual hace que éste sea un recurso importante a emplear en la industria de la construcción debido a esta particularidad siempre y cuando el material de caucho reciba un nuevo tratamiento para su adecuación y en especial para la reducción de su tamaño de partícula. [1] La mejora de las mezclas de pavimentos debe ser un tema incentivado en el ámbito académico y éste debe ser ampliamente investigado con el fin de buscar mezclas asfálticas apropiadas mediante la variación del ligante bituminoso, esto con el objetivo de buscar un mejoramiento en las propiedades mecánicas del pavimento.

Uno de los principales problemas de las mezclas bituminosas es el envejecimiento [1] debido a alteraciones propias de la intemperie y del tiempo. Existen diversos problemas recurrentes una vez la mezcla se ha rigidizado, las ondulaciones superficiales pueden ocurrir por exceso de asfalto en el diseño de la mezcla o en el propio proceso de mezclado, también es posible encontrar de forma eventual, agrietamiento o desintegración de la capa superficial y pavimento quebradizo, ambas anomalías por causa de insuficiencia de la cantidad de asfalto en la mezcla y esta última, causada por deflexión excesiva del pavimento ya sea bien por una mezcla quebradiza o por endurecimiento excesivo. Es necesario cerciorar que las

deformaciones sufridas por el pavimento mezclado se encuentren en el rango elástico y las mezclas que se desarrollarán no deben ser ajenas a esto; las deformaciones plásticas son consecuencias perjudiciales y éstas deben ser tenidas en cuenta para realizar un buen procedimiento en el proceso de mezclado. [2]

Otro problema inminente es la degradación del caucho, éste tarda aproximadamente entre 100 a 600 años en degradarse de forma natural aunque ciertas revistas importantes, atribuyen un tiempo mayor a 1000 años para la degradación natural de los neumáticos, siendo éste la principal fuente para el caucho reciclado en la industria de la construcción en el país. [3]

Debido a las alteraciones climáticas, es necesario tomar acciones responsables con respecto a los procesos de quema de caucho, ya que es un proceso altamente contaminante y por ende, impacta de manera directa el ecosistema en donde este se realiza, además, es un proceso nocivo que puede perjudicar la salud de las personas que estén involucradas directamente con la quema de caucho. Una forma sencilla y menos contaminante para manejar los residuos de caucho, es el reciclaje para uso en la elaboración de mezclas asfálticas como material pétreo y esto a su vez, tendrá que suponer una mejora notoria en las propiedades mecánicas del pavimento tal que garantice una respuesta apropiada cuando esté solicitado a diferentes cargas.

El proyecto de grado buscó elaborar una mezcla óptima de un ligante asfáltico con caucho reciclado, teniendo en cuenta el parámetro de rigidez medido en laboratorio variando cada uno de los componentes presentes en la mezcla, para así, establecer una relación entre su comportamiento con respecto a dichas variaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la variación de rigidez de un ligante asfáltico modificado con caucho reciclado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la rigidez del asfalto aditivado con caucho reciclado.
- Estudiar el efecto del tamaño de las partículas de caucho reciclado en la rigidez de asfalto modificado.
- Estudiar el efecto de la concentración de las partículas de caucho reciclado en la rigidez de asfalto modificado.
- Estudiar el efecto del tiempo de mezclado en la rigidez del asfalto modificado.

1. MARCO TEORICO

1.1. ASFALTO.

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencias, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. [4]

1.1.1. Tipo de asfalto utilizado: Los cementos asfálticos se designan por las letras CA, y se elaboran a partir de una combinación de asfaltos refinados de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación. Se clasifican según su grado de dureza o consistencia, lo cual se mide a través de un ensaye de penetración en décimas de milímetros. Es así como podemos distinguir los tipos CA 40-50, CA 60-70, CA 85-1 00, CA 120-150, entre otros. [5]

El asfalto utilizado para realización de este proyecto es CA 60-70 de la empresa MPI que es un asfalto "NORMALIZADO" termino que hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 60 y 70 mm/10. [6]

1.2. CAUCHO RECICLADO.

El caucho reciclado es obtenido de las llantas en desuso de los automotores, las cuales de otra manera, no tendrían un destino diferente al de los sitios dispuestos como rellenos municipales o simplemente basureros a cielo abierto, cumpliendo un

importante y peligroso papel en la creciente contaminación ambiental que nos afecta actualmente. [1]

El caucho molido se obtuvo de la empresa INDUSTRIA DE CAUCHOS RECORD.Ltda en Bucaramanga.

1.3. INFLUENCIA DEL CAUCHO RECICLADO DE LLANTA EN EL ASFALTO MODIFICADO.

El caucho de llanta se ha convertido en un elemento útil y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas. Algunas ventajas del uso de caucho reciclado en las mezclas asfálticas se presentan a continuación: [1]

- El caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento elimina los problemas encontrados con el polímero virgen.
- No presenta solubilidad, a diferencia del caucho natural este no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
- Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.

1.4. RIGIDEZ EN MATERIALES VISCO-ELÁSTICOS.

La cohesión interna entre las partículas de un sólido deformable, permite que presente resistencia ante las sollicitaciones de carga. El módulo de rigidez representa el grado de cohesión de un material, por consiguiente, es un indicador de su resistencia.

Generalmente, los materiales rígidos por un comportamiento elástico presentan una cohesión intermolecular estable, bajo condiciones térmicas y de carga normales. En estos casos, el comportamiento elástico es representado correctamente por el módulo de elasticidad. Por otro lado, en materiales visco-elásticos, dichas condiciones inciden notablemente en el grado de cohesión interna de las partículas.

Cuando las condiciones de temperatura y frecuencia de carga varían sustancialmente, el comportamiento del material tiende a los extremos (Elástico o Viscoso). [7]

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El cemento asfáltico mezclado con gránulo de caucho a altas temperaturas atrae componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.

Este proyecto de grado tuvo como finalidad la obtención del módulo de rigidez en diferentes mezclas de asfalto-caucho en las cuales se varió tres propiedades de la composición de la mezcla que fueron:

- Tamaño de partícula del gránulo de caucho
- Porcentaje en masa de la mezcla
- Tiempo de mezclado

Para cada una de estas propiedades, se estableció tres tipos de tamaño de partícula, tres tipos de porcentaje en masa y tres tiempos de mezclado diferentes para una combinación total de veintisiete especímenes de mezclas de asfalto-caucho y 4 espécimen de control de solo asfalto para un total de treinta y un especímenes (31). [Ver Anexo A]

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCHO GRANULADO.

El gránulo de caucho se separó en tamaños determinados con los tamices que sugiere el ensayo (INV E-123) como se puede evidenciar en la Figura 1. Los tres tamaños que se escogieron para realizar el proyecto fueron los retenidos en los tamices # 60, 100 y 200.

Figura 1. Proceso de tamizado.



2.2. PORCENTAJE EN MASA DE LA MEZCLA.

Para este proyecto se fijó tres porcentajes en masa de la mezcla, de las cuales el 15%, 20% y 25% de la masa total del espécimen estuvo constituido por material granuloso de caucho. [8]

2.3. TIEMPO DE MEZCLADO.

Con el fin de obtener variaciones significativas en los resultados se empleó tres tiempos de mezclado diferentes: 30, 50 y 70 minutos. [8]

2.4. ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.

Para la elaboración de los especímenes se utilizó moldes cilíndricos de silicona con medidas de 1.5cms de diámetro y una altura de 3cms.

Cada uno de los especímenes se elaboró siguiendo la siguiente secuencia:

1. Se procedió a dosificar la cantidad del caucho granulado (tamizado) de la mezcla asfalto-caucho con un tamaño de partícula determinado teniendo en cuenta los porcentajes en masa y tamaños de partículas establecidos como se muestra en la Figura 2. (Cerciorando que cada una de las configuraciones en las propiedades de la mezcla de cada uno de los veintisiete especímenes sea única.). Este proceso se llevó a cabo tomando como base proporcional una mezcla de 50g de asfalto-caucho.

Figura 2. Caucho Granulado Dosificado.



2. En una estufa eléctrica, se calentó el asfalto dosificado hasta alcanzar una temperatura de 180° C, una vez alcanzada la temperatura, se añadió el gránulo de caucho faltante para obtener la mezcla total proporcionada en 50 gramos. Se hizo control de la temperatura con un termómetro de alcohol con capacidad de 200°C, manteniendo la mezcla en un rango de 170-190 °C como se ve en la Figura 3. Además se elaboró 4 probetas asfálticas de control de asfalto 60/70, en las cuales 3 tuvieron como parámetros de estudio únicamente el tiempo de mezclado de 30, 50 y 70 minutos y otra la cual solamente se mezcló hasta alcanzar una temperatura de 180°.

Figura 3. Mezcla Asfalto-Caucho.



3. Con un agitador de aluminio se batió la mezcla durante 30, 50 y 70 minutos consecutivamente y al cumplir cada uno de los tiempos la mezcla se depositó en los moldes de silicona para un total de 3 especímenes completado este proceso, como se puede evidenciar en las Figuras 4 y 5. Siguiendo el proceso anterior en cada jornada se realizaban 3 especímenes.

Figura 4. Proceso de Mezclado.



Figura 5. Espécimen de Asfalto-Caucho.



2.5. ENSAYO DE CARGA UNIAXIAL (METRAVIB).

Los especímenes fueron puestos en un ambiente con temperaturas bajas con el fin de conservar su forma, esto debido a que la mezcla podía sufrir alteraciones ante cualquier contacto a temperatura ambiente.

Una vez que los especímenes alcanzaron un estado de rigidez estable producto de la baja temperatura, éstos fueron sometidos a un ensayo a compresión uniaxial (INV E 754-07) a temperatura ambiente en la máquina METRAVIB la cual es una máquina de pruebas dinámicas basadas en un concepto dedicado al análisis de las características visco-elásticas como se ve en la Figura 6.

Figura 6. Ensayo en la METRAVIB.



Para la realización del ensayo, fue necesario ajustar previamente las características de la máquina a los parámetros correspondientes para el proyecto en particular con el fin de realizar un ensayo óptimo. En la configuración previa se ajustó las dimensiones del espécimen, tipo de espécimen, tipo de ensayo, frecuencia de cargas, tipo de cargas, estabilización de la máquina y temperatura a la cual se realizó el ensayo. Cabe destacar que el ensayo se realizó a temperatura ambiente la cual osciló entre 21,6-21,9 °C.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Luego de los ensayos de tracción-compresión realizados en la máquina METRAVIB se obtuvo los siguientes resultados en cada uno de los especímenes, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Resultados de un espécimen ensayado a tracción-compresión en la maquina METRAVIB.

dyn D = 1.e-5 (m)	Freq (Hz)	Temp (°C)	Stiffness (N/m)	Phase (°)	Modulus (Pa)
	1.	2.17E+01	2.71E+04	5.23E+01	4.30E+06
	3.	2.16E+01	5.15E+04	5.12E+01	8.18E+06
	5.	2.16E+01	6.89E+04	5.05E+01	1.09E+07
	10.	2.16E+01	1.01E+05	4.92E+01	1.61E+07
	15.	2.16E+01	1.26E+05	4.83E+01	2.00E+07
	25.	2.16E+01	1.65E+05	4.72E+01	2.62E+07
	30.	2.16E+01	1.82E+05	4.67E+01	2.89E+07

En el ensayo de tracción-compresión el espécimen se sometió a cargas con siete valores diferentes de frecuencias entre 1 y 30 Hz donde se determinaron y registraron valores de temperatura, constante de rigidez, ángulo de desfase y módulo de rigidez.

3.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO.

Para determinar el módulo complejo-dinámico para cada uno de los especímenes se utilizó la ecuación (1). [Ver Anexo B]

$$E^* = E * \cos(\delta) + E * i.\text{sen}(\delta) \quad (1)$$

$$E1 = E * \cos(\delta) , E2 = E * i.\text{sen}(\delta) \quad (2)$$

$$E^* = E1 + E2 \quad (3)$$

Donde:

E*: Modulo Complejo

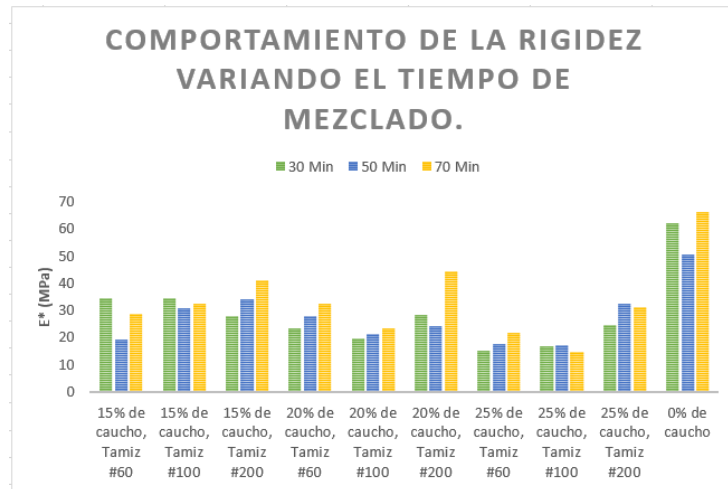
E: Modulo de Rigidez

δ : Angulo de desfase

3.2. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO SU TIEMPO DE MEZCLADO.

De acuerdo a los resultados obtenidos [Ver Anexo C] la influencia de la variación del tiempo de mezcla en los valores del módulo complejo muestran una tendencia ascendente a medida que el tiempo de mezclado es mayor; de esta forma la mayoría de los especímenes que fueron mezclados durante una mayor cantidad de tiempo, en este caso de 70 minutos, mostraron valores de rigidez mayores con respecto aquellos que se mezclaron durante 30 y 50 minutos. Como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Comportamiento de la rigidez variando el tiempo de mezclado.



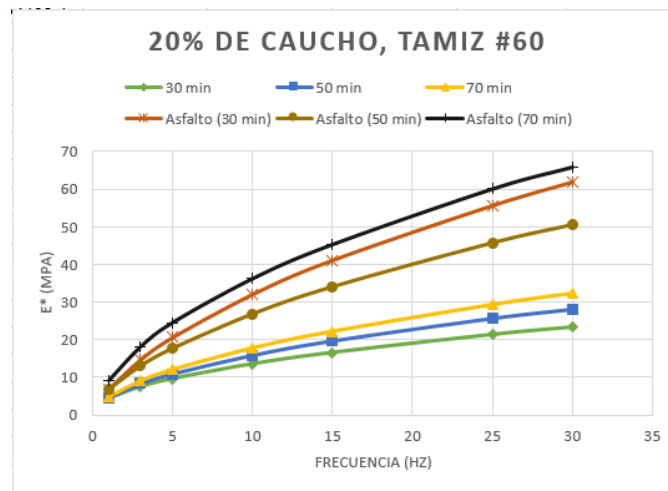
La Figura 8 muestra los valores del módulo complejo de los 27 especímenes de asfalto-caucho clasificados por grupos de 3 especímenes cada uno según las características comunes en su composición variando su tiempo de mezcla. Los valores de rigidez que se tomaron fueron los registrados bajos cargas cíclicas con frecuencias de 30 Hz.

A pesar de que la tendencia indicó que a un mayor tiempo de mezclado la rigidez es mayor, esto no cumplió con algunos especímenes debido a variables que interfirieron en el proceso de mezcla como la temperatura, porcentaje en masa y tamaño de partícula.

La Figura 9 muestra los valores registrados del módulo complejo de 3 especímenes mezclados con características iguales en su composición variando su tiempo de mezcla y además muestra los valores del módulo complejo de los especímenes de control. En la Figura 9 se visualiza los valores de la rigidez para 7 valores diferentes y establecidos de frecuencias entre 1 y 30 Hz. El gráfico registró bajo condiciones de igualdad en la composición de la mezcla que el espécimen con mayor valor en

el comportamiento del módulo dinámico entre los especímenes mezclados fue el que se mezcló durante 70 minutos.

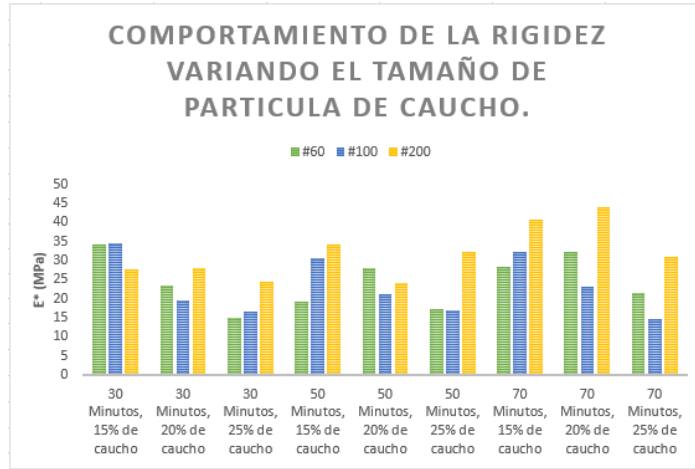
Figura 9. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición variando el tiempo de mezcla.



3.3. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO SU TAMAÑO DE PARTÍCULA.

De acuerdo a los resultados obtenidos [Ver Anexo D] la influencia de la variación del tamaño de partícula en los valores del módulo complejo muestran una tendencia ascendente y semi-curva a medida que el tamaño de partícula es menor; de esta forma la mayoría de los especímenes que fueron mezclados con el menor tamaño de partícula, en este caso de las partículas retenidas en el tamiz #200 ($75\mu\text{m}$), mostraron valores de rigidez mayores con respecto aquellos que se mezclaron con los tamaños de tamiz #60 y #100. Como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Comportamiento típico de la rigidez variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho.



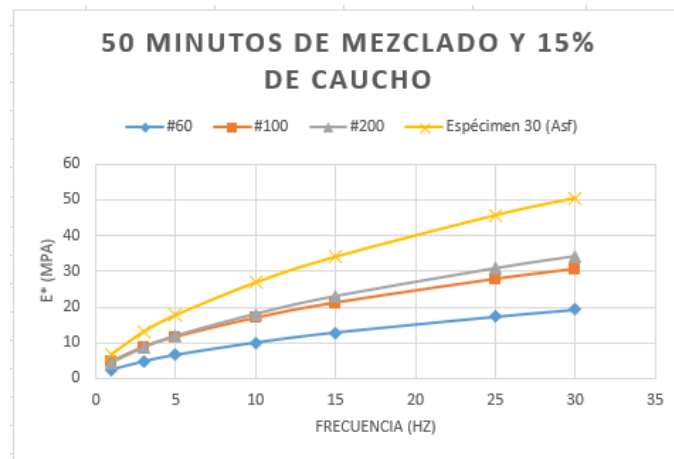
La Figura 10 muestra los valores del módulo complejo de los 27 especímenes de asfalto-caucho clasificados por grupos de 3 especímenes cada uno según las características comunes en su composición y tiempo de mezcla variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho. Los valores de rigidez que se tomaron fueron los registrados bajos cargas cíclicas con frecuencias de 30 Hz.

Esta tendencia fue afectada por variables como la temperatura, tiempo de mezclado y porcentajes en masa que afectaron el resultado final en determinados especímenes.

La Figura 11 muestra los valores registrados del módulo complejo de 3 especímenes mezclados con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho y además mostró los valores del módulo complejo del espécimen de control mezclado por 50 minutos. En la Figura 11 se visualiza los valores de la rigidez para 7 valores de frecuencias diferentes y establecidas entre 1 y 30 Hz. El gráfico registró bajo condiciones de

igualdad en la composición de la mezcla y tiempo de mezclado que el espécimen con mayor valor en el comportamiento del módulo dinámico entre los especímenes mezclados fue el que estuvo compuesto por las partículas de caucho retenidas en el tamiz #200, es decir, aquellas que poseían el menor tamaño.

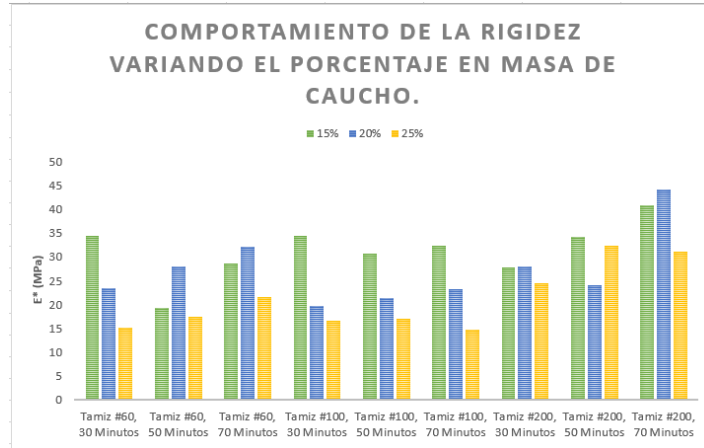
Figura 11. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el tamaño de partícula del gránulo de caucho.



3.4. ANÁLISIS DE LA RIGIDEZ VARIANDO EL PORCENTAJE EN MASA.

De acuerdo a los resultados obtenidos [Ver Anexo E] la influencia de la variación del porcentaje en masa en los valores del módulo complejo muestran una tendencia ascendente a medida que el porcentaje en masa es menor; de esta forma la mayoría de los especímenes que fueron mezclados con el menor porcentaje en masa, en este caso de 15%, mostraron valores de rigidez mayores con respecto aquellos que se mezclaron con porcentajes de 20 y 25%. Como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Comportamiento típico de la rigidez variando el porcentaje en masa de caucho en la mezcla.



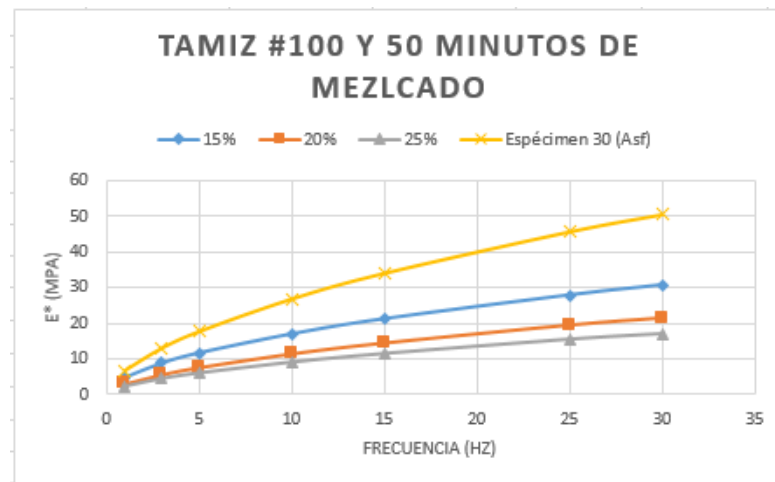
La Figura 12 muestra los valores del módulo complejo de los 27 especímenes de asfalto-caucho clasificados por grupos de 3 especímenes cada uno según las características comunes en su composición variando su tiempo de mezcla. Los valores de rigidez que se tomaron fueron los registrados bajos cargas cíclicas con frecuencias de 30 Hz.

Aunque la tendencia mostró que a menor porcentaje en masa la rigidez fue mayor, en algunos especímenes esta tendencia fue afectada por variables como la temperatura, tiempo de mezclado y el tamaño de partícula.

La Figura 13 muestra los valores registrados del módulo complejo de 3 especímenes mezclados con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el porcentaje en masa del gránulo de caucho de la mezcla y además mostró los valores del módulo complejo del espécimen de control mezclado por 50 minutos. En la Figura 13 se visualiza los valores de la rigidez para 7 valores de frecuencias diferentes y establecidas entre 1 y 30 Hz. El gráfico registró bajo

condiciones de igualdad en la composición de la mezcla y tiempo de mezclado que el espécimen con mayor valor en el comportamiento del módulo dinámico entre los especímenes mezclados fue el constituido con 15% de asfalto en su masa total.

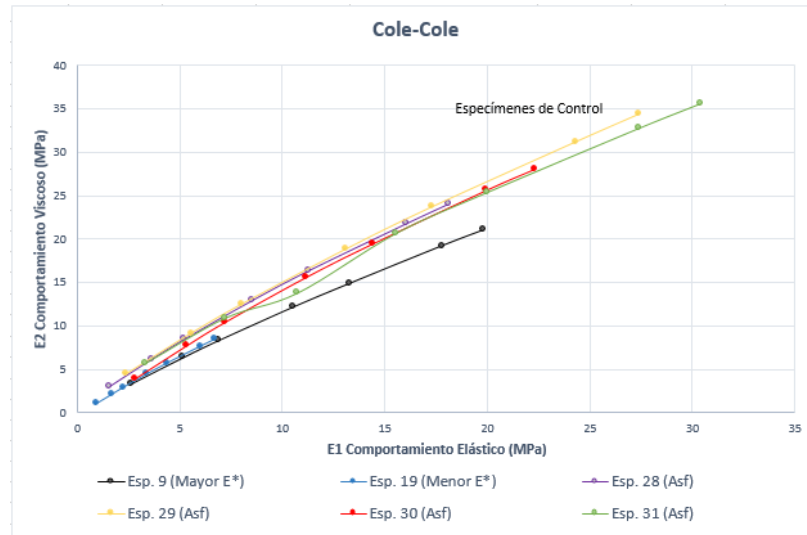
Figura 13. Comportamiento típico de la rigidez de un grupo de especímenes con características iguales en su composición y tiempo de mezcla variando el porcentaje en masa del gránulo de caucho reciclado en la mezcla.



3.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES VISCO-ELÁSTICAS CON RESPECTO A LA RIGIDEZ.

Para analizar el comportamiento visco-elástico de los especímenes se realizó el gráfico Cole-Cole como se muestra en la Figura 14, que relaciona la parte real y la imaginaria del módulo complejo (E^*), en función de la temperatura y la frecuencia de carga. [9]

Figura 14. Grafico Cole-Cole de los especímenes de mayor y menor rigidez junto con los especímenes de control.



Utilizando la ecuación 2 se determinó los componentes elásticos y viscosos de los 27 especímenes mezclados, éstos se graficaron junto con los especímenes de asfalto para determinar el comportamiento visco-elástico de cada uno de los especímenes [Ver Anexo F]. Las gráficas se hicieron en función de los 7 valores de frecuencias diferentes entre 1 y 30 Hz en donde cada punto representa un valor de frecuencia establecido.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a la composición de cada una de las probetas, la rigidez de los 27 especímenes varió de la siguiente manera:

- Los resultados muestran que a mayor tiempo de mezclado se obtendrá un aumento en la rigidez. Este comportamiento se esperaba debido a que el asfalto a mayor tiempo de mezclado, a altas temperaturas, evaporará compuestos hidrocarbonados livianos que hacen que su rigidez aumente. Así, de los especímenes mezclados a 30, 50 y 70 minutos, los especímenes que tuvieron tiempos de mezcla de 70 minutos presentaron valores más altos en su rigidez. La variación de rigidez de las muestras con adición de caucho no permiten asegurar que tiempos de mezclado variando entre 30 y 70 minutos, para la temperatura de mezclado, puedan producir variación en las interacciones entre el asfalto y el caucho. Se requiere un estudio más intensivo y con diferentes tipos de asfalto para valorar de manera definitiva si hay una influencia del tiempo de mezclado en el material resultante.
- Los especímenes que contenían en su composición las partículas de gránulo de caucho contenidas entre el tamiz #100 y #200 presentaron valores más altos en su rigidez que los fabricados con caucho retenido en el tamiz #60. Con un menor tamaño de partícula del caucho el material asfalto-caucho obtendrá una mayor rigidez, esto pudiera ser indicativo de que con una mayor área de contacto o área de la interface asfalto-caucho se produce un mayor número de enlaces entre los dos materiales.
- Los resultados indican que el caucho reduce la rigidez del asfalto, esto pudiera explicarse porque a la temperatura que se realizaron las pruebas el asfalto es más rígido que el caucho. A temperaturas más elevadas la tendencia se puede revertir. La rigidez del material resultante pudiera ser

mayor debido a un aumento en la deformabilidad del asfalto y rigidez estable del caucho.

De acuerdo con los análisis realizados, el espécimen 9 presentó mayor rigidez ya que este espécimen reúne las características que condicionan la mayor rigidez entre los especímenes mezclados. Estas características son: Menor contenido de caucho (15%), mayor tiempo de mezclado (70 min) y menor tamaño de partícula (retenido entre los tamices #100 y #200). El espécimen 19 presentó la menor rigidez, sus características son: 25% de caucho en la mezcla, 30 minutos de tiempo de mezclado y tamaño de partícula contenidas entre el tamiz #40 y #60.

En el análisis del comportamiento visco-elástico, se estudió los especímenes con mayor y menor rigidez junto con los 4 especímenes de control. En la Figura 14 se pudo evidenciar que la adición del gránulo de caucho al asfalto provocó que el nuevo material se comportara de forma más elástica con respecto a los especímenes de control. Este cambio en el comportamiento visco-elástico de la mezcla significó una disminución en la rigidez del material asfalto-caucho. Aunque el análisis visco-elástico se realizó en los especímenes de mayor y menor rigidez no hubo diferencias significativas en el comportamiento visco-elástico entre los demás especímenes mezclados los cuales tuvieron comportamientos similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ANGULO RODRÍGUEZ, Ricardo Alberto y DUARTE AYALA, José Luis. Modificación de un Asfalto con Caucho Reciclado de Llantas Para su Aplicación en Pavimentos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005. 10 p.
- [2] S.A. Construmatica.com. Patologías en Pavimentos Asfálticos. [En línea]. (Citado el 1 de Septiembre de 2017). Disponible en: http://www.construmatica.com/construpedia/Patolog%C3%ADas_en_Pavimentos_Asf%C3%A1lticos
- [3] S.A. Efemotor.com. Descomposición de un neumático. [En línea]. (Citado el 3 de Septiembre de 2017). Disponible en: <http://www.efemotor.com/consejo/un-neumatico-tarda-mil-anos-en-desaparecer-de-la-naturaleza/>
- [4] S.A. Blogspot.com. El Asfalto. [En línea]. (Citado el 5 de Septiembre de 2017). Disponible en: <http://asfaltoenobracivil.blogspot.com.co/2012/07/definicion.html>
- [5] S.A. Asphalt.com. Tipos de Asfalto. [En línea]. (Citado el 8 de Septiembre de 2017). Disponible en: <http://www.e-asphalt.com/espectecnicas/esptecnica.htm>
- [6] S.A. Mpi.net. Ficha Técnica del Asfalto. [En línea]. (Citado el 12 de Septiembre de 2017). Disponible en: <http://www.mpi.net.co/Fichas%20/60-70.pdf>
- [7] NARANJO SALAZAR, Fabio Armando y RUEDA ZAMBRANO, Javier Alberto. Implementación de un Ensayo Para Medir el Modulo de Rigidez Complejo en Mezclas Asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011. 27 p.
- [8] IBARRA QUINTERO, Liz Yulin. Modificación de Asfalto AC-10(ASTM D-3381) Utilizando Caucho de Llanta Molido, de acuerdo a los Requerimientos de la Norma ASTM D-6114-97. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010. 22 p.

BIBLIOGRAFIA

ANGULO RODRÍGUEZ, Ricardo Alberto y DUARTE AYALA, José Luis. Modificación de un Asfalto con Caucho Reciclado de Lantas Para su Aplicación en Pavimentos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2005. 10 p.

IBARRA QUINTERO, Liz Yulin. Modificación de Asfalto AC-10(ASTM D-3381) Utilizando Caucho de Lanta Molido, de acuerdo a los Requerimientos de la Norma ASTM D-6114-97. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010. 22 p.

NARANJO SALAZAR, Fabio Armando y RUEDA ZAMBRANO, Javier Alberto. Implementación de un Ensayo Para Medir el Modulo de Rigidez Complejo en Mezclas Asfálticas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011. 27 p.

ANEXOS

Anexo A. Características de los 31 especímenes.

Especímen	% en Masa	Tamaño Partícula	Tiempo de Mezclado (min)
1	15	# 60	30
2	15	# 60	50
3	15	# 60	70
4	15	# 100	30
5	15	# 100	50
6	15	# 100	70
7	15	# 200	30
8	15	# 200	50
9	15	# 200	70
10	20	# 60	30
11	20	# 60	50
12	20	# 60	70
13	20	# 100	30
14	20	# 100	50
15	20	# 100	70
16	20	# 200	30
17	20	# 200	50
18	20	# 200	70
19	25	# 60	30
20	25	# 60	50
21	25	# 60	70
22	25	# 100	30
23	25	# 100	50
24	25	# 100	70
25	25	# 200	30
26	25	# 200	50
27	25	# 200	70
28	Solo Asfalto		0
29	Solo Asfalto		30
30	Solo Asfalto		50
31	Solo Asfalto		70

Anexo B. Calculo del Módulo Complejo.

Frecuencia (Hz)	Espécimen 1					Espécimen 2				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	46.5	4.16	2.86356	3.01756	5.88111	51.5	1.7	1.05827	1.33043	2.38871
3	45.9	7.48	5.20543	5.37158	10.577	53.1	3.37	2.02342	2.69494	4.71835
5	45.6	9.81	6.8637	7.00898	13.8727	52.9	4.67	2.81698	3.72472	6.5417
10	45.1	14	9.8822	9.91676	19.799	52.1	7.15	4.39214	5.64195	10.0341
15	44.6	17.2	12.2468	12.077	24.3239	51.2	9.15	5.73342	7.13094	12.8644
25	44	22.2	15.9693	15.4214	31.3908	50.2	12.3	7.87335	9.44989	17.3232
30	43.7	24.3	17.5681	16.7884	34.3565	49.7	13.7	8.86102	10.4486	19.3096

Frecuencia (Hz)	Espécimen 3					Espécimen 4				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	52.8	2.94	1.77752	2.3418	4.11932	51.9	3.8	2.34474	2.99035	5.33509
3	51.7	5.6	3.47076	4.39475	7.86551	50.2	7.05	4.51277	5.4164	9.92917
5	51.1	7.51	4.716	5.84461	10.5606	49.7	9.31	6.02161	7.10044	13.1221
10	50	11.1	7.13494	8.50309	15.638	48.7	13.6	8.97602	10.2172	19.1932
15	49.2	13.9	9.08255	10.5222	19.6048	48	17	11.3752	12.6335	24.0087
25	48.3	18.3	12.1737	13.6635	25.8372	47	22.2	15.1404	16.2361	31.3764
30	48	20.2	13.5164	15.0115	28.528	46.6	24.4	16.7649	17.7284	34.4934

Frecuencia (Hz)	Espécimen 5					Espécimen 6				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	50.7	3.38	2.14083	2.61558	4.75641	52.8	3.12	1.88635	2.48517	4.37152
3	50.2	6.25	4.00069	4.80177	8.80246	52	6.02	3.70628	4.74382	8.45011
5	49.9	8.24	5.30758	6.30295	11.6105	51.4	8.19	5.10957	6.40065	11.5102
10	49.2	12	7.84105	9.08394	16.925	50.2	12.3	7.87335	9.44989	17.3232
15	48.7	15	9.90003	11.269	21.169	49.3	15.6	10.1727	11.8269	21.9996
25	47.8	19.7	13.2329	14.5939	27.8267	48.4	20.7	13.7433	15.4794	29.2227
30	47.5	21.7	14.6603	15.9989	30.6592	47.7	22.9	15.412	16.9376	32.3495

Frecuencia (Hz)	Espécimen 7					Espécimen 8				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	53	2.57	1.54666	2.05249	3.59916	53.2	3.14	1.88093	2.5143	4.39523
3	53.4	4.99	2.97516	4.00606	6.98122	53.1	6.17	3.70459	4.93405	8.63865
5	53.3	6.81	4.06983	5.46009	9.52992	52.7	8.47	5.13272	6.73766	11.8704
10	52.6	10.3	6.25597	8.18247	14.4384	51.6	12.8	7.95069	10.0313	17.982
15	52	13.2	8.12673	10.4017	18.5285	50.7	16.3	10.3241	12.6136	22.9377
25	50.9	17.7	11.163	13.736	24.899	49.5	21.8	14.158	16.5769	30.7348
30	50.5	19.7	12.5307	15.201	27.7317	48.9	24.2	15.9085	18.2362	34.1447

Frecuencia (Hz)	Espécimen 9					Espécimen 10				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	52.3	4.3	2.62957	3.40226	6.03183	45.1	3.07	2.16703	2.1746	4.34163
3	51.2	8.18	5.12562	6.37498	11.5006	46.3	5.28	3.64786	3.81727	7.46513
5	50.5	10.9	6.93325	8.41071	15.344	46.6	6.77	4.65158	4.91891	9.57049
10	49.2	16.1	10.5201	12.1876	22.7077	46.6	9.57	6.57543	6.95332	13.5287
15	48.3	20	13.3046	14.9328	28.2374	46.4	11.7	8.06855	8.47281	16.5414
25	47.2	26.2	17.8014	19.2237	37.0251	46.1	15.1	10.4704	10.8803	21.3507
30	46.7	28.9	19.8202	21.0326	40.8528	45.9	16.5	11.4826	11.8491	23.3316

Frecuencia (Hz)	Espécimen 11					Espécimen 12				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	48.7	3.25	2.14501	2.44161	4.58661	51.6	3.44	2.13675	2.69591	4.83265
3	49.1	5.9	3.86297	4.45954	8.32251	51.4	6.45	4.02402	5.04081	9.06483
5	48.9	7.74	5.08808	5.83258	10.9207	50.9	8.58	5.4112	6.65848	12.0697
10	48.2	11.2	7.46516	8.34933	15.8145	50	12.6	8.09912	9.65216	17.7513
15	47.7	13.9	9.35487	10.2809	19.6357	49.3	15.7	10.2379	11.9027	22.1407
25	46.9	18.1	12.3673	13.2159	25.5832	48.3	20.7	13.7703	15.4554	29.2257
30	46.5	19.8	13.6294	14.3624	27.9918	47.9	22.8	15.2857	16.917	32.2028

Frecuencia (Hz)	Espécimen 13					Espécimen 14				
	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d (°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	49	1.75	1.1481	1.32074	2.46885	50.1	2.15	1.37912	1.64941	3.02852
3	52.2	3.36	2.05937	2.65492	4.71429	51.1	3.98	2.49929	3.09741	5.5967
5	52.9	4.66	2.81095	3.71674	6.52769	51.5	5.37	3.3429	4.20261	7.54551
10	52.7	7.17	4.34494	5.70354	10.0485	51.4	8.07	5.03471	6.30687	11.3416
15	52.3	9.21	5.63216	7.28717	12.9193	51	10.2	6.41907	7.92689	14.346
25	51.6	12.5	7.76435	9.79617	17.5605	50.3	13.7	8.75112	10.5408	19.2919
30	51.1	14	8.79148	10.8954	19.6869	49.9	15.1	9.72627	11.5503	21.2766

Frecuencia (Hz)	Espécimen 15					Espécimen 16				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	50.1	2.28	1.46251	1.74914	3.21164	52.8	2.79	1.68683	2.22232	3.90915
3	51.7	4.32	2.67745	3.39023	6.06768	52.8	5.33	3.22251	4.2455	7.46802
5	51.8	5.84	3.61151	4.5894	8.20091	52.5	7.19	4.37699	5.70421	10.0812
10	51.3	8.77	5.48338	6.84437	12.3278	51.7	10.7	6.63164	8.39711	15.0287
15	50.7	11.1	7.03053	8.58963	15.6202	50.9	13.5	8.51412	10.4766	18.9907
25	49.8	14.9	9.61732	11.3806	20.9979	50	18	11.5702	13.7888	25.359
30	49.4	16.5	10.7378	12.528	23.2658	49.6	19.9	12.8976	15.1546	28.0522

Frecuencia (Hz)	Espécimen 17					Espécimen 18				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	51.9	2.28	1.40684	1.79421	3.20105	51.4	4.9	3.05701	3.82945	6.88646
3	52.6	4.42	2.6846	3.51131	6.19591	51.2	9.05	5.67076	7.05301	12.7238
5	52.4	6.02	3.67307	4.76958	8.44266	50.7	12	7.60057	9.28608	16.8867
10	51.7	9.07	5.6214	7.11792	12.7393	49.6	17.4	11.2773	13.2508	24.5281
15	51	11.5	7.23718	8.93718	16.1744	48.9	21.7	14.265	16.3523	30.6174
25	50	15.4	9.89893	11.7971	21.696	47.9	26.4	17.6993	19.5882	37.2874
30	49.6	17.1	11.0829	13.0223	24.1052	47.5	31.2	21.0784	23.0031	44.0815

Frecuencia (Hz)	Espécimen 19					Especimen 20				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	49.3	1.48	0.96511	1.12204	2.08714	57.4	1.62	0.87281	1.36477	2.23758
3	51.8	2.74	1.69444	2.15325	3.84769	55.6	3.22	1.81919	2.65687	4.47606
5	52.6	3.71	2.25336	2.94728	5.20064	54.7	4.37	2.52524	3.56652	6.09176
10	52.8	5.64	3.40994	4.49243	7.90237	53.6	6.59	3.91063	5.30425	9.21488
15	52.6	7.2	4.37311	5.71979	10.0929	53	8.35	5.02516	6.66861	11.6938
25	51.9	9.73	6.00376	7.65688	13.6606	52.2	11.2	6.86456	8.84974	15.7143
30	51.6	10.8	6.7084	8.46389	15.1723	51.9	12.4	7.65124	9.75799	17.4092

Frecuencia (Hz)	Espécimen 21					Especimen 22				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	55.4	2.03	1.15272	1.67097	2.82369	52.8	1.61	0.9734	1.28241	2.25582
3	54.8	3.94	2.27114	3.21955	5.49069	53.4	3.08	1.83637	2.47268	4.30905
5	54.5	5.35	3.10676	4.35552	7.46228	53.4	4.16	2.4803	3.33972	5.82002
10	53.8	8.1	4.78391	6.53638	11.3203	53	6.25	3.76134	4.99147	8.75282
15	53.2	10.3	6.16994	8.24753	14.4175	52.6	7.93	4.81649	6.29971	11.1162
25	52.3	13.8	8.43907	10.9189	19.358	51.8	10.6	6.55513	8.33008	14.8852
30	51.9	15.3	9.44065	12.0401	21.4808	51.5	11.8	7.34567	9.23478	16.5804

Frecuencia (Hz)	Espécimen 23					Especimen 24				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	54.4	1.68	0.97797	1.36601	2.34398	54.3	1.39	0.81112	1.1288	1.93992
3	54.1	3.21	1.88226	2.60023	4.48249	54.5	2.67	1.55048	2.17369	3.72417
5	54.1	4.3	2.5214	3.48318	6.00458	54.6	3.63	2.10279	2.95891	5.0617
10	53.7	6.46	3.82441	5.2063	9.0307	54.3	5.51	3.21531	4.47458	7.68989
15	53.2	8.17	4.89402	6.54198	11.436	53.9	7.03	4.14205	5.68017	9.82222
25	52.4	11	6.7116	8.71519	15.4268	53.1	9.51	5.71	7.605	13.315
30	52.2	12.1	7.41618	9.56088	16.9771	52.9	10.5	6.33368	8.37463	14.7083

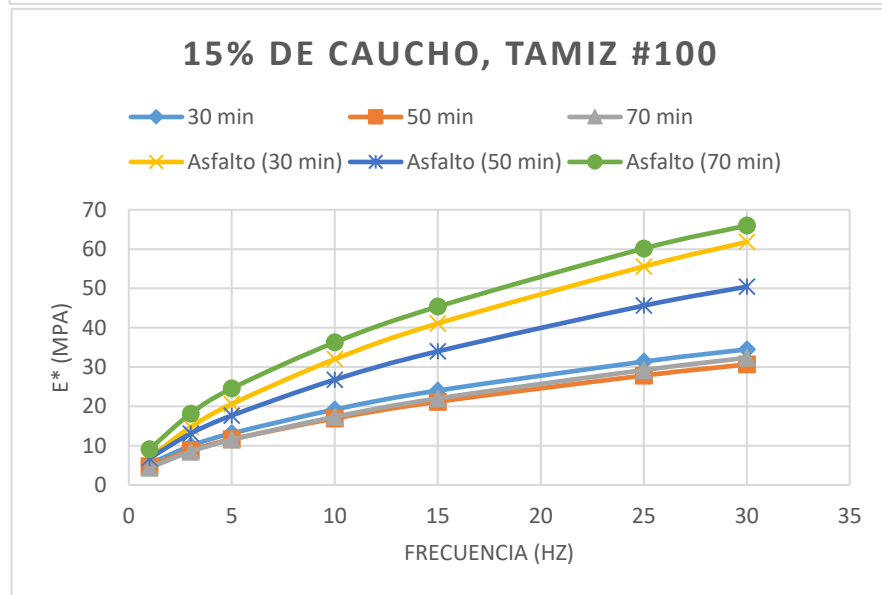
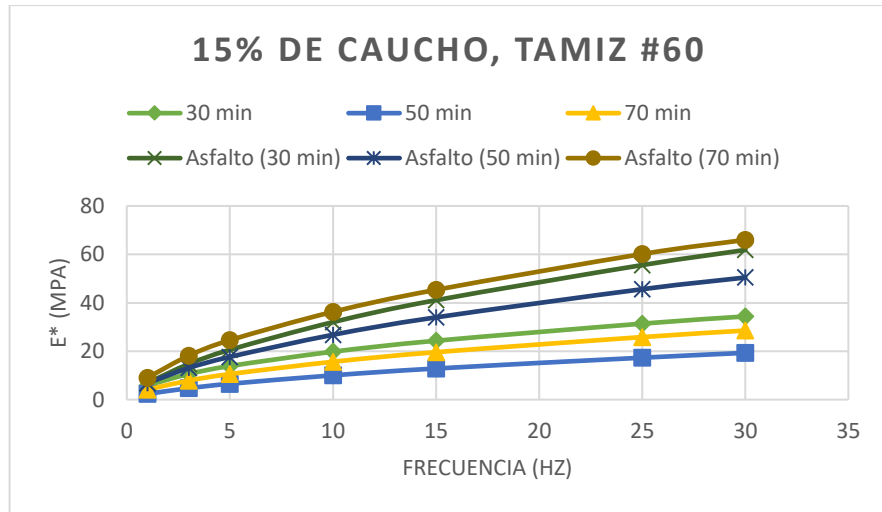
Frecuencia (Hz)	Espécimen 25					Espécimen 26				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	54.3	2.3	1.34214	1.86779	3.20994	54.3	3.06	1.78564	2.48498	4.27061
3	54.3	4.47	2.60843	3.63001	6.23844	53.9	5.98	3.52339	4.83178	8.35517
5	54.1	6.08	3.56514	4.92505	8.4902	53.3	8.11	4.84674	6.5024	11.3491
10	53.4	9.2	5.48527	7.38592	12.8712	52.2	12.2	7.47747	9.63989	17.1174
15	52.8	11.7	7.07381	9.3194	16.3932	51.4	15.5	9.67013	12.1136	21.7837
25	51.8	15.7	9.70901	12.338	22.047	50.3	20.6	13.1586	15.8496	29.0082
30	51.4	17.4	10.8555	13.5985	24.454	49.9	22.9	14.7504	17.5167	32.2671

Frecuencia (Hz)	Espécimen 27					Espécimen 28				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	53.4	3.3	1.96754	2.6493	4.61684	62.6	3.45	1.58769	3.06296	4.65065
3	51.6	6.15	3.82006	4.81971	8.63977	59.6	7.2	3.64344	6.2101	9.85354
5	51.4	8.14	5.07838	6.36158	11.44	58.4	9.99	5.23462	8.50875	13.7434
10	50.9	12	7.56811	9.31256	16.8807	56.6	15.5	8.53245	12.9401	21.4726
15	50.6	15	9.52096	11.591	21.112	55.4	19.9	11.3001	16.3804	27.6805
25	49.8	20	12.9092	15.2759	28.1851	53.6	27.1	16.0817	21.8126	37.8943
30	49.4	22	14.317	16.704	31.021	53	30.1	18.1146	24.0389	42.1536

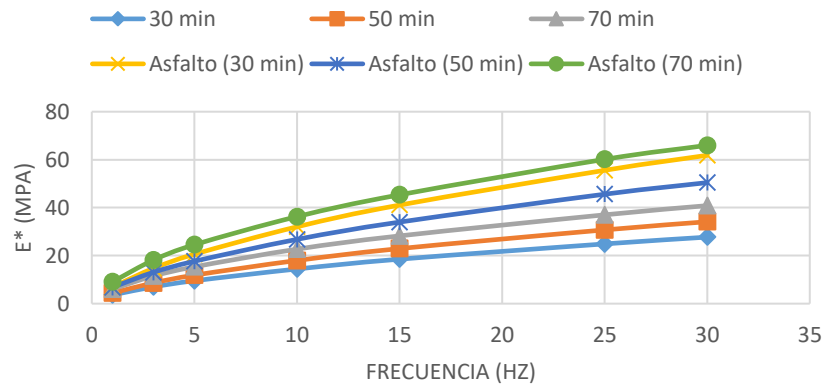
Frecuencia (Hz)	Espécimen 29					Espécimen 30				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	61.7	5.09	2.41311	4.48163	6.89474	54.8	4.87	2.80723	3.9795	6.78672
3	58.7	10.7	5.55885	9.14271	14.7016	55.6	9.39	5.30504	7.74782	13.0529
5	57.3	14.9	8.04958	12.5385	20.5881	55.5	12.7	7.19336	10.4664	17.6598
10	55.2	23	13.1264	18.8864	32.0128	54.5	19.2	11.1495	15.631	26.7805
15	53.9	29.4	17.3224	23.7549	41.0773	53.5	24.3	14.4542	19.5337	33.9879
25	52.1	39.6	24.3257	31.2477	55.5734	52.1	32.5	19.9643	25.6452	45.6095
30	51.5	44	27.3906	34.4348	61.8254	51.5	35.9	22.3483	28.0956	50.4439

Frecuencia (Hz)	Espécimen 31				
	d(°)	E (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E* (MPa)
1	60.1	6.64	3.30996	5.75619	9.06615
3	56.7	13.1	7.1922	10.9491	18.1413
5	52.2	17.5	10.7259	13.8277	24.5536
10	53.1	25.9	15.5509	20.7118	36.2627
15	51.8	32.3	19.9746	25.3832	45.3578
25	50.1	42.7	27.3899	32.758	60.1479
30	49.5	46.8	30.3942	35.587	65.9812

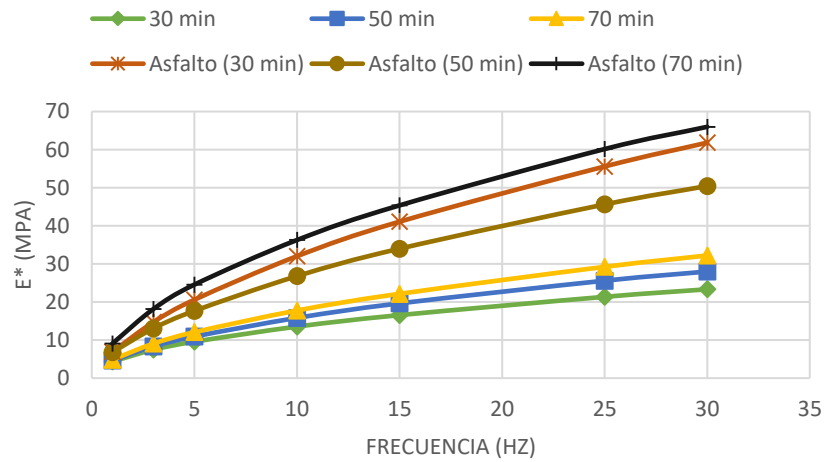
Anexo C. Comportamiento de la rigidez variando el tiempo de mezclado del asfalto-caucho.



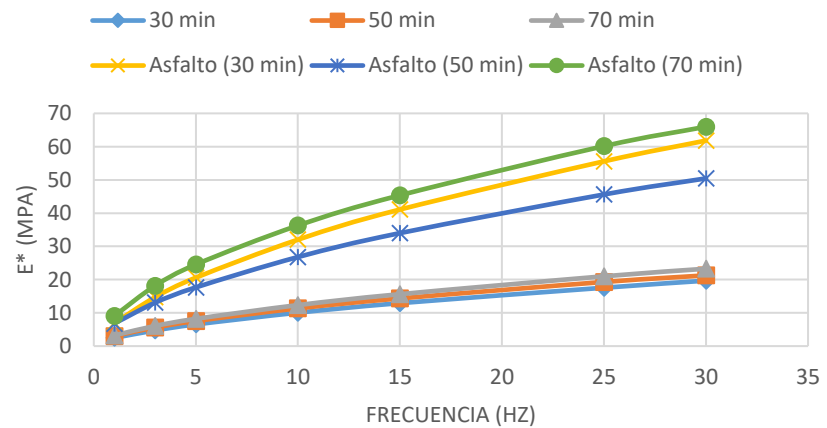
15% DE CAUCHO, TAMIZ #200



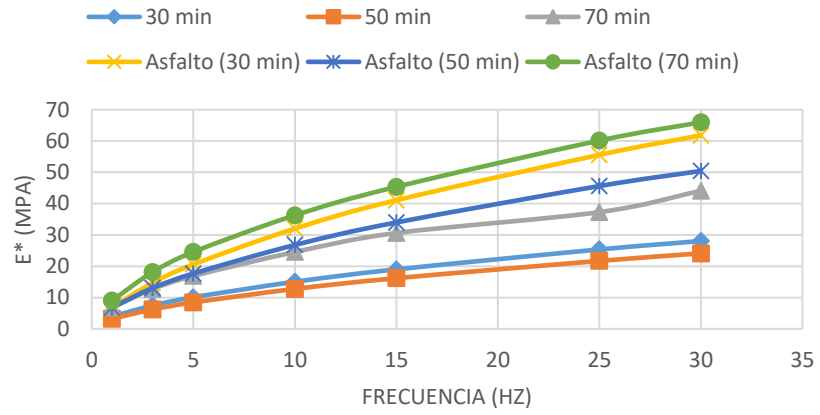
20% DE CAUCHO, TAMIZ #60



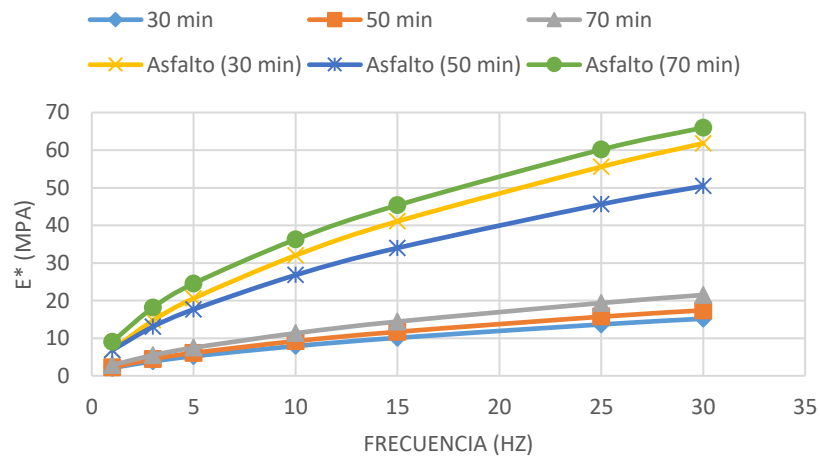
20% DE CAUCHO, TAMIZ #100

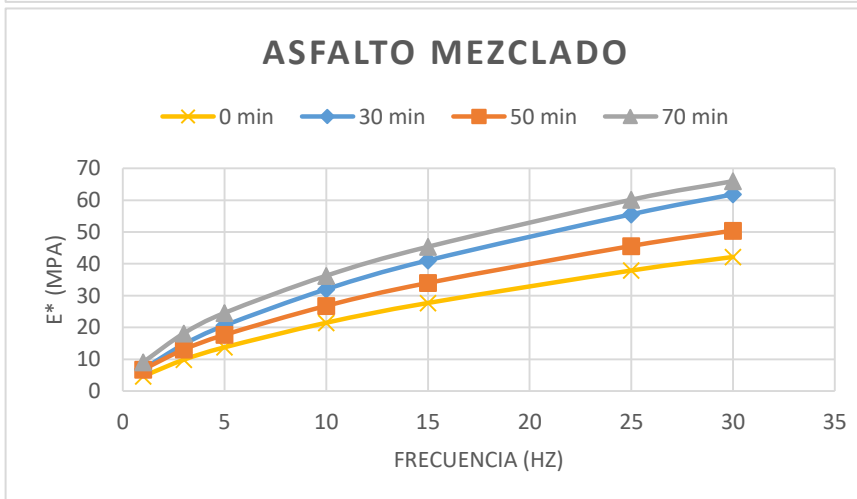
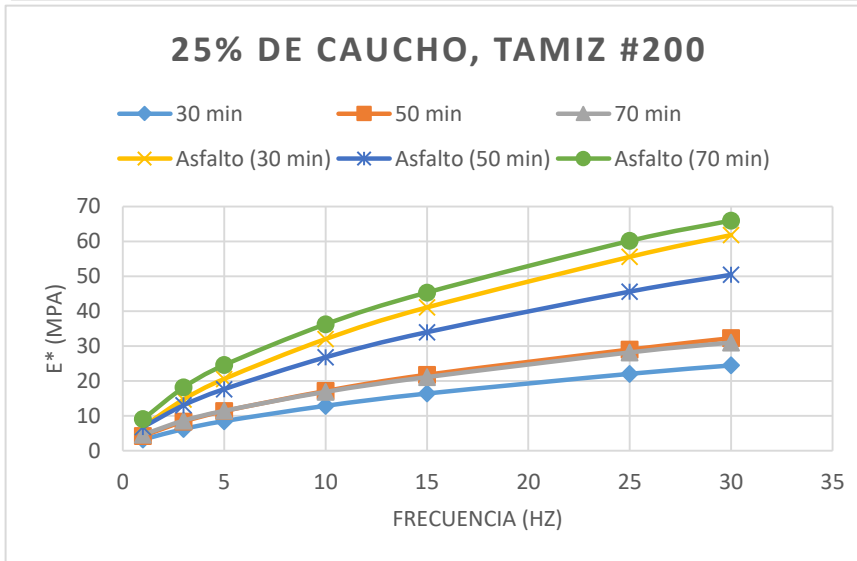
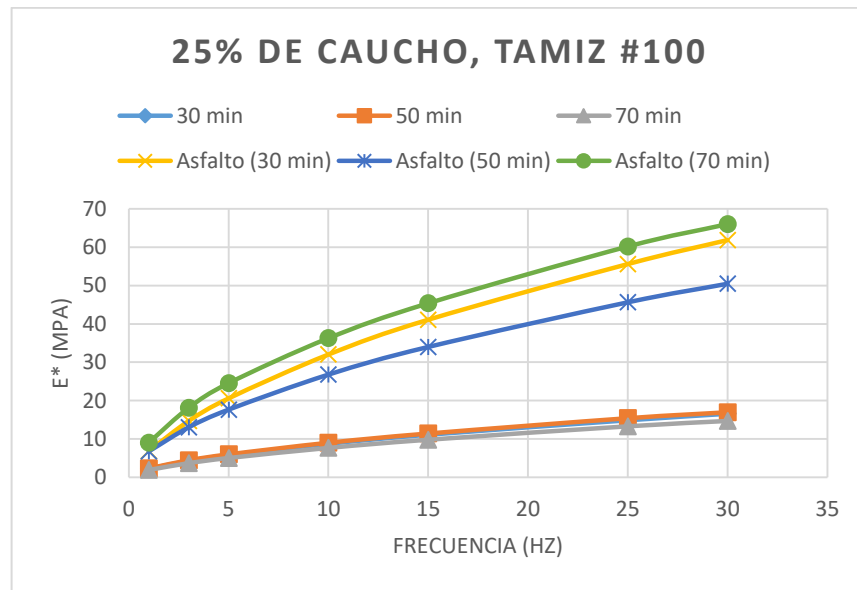


20% DE CAUCHO, TAMIZ #200

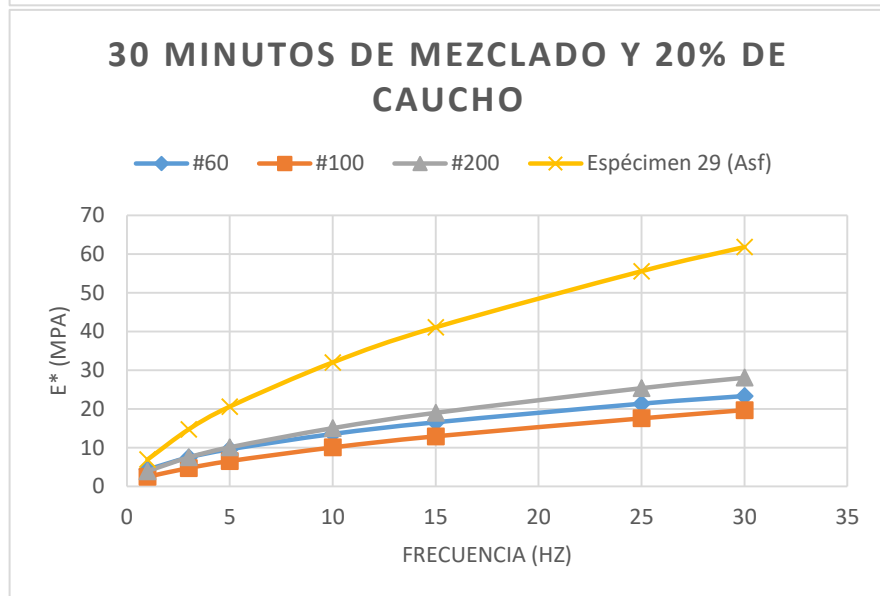
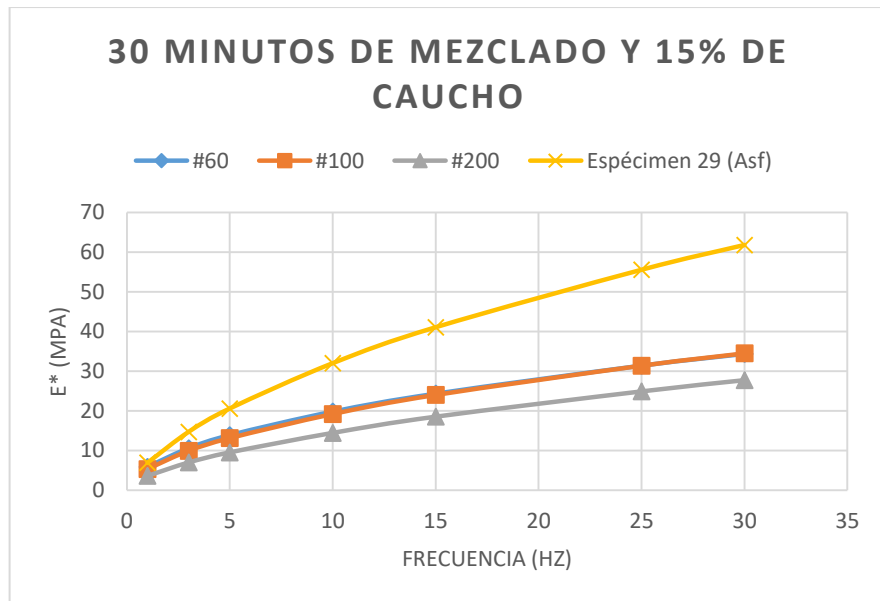


25% DE CAUCHO, TAMIZ #60

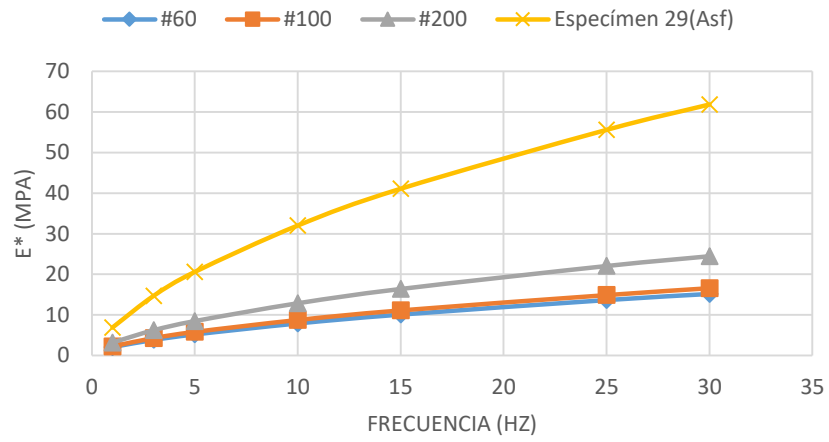




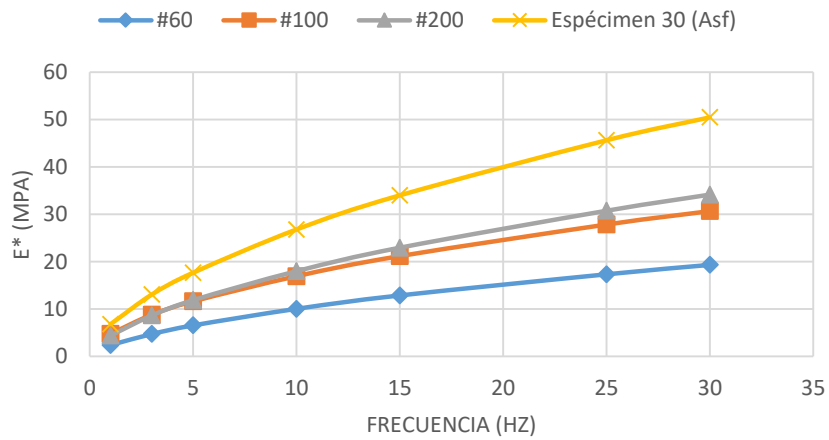
Anexo D. Comportamiento de la rigidez variando el tamaño de partícula del caucho.



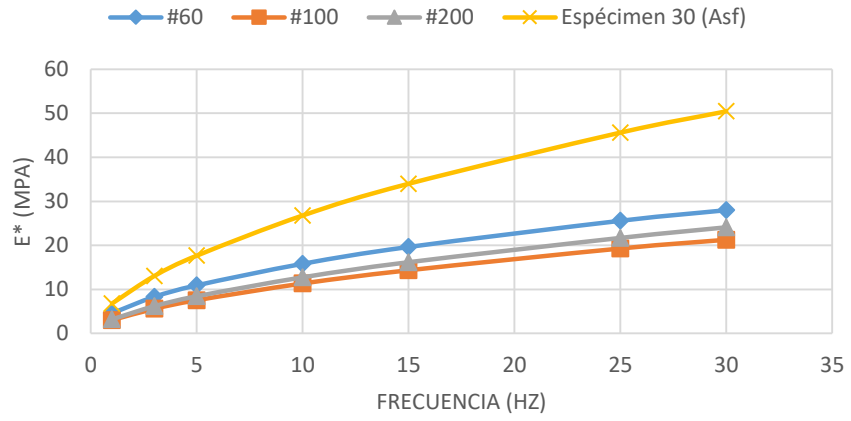
30 MINUTOS DE MEZCLADO Y 25% DE CAUCHO



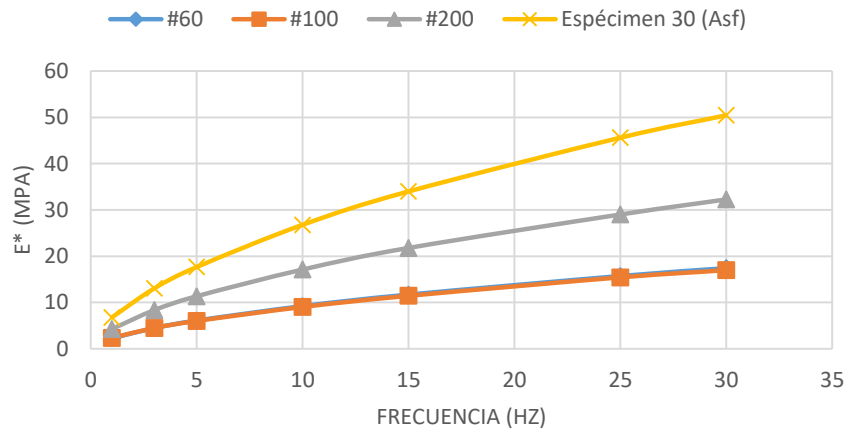
50 MINUTOS DE MEZCLADO Y 15% DE CAUCHO



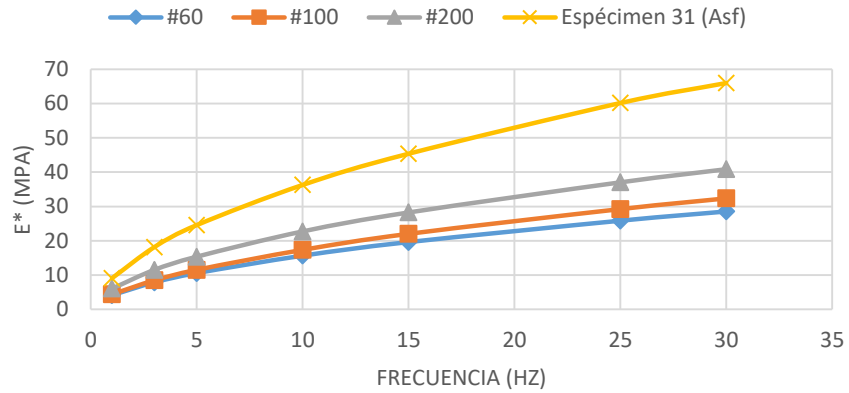
50 MINUTOS DE MEZCLADO Y 20% DE CAUCHO



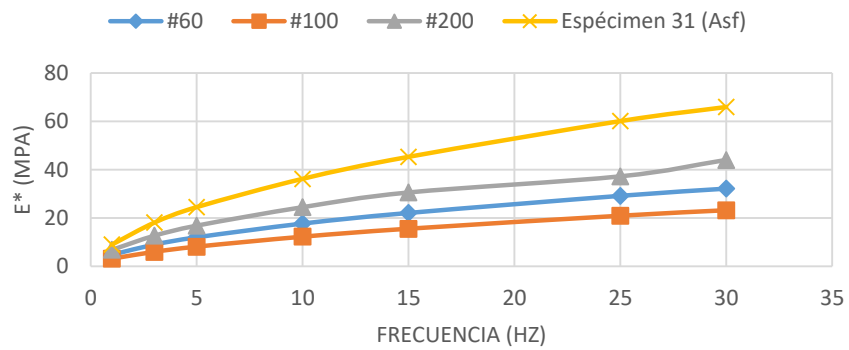
50 MINUTOS DE MEZCLADO Y 25% DE CAUCHO



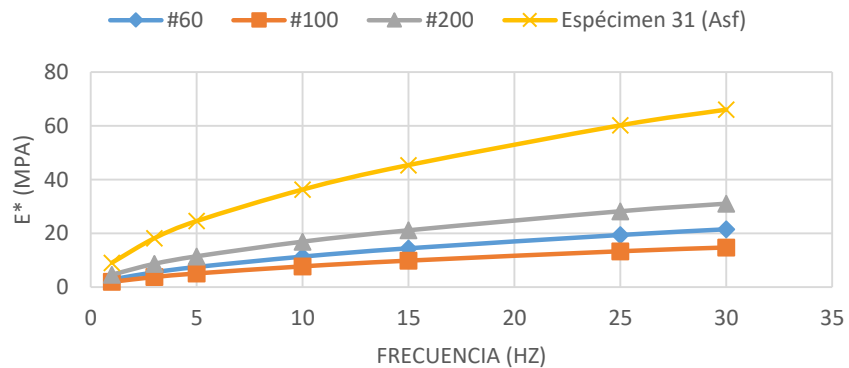
70 MINUTOS DE MEZCLADO Y 15% DE CAUCHO



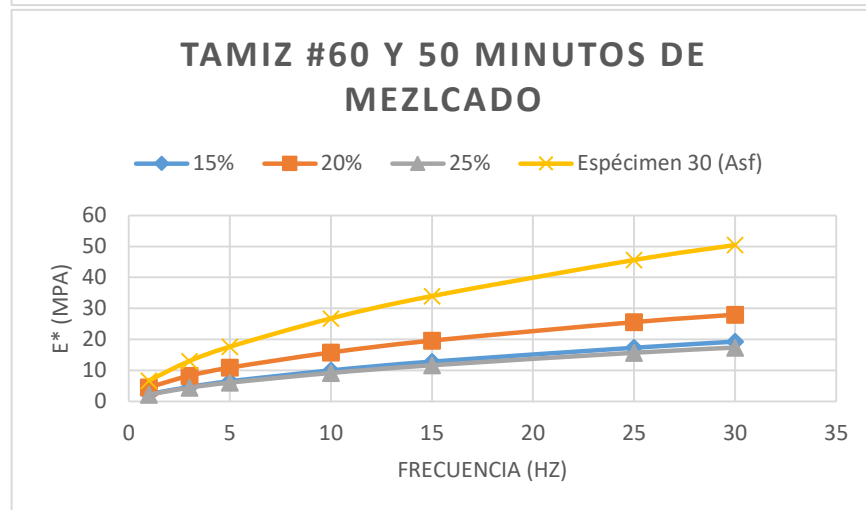
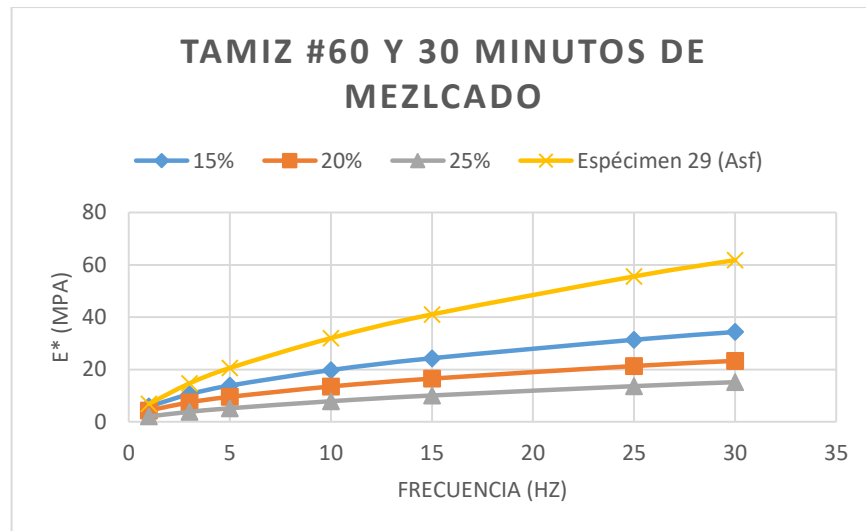
70 MINUTOS DE MEZCLADO Y 20% DE CAUCHO



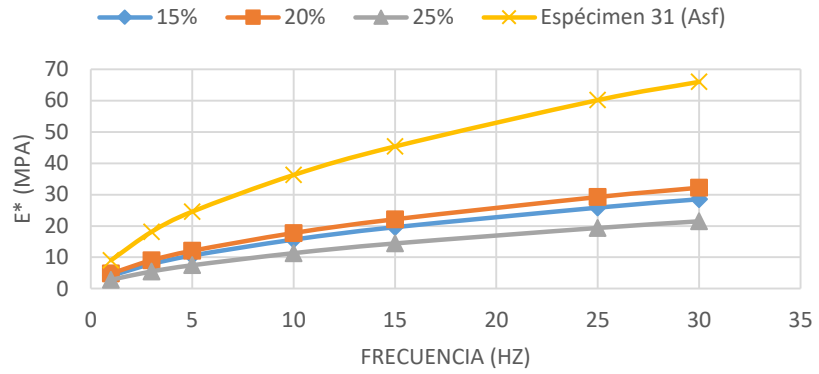
70 MINUTOS DE MEZCLADO Y 25% DE CAUCHO



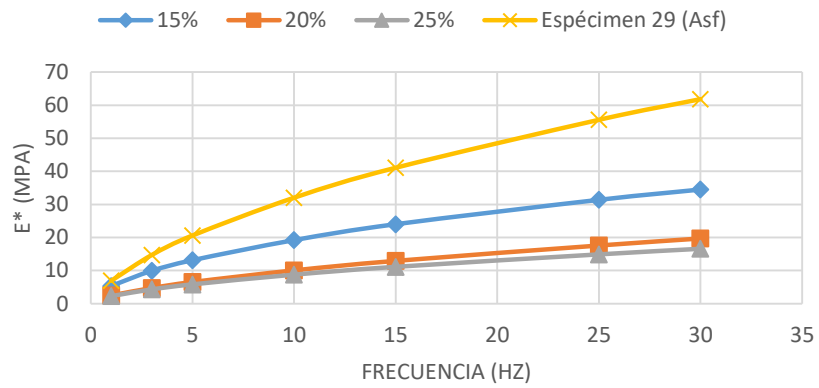
Anexo E. Comportamiento de la rigidez variando porcentaje en masa de caucho granulado de la mezcla asfalto- caucho.



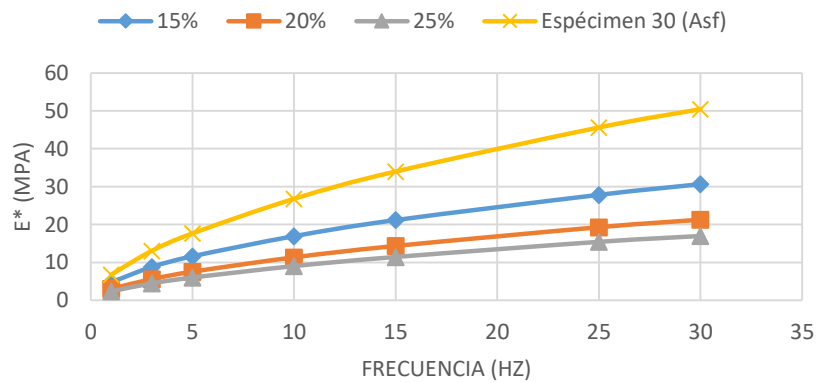
TAMIZ #60 Y 70 MINUTOS DE MEZLCADO



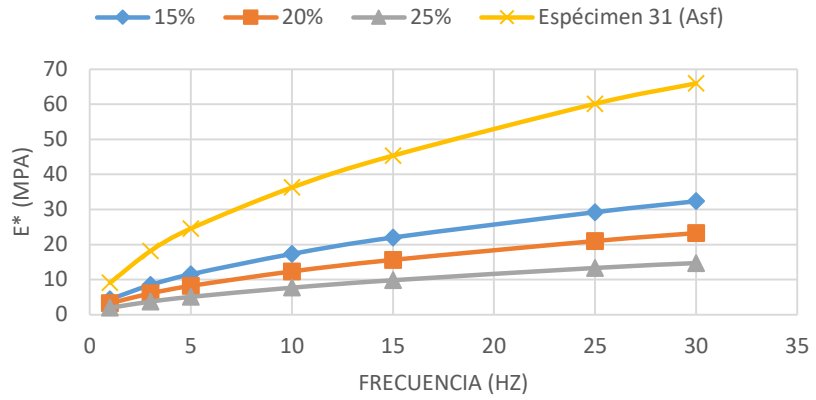
TAMIZ #100 Y 30 MINUTOS DE MEZLCADO



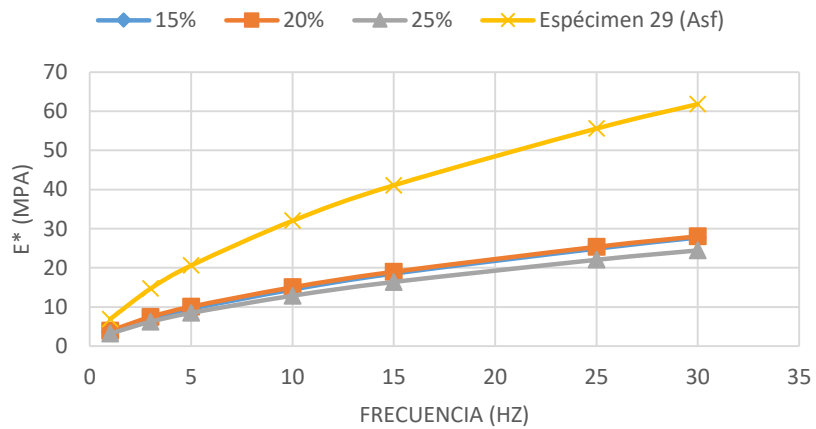
TAMIZ #100 Y 50 MINUTOS DE MEZLCADO



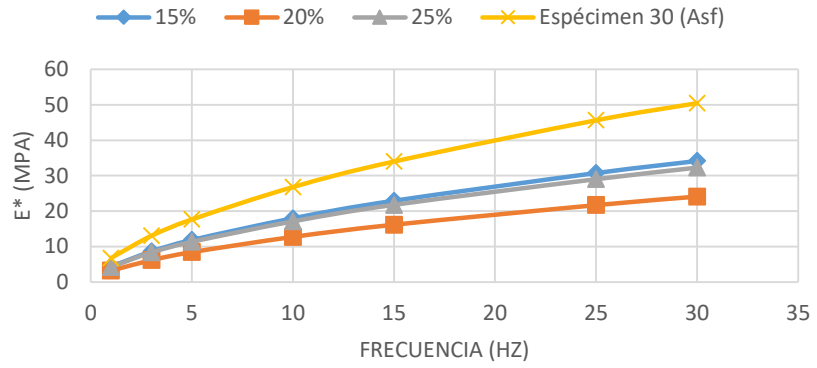
TAMIZ #100 Y 70 MINUTOS DE MEZLCADO



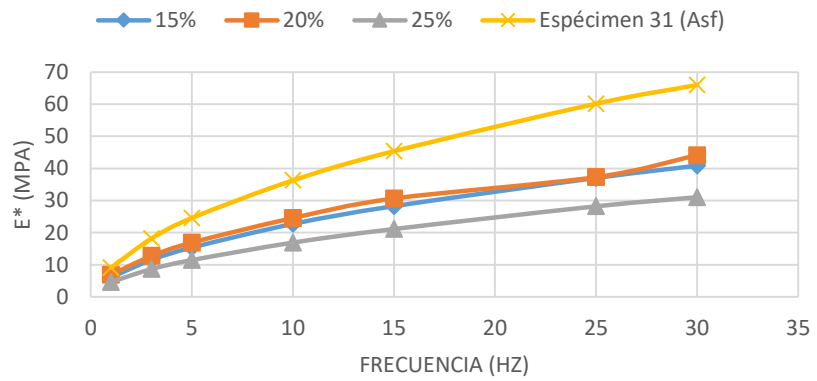
TAMIZ #200 Y 30 MINUTOS DE MEZLCADO



TAMIZ #200 Y 50 MINUTOS DE MEZLCADO



TAMIZ #200 Y 70 MINUTOS DE MEZLCADO



Anexo F. Grafico Cole-Cole de los 27 especímenes mezclados junto con los 4 especímenes de control.

