



Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACION DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No. IE 14/14

CARACTERIZACION MECANICA DE UNA MEZCLA TIBIA CON ADITIVOS QUÍMICOS

Responsable del proyecto:

Dr. Horacio Delgado Alamilla
Líder del Área de Asfaltos y Mezclas Asfálticas

Aprobó:

MC Rodolfo Téllez Gutiérrez
Coordinador de Infraestructura

Autorizó:

M en I M en C José San Martín Romero
Director General

14 de enero de 2015

Este proyecto fue realizado en la división de laboratorios de Infraestructura por los investigadores, Dr. Horacio Delgado Alamilla, M.C. Mayra Flores Flores con la colaboración del Ing. Aldo Zayd Salazar Rivera, Ing. Yelitza Ayala del Toro y Víctor Hugo Cuellar Pérez.

Resumen

Las mezclas asfálticas tibias son un tipo de mezcla de asfáltica que requiere temperaturas de producción más bajas en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, el objetivo de las mezclas tibias es mantener las mismas propiedades mecánicas de una mezcla en caliente, como la resistencia a la humedad y a la deformación permanente así como sus propiedades a la fatiga. Actualmente las mezclas tibias empiezan a ser utilizadas en México, sin embargo como muchos de los nuevos desarrollos no se cuentan con una referencia de su desempeño para México.

El presente estudio expone la evaluación de dos ensayos mecánicos para mezclas asfálticas con el fin de conocer sus propiedades de desempeño, estas pruebas son el módulo complejo y la fatiga. Las mezclas asfálticas tibias fueron compactadas con un material basáltico compuesto por una arena y dos gravas, con un asfalto PG 76-22 el cual contenía un aditivo químico que modificó las propiedades reológicas del asfalto para partir de un PG 64-16 y obtener el PG 76-22, el cual permite reducir las temperaturas de mezclado y compactación. La mezcla asfáltica tibia fue comparada con dos diferentes tipos de mezclas, la primera de ellas fabricada con un material de referencia y un asfalto PG 64-16. La segunda mezcla fabricada con el mismo material de referencia y otro tipo de ligante, este fue un asfalto modificado poliméricamente clasificado como un PG 76-16.

El tipo de modificación fue realizada con un aditivo químico, el cual le confiere al material asfáltico un comportamiento poco convencional en comparación con asfaltos modificados con polímeros convencionales. Por lo cual, fue necesario evaluar mediante ensayos de desempeño, para poder establecer el comportamiento mecánico de este tipo de mezclas.

Los ensayos de desempeño a la mezcla asfáltica mostraron que la adición de aditivo químico reduce el valor del módulo complejo y aumenta el ángulo de fase de la mezcla asfáltica, sin embargo esta modificación representó un aumento en la vida útil a la fatiga con respecto a las dos mezclas de referencia utilizadas.

Índice

Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	8
1. Introducción	9
2. Generalidades de las mezclas asfálticas tibias.....	10
3. Caracterización del material asfáltico	11
3.1 Recuperación Elástica de Creep Repetido (MSCR).....	13
3.2 Carga Cíclica Repetida (RCL)	15
3.3 Barrido de Amplitud Lineal (LAST)	16
4. Comportamiento de las mezclas asfálticas.....	17
4.1 Medición de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica	18
4.2 Módulo Complejo en mezclas asfálticas	19
4.2.1 Consideraciones para la realización del ensayo de Módulo Complejo	20
4.3 Fatiga en mezclas asfálticas	21
4.3.1 Mecanismo de fatiga.....	21
4.3.2 Criterio clásico de fatiga	22
5. Actividades del proyecto	23
5.1 Muestreo de material.....	23
5.2 Calidad de los materiales	23
5.3 Análisis de la estructura granulométrica.....	25
5.3.1 Diseño de la estructura granulométrica y dosificación de las probetas	26
5.4 Fabricación de especímenes de ensayo de materiales asfálticos.....	29
5.5 Fabricación de especímenes de ensayo de mezclas asfálticas	29
5.5.1 Tipos de mezclas asfálticas.....	29
5.5.2 Fabricación de los especímenes	30
6. Resultados.....	31
6.1 Asfaltos	31
Grado PG – Temperatura alta	31
Recuperación Elástica de Creep Repetido (MSCR)	34
Carga Cíclica Repetida (RCL)	38
Barrido de Amplitud Lineal (LAST)	39
6.2 Mezclas asfálticas	41

Módulo complejo.....	41
Curva maestra del módulo dinámico, $ E^* $	42
Curva maestra del ángulo de fase, ϕ	43
Plano Cole-Cole.....	45
Espacio de Black.....	46
Ensayos de flexión repetida en cuatro puntos.....	47
Fatiga.....	50
Conclusiones	52
Bibliografía.....	54
Anexo 1.....	56
Anexo 2.....	60
Anexo 3.....	64

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación por rango de temperatura	10
Figura 2. Comportamiento elástico y viscoso del asfalto	12
Figura 3. Importancia de δ en la reología.....	12
Figura 4. Respuesta esfuerzo-deformación de un material viscoelástico	13
Figura 5. Ciclo 1, ensayo MSCR.....	14
Figura 6. Parámetro de conformidad vs. porcentaje de recuperación.....	14
Figura 7. Resultados de fatiga en residuo de RTFO, $f=10$ Hz, $\gamma=3\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$	15
Figura 8. Cálculo de Ley de Fatiga en ensayo LAST	17
Figura 9. Comportamiento «tipo» de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, (ϵ) deformación – (N) Número de repeticiones de carga.....	18
Figura 10. Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo complejo	20
Figura 11. Distinción de las tres fases del ensayo de fatiga	22
Figura 12. Principio de obtención de la curva de Wöhler para un ensayo en control de fuerza	22
Figura 13. Distribución granulométrica de la grava y arena.	25
Figura 14. Distribución granulométrica de la mezcla tibia.....	27
Figura 15. Distribución granulométrica de la mezcla de referencia.....	27
Figura 16. Comparación de las curvas de diseño.	28
Figura 17. Dosificación del agregado para la fabricación de las mezclas asfálticas	28
Figura 18. Espécimen de asfalto para DSR en 25mm.	29
Figura 19. Espécimen de mezcla asfáltica para ensaye de modulo complejo.	30
Figura 20. Compactación de vigas para ensayo de fatiga	31
Figura 21. Vigas preparadas para ensayo de fatiga	31
Figura 22. Resultados de DSR en condición original, E1 y E2	33

Figura 23. Resultados de DSR después de RTFO, E1 y E2.....	34
Figura 24. Resultados de MSCR a 76 °C, 0.1 kPa, ciclo 1-10	35
Figura 25. Resultados de MSCR a 76 °C, 3.2 kPa, ciclo 11-20	35
Figura 26. Resultados de MSCR a 82 °C, 0.1 kPa, ciclo 1-10	36
Figura 27. Resultados de MSCR a 82 °C, 3.2 kPa, ciclo 11-20	37
Figura 28. Resultados de RCL a 20 °C, residuo de RTFO, $\epsilon=5\%$, $f=10\text{Hz}$	38
Figura 29. Determinación de N_p	39
Figura 30. Resultados de LAST	40
Figura 31. Ley de Fatiga de LAST	41
Figura 32. Curva Maestra del módulo complejo, E^*	43
Figura 33. Curva Maestra del ángulo de fase, ϕ	44
Figura 34. Plano de Cole-Cole	46
Figura 35. Espacio de Black	47
Figura 36. Curva de Wöhler	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Grados de desempeño, MSCR.....	15
Tabla 2. Generalidades del ensayo RCL	16
Tabla 3. Generalidades del ensayo LAST	17
Tabla 4. Resultados de la caracterización del material grueso.	24
Tabla 5. Resultados de la caracterización del material fino.....	24
Tabla 6. Granulometría del agregado grueso y fino	25
Tabla 7. Composición de la curva granulométrica de diseño y referencia.....	26
Tabla 8. Resultados del DSR	32
Tabla 9. Determinación de PG en altas temperaturas.....	34
Tabla 10. Cálculos de MSCR a 76 °C	36
Tabla 11. Cálculos de MSCR a 82 °C	37
Tabla 12. Parámetros de entrada de ensayo RCL	38
Tabla 13. Parámetros de entrada de ensayo LAST	39
Tabla 14. Nf calculado para cada nivel de deformación	40
Tabla 15. Parámetros volumétricos de los especímenes ensayados de mezclas tibias	42
Tabla 16. Valores del aT calculados para la mezcla de referencia y modificada	45
Tabla 17. Valores del aT calculados para la mezcla tibia.....	45
Tabla 18. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos de referencia	48
Tabla 19. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos modificados	48
Tabla 20. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos de mezclas tibias.....	49
Tabla 21. Resultados de ensayos de fatiga.....	50
Tabla 22. Resultados de ensayos de fatiga e ₆	51

1. Introducción

En los últimos años se ha desarrollado una conciencia ecológica a nivel mundial, la cual se ha visto reflejada en los nuevos desarrollos en mezclas asfálticas para carreteras. Siendo las mezclas tibias las que más han sido utilizadas en países desarrollados, esto es debido a los beneficios y ventajas que proporcionan este tipo de mezclas, como son: la utilización de agregados pétreos húmedos y propios del sitio, la facilidad de mezclado, temperaturas de aplicación bajas, eliminación del riesgo de incendio.

Este tipo de mezclas contribuyen a favorecer el medio ambiente en cuanto a la reducción de problemas de degradación de la calidad del aire, la reducción de las emisiones de CO₂, reducción del uso de recursos naturales y la facilidad de ajuste de la composición de las mezclas teniendo en cuenta las condiciones y agregados propios de cada región, lo que proporciona un ahorro de energía y costos de producción menores.

Sin embargo, los aportes mecánicos en cuanto a propiedades de desempeño son variados, ya que diferentes investigaciones realizadas a nivel internacional indican desde propiedades similares a las de una mezcla asfáltica en caliente hasta reducciones de 50% en cuanto a propiedades de desempeño.

Por lo tanto es indispensable realizar evaluaciones de propiedades de desempeño en este tipo de mezclas utilizando materiales actualmente empleados en México para conocer su comportamiento mecánico cuando formen parte del pavimento.

2. Generalidades de las mezclas asfálticas tibias

La tecnología de las mezclas tibias permite reducir significativamente la temperatura de mezclado, tendido y compactación de una mezcla asfáltica en un rango de 30 a 40°C, manteniendo o mejorando las condiciones y propiedades de trabajo con respecto a mezclas asfálticas convencionales, reduciendo de esta forma las demandas de combustible y las emisiones, lo que nos permite reducir el impacto al medio ambiente.

Esta tecnología está diseñada para mejorar la trabajabilidad, la adherencia y la compactación de las mezclas asfálticas convencionales o modificadas con polímeros, sin necesidad de realizar ninguna alteración en los equipos utilizados.

Gracias a la temperatura de producción y de aplicación más baja, este tipo de mezclas asfálticas tibias tienen varias ventajas:

- Reducción en el consumo de energía dando como resultados menores emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reducción en el uso de combustibles para la producción de mezclas asfálticas.
- Incremento en el uso de pavimentos reciclados (RAP) dentro la mezcla asfáltica.
- Permite una abertura más rápida al tránsito.

En general las mezclas asfálticas pueden clasificarse por su rango de temperatura de mezclado, la figura 1 muestra una representación desde las mezclas asfálticas en frío hasta las mezclas asfálticas en caliente.

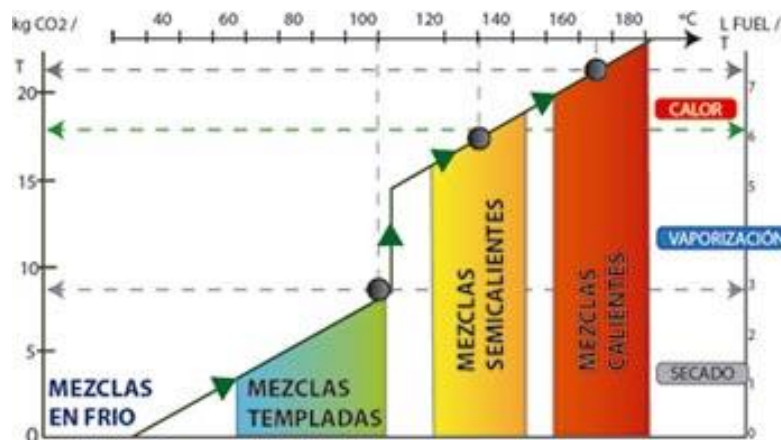


Figura 1. Clasificación por rango de temperatura

Las mezclas asfálticas tibias se fabrican mediante la reducción de la viscosidad del asfalto en un determinado rango de temperatura. Al realizar este proceso, permite que las mezclas se puedan producir a temperaturas relativamente bajas (en comparación con una mezcla convencional) y aun así tener una viscosidad suficientemente baja (fluidez) para el mezclado y la compactación de la mezcla. Diversos enfoques para producir las mezclas tibias se han desarrollado y pueden dividirse en las siguientes categorías:

- Mezclas de asfalto espumado: Consiste en añadir pequeñas cantidades de agua y aire comprimido al ligante asfáltico caliente dentro de una cámara de expansión, formando de manera controlada un efecto espumado, que permite aumentar el volumen del asfalto y reducir su viscosidad.
- Aditivos orgánicos: Esta técnica consiste en alterar la curva de viscosidad del asfalto por medio de aditivos orgánicos, especialmente en un rango de temperatura por encima de 100 °C, donde ocurren normalmente el mezclado y la compactación.
- Aditivos químicos. Este tipo de aditivos no cambia la viscosidad del asfalto, como agentes tensoactivos funcionan en la interfaz del asfalto/agregado. Este tipo de aditivos pueden reducir las temperaturas de mezclado y compactado alrededor de 30 a 40 °C

3. Caracterización del material asfáltico

Debido a que el comportamiento del asfalto es dependiente del tiempo y de la temperatura se utiliza un reómetro de corte dinámico (DSR) para evaluar los efectos de ambos parámetros. Las propiedades reológicas que se determinan son el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). El módulo complejo de corte es una medida de la resistencia total de un material asfáltico a la deformación cuando se somete a un esfuerzo de corte. El ángulo de fase es un indicador del desfase entre la aplicación de la carga y la reacción del material a esta carga, por lo cual es una medición de tiempo. Este parámetro permite definir, en conjunto con el módulo complejo de corte, la componente elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable) del material asfáltico (Figura 2).

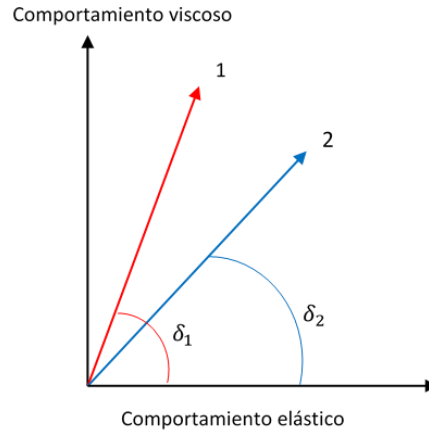


Figura 2. Comportamiento elástico y viscoso del asfalto

En la figura anterior, el eje vertical indica un comportamiento puramente viscoso, ($\delta = 90^\circ$); se obtiene cuando el asfalto se encuentra a muy altas temperaturas (superiores a las temperaturas de trabajo del pavimento). Por otro lado, el eje horizontal indica un comportamiento puramente elástico, ($\delta = 0^\circ$); este se obtiene cuando el asfalto se encuentra a muy bajas temperaturas (inferiores a las temperaturas de trabajo del pavimento).

La importancia de evaluar el ángulo de fase y no solo el módulo de corte para determinar la resistencia de los asfaltos, reside en que dos ligantes asfálticos (A y B) pueden tener el mismo G^* , pero distinta proporción viscosa y elástica (δ), como se observa en la Figura 3. En dicho caso, el asfalto B tiene un mejor comportamiento, ya que su parte elástica es mayor que la del asfalto A. Esto quiere decir, que si una misma carga es aplicada a ambos asfaltos, el asfalto A tendrá más deformación no recuperable (permanente) que el asfalto B.

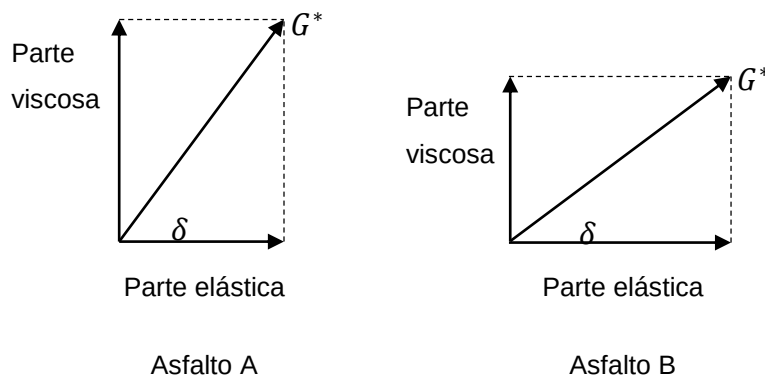


Figura 3. Importancia de δ en la reología

Los parámetros G^* y δ se obtienen cuando —utilizando el DSR— se aplica una carga de manera oscilatoria a una muestra de asfalto, generando una onda sinusoidal como se observa en la Figura 4.

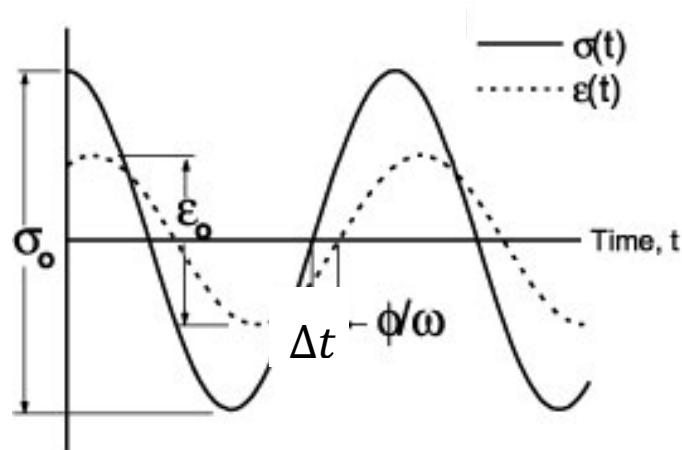


Figura 4. Respuesta esfuerzo-deformación de un material viscoelástico

3.1 Recuperación Elástica de Creep Repetido (MSCR)

La evaluación se realizó de acuerdo a la normativa AASHTO TP70-12. En este método se determina el porcentaje no recuperable del parámetro de conformidad, denominado J_{nr} . El porcentaje de recuperación tiene la intención de proporcionar un medio para determinar la respuesta elástica y la dependencia a dos niveles de esfuerzo diferentes, de ligantes modificados y no modificados, sujetos a diez ciclos de esfuerzo y recuperación.

El ensayo se ejecuta en el DSR con una muestra —residuo de RTFO— de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor y consiste en aplicar un esfuerzo controlado de 0.1 kPa durante 10 ciclos y posteriormente aplicar un esfuerzo de 3.2 kPa durante otros 10 ciclos. Cada ciclo consiste en la aplicación del esfuerzo durante 1 s y posteriormente 9 s de recuperación, resultando una duración total de 10 s por ciclo. Un ciclo de prueba se observa como en la Figura 5, donde se genera una deformación total durante el primer segundo y una deformación recuperada durante los nueve segundos siguientes. De los valores anteriores se obtiene la deformación no recuperable (permanente) por ciclo. La temperatura del ensayo es la obtenida como temperatura alta determinada con los ensayos de rigidez del Grado PG.

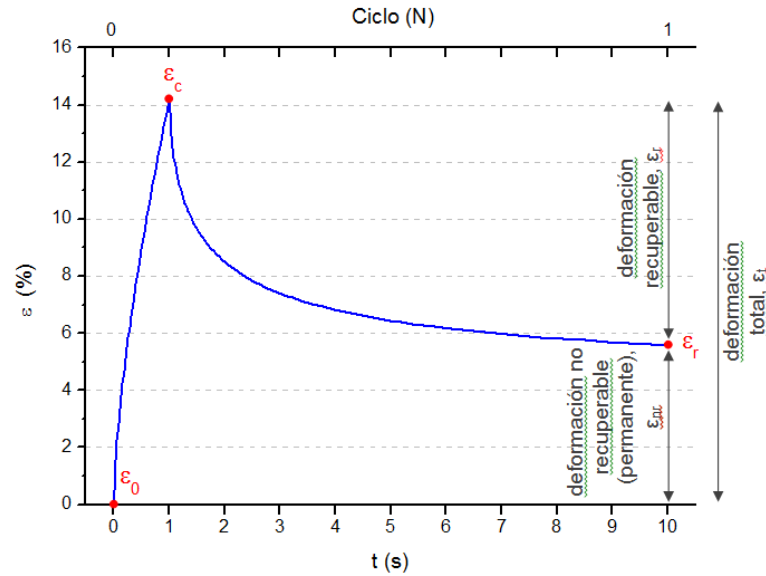


Figura 5. Ciclo 1, ensayo MSCR

Una vez concluido el ensayo se registran las deformaciones al inicio y final de cada aplicación de carga para calcular los porcentajes de recuperación y parámetro de conformidad de acuerdo al procedimiento establecido en la norma. Una vez realizados los cálculos, se grafica el porcentaje de recuperación, $R_{3.2}$, contra el parámetro de conformidad, $J_{nr_{3.2}}$, de cada ligante asfáltico como lo indica el método de ensayo. El porcentaje de recuperación, R , tiene como objetivo determinar la respuesta elástica del ligante y su dependencia al esfuerzo aplicado. La curva en la Figura 6 se utiliza como indicador de la presencia de un polímero elastomérico.

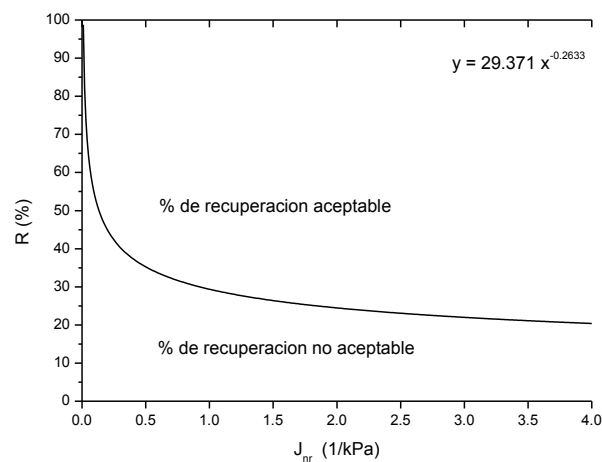


Figura 6. Parámetro de conformidad vs. porcentaje de recuperación

Finalmente, se realizó una clasificación por medio de la norma AASHTO MP19-10, la cual indica que el ligante se puede clasificar de acuerdo a su J_{nr} en cuatro distintos grados de desempeño, indicados en la Tabla 1. Estos grados se definen mediante una nueva clasificación PG, donde se sustituye el ensayo en el DSR después de RTFO en el por el ensayo MSCR para determinar la resistencia a la deformación permanente de los ligantes asfálticos.

Tabla 1. Grados de desempeño, MSCR

Grado	$J_{nr3.2}$ (kPa ⁻¹)	ESALs (millones)	Velocidad de tránsito (km/h)
Estándar "S"	≤ 4.0	< 10	y > 70
Alto "H"	≤ 2.0	10 - 30	ó 20 - 70
Muy Alto "V"	≤ 1.0	> 30	ó < 20
Extremadamente Alto "E"	≤ 0.5	> 30	y < 20

Fuente: AASHTO MP19 (2010).

3.2 Carga Cíclica Repetida (RCL)

El ensayo llamado Carga Cíclica Repetida (RCL) fue desarrollado utilizando el DSR en una prueba de barrido de tiempo. La prueba provee un método simple para aplicar una carga cíclica —en términos de esfuerzo o deformación controlada— a una temperatura y frecuencia seleccionada. En la Figura 7 se observa la evaluación de 9 ligantes durante la investigación del NCHRP 459, donde tres de ellos logran soportar más de 100,000 ciclos, mientras que en el rango lineal estos no figuran como los más resistentes.

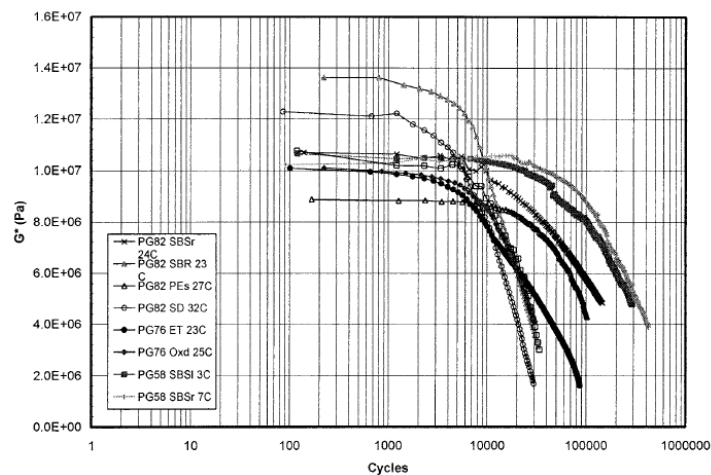


Figura 7. Resultados de fatiga en residuo de RTFO, $f=10$ Hz, $\gamma = 3\%$, $T = 20^\circ\text{C}$

El método RCL se realiza en el DSR, donde una muestra de asfalto es sometida a un esfuerzo sinusoidal de acuerdo a las consideraciones de la Tabla 2. El ensayo se realizó en residuo de RTFO a una deformación controlada del 5% y frecuencia de 10 Hz.

Tabla 2. Generalidades del ensayo RCL

Origen de la muestra	Residuo de RTFO o PAV	
Temperatura de ensayo	Intermedia	
Geometría	8 mm	
Espesor	2 mm	
Frecuencia	1.596 Hz	15.96 Hz
Esfuerzo controlado	500 kPa	1000 kPa
Deformación controlada	10%	5%
Ciclos requeridos aprox.	4,500	45,000
Duración de ensayo aprox.	50 min	

Finalmente se realizan los cálculos correspondientes para determinar la Proporción de Energía Disipada (DER) y por medio de esta, el ciclo de inicio de la grieta, N_p , definido como el ciclo en el que la línea de igualdad entre N y DER (45°), y la mayor tangente a la curva, se interceptan.

3.3 Barrido de Amplitud Lineal (LAST)

El ensayo Barrido de Amplitud Lineal (LAST) se lleva a cabo por medio del método AASHTO TP101-14, el cual determina la resistencia al daño por fatiga por medio de una carga cíclica (sinusoidal) e incrementando la amplitud de carga en forma lineal; la intención del ensayo es causar un daño acelerado por fatiga. El Enfoque de Daño Continuo se utiliza para calcular la resistencia a la fatiga a partir de las propiedades reológicas del ligante y los resultados del barrido de amplitud. El ensayo se realiza en el DSR de acuerdo a los parámetros mostrados en la Tabla 3, donde se divide en 2 etapas, siendo la primera un barrido de frecuencias a una deformación constante; mientras que la segunda es un barrido de deformaciones a frecuencia constante.

Tabla 3. Generalidades del ensayo LAST

Origen de la muestra	Residuo de RTFO o PAV											
Temperatura de ensayo	Intermedia											
Geometría	8 mm											
Espesor	2 mm											
Etapa 1												
Deformación controlada (%)	0.1											
Barrido de frecuencias (Hz)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10	20	30
Etapa 2												
Frecuencia (Hz)	10											
Barrido de deformación (%)	0 - 30											
Ciclos requeridos	3,100											

Una vez realizado el ensayo, se realizan los cálculos indicados en la norma para determinar la ley de fatiga del ligante por medio del enfoque de Daño Continuo Viscoelástico (VECD), como se ilustra en la Figura 8.

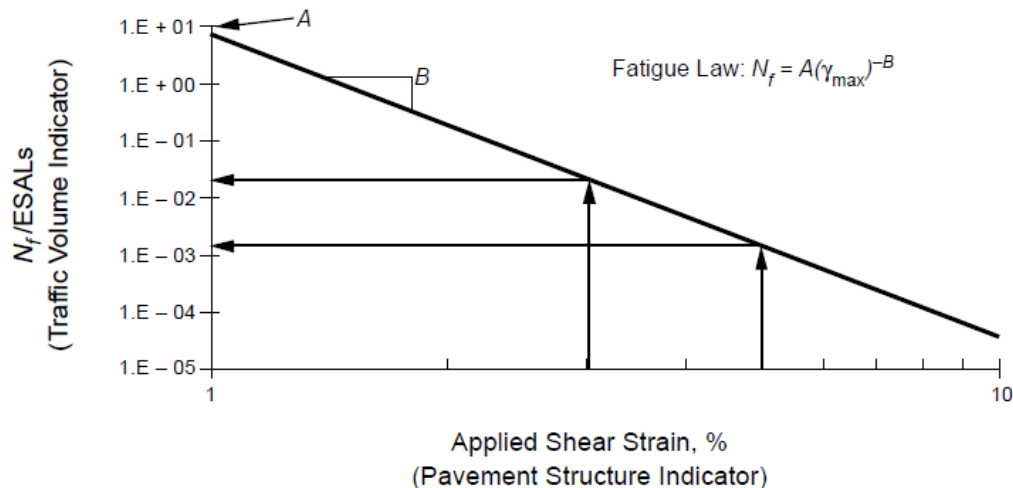


Figura 8. Cálculo de Ley de Fatiga en ensayo LAST

4. Comportamiento de las mezclas asfálticas

Los pavimentos asfálticos presentan diversos deterioros, los más comunes son la deformación permanente y la fatiga. Estos deterioros pueden ser simulados en laboratorio considerando dos parámetros básicos como son la amplitud de deformación ($|\epsilon|$) y el número de ciclos de carga aplicados (N), con los cuales se pueden identificar cuatro clases de comportamientos principales

[04], para el caso particular de este estudio solo se analizaron dos de estos comportamientos los cuales se escriben a continuación:

- Para cargas que comprenden algunos cientos de ciclos y deformaciones «pequeñas» ($<10^{-4}$) el comportamiento es considerado como viscoelástico lineal.
- Durante cargas de decenas de miles de ciclos y deformaciones «pequeñas» se desarrolla un tipo de daño, conocido como el fenómeno de «fatiga».

La Figura 9 presenta un esquema de los comportamientos descritos en los puntos anteriores.

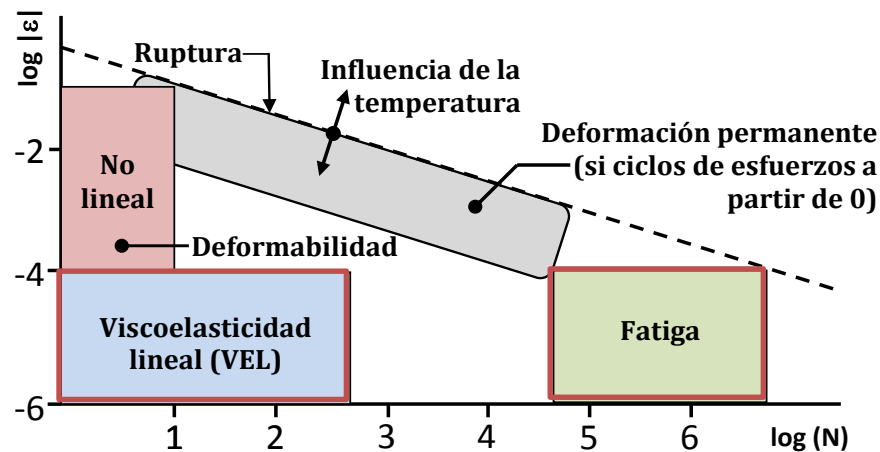


Figura 9. Comportamiento «tipo» de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, (ϵ) deformación – (N) Número de repeticiones de carga^[02]

4.1 Medición de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica

Dos consideraciones se deben tomar en cuenta. La primera es el tipo de ensayo a utilizar y la segunda el tipo de señal de sollicitación a aplicar.

Existen diferentes tipos de ensayos de laboratorio para la determinación del módulo dinámico y propiedades a la fatiga de la mezcla asfáltica. Estos ensayos se pueden clasificar en dos grandes grupos: ensayos homogéneos y no homogéneos.

En el primer grupo se encuentran el ensayo triaxial, ensayo de compresión y/o tensión simple en probetas cilíndricas y ciertos ensayos de corte (cizallamiento). Los ensayos no homogéneos son los ensayos de flexión (en 2, 3 o 4 puntos) y el ensayo de compresión diametral.

En el caso de los ensayos homogéneos, el estado de esfuerzos y de deformaciones es el mismo en cada punto de la probeta ensayada. Esto permite que los ensayos homogéneos den acceso a la ley de comportamiento sin la necesidad de utilizar hipótesis complementarias. Los ensayos no homogéneos necesitan de la incorporación de hipótesis y la realización de cálculos más o menos complejos para obtener ese comportamiento.

La descripción del comportamiento mecánico del material puede ser realizado utilizando diferentes tipos de señales de carga en función del tiempo. Siendo la carga sinusoidal la más común en este tipo de determinaciones.

4.2 Módulo Complejo en mezclas asfálticas

El ensayo de módulo complejo es realizado mediante un ensayo que somete el material a sollicitaciones sinusoidales a diferentes frecuencias. Las mediciones son realizadas en el rango de pequeñas deformaciones, para las cuales la mezcla asfáltica se comporta principalmente como un material viscoelástico lineal, la respuesta establecida para una sollicitación sinusoidal es también sinusoidal ^[05].

El módulo complejo $|E^*|$, es el número complejo definido como la relación entre la amplitud compleja del esfuerzo sinusoidal de pulsación ω aplicada al material, $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ y la amplitud compleja de la deformación sinusoidal resultante. Teniendo en consideración el carácter viscoelástico del material la deformación presenta un retardo del esfuerzo, el cual se traduce en un ángulo de desfase ϕ entre las dos señales: $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$.

El módulo complejo $|E^*|$ (t) es definido por:

$$E^*(t) = \sigma^*(t) / \varepsilon^*(t)$$

Donde:

$$E^*(w) = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\phi}$$

$|E^*|$ es el módulo complejo, muchas veces llamado módulo de rigidez (stiffness modulus).

φ es el ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material.

Estos dos valores permiten describir la parte elástica y viscosa de la mezcla asfáltica. Para esto se utiliza la siguiente notación ^[06]:

$$E^* = E1 + iE2$$

Donde:

$E1$, es llamado módulo de elasticidad dinámica y es definido por $E1 = |E^*| \cos\varphi$,

$E2$, es llamado módulo de pérdida (parte viscosa) y es definido por $E2 = |E^*| \sin\varphi$.

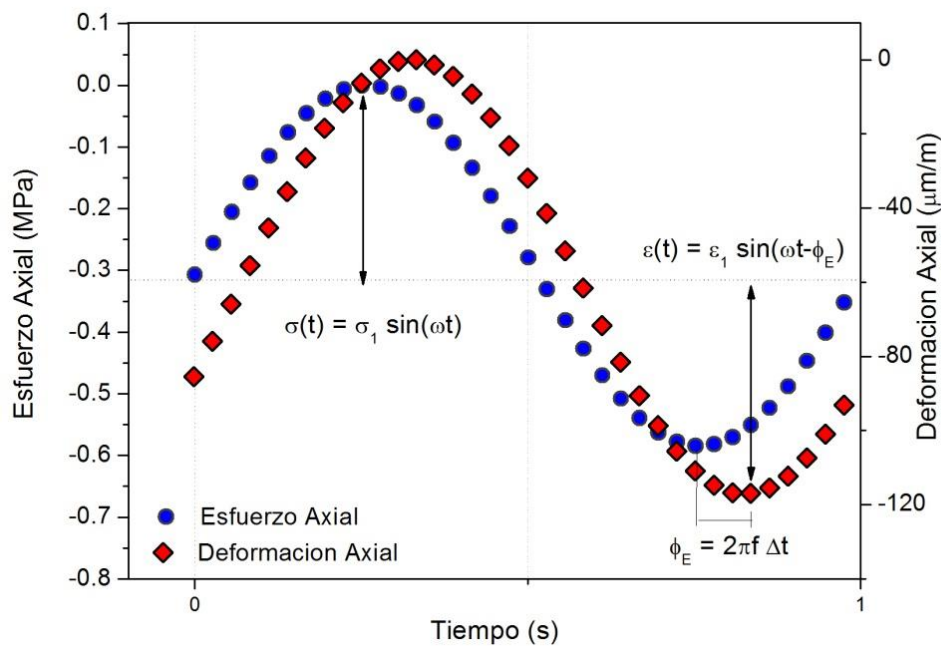


Figura 10. Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo complejo

4.2.1 Consideraciones para la realización del ensayo de Módulo Complejo

Como se ha definido con anterioridad que los diferentes componentes del módulo complejo varían con la frecuencia de sollicitación (Hz) y la temperatura (°C), a partir de esta combinación se obtendrán diversos valores de $|E^*|$ y φ , con los cuales podremos caracterizar el comportamiento viscoelástico del material. Las frecuencias evaluadas van de 10 Hz hasta 0,1Hz. Es importante

mentonar que frecuencias superiores a 10Hz presentan ciertas distorsiones en la señal y por consiguiente los valores obtenidos no son muy confiables. El rango clásico de temperaturas que se maneja es de -10°C a 40°C. Se debe tener precaución en los ensayos realizados a 40°C o más ya que existen problemas potenciales de pérdida de linealidad y fluencia de la probeta.

4.3 Fatiga en mezclas asfálticas

El fenómeno de fatiga de un material se caracteriza por su ruptura después de la aplicación repetida de un gran número de sollicitaciones (en la práctica $N > 10^4$), en donde la amplitud de la sollicitación es inferior a la carga de ruptura instantánea de la probeta.

En el caso de mezclas asfálticas, éstas son sometidas a sollicitaciones de corta duración al paso de los ejes del vehículo. La fisuración por fatiga no se presenta inmediatamente, ésta se presenta con el tiempo, debido a la repetición de cargas en la base de la carpeta asfáltica a causa de esfuerzos de tracción que se acumulan a cada paso de los neumáticos.

4.3.1 Mecanismo de fatiga

Durante el ensayo de fatiga, independientemente de la sollicitación impuesta, se distinguen tres fases de evolución del módulo de rigidez en función del número de ciclos.

Fase 1: fase de adaptación, se observa una caída rápida del valor del módulo. Durante este periodo, se asocian fenómenos como el calentamiento y la tixotropía.

Fase 2: fase de la fatiga, está definida por una línea ligeramente inclinada que traduce el establecimiento de un régimen estable y cuasi-lineal, con una lenta evolución del daño causado por la creación de micro-fisuras al interior del material.

Fase 3: fase de ruptura, el módulo decrece brutalmente, se presentan zonas de concentración de esfuerzos y un desarrollo rápido de macro-fisuras, de igual forma la aparición de perturbaciones térmicas en los puntos de fisuración.

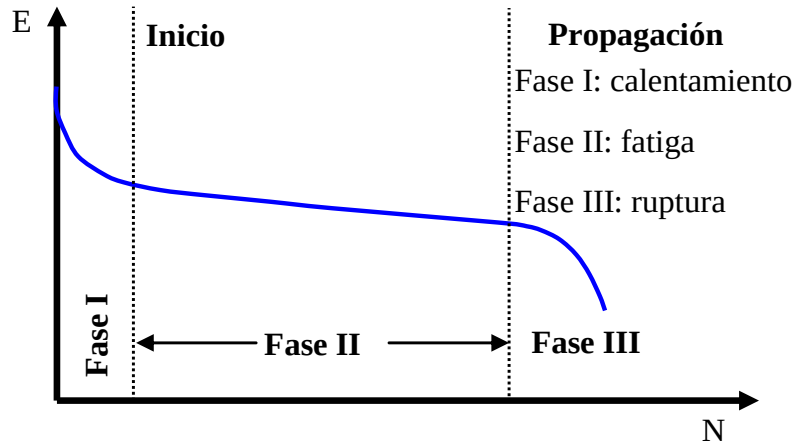


Figura 11. Distinción de las tres fases del ensayo de fatiga

4.3.2 Criterio clásico de fatiga

En el criterio clásico, la probeta se considera en “ruptura” si su módulo llega a la mitad de su valor inicial medido en el ciclo cincuenta de carga bajo las mismas condiciones de ensayo (misma temperatura y frecuencia). La vida útil N_f es entonces el número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial.

La figura 12 presenta el principio de obtención de la curva de Wöhler. Específicamente se presenta un ensayo realizado en control de fuerza y tomando en consideración el criterio clásico de fatiga.

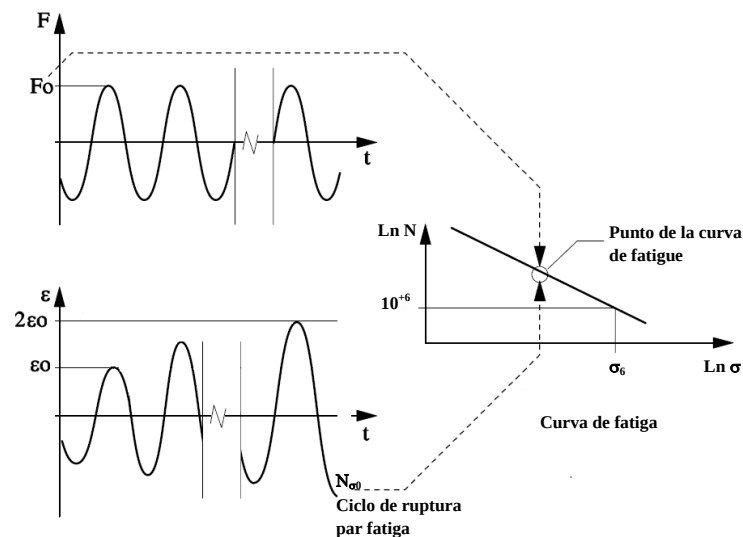


Figura 12. Principio de obtención de la curva de Wöhler para un ensayo en control de fuerza

5. Actividades del proyecto

Para el proyecto no se realizó ningún tipo de diseño de mezcla asfáltica, ni verificación del mismo, debido a que solo se deseaba conocer el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica tibia después de realizar los ensayos de módulo complejo y fatiga. Por lo cual únicamente se fabricaron especímenes para estos ensayos de desempeño.

5.1 Muestreo de material

Esta actividad no fue realizada debido a que la empresa Quimikao proporcionó el material pétreo y asfáltico a utilizar en el proyecto, por lo cual no fue necesario realizar el muestreo.

Se utilizaron 3 tipos de agregados pétreos, 2 de estos materiales se utilizaron para la mezcla tibia, de los cuales el primer tipo de agregados es procedente del banco de materiales Cuatro Caminos, ubicado en la Cd. de Tuxpan, Jalisco, el cual corresponde a una roca basáltica de buena calidad y estuvo compuesto de dos fracciones (gravas y arenas). El segundo banco corresponde al banco Teocuitatlan ubicado, en la Cd. de Teocuitatlan, Jalisco, el cual está compuesto únicamente por gravas.

El último es un agregado de referencia el cual es producto de la trituración de roca basáltica, compuesto por grava y arena, proveniente del banco La Cañada ubicado en la localidad de Saldarriaga en el Marques, Qro.

El material asfáltico fue PG 76-22, el cual se obtuvo con la adición del aditivo y partiendo de un ligante PG 64-16 de la refinería de Salamanca.

5.2 Calidad de los materiales

El material pétreo fue caracterizado de acuerdo con lo establecido en el protocolo AMAAC PA MA 01/2013. Diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. Este protocolo considera 10 ensayos para la caracterización física del material pétreo. Las tablas 4 y 5 indican las características del material pétreo.

De los resultados obtenidos se puede observar que para el banco Teocuitatlan solo un parámetro no cumple con la especificación, siendo este el desgaste de los ángeles que obtuvo un valor de 36% y el límite de la especificación es 30% máximo.

Para el banco La Cañada el unico parametro que no cumple con la especificación, es el azul de metileno el cual obtuvo un valor de 28 mg/g y el límite de la especificación es 15 mg/g máximo.

Tabla 4. Resultados de la caracterización del material grueso

Prueba	Norma	Banco La Cañada	Banco Cuatro Caminos	Banco Teocuitatlan	Especificación[01]
Gravedad específica, Gsb	ASTM C127-12	2.730	2.578	2.535	Min 2,4
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C131-06	12%	-	36%	30 % máximo
Desgaste Micro-Deval	ASTM D 6928-06	9%	8%	8%	15 % máximo
Intemperismo acelerado	ASTM C142-04	6%	1%	5%	15% máximo,
Caras Fracturadas	ASTM D5821-06	94%	100%	95%	90% mínimo
Partículas alargadas	ASTM D4791-05	0%	0%	0%	3:1, 15 % máximo Planas + alargadas
Partículas planas		5%	0%	0%	

Tabla 5. Resultados de la caracterización del material fino

Prueba	Norma	Banco La Cañada	Banco Cuatro Caminos	Especificación[01]
Gravedad específica, Gsb	ASTM C127-12	2.574	2.550	Min 2,4
Azul de metileno	(AASHTO T330-07)	28	8	15 mg/g máximo
Equivalente de arena	(ASTM D2419-02)	53%	61%	50% mínimo
Angularidad del agregado fino	(ASTM C1252-03)	46%	50%	40% mínimo

El material asfáltico fue evaluado de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño basado en el método Superpave. Dicha clasificación se realizó de acuerdo a los ensayos y parámetros establecidos en la norma ASTM D6373-13. El ligante asfáltico evaluado indicó ser un PG 88 en la temperatura alta.

5.3 Análisis de la estructura granulométrica

La estructura del agregado pétreo para la mezcla tibia estaba compuesta de tres materiales granulares (dos gravas y una arena). Para definir la estructura granulométrica del estudio, se realizó el ensayo de granulometría en materiales gruesos y finos bajo la Norma ASTM C136-06. Los resultados se presentan en la Tabla 6 y la Figura 13. Con estos materiales se pudo elaborar una granulometría densa.

Tabla 6. Granulometría del agregado grueso y fino

Malla	Abertura, mm	Grueso Cuatro Caminos	Grueso Teocuitatlan	Fino Cuatro Caminos
			% Que pasa	
¾"	19.00	100	100	100
½"	12.50	88	95	100
⅜"	9.50	47	67	100
No. 4	4.75	3	9	94
No. 8	2.36	1	4	67
No. 16	1.18	1	3	48
No. 30	0.60	1	2	35
No. 50	0.30	1	2	25
No. 100	0.15	1	1	16
No. 200	0.08	1	1	10

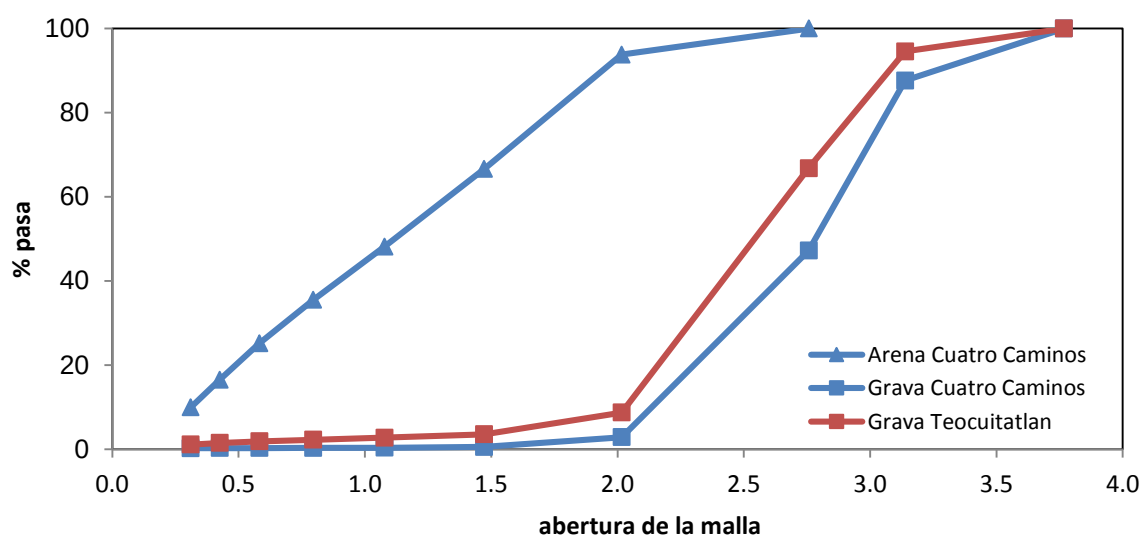


Figura 13. Distribución granulométrica de la grava y arena

5.3.1 Diseño de la estructura granulométrica y dosificación de las probetas

Para poder realizar las dosificaciones del material pétreo que tendrían cada uno de los especímenes de prueba, primeramente fue necesario realizar la granulometría que tuvo el diseño, la cual estaba compuesta por 51% de arena y 49% de grava. Para realizar la composición de la grava fue obtenida de la mezcla (50/50) de las dos gravas analizadas en el estudio (banco cuatro caminos y banco teocuitatlan). Esto puede observarse en la tabla 7 y figura 14, donde la curva granulométrica de la mezcla tibia tiene un tamaño nominal de $\frac{1}{2}$ " y cumple perfectamente con los puntos de control especificados en el protocolo AMAAC.

La figura 15 muestra la curva granulométrica de referencia, la cual tiene un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ". Esta estructura granulometria esta compuesta por 43% de arena y el 57% de grava.

Tabla 7. Composición de la curva granulométrica de diseño y referencia

Malla	Abertura, mm	Arena	Grava	Grava	Diseño	Referencia
		51%	24.5%	24.5%		
		% Que pasa				
1"	25	100	100	100	100	100
¾"	19.00	100	100	100	100	95
½"	12.50	100	88	95	96	81
⅜"	9.50	100	47	67	79	68
No. 4	4.75	94	3	9	51	43
No. 8	2.36	67	1	4	35	25
No. 16	1.18	48	1	3	25	16
No. 30	0.60	35	1	2	19	11
No. 50	0.30	25	1	2	13	9
No. 100	0.15	16	1	1	9	6
No. 200	0.08	10	1	1	5	4

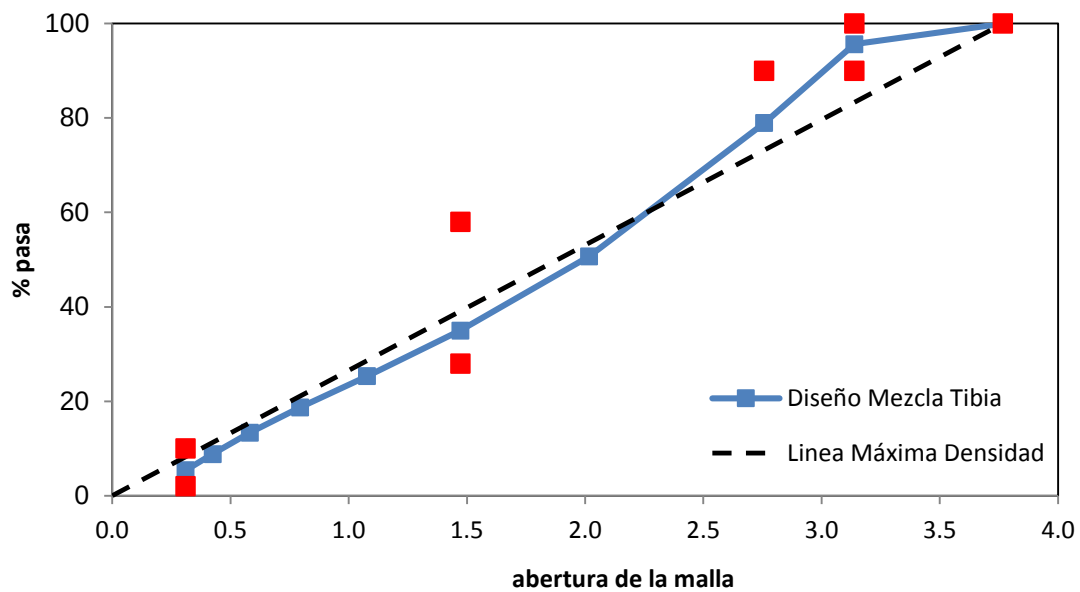


Figura 14. Distribucion granulométrica de la mezcla tibia

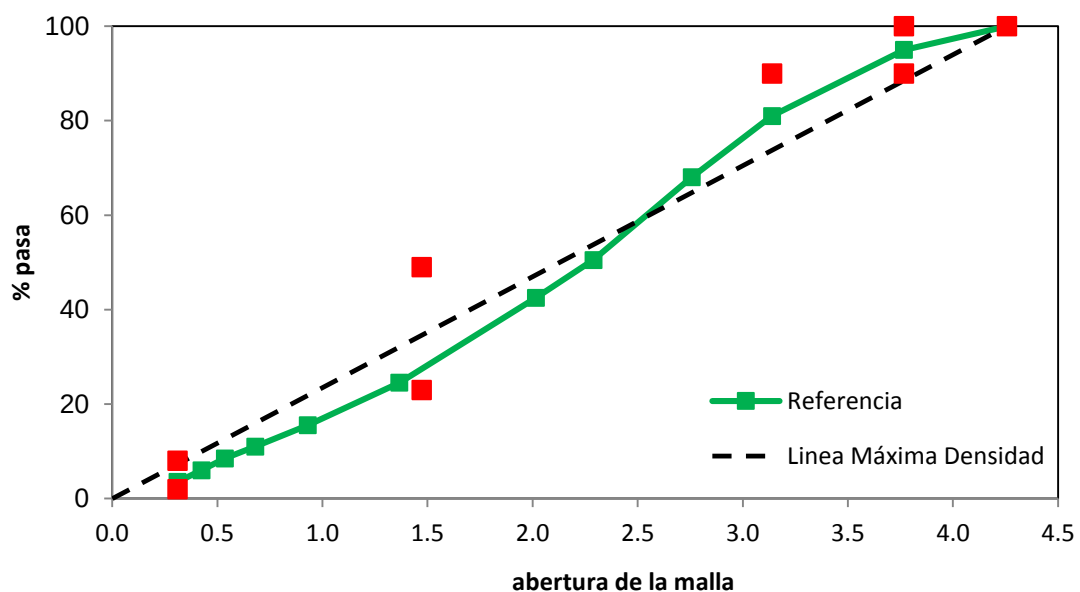


Figura 15. Distribucion granulométrica de la mezcla de referencia

La Figura 16 muestra una comparación de las dos curvas granulométricas donde se puede observar que las curvas no son similares, se puede observar que la granulometría de la mezcla tibia es más fina que la mezcla de referencia, por lo cual se considera puede existir una influencia en el comportamiento de las mezcla tibia debido a la estructura granulométrica.

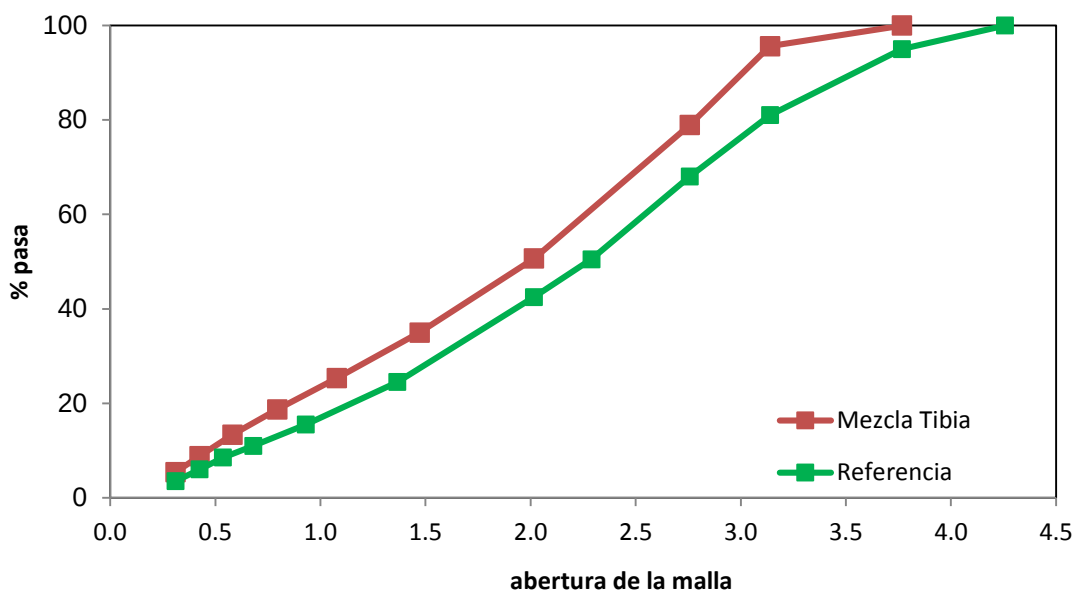


Figura 16. Comparacion de las curvas de diseño

Con esta información se procedio a realizar la dosificación del material pétreo para la realización de las mezclas asfálticas. Para esto se realizarón 12 mezclas asfálticas de 6800 kg, para módulo complejo, 15 especímenes de 5600 kg para fatiga.



Figura 17. Dosificación del agregado para la fabricación de las mezclas asfálticas

5.4 Fabricación de especímenes de ensayo de materiales asfálticos

Para la fabricación del espécimen de prueba para el DSR, se vierte asfalto caliente (fluido) en un molde de silicón con dimensiones estandarizadas (a) de acuerdo a la ASTM D7175. Una vez vertido el asfalto en el molde, se permite enfriar a temperatura ambiente hasta que el asfalto se pueda despegar del molde doblando los extremos de este. Posteriormente se coloca la muestra en el plato de 25mm (b) cuidando que quede centrada sobre el mismo. Finalmente se enrasa la muestra entre el plato superior e inferior, para permitir que el espécimen tenga un diámetro igual a estos (c) y un espesor de 1mm.

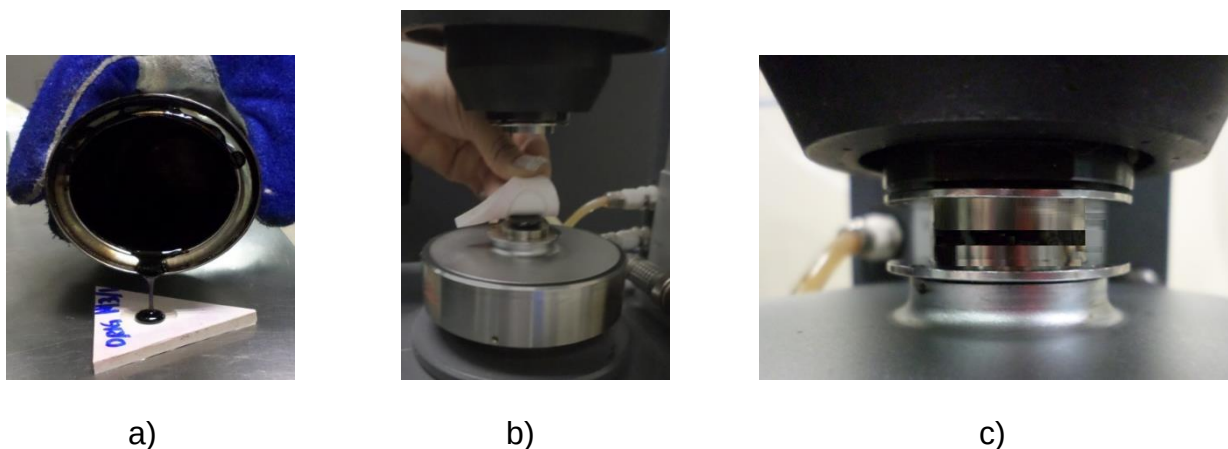


Figura 18. Especímen de asfalto para DSR en 25mm.

5.5 Fabricación de especímenes de ensayo de mezclas asfálticas

Se fabricaron 3 diferentes mezclas asfálticas. Las variaciones de estas mezclas asfálticas consistió en el tipo de asfalto y material pétreo utilizado.

5.5.1 Tipos de mezclas asfálticas

Para la mezcla asfáltica de referencia se utilizó un asfalto convencional proveniente de la refinería de Salamanca, Gto., de acuerdo al proveedor es un PG 64-16. La segunda mezcla consistía en el mismo asfalto PG 64-16 pero modificado con un polímero SBS obtenido un PG 76-16. La tercera mezcla fue realizada con un asfalto proporcionado por la empresa Quimikao y estaba compuesto por un asfalto base PG 76-22, obtenido con el uso de un aditivo y partiendo del mismo PG 64-16 de base.

La descripción de la clasificación de las mezclas asfálticas es la siguiente:

PG 64 - 16 + Material Virgen La Cañada	→	Referencia
PG 76 - 16 + Material Virgen La Cañada	→	Modificado
PG 76 - 22 + Aditivo + Material Virgen Cuatro Caminos/ Toecuitatlan	→	M. Tibia

5.5.2 Fabricación de los especímenes

Para realizar las pruebas del módulo complejo $|E^*|$, se compactaron especímenes cilíndricos en el compactador giratorio con un porcentaje de vacíos de 6% (aprox.) los cuales debían tener dimensiones específicas de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura. Las probetas de ensayo son extraídas de estas probetas compactadas, teniendo las dimensiones finales siguientes: 100 mm de diámetro y 150 mm de altura como se muestra en la figura 19 y con una relación de vacíos de $4 \pm 1\%$.



Figura 19. Especimen de mezcla asfáltica para ensaye de modulo complejo

Para el ensayo de flexion repetida en viga de cuatro puntos, se compactaron vigas con un porcentaje de vacíos de aire de $4 \pm 1\%$ en un compactador lineal (Figura 19). Posteriormente se almacenaron durante 10 días para permitir el curado de la mezcla asfáltica y después se cortaron a las dimensiones requeridas (50 mm de altura x 63 mm de ancho y 380 mm de largo), como se observa en la Figura 21.



Figura 20. Compactación de vigas para ensayo de fatiga



Figura 21. Vigas preparadas para ensayo de fatiga

Los contenidos de vacíos de aire de las probetas asfálticas, obtenidos después del cortar las probetas, están en un rango de $4\pm 1\%$.

6. Resultados

6.1 Asfaltos

Grado PG – Temperatura alta

Se evaluó el asfalto en condición original y envejecida en RTFO, determinándose con esto la temperatura alta del Grado PG. Los resultados se muestran en la Tabla 8, donde se indican dos

ensayos ejecutados en condición original y tres en condición de RTFO. En condición original los resultados cumplen con la repetitividad permitida establecida en la norma del ensayo; por otro lado, en residuo de RTFO el ensayo 2 (E2) mostró gran dispersión respecto al ensayo 1 (E1), por lo que se llevó a cabo un E3, donde se corroboraron los resultados correctos.

Tabla 8. Resultados del DSR

	T (°C)	Parámetro	Original E1	Original E2	RTFO E1	RTFO E2	RTFO E3
DSR	58	G* (kPa)	8.527				
		δ (°)	63.13				
		G*/sin δ (kPa)	9.559				
	64	G* (kPa)	4.947				
		δ (°)	62.54				
		G*/sin δ (kPa)	5.575				
	70	G* (kPa)	3.361		5.936		
		δ (°)	59.42		60.5		
		G*/sin δ (kPa)	3.904		6.82		
	76	G* (kPa)	2.204	2.293	3.93	4.067	4.568
		δ (°)	58.23	56.86	57.92	56.68	55.61
		G*/sin δ (kPa)	2.593	2.738	4.639	4.868	5.535
	82	G* (kPa)	1.565	1.636	2.525	2.722	3.056
		δ (°)	55.22	53.83	56.93	54.99	54.12
		G*/sin δ (kPa)	1.905	2.027	3.014	3.324	3.772
	88	G* (kPa)	1.182	1.245	1.711	1.824	1.902
		δ (°)	50.6	49.41	54.39	53.21	54.23
		G*/sin δ (kPa)	1.53	1.639	2.105	2.278	2.344
	94	G* (kPa)		0.915		1.213	1.29
		δ (°)		45.91		50.86	51.62
		G*/sin δ (kPa)		1.274		1.564	1.646
	100	G* (kPa)		0.568			
		δ (°)		45.09			
		G*/sin δ (kPa)		0.403			

En condición original, los resultados indican un comportamiento inusual en el asfalto: el ángulo de fase disminuye a medida que la temperatura se incrementa; lo anterior indica un incremento en la proporción elástica del ligante a mayores temperaturas (Figura 22).

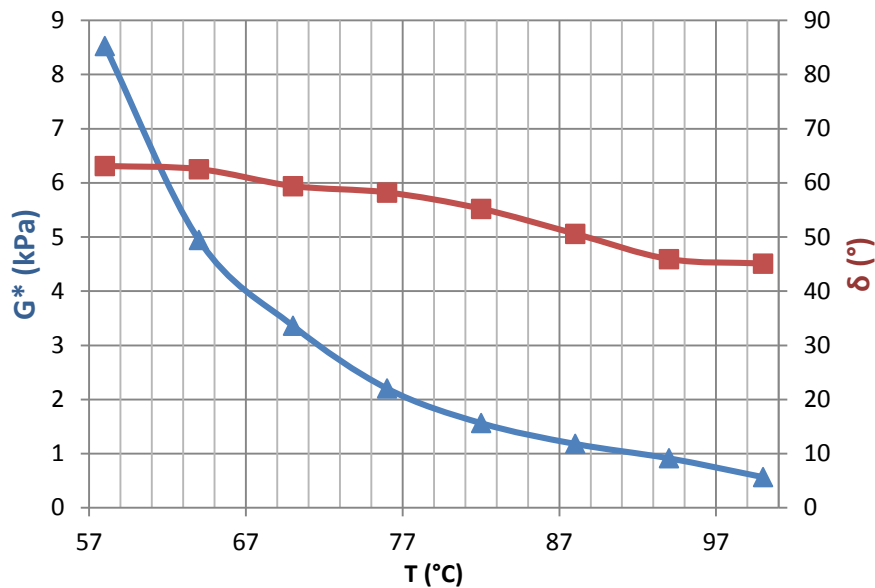


Figura 22. Resultados de DSR en condición original, E1 y E2

Por otro lado, en la Figura 23 se ilustra el comportamiento del asfalto después de envejecido en RTFO, donde se observa el mismo comportamiento en menor escala, es decir, el ángulo de fase también disminuye con el incremento de la temperatura, pero en menor proporción, manteniéndose casi constante. En lo que respecta al G^* existe una disminución del mismo con el incremento de temperatura, lo que es un comportamiento común de los asfaltos.

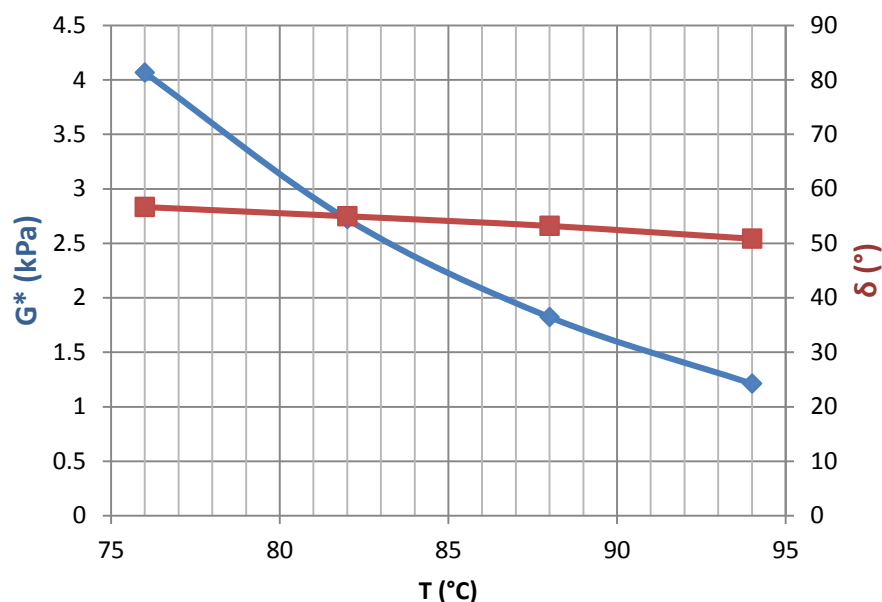


Figura 23. Resultados de DSR después de RTFO, E1 y E2

De acuerdo al $G^*/\sin\delta$ indicado por normativa para los dos estados del asfalto (original y residuo de RTFO), el PG para altas temperaturas indica ser un PG 88 como se muestra en la Tabla 9. En este caso fue el residuo de RTFO la muestra que determinó el PG del asfalto a altas temperaturas, siendo esto también un comportamiento inusual en los ligantes asfálticos.

Tabla 9. Determinación de PG en altas temperaturas

Temperatura Alta - PG		PG
Original	RTFO	
94	88	88

Recuperación Elástica de Creep Repetido (MSCR)

El ensayo MSCR se ejecutó a 76 y 82 °C, a pesar que es un PG 88, los resultados indicaron un alto porcentaje de deformación a las temperaturas mencionadas por lo que ya no se consideró relevante evaluarlo también a 88 °C.

Como se mencionó anteriormente, el ensayo se realiza a dos niveles de esfuerzo (0.1 y 3.2 kPa); por este motivo, los resultados del asfalto evaluado a 76 °C se indican en las Figuras 24 y 25. En la primera figura se observa un gran porcentaje de recuperación cuando el asfalto es sometido a un esfuerzo bajo durante los primeros 10 ciclos del ensayo. Por otro lado, en la segunda figura no se observa recuperación del asfalto cuando se retira la carga durante 9 s, por el contrario, en

los datos arrojados por el equipo se registra que el material continúa deformándose aun cuando la carga se retira.

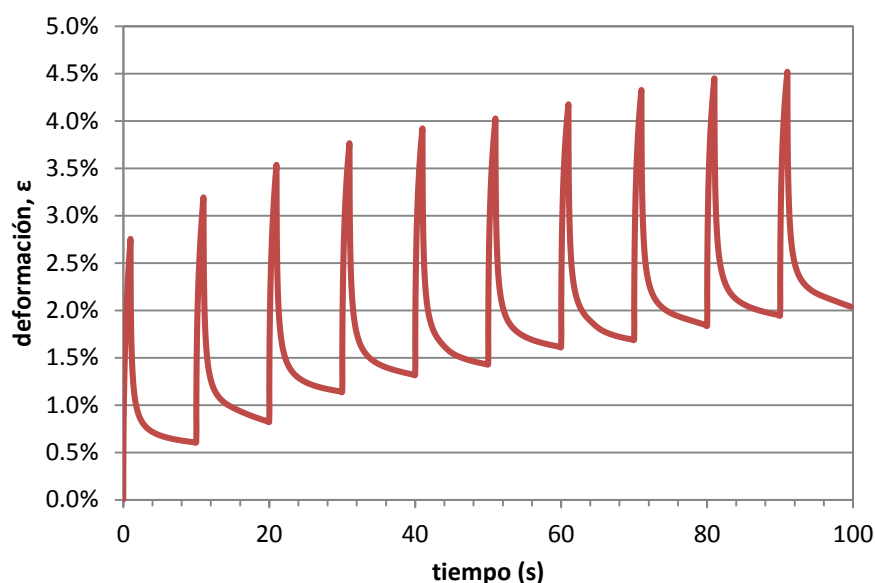


Figura 24. Resultados de MSCR a 76 °C, 0.1 kPa, ciclo 1-10

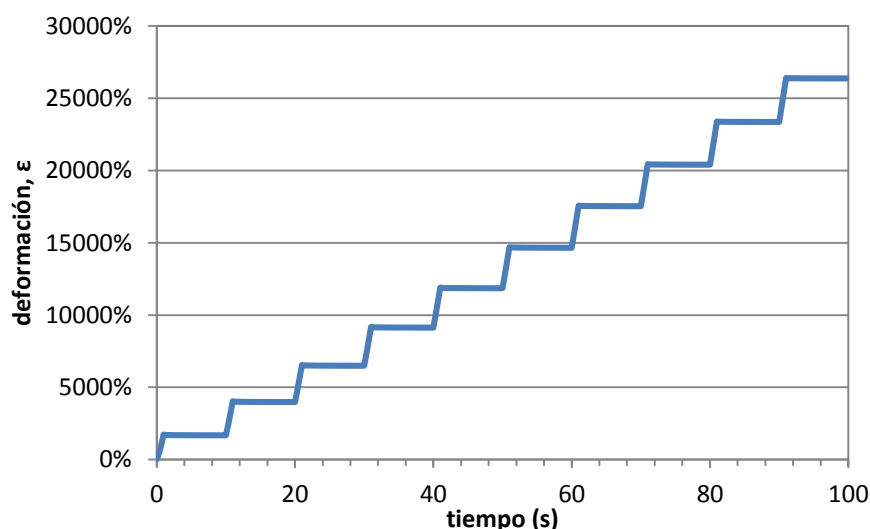


Figura 25. Resultados de MSCR a 76 °C, 3.2 kPa, ciclo 11-20

Se efectuaron los cálculos para obtener los parámetros de evaluación del asfalto de acuerdo a la norma, indicados en la Tabla 10. En ellos se indica lo observado anteriormente; la recuperación con un esfuerzo de 0.1 kPa fue del 92.07% (muy alta) mientras que la recuperación con un esfuerzo de 3.2 kPa fue de -3.96% (muy baja), lo que indica que no solo el material no recuperó, sino que se deformó de más.

Tabla 10. Cálculos de MSCR a 76 °C

R_{0.1}	92.07%
R_{3.2}	-3.96%
R_{diff}	104.30%
J_{nr 0.1}	0.02080
J_{nr 3.2}	8.24030
R_{diff Jnr}	39509.03%

En las Figuras 26 y 27 se indican los resultados del Creep Repetido a 82 °C. En este caso se observa el mismo comportamiento determinado anteriormente, únicamente con mayores niveles de deformación presentados en el asfalto.

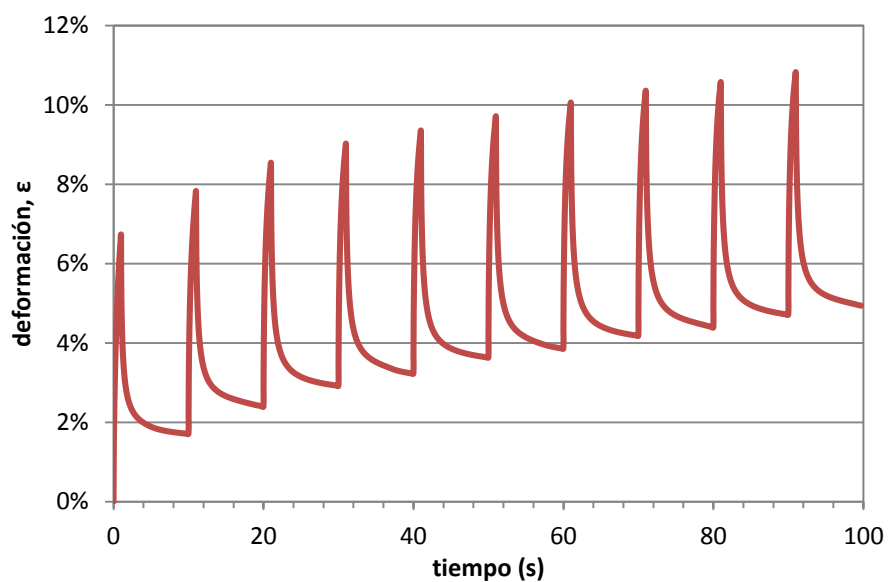


Figura 26. Resultados de MSCR a 82 °C, 0.1 kPa, ciclo 1-10

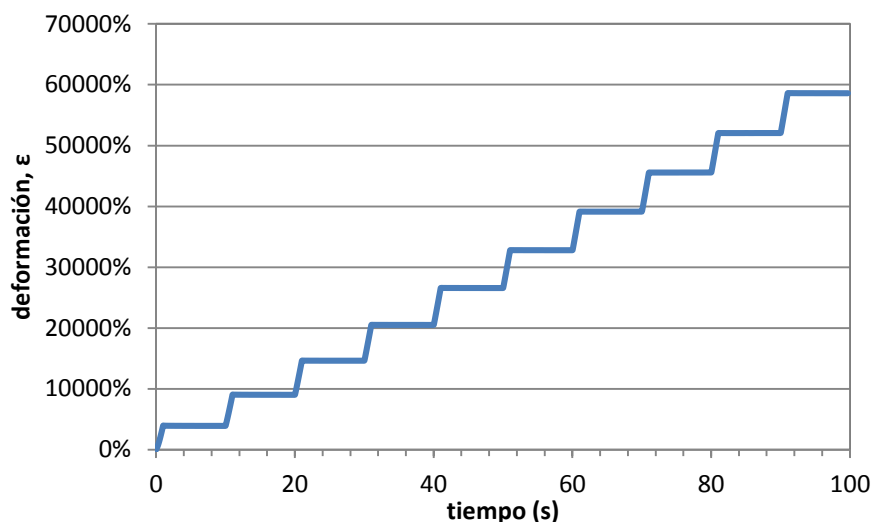


Figura 27. Resultados de MSCR a 82 °C, 3.2 kPa, ciclo 11-20

En la Tabla 11 se indican los cálculos realizados para obtener el R_{diff} y el J_{nr} . Nuevamente, la recuperación con un esfuerzo de 0.1 kPa fue muy alta, mientras que la recuperación con un esfuerzo de 3.2 kPa resultó negativa.

Tabla 11. Cálculos de MSCR a 82 °C

$R_{0.1}$	91.99%
$R_{3.2}$	-6.45%
R_{diff}	107.01%
$J_{nr\ 0.1}$	0.04992
$J_{nr\ 3.2}$	18.31768
$R_{diff\ Jnr}$	36597.74%

El $J_{nr3.2}$ determinado para ambas temperaturas no clasifica dentro de lo establecido por la norma para obtener un grado de desempeño de acuerdo a este método, ya que la deformación presentada en altos niveles de esfuerzo es muy grande. Posiblemente este método no es el adecuado para evaluar la resistencia a la deformación permanente de este ligante asfáltico.

Carga Cíclica Repetida (RCL)

El ensayo RCL se llevó a cabo de acuerdo a la metodología mencionada previamente, con los parámetros de entrada indicados en la Tabla 12. Los resultados arrojaron las curvas mostradas en la Figura 28, donde se observa la caída del módulo de corte alrededor del ciclo no. 20,000.

Tabla 12. Parámetros de entrada de ensayo RCL

Origen de la muestra	RTFO
Temperatura de ensayo	20 °C
Frecuencia (Hz)	10 Hz
Deformación controlada	5 %
Duración del ensayo	50 min

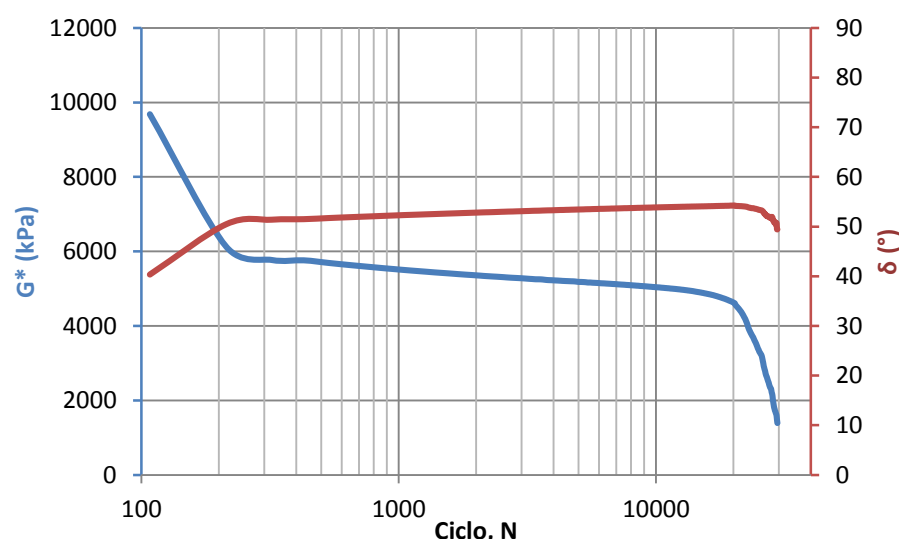
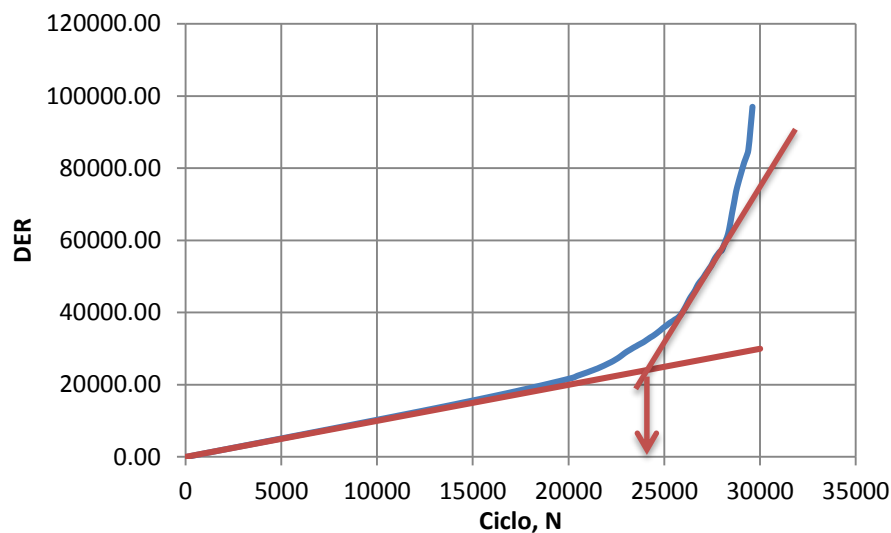


Figura 28. Resultados de RCL a 20 °C, residuo de RTFO, $\epsilon=5\%$, $f=10\text{Hz}$

Los cálculos realizados de acuerdo al criterio de DER se indican en la Figura 29, de la cual se obtiene un ciclo de falla $N_p = 24,500$. Por otro lado, en comparativa con el Criterio Clásico, la falla se presentaría a los 26,302 ciclos.

Figura 29. Determinación de N_p Barrido de Amplitud Lineal (LAST)

El ensayo se llevó a cabo de acuerdo a los parámetros de entrada mostrados en la Tabla 13. Los resultados de barrido de deformaciones se muestran en la Figura 30, donde el asfalto parece presentar la falla a partir de una deformación del 17%.

Tabla 13. Parámetros de entrada de ensayo LAST

Origen de la muestra	RTFO											
Temperatura de ensayo	20 °C											
Etapa 1												
Deformación controlada (%)	0.1											
Barrido de frecuencias (Hz)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10	20	30
Etapa 2												
Frecuencia (Hz)	10											
Barrido de deformación (%)	0 - 30											
Ciclos	3,100											

A partir de los cálculos realizados, se obtuvo la Ley de Fatiga del asfalto evaluado (Figura 31), donde se determinó el parámetro de resistencia a la fatiga, N_f , normalizado a 1'000,000 de ESALs. En la Tabla 14 se muestran los resultados sin normalizar.

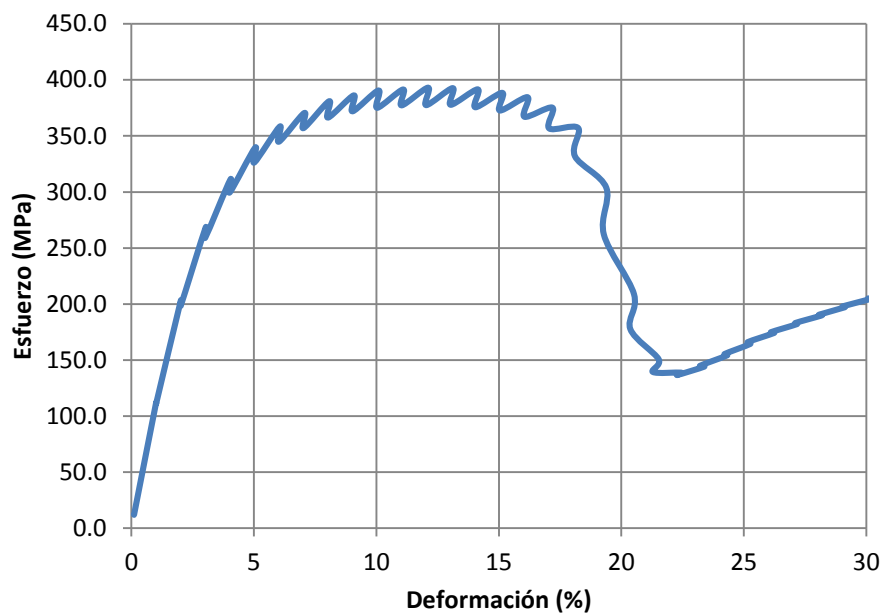


Figura 30. Resultados de LAST

Tabla 14. Nf calculado para cada nivel de deformación

γ max	Nf
1.0	16,687,889
1.5	2,943,425
2.0	859,413
2.5	330,746
3.0	151,584
3.5	78,373
4.0	44,259
4.5	26,737
5.0	17,033
6.0	7,806
7.0	4,036
8.0	2,279
9.0	1,377
10.0	877

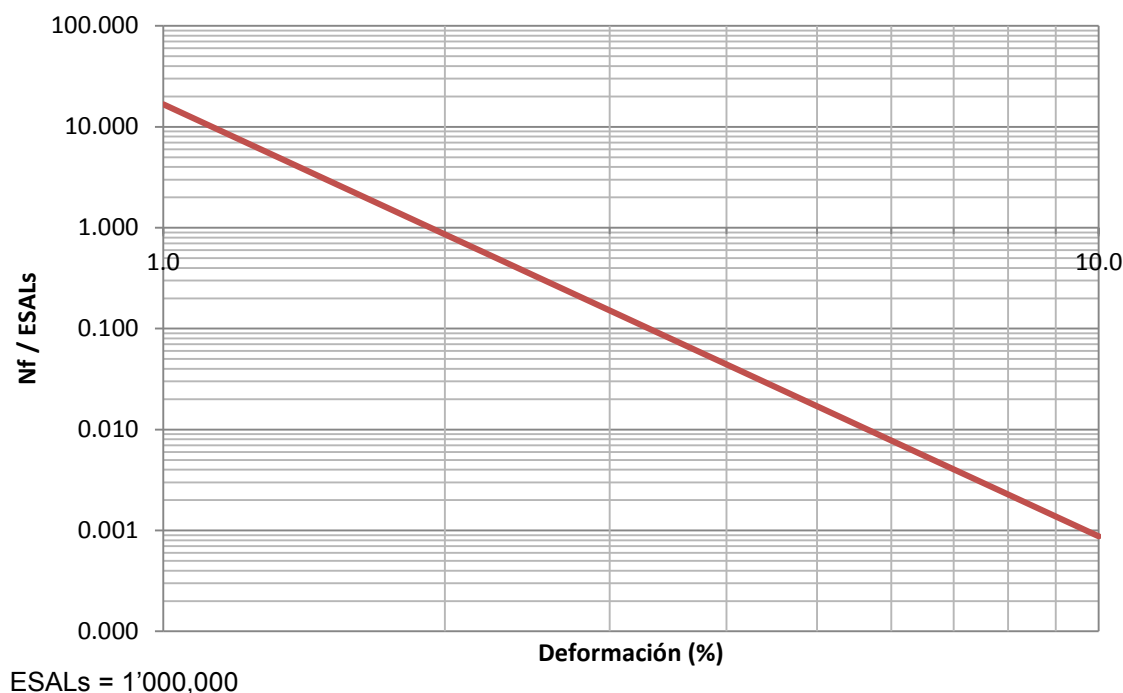


Figura 31. Ley de Fatiga de LAST

6.2 Mezclas asfálticas

Módulo complejo

De los especímenes compactados, una parte de estos especímenes fue utilizada para calibrar el ensayo, la otra parte fue utilizada para realizar los ensayos. Las propiedades volumétricas de las probetas ensayadas se presentan en la Tabla 15.

Para el caso de la mezcla asfáltica tibia se realizó el ensayo de módulo complejo en una probeta cilíndrica sometida a (una sollicitación sinusoidal de compresión (AASHTO T342-11). El ensayo fue realizado a 6 temperaturas (-10, 0, 10, 20, 30 y 40°C) y 5 frecuencias (10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz) diferentes. El análisis fue realizado mediante la curva maestra la cual fue construida a una temperatura de 20°C.

La mezcla de referencia y la mezcla modificada, el ensayo fue realizado a 5 temperaturas (-10, 4, 21, 37, 54°C) y 6 frecuencias (25, 10, 5, 1, 0.3, 0.1 Hz).

Tabla 15. Parámetros volumétricos de los especímenes ensayados de mezclas tibias

Asfalto	AC-20	A.M.	M.T.
% C.A.	5.38	5.02	5.9
Gmb	2.301	2.293	2.320
Gmm	2.443	2.437	2.415
%VA	5.8	5.9	3.9
%VAM	16.65	16.62	14.49
%VFA	65.17	64.55	73.08
%Filler/Asfalto	0.72	0.73	1.07
Diámetro	101.43	101.03	101.20
Altura	148.99	149.54	150.4

Curva maestra del módulo dinámico, $|E^*|$

Para el estudio se tomó la temperatura de 21°C como la temperatura de referencia arbitraria. Para analizar los resultados las gráficas se dividieron en 3 zonas, frecuencias bajas, frecuencias intermedias y frecuencias altas, a continuación se presentan los rangos de estas frecuencias:

- Frecuencias bajas < 0.1 Hz
- Frecuencias intermedias 0.1Hz a 100 Hz
- Frecuencias altas > 100 Hz

Se dividieron de esta forma debido a que en las frecuencias intermedias es el rango de trabajo en que se encuentran la mayoría de las mezclas asfálticas y en este rango es donde se miden las propiedades a la fatiga de la mezcla asfáltica. Por otro lado las frecuencias altas (bajas temperaturas), dan un indicador de la susceptibilidad de la mezcla a la fisuración térmica. Y el rango de bajas frecuencias es un indicador a la deformación permanente.

La Figura 32 presenta la curva maestra del módulo dinámico para las mezclas asfálticas.

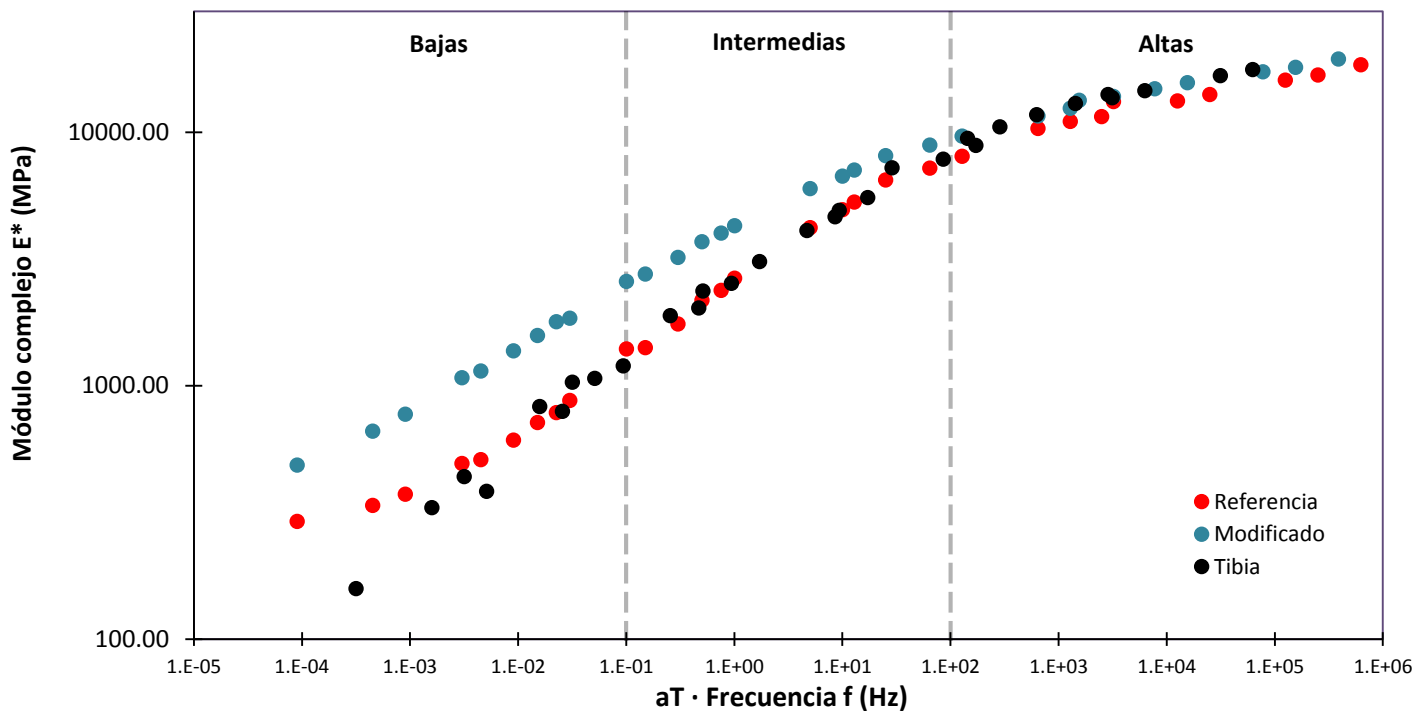


Figura 32. Curva Maestra del módulo complejo, E^*

En la figura anterior se observa que la mezcla con asfalto modificado presenta el siguiente comportamiento:

- a frecuencias bajas el valor del módulo se incrementa un 51% como valor promedio.
- a frecuencias intermedias es más variable ya que va de un 38% a un 60%.

Estos incrementos pueden significar un mejor desempeño a la deformación permanente.

Para el caso de la mezcla tibia, se observa que tiene un comportamiento similar al de la mezcla de Referencia, siendo que tiene un mejor comportamiento a temperaturas altas. Con esta primera evaluación se podría determinar que la mezcla asfáltica modificada tendrá mejores resultados en los ensayos de desempeño. Esto se verificará en ensayos posteriores.

Curva maestra del ángulo de fase, ϕ

La Figura 33 presenta la curva maestra del ángulo de fase para las mezclas asfálticas, donde se puede describir el siguiente análisis.

- a frecuencias altas, la mezcla tibia tiene el mismo comportamiento que la mezcla asfáltica de referencia y la modificada.

- a frecuencias intermedias, la mezcla tibia presenta un comportamiento similar a la mezcla de referencia. Para la mezcla modificada, esta presenta un mejor comportamiento en los valores de ϕ , ya que se reducen mejorando la componente elástica de la mezcla, lo que representa una mejora en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.
- a frecuencias bajas, los valores de ϕ para la mezcla tibia son los más altos que las mezclas evaluadas, por lo cual podría repercutir en el desempeño de la mezcla. Para la mezcla de referencia, esta presenta un ángulo de fase menor que la mezcla modificada, esto es debido a la dispersión del resultado, ya que el ensayo se realizó una temperatura de 54° C con 25 Hz.

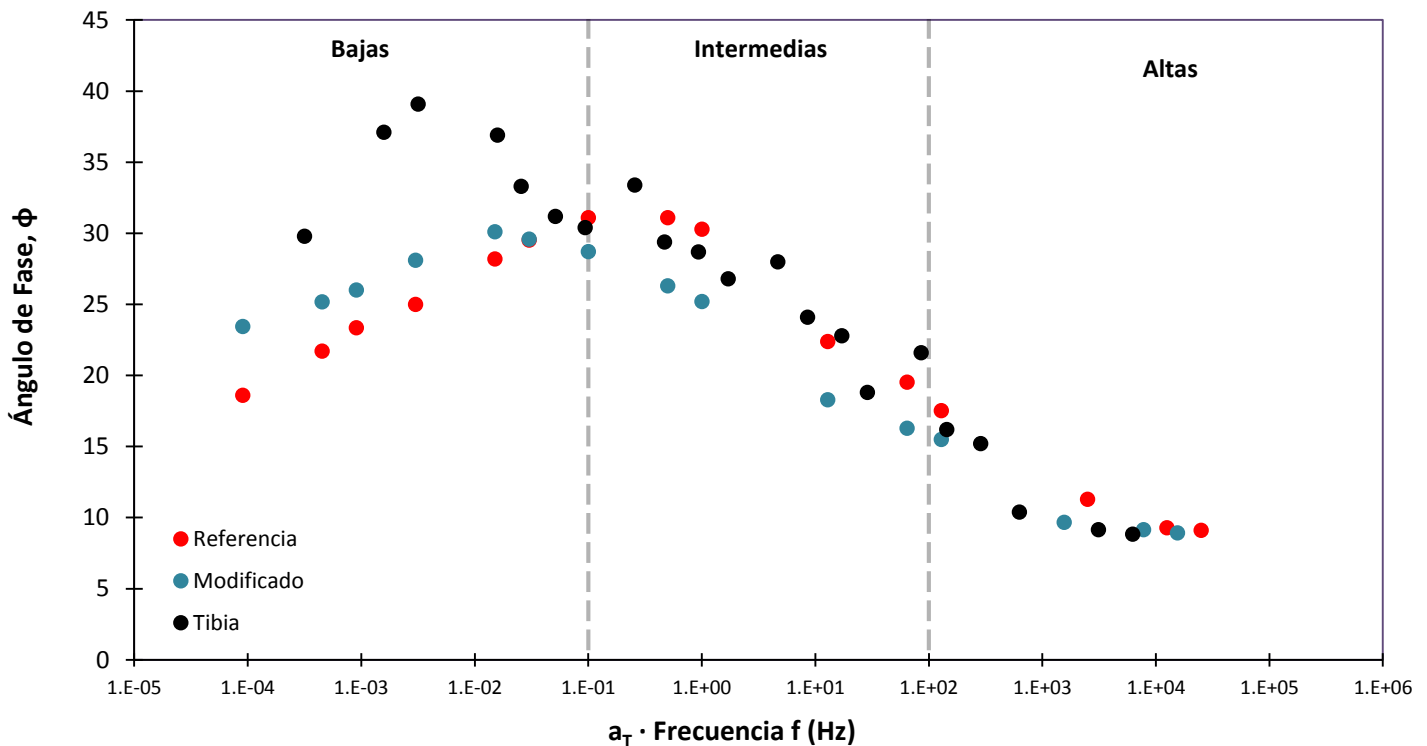


Figura 33. Curva Maestra del ángulo de fase, ϕ

En la tabla 16 y 17 se presentan los valores del a_T calculados para construir las curvas maestras del módulo complejo y ángulos de fase.

Tabla 16. Valores del a_T calculados para la mezcla de referencia y modificada

Temperatura	Referencia	A.M.
-10	25000	15500
4	250	128
21	1	1
37	0.009	0.03
54	0.0002	0.0009

Tabla 17. Valores del a_T calculados para la mezcla tibia

Temperatura	M.T.
-10	6237
0	286
10	17
20	1
30	0.05102
40	0.00316

Plano Cole-Cole

En esta representación nos permite evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica a bajas temperaturas combinando los 2 efectos ($|E^*|$ y ϕ), analizando los resultados del ensayo en un plano complejo. La Figura 34 presenta el plano cole-cole para las mezclas asfálticas evaluadas.

Los puntos experimentales permiten definir una curva única con su ecuación de regresión en el cual se pudo observar un incremento del 16% en la parte elástica para la mezcla modificada respecto de la mezcla tibia de referencia, por lo que la mezcla modificada tendrá mejor comportamiento a bajas temperaturas.

La mezcla asfáltica de referencia y la mezcla tibia, presentan el mismo comportamiento en la parte elástica y viscosa

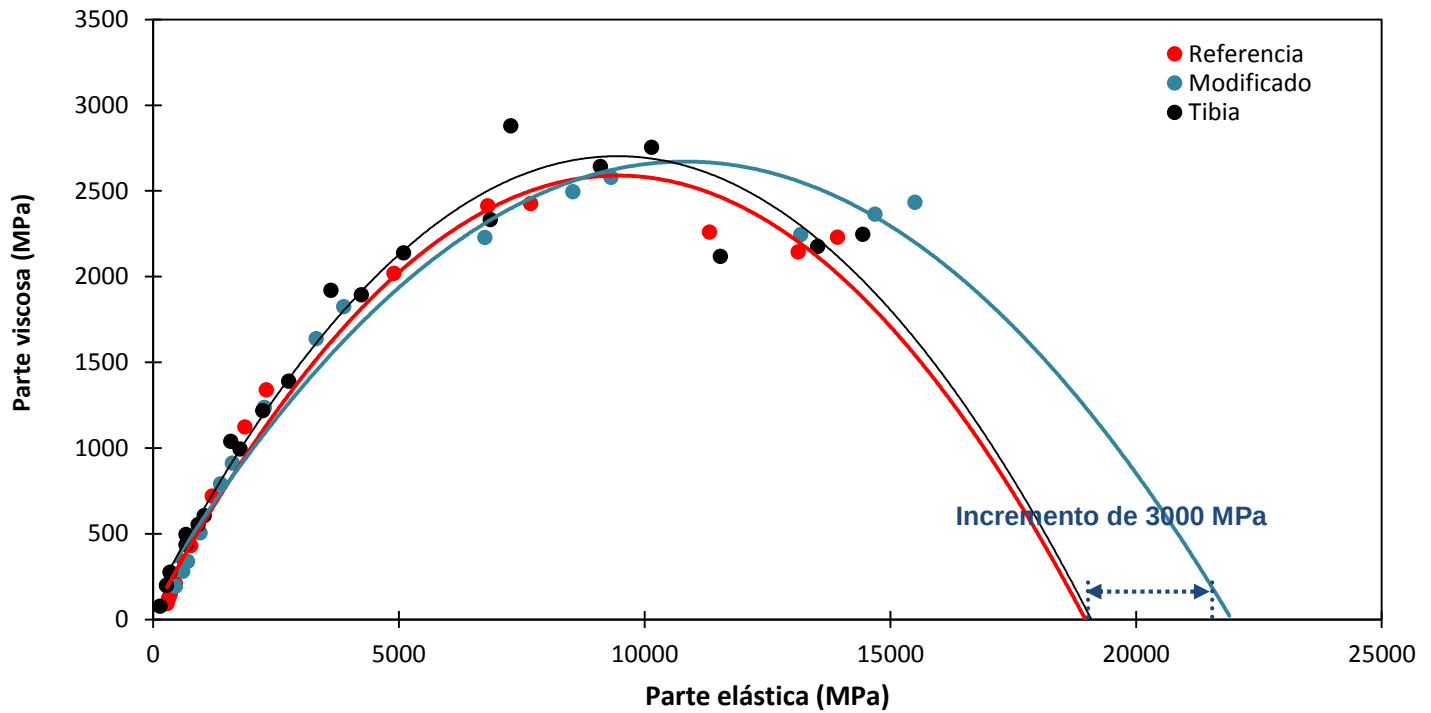


Figura 34. Plano de Cole-Cole

Espacio de Black

A continuación se presentan los resultados en el Espacio de Black, donde en esta gráfica se representan las zonas con valores de módulo bajo y en particularmente la disminución del ángulo de fase para temperaturas altas. La Figura 35 presenta el espacio de Black para las mezclas asfálticas evaluadas.

Los puntos muestrales evaluados forman una curva única para cada mezcla asfáltica, donde se puede apreciar que la curva de la mezcla de referencia y modificada tienen un efecto visual de contracción con respecto a la mezcla tibia. Esto significa que la mezcla tibia, es menos rígida que las otras dos mezclas, por ende será más susceptible a la deformación permanente, pero puede representar una mejora de sus propiedades a la fatiga.

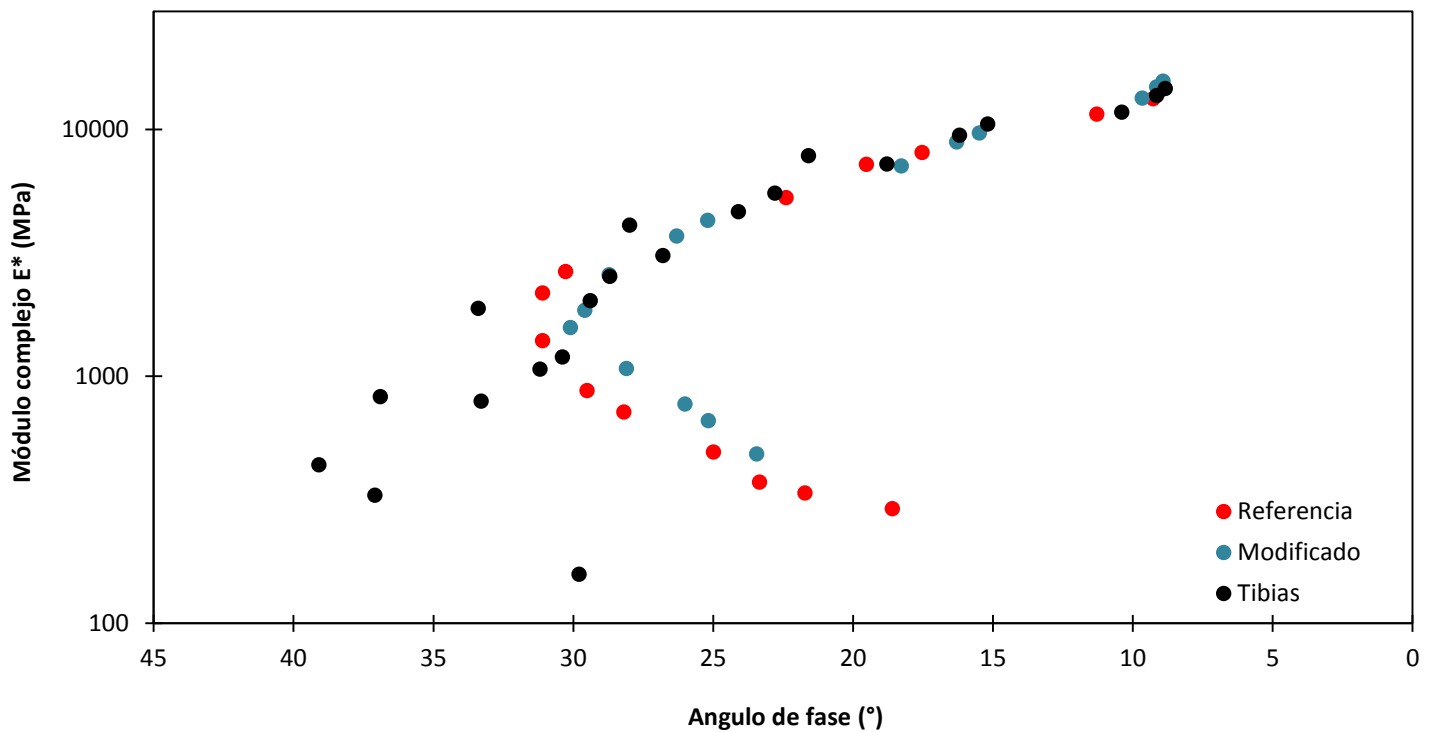


Figura 35. Espacio de Black

Ensayos de flexión repetida en cuatro puntos

El ensayo de flexión repetida en cuatro puntos consiste en aplicar una carga sinusoidal a una viga rectangular en un ambiente controlado, generalmente a 20°C ya que se considera que a esta temperatura se presenta este tipo de deterioro. La viga se sujeta con cuatro mordazas y se aplica una carga sinusoidal repetida en los puntos localizados a un tercio del extremo de la viga (mordazas interiores). La deflexión causada por la carga se mide en el centro de la viga. El número de ciclos a la falla es un indicador de la vida a la fatiga de la mezcla asfáltica.

Los ensayos realizados fueron conforme a la norma AASHTO T 321-07. Los ensayos se realizaron en el modo de deformación controlada a una temperatura de 20°C y una frecuencia de aplicación de la carga senoidal de 10Hz. El ensayo se realizó para cuatro niveles de deformación: 300, 400, 500 y 650 $\mu\epsilon$. Las tablas 18 - 20 muestran las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas.

Tabla 18. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos de referencia

με	300	400	500	600
No. Probeta	50	5	2	35
% C.A.	5,4	5,4	5,4	5,4
Gmb	2,30	2,28	2,30	2,29
Gmm	2,443	2,443	2,443	2,443
%VA	5,80	6,60	5,80	6,40
%VAM	16,68	17,36	16,66	17,15
%VFA	65,23	61,98	65,19	62,68
%Filler/Asfalto	0,72	0,72	0,72	0,72

Tabla 19. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos modificados

με	300	400	500	600
No. Probeta	12	11	8	10
% C.A.	5,0	5,0	5,0	5,0
Gmb	2,23	2,27	2,28	2,28
Gmm	2,437	2,437	2,437	2,437
%VA	8,40	6,70	6,50	6,50
%VAM	18,85	17,32	17,12	17,17
%VFA	55,44	61,32	62,03	62,14
%Filler/Asfalto	0,73	0,73	0,73	0,73

Tabla 20. Parámetros volumétricos de los especímenes prismáticos de mezclas tibias

με	300	400	450	500	600
No. Probeta	4	6	8	7	9
% C.A.	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Gmb	2.282	2.331	2.324	2.324	2.309
Gmm	2.415	2.415	2.415	2.415	2.415
%VA	5.5	3.5	3.8	3.8	4.4
%VAM	15.90	14.07	14.35	14.25	14.90
%VFA	65.41	75.12	73.52	73.52	70.47
%Filler/Asfalto	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07

Fatiga

El criterio de falla para el análisis de resultados fue el criterio clásico, el cual considera que la viga falla cuando el módulo de rigidez se reduce un 50% con respecto a su valor inicial. Se utilizaron tres niveles de deformación para caracterizar la vida a la fatiga de las mezclas asfálticas evaluadas. Estos niveles de deformación fueron seleccionados de manera que fueran representativos de los desarrollados en la estructura del pavimento bajo condiciones típicas de tránsito.

Tabla 21. Resultados de ensayos de fatiga

Tipo de asfalto	Espécimen	Deformación $\mu\text{m/m}$	No. de ciclos
Referencia	02AC20_300	300	1 0290 000
	05AC20_400	400	926 001
	02AC20_500	500	180 000
	35AC20_650	650	37 758
Modificado	12AM_300	300	1 447 461
		400	227 500
	08AM_500	500	220 000
	10AM_650	650	242 293
Tibias	MT_04_300	300	1 708366
	MT_06_400	400	1 425 000
	MT_08_2_450	450	900 000
	MT_07_500	500	375 004
	MT_09_600	600	80 000

Para determinar el comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas estudiadas se hace uso de la curva de Wöhler. La figura 36 ilustra las curvas de Wöhler construidas con los resultados obtenidos para diferentes niveles de deformación (Tabla 22) y por medio de un análisis de regresión se determinan la ecuación y las constantes.

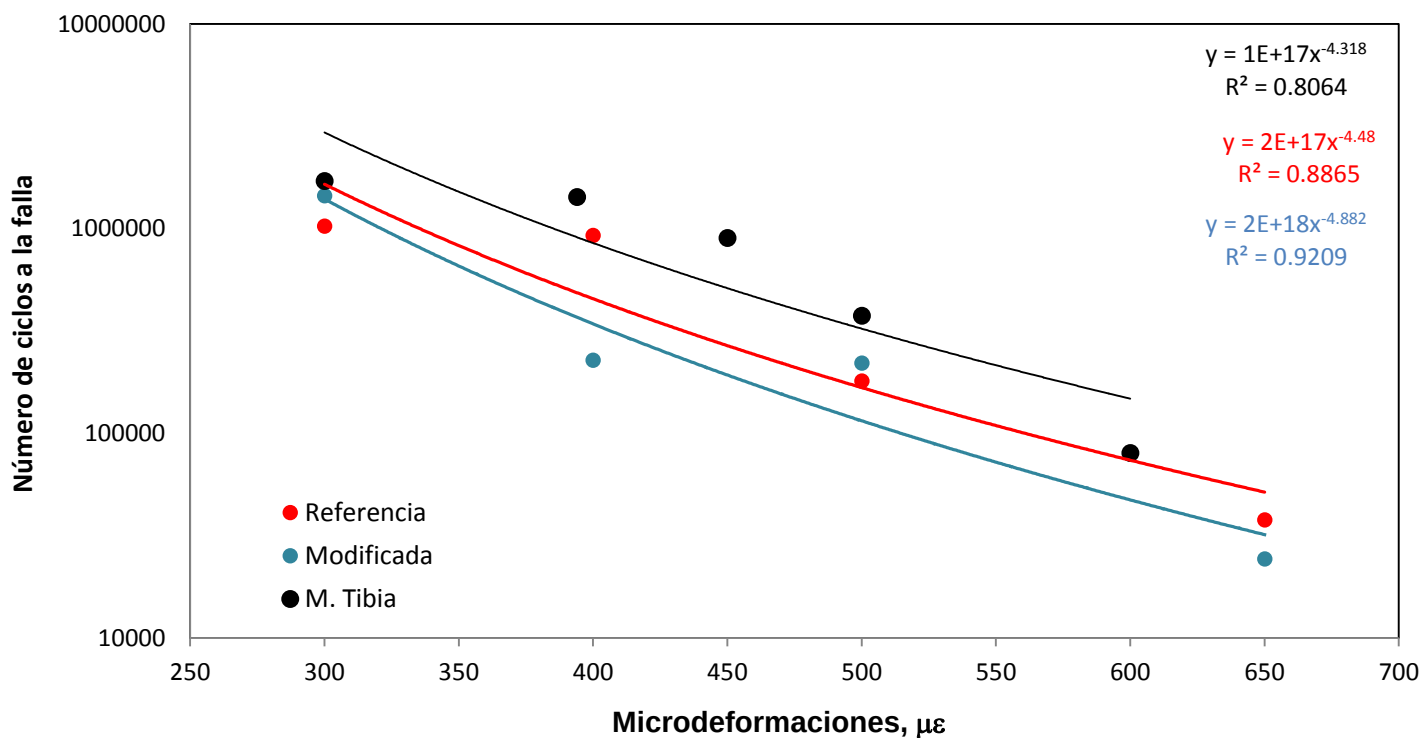


Figura 36. Curva de Wöhler

Tabla 22. Resultados de ensayos de fatiga ϵ_6

Formulación	ϵ_6	Pendiente
Referencia	333	-4.773
Modificado	331	-4.48
Tibia	353	-4.318

Del análisis de la figura 35 se observa que la mezcla asfáltica modificada tiene un desempeño inferior que la mezcla asfáltica convencional y la mezcla tibia en los puntos muestrales analizados. Pero la mezcla asfáltica tibia al ser menos rígida tiene un mejor desempeño a la fatiga, siendo esta la que presenta mejores resultados.

Conclusiones

- Un punto importante a remarcar, es que Independientemente del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica, las mezclas tibias proporcionan un aporte ecológico con respecto a las mezclas convencionales (emisiones y reducciones de temperaturas producción).

Material asfáltico

- El tipo de modificación realizada (concentración y tipo de aditivo) confieren al material asfáltico un comportamiento poco convencional en comparación con asfaltos modificados con polímeros convencionales.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de Creep Repetido y LAST para el material asfáltico con aditivo químico, dieron resultados poco congruentes. Esto puede estar asociado a que estos métodos de evaluación están más enfocados a la evaluación de asfaltos modificados convencionales, por lo cual se deberá presentar especial enfoque a la validación en ensayos de desempeño de la mezcla asfáltica.
- La evaluación de nuevos materiales conlleva la implementación de nuevos ensayos, por lo cual se deberá trabajar en el desarrollo de un ensayo que estime de mejor forma el comportamiento del material asfáltico.

Mezcla asfáltica

- La realización de ensayos mecánicos en la mezcla asfáltica consumen muchos recursos (tiempo y dinero), por lo cual se ha optado por hacer ensayos que puedan estimar las propiedades de la mezcla asfáltica, sin embargo como se pudo ver en este trabajo, para este material no pudieron establecer el comportamiento de la mezcla de forma adecuada.
- En la evaluación del módulo complejo de las mezclas asfálticas se observó que la mezcla tibia presentó rigideces similares a las obtenidas con una mezcla convencional sin modificador aun y cuando el grado de desempeño no es el mismo, lo cual es un indicador que con un buen diseño, esta mezcla puede ser utilizada en pavimentos de alto desempeño. Siendo la mezcla asfáltica modificada la que presentó los mejores resultados.
- En el segundo ensayo de desempeño a la mezcla asfáltica se observó que la adición del aditivo químico mejoró el comportamiento a la fatiga de la mezcla. Siendo el asfalto

modificado con polímero el que presentó una disminución de su vida a la fatiga por la inclusión del polímero.

- Como se mencionó en el punto anterior, estos ensayos son preliminares y por lo tanto se deben realizar más estudios para definir con certitud del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.

Bibliografía

1. **H. Delgado**, Lo complejo del Módulo Complejo: aspectos experimentales. Revista Asfáltica, Num 34, pp 42-46, 2013
2. **H. Delgado, L. Arnaud**, Experimentación y modelización del comportamiento reológico de una mezcla asfáltica, VII Congreso Mexicano del Asfalto, 2011.
3. **Di Benedetto H., Corte J.-F.**, « Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges », Hermes, Lavoisier, 2004.
4. **P Garnica, J.A Gómez, H. Delgado**, Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 228, 2003
5. **H. Delgado, L. Arnaud**, Investigation of the fatigue properties of asphalt mixtures reinforced with natural fibers. 5th International conference: bituminous mixtures and pavements, Tesalónica, Grecia, Junio 2011.
6. **H. Delgado**, Comportement à la Fatigue d'Enrobés Bitumineux Renforcés de Fibres de chanvre, Tesis de doctorado, Escuela Nacional de Trabajos Públicos del Estado, Lyon Francia, 2012.
7. Diseño de mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño PA-MA 01/11
8. Folleto técnico, Aditivos de adherencia. Quimikao
9. AASHTO MP19. (2010). *Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Recuperado el 22 de Mayo de 2014, de The Tech Standard: <http://www.thetechstandard.com/AASHTO-MP-19-10>
10. AASHTO TP101. (2014). *Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. Recuperado el 12 de Agosto de 2014, de Modified Asphalt Research Center: <http://uwmarc.wisc.edu/files/linearamplitudesweep/AASHTO-TP101-LAS-May-2013-v2.pdf>
11. AASHTO TP70. (2012). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Recuperado el 15 de marzo de 2014, de Techstreet: <http://www.techstreet.com/products/1841694>

12. ASTM D6373. (2013). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. Recuperado el 01 de julio de 2014, de ASTM International: <http://www.astm.org/Standards/D6373.htm>
13. ASTM D7175. (2008). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. Recuperado el 1 de febrero de 2014, de ASTM International: <http://www.astm.org/Standards/D7175.htm>
14. Bahia, H., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M., & Anderson, R. (2001). *Characterization of modified asphalt binders in Superpave Mix Design*. Washington D.C., EUA: National Academy Press.

Anexo 1.

Curvas isotérmicas y curva maestra del módulo dinámico, $|E^*|$

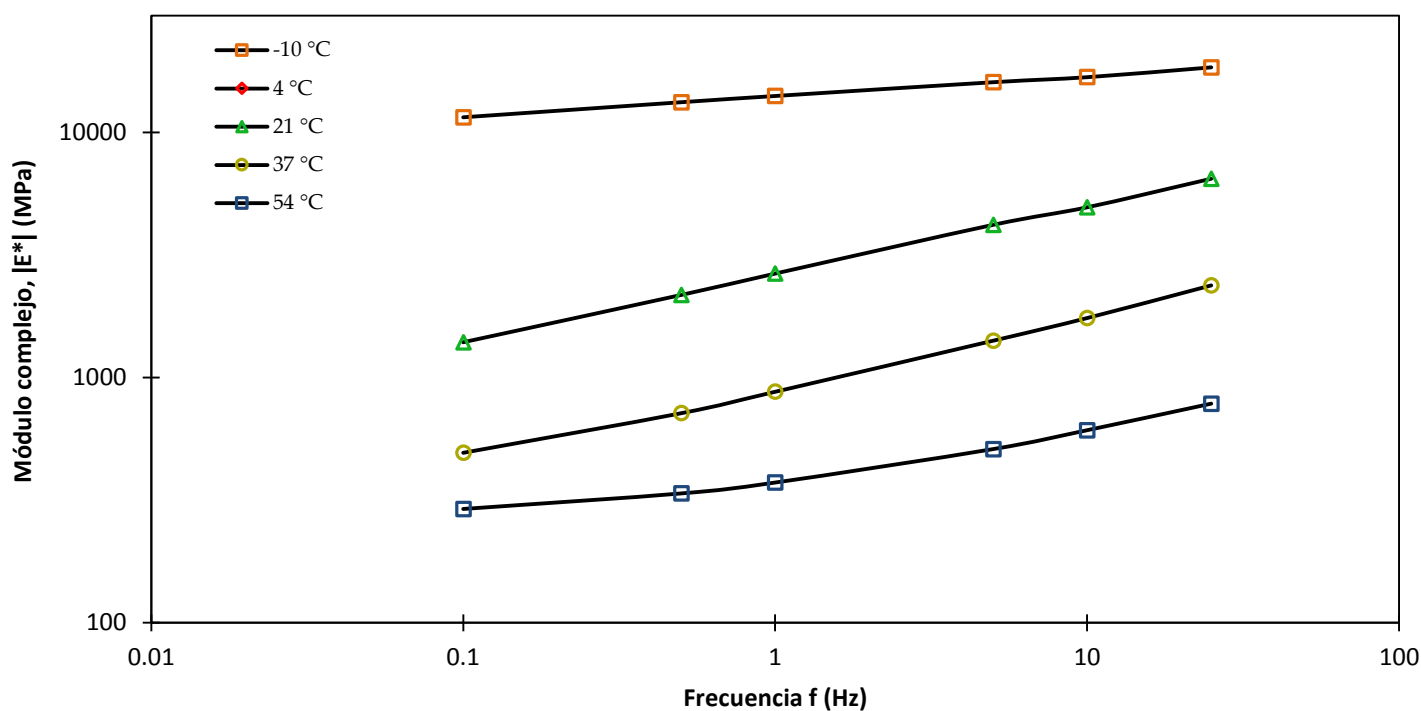


Figura 1.1 Curva isotérmica del módulo complejo con mezcla de referencia.

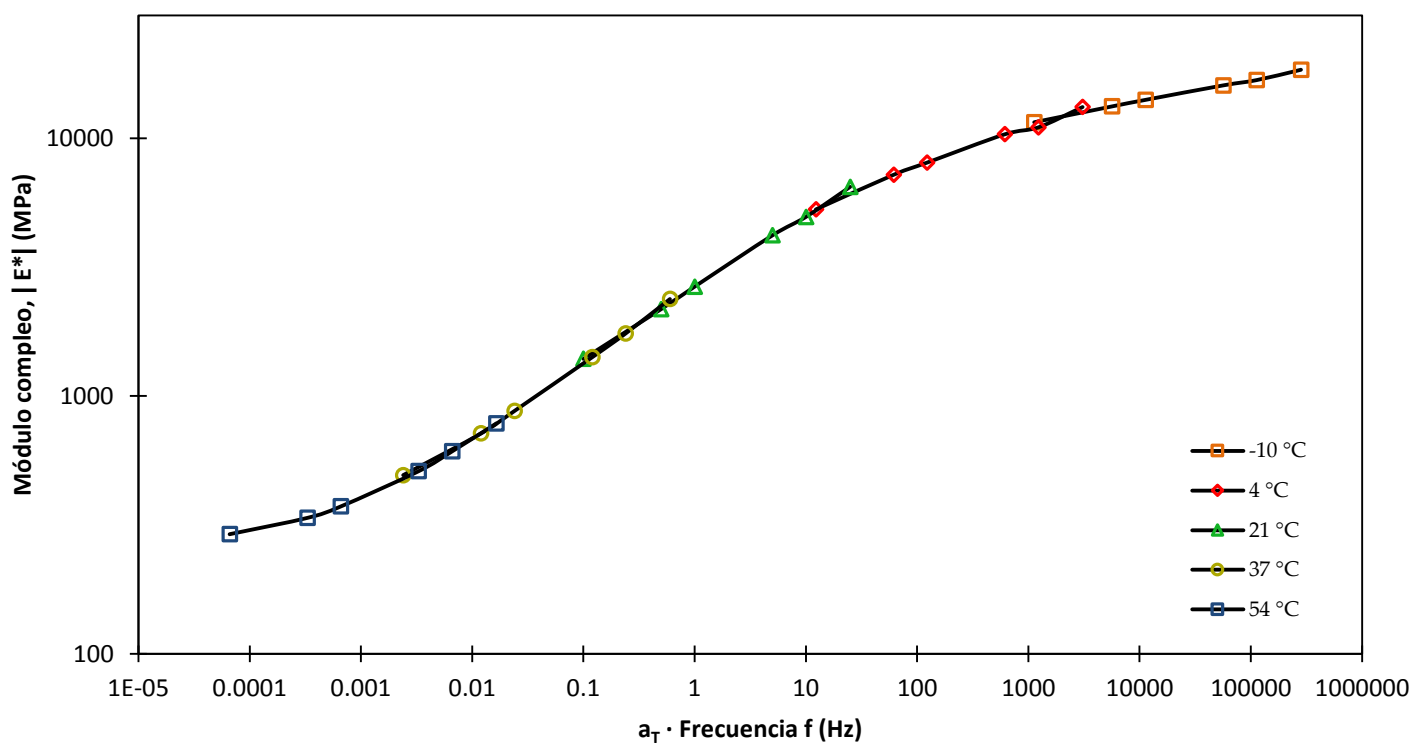


Figura 1.2 Curva maestra del módulo complejo con mezcla de referencia.

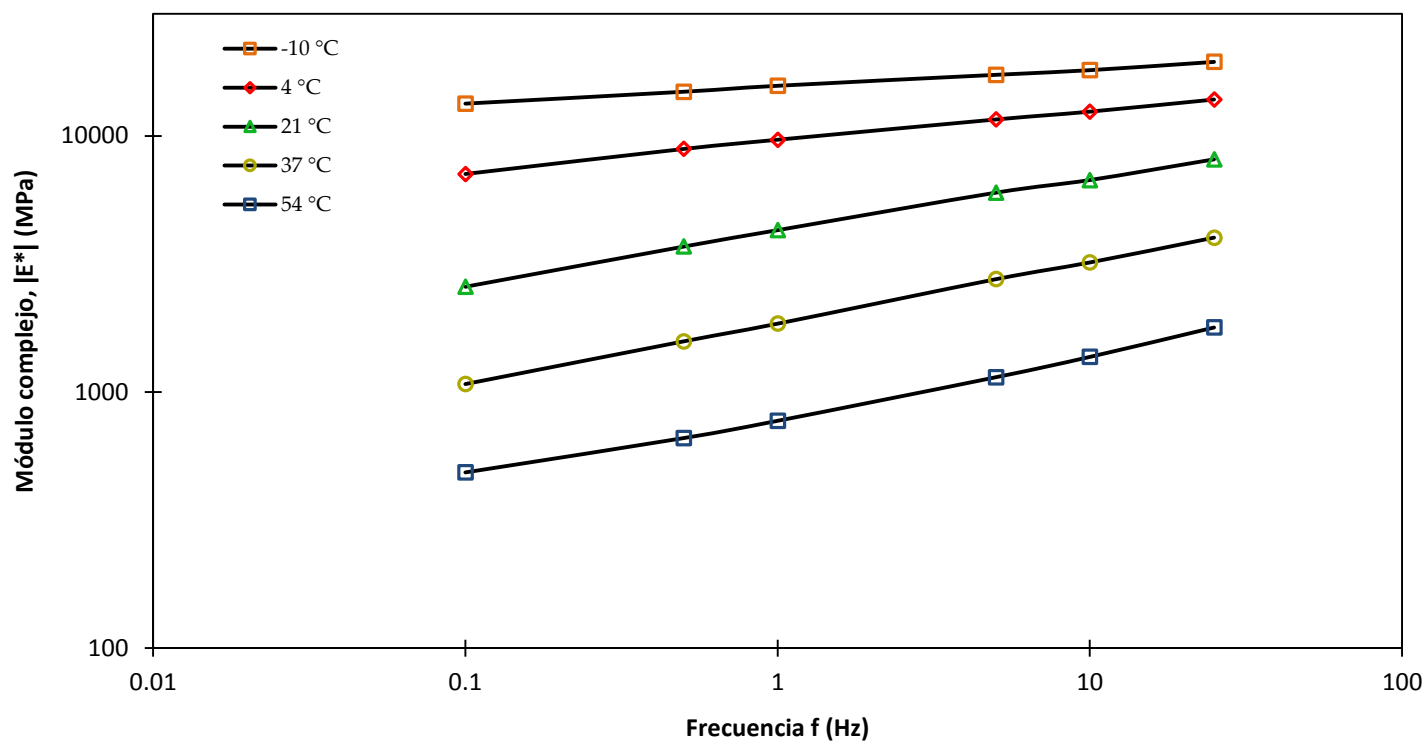


Figura 1.3 Curva isotérmica del módulo complejo con mezcla modifica.

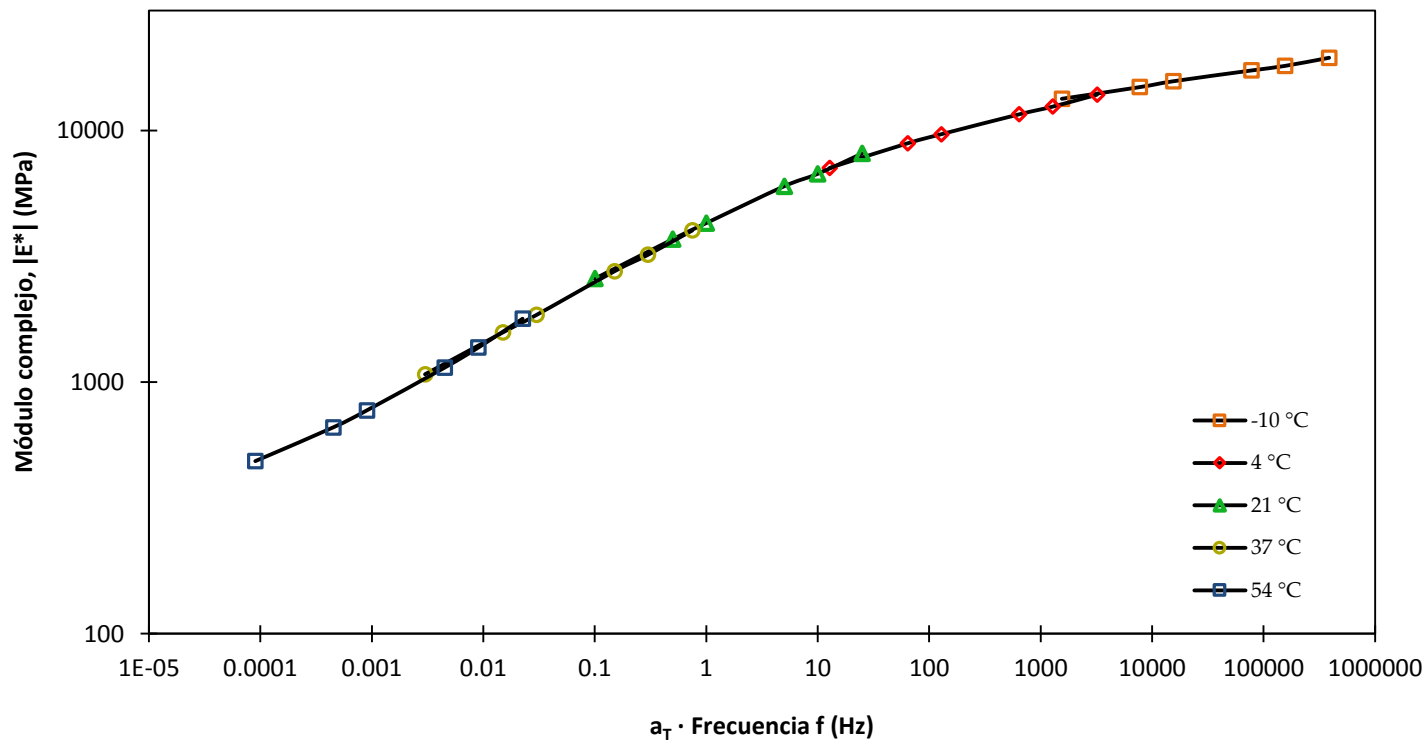


Figura 1.4 Curva maestra del módulo complejo con mezcla modificada.

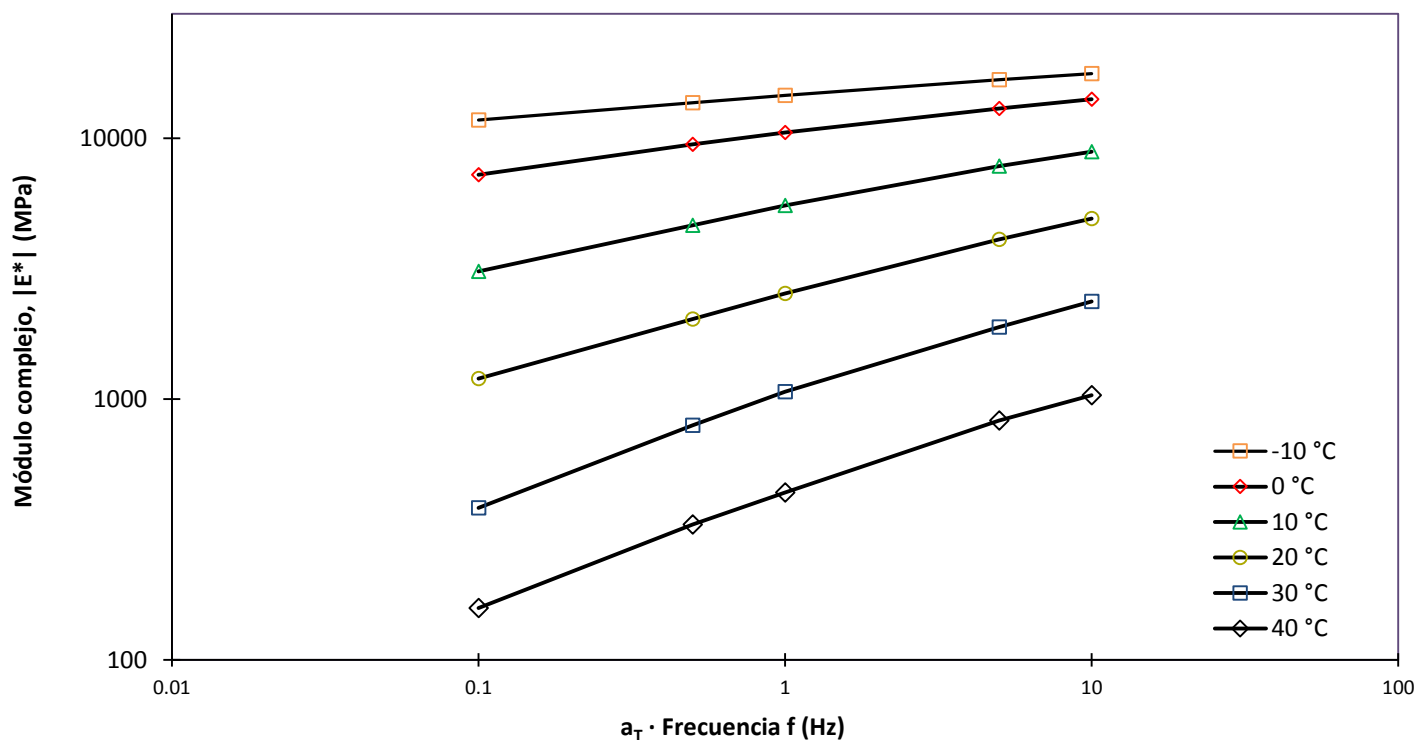


Figura 1.5 Curva isotérmica del módulo complejo de la mezcla tibia.

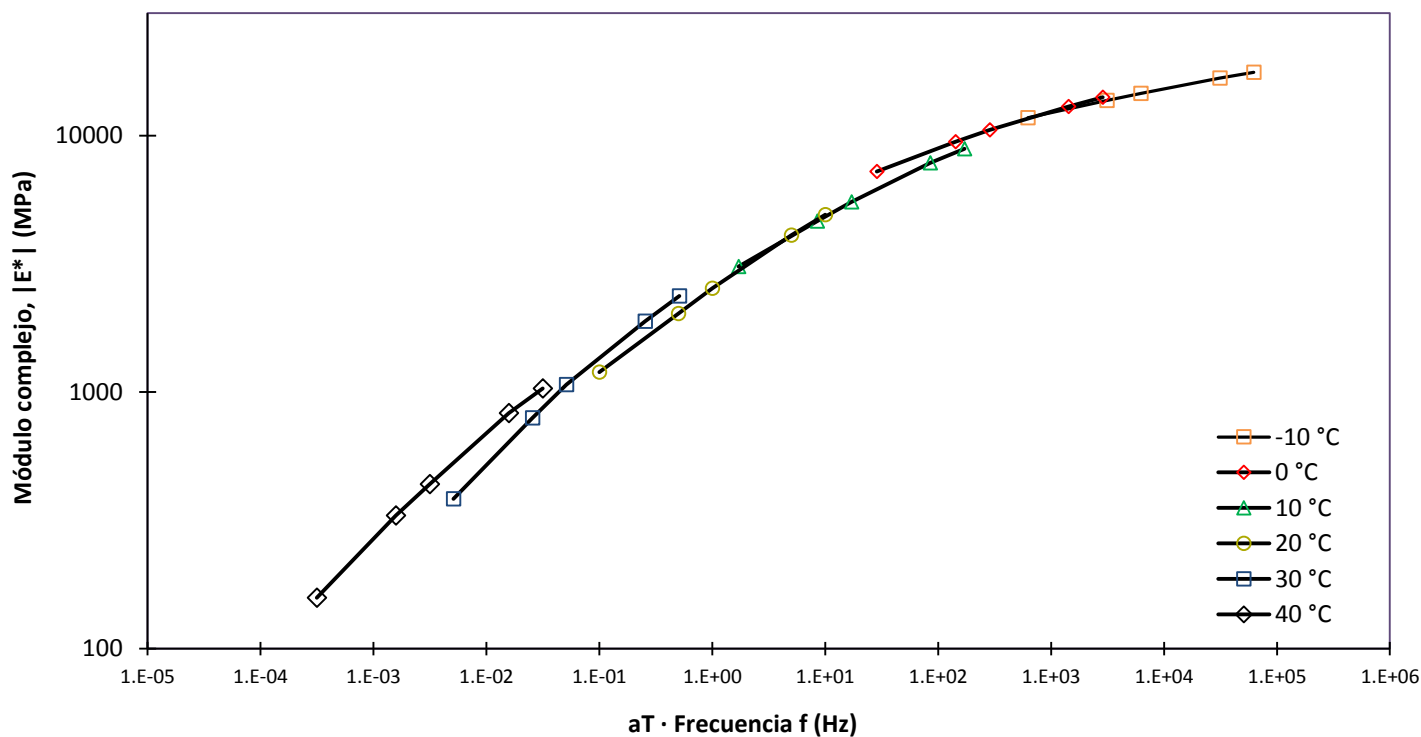


Figura 1.6 Curva maestra del módulo complejo de la mezcla tibia.

Anexo 2.

Curvas isotérmicas y curva maestra del ángulo de fase, ϕ

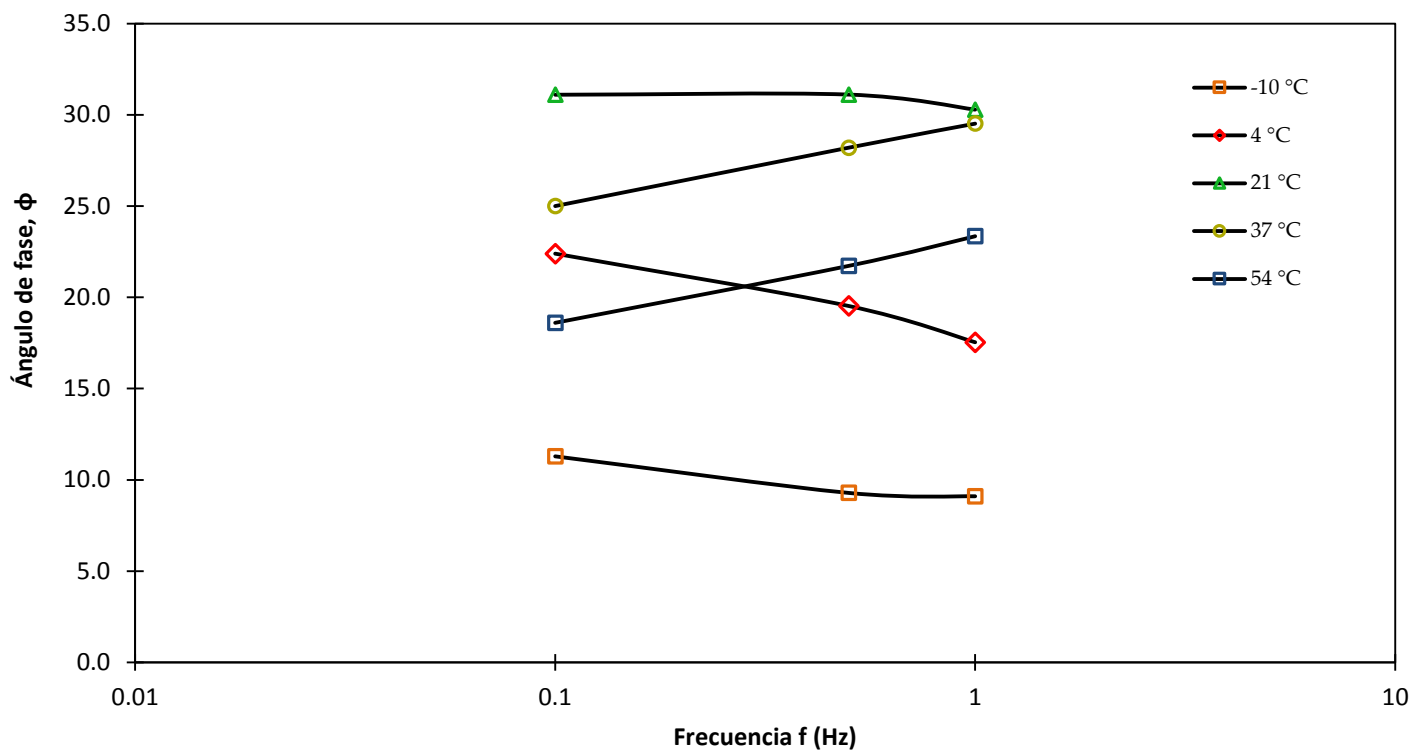


Figura 2.1 Curva isotérmica del ángulo de fase con mezcla de referencia.

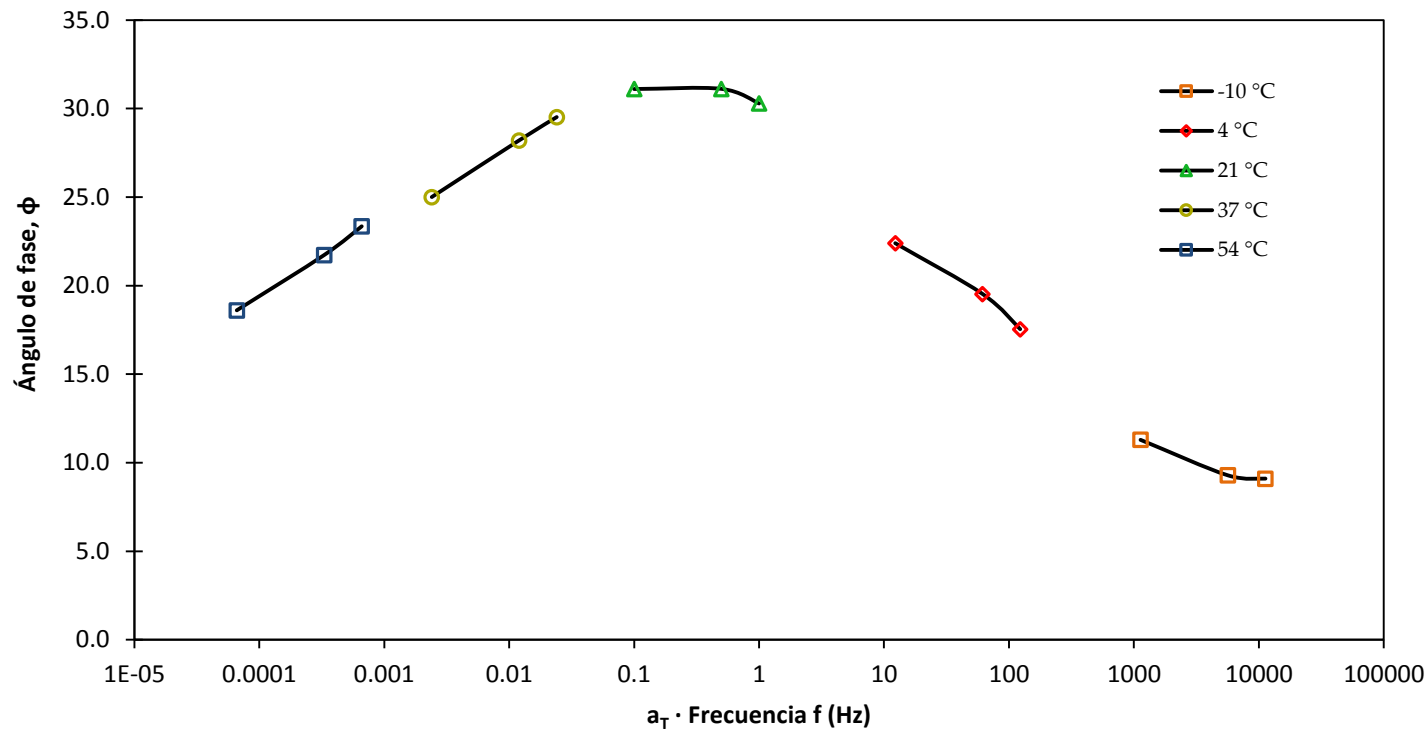


Figura 2.2 Curva maestra del ángulo de fase con mezcla de referencia.

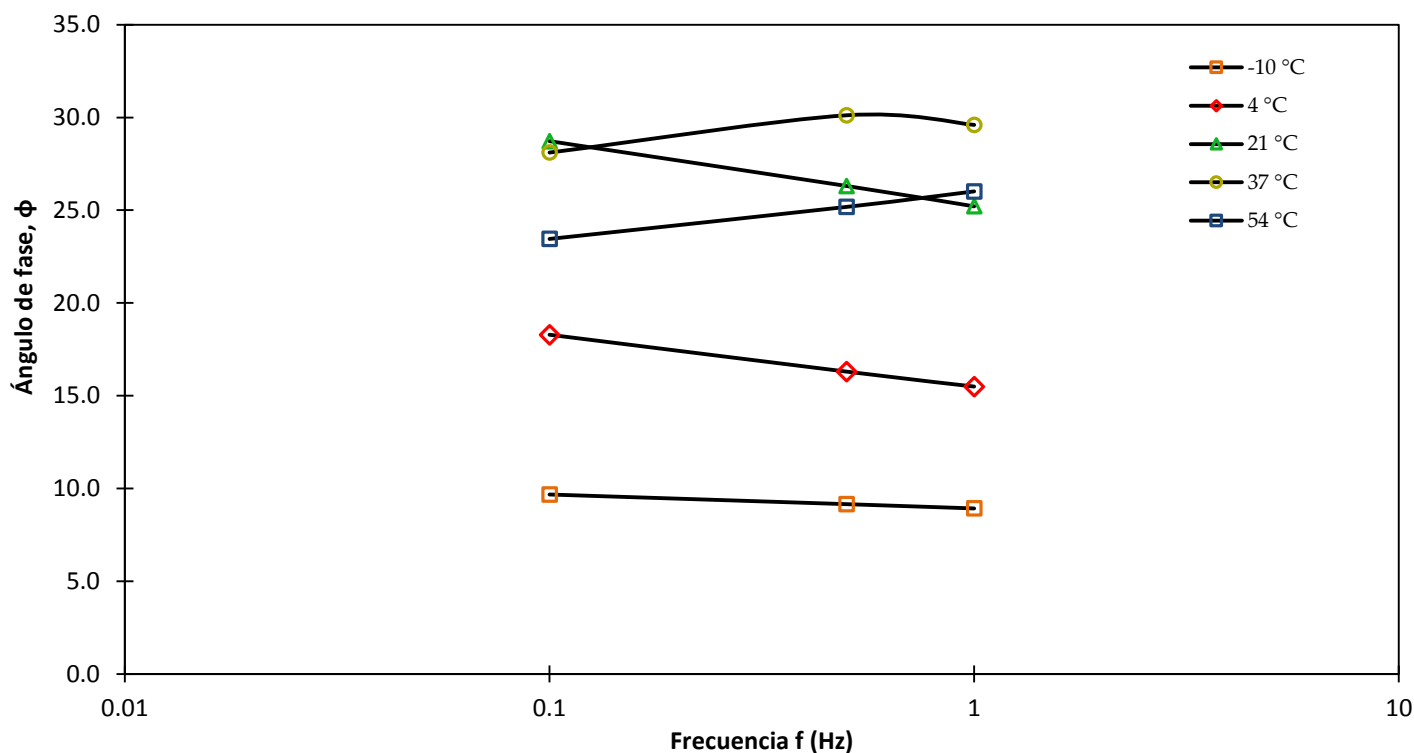


Figura 2.3 Curva isotérmica del ángulo de fase con mezcla modificada.

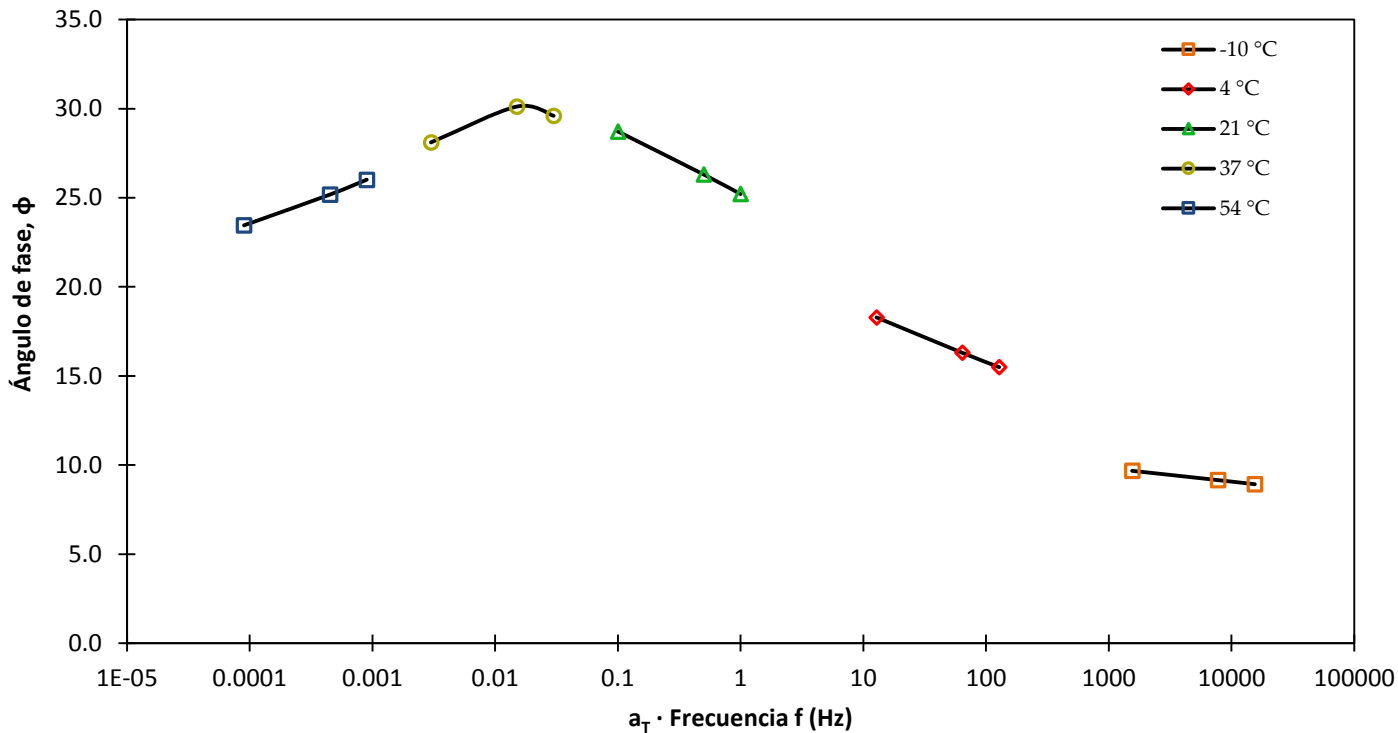


Figura 2.4 Curva maestra del ángulo de fase con mezcla modificada.

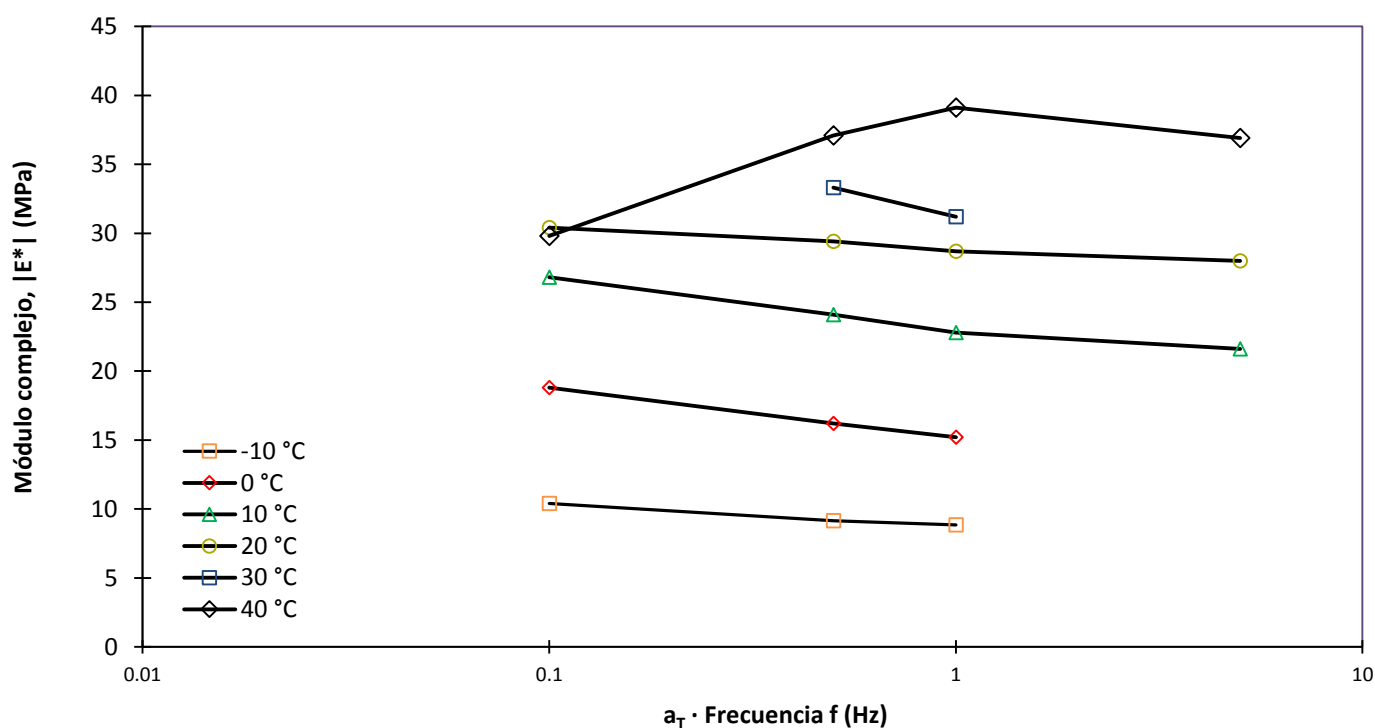


Figura 2.5 Curva isotérmica del ángulo de fase con la mezcla tibia.

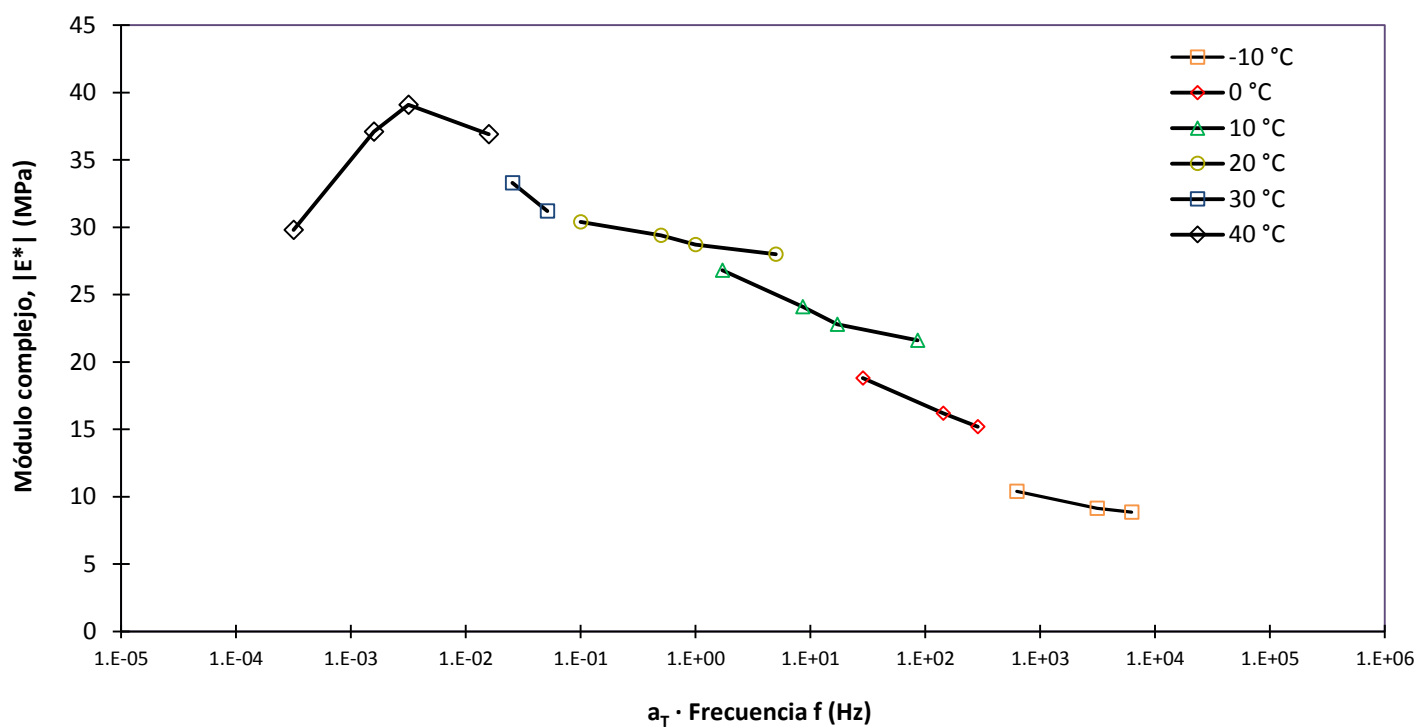


Figura 2.6 Curva maestra del ángulo de fase con la mezcla tibia.

Anexo 3.

Registro de datos de los especímenes ensayados

Tabla 1. Registro de datos del módulo complejo y ángulo de fase de la probeta N de la mezcla de referencia.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	E* (MPa)	ϕ (°)	$\sigma_{[E^*]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[E^*]}$ (MPa)	$\sigma_{[\phi]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[\phi]}$ (MPa)	ϵ_{moy}
-10.0	25	18348	-27.2	3416	19%	4.7	-17%	37.5
-10.0	10	17344	14.2	4229	24%	1.7	12%	30.2
-10.0	5	16641	10.5	4471	27%	0.7	6%	30.9
-10.0	1	14836	8.5	4173	28%	0.2	2%	30.5
-10.0	0.5	14034	8.7	3910	28%	0.2	2%	32.2
-10.0	0.1	12246	10.2	3865	32%	0.2	2%	29.9
4.1	25	13758	-31.5	718	5%	5.8	-18%	38.8
4.2	10	11454	20.4	2060	18%	2.3	11%	36.2
4.1	5	11112	17.6	1990	18%	1.2	7%	36.5
3.9	1	8756	16.9	1949	22%	2.0	12%	38.5
3.9	0.5	7885	18.5	1969	25%	2.1	11%	34.7
4.1	0.1	5860	21.2	1403	24%	2.4	11%	41.4
21.0	25	6772	-42.3	413	6%	5.6	-13%	37.8
21.0	10	5405	31.8	266	5%	4.4	14%	40.8
21.0	5	4594	29.0	303	7%	3.6	12%	43.3
20.9	1	2936	29.9	124	4%	4.1	14%	58.2
20.8	0.5	2411	30.9	124	5%	4.2	14%	49.9
20.7	0.1	1558	30.7	116	7%	4.4	14%	64.6
37.0	25	2593	-49.4	395	15%	1.8	-4%	38.0
37.0	10	1901	37.8	415	22%	3.0	8%	38.7
37.0	5	1527	33.7	366	24%	2.8	8%	39.3
37.1	1	939	29.1	208	22%	3.3	11%	64.8
37.1	0.5	761	28.0	187	25%	3.6	13%	63.1
37.4	0.1	522	24.2	142	27%	4.2	17%	79.1
54.0	25	817	-51.0	227	28%	2.5	-5%	40.5
54.0	10	641	21.5	223	35%	4.2	20%	48.4
54.0	5	533	29.9	196	37%	4.9	16%	53.7
54.1	1	384	23.7	143	37%	5.9	25%	73.3
54.2	0.5	349	22.0	148	43%	6.6	30%	61.7
54.4	0.1	307	18.2	171	56%	6.4	35%	50.8

Tabla 2. Registro de datos del módulo complejo y ángulo de fase de la probeta 2 de la mezcla de referencia.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	E* (MPa)	ϕ (°)	$\sigma_{[E^*]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[E^*]}$ (MPa)	$\sigma_{[\phi]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[\phi]}$ (MPa)	ϵ_{moy}
-10.0	25	18549	-28.8	3119	17%	3.1	-11%	55.1
-10.0	10	16294	16.4	882	5%	2.9	18%	51.9
-10.0	5	15451	12.5	455	3%	2.9	24%	50.6
-10.0	1	13357	9.7	82	1%	2.2	23%	48.7
-10.0	0.5	12555	9.8	69	1%	1.6	16%	50.0
-10.0	0.1	10837	12.4	48	0%	1.8	15%	52.1
4.1	25	12683	14.7	1325	10%	2.4	17%	47.9
4.2	10	10596	22.6	97	1%	3.9	17%	49.6
4.1	5	9621	19.4	180	2%	3.4	18%	48.7
3.9	1	7342	18.2	263	4%	2.2	12%	43.0
3.9	0.5	6552	20.6	24	0%	2.6	13%	60.8
4.1	0.1	4736	23.5	66	1%	2.8	12%	65.9
21.0	25	6188	-44.3	2098	34%	6.5	-15%	48.8
21.0	10	4502	33.0	757	17%	4.5	14%	53.7
21.0	5	3809	30.3	569	15%	5.0	17%	50.1
20.9	1	2379	30.7	185	8%	4.8	16%	69.6
20.8	0.5	1937	31.3	182	9%	5.4	17%	61.7
20.7	0.1	1231	31.5	78	6%	6.1	19%	80.9
37.0	25	2164	-52.1	660	31%	8.1	-15%	48.7
37.0	10	1599	38.1	289	18%	5.5	14%	49.6
37.0	5	1302	33.9	226	17%	6.0	18%	46.5
37.1	1	812	29.9	88	11%	4.7	16%	73.2
37.1	0.5	671	28.4	83	12%	5.1	18%	69.1
37.4	0.1	465	25.8	55	12%	5.9	23%	78.6
54.0	25	749	-50.7	94	13%	8.7	-17%	59.8
54.0	10	579	35.7	30	5%	6.1	17%	59.4
54.0	5	489	29.5	27	5%	5.5	19%	59.8
54.0	1	363	23.0	23	6%	5.0	22%	72.0
54.0	0.5	325	21.5	27	8%	6.5	30%	60.3
54.0	0.1	275	19.0	37	13%	7.6	40%	60.2

Tabla 3. Registro de datos del módulo complejo y ángulo de fase de la probeta 15 de la mezcla modificada.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	E* (MPa)	ϕ (°)	$\sigma_{[E^*]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[E^*]}$ (MPa)	$\sigma_{[\phi]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[\phi]}$ (MPa)	ϵ_{moy}
-7.5	25	22740	-28.9	5546	24%	3.6	-13%	40.3
-7.5	10	20999	16.9	4325	21%	0.5	3%	40.0
-7.5	5	20259	13.0	4114	20%	0.9	7%	39.2
-7.5	1	18459	10.1	4328	23%	0.3	3%	37.0
-7.5	0.5	17442	10.4	3947	23%	0.6	6%	37.7
-7.5	0.1	15762	10.8	3847	24%	0.8	8%	37.1
4.1	25	15849	-35.5	350	2%	5.5	-15%	39.0
4.0	10	14146	21.4	146	1%	1.7	8%	39.3
4.0	5	13160	18.0	357	3%	2.1	12%	37.7
4.0	1	10841	16.9	350	3%	1.3	8%	37.6
4.1	0.5	9942	18.2	365	4%	1.6	9%	37.4
4.0	0.1	7979	20.0	292	4%	1.4	7%	39.6
21.0	25	9238	-40.1	567	6%	2.0	-5%	38.0
21.0	10	7570	29.3	571	8%	3.4	12%	39.5
21.0	5	6813	25.9	582	9%	2.9	11%	38.5
20.9	1	4819	27.0	312	6%	3.0	11%	48.2
21.1	0.5	4140	28.2	200	5%	2.9	10%	48.0
20.8	0.1	2842	30.7	92	3%	3.4	11%	63.1
36.6	25	4309	-45.7	137	3%	1.8	-4%	39.2
36.6	10	3464	34.5	262	8%	2.7	8%	37.2
36.6	5	3006	31.4	278	9%	2.7	9%	33.1
36.6	1	2029	31.8	163	8%	3.2	10%	32.4
36.6	0.5	1737	32.3	150	9%	3.2	10%	34.2
36.6	0.1	1182	33.6	87	7%	3.0	9%	44.9
54.0	25	1849	-46.9	339	18%	2.2	-5%	38.5
54.0	10	1423	30.5	176	12%	1.9	6%	38.9
54.0	5	1177	29.8	137	12%	2.7	9%	42.3
54.1	1	784	26.4	78	10%	2.0	8%	54.2
54.0	0.5	670	25.6	62	9%	2.3	9%	53.9
54.0	0.1	485	23.9	30	6%	2.4	10%	61.4

Tabla 4. Registro de datos del módulo complejo y ángulo de fase de la probeta 23 de la mezcla modificada.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	E* (MPa)	ϕ (°)	$\sigma_{[E^*]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[E^*]}$ (MPa)	$\sigma_{[\phi]}$ (MPa)	% $\epsilon_{[\phi]}$ (MPa)	ϵ_{moy}
-7.3	25	16157	-14.5	718	4%	2.4	-16%	43.9
-7.4	10	15098	14.2	365	2%	1.8	12%	43.7
-7.5	5	14367	10.4	18	0%	2.0	20%	45.5
-7.5	1	12920	7.7	536	4%	2.6	34%	46.3
-7.5	0.5	12297	7.9	756	6%	2.7	34%	46.7
-7.5	0.1	10963	8.5	1132	10%	1.8	21%	48.7
4.1	25	11884	-28.8	376	3%	4.2	-15%	39.8
4.0	10	10722	18.3	142	1%	3.1	17%	36.1
4.0	5	10018	14.9	218	2%	3.3	22%	33.8
4.0	1	8477	14.0	860	10%	3.3	24%	31.4
4.1	0.5	7839	14.4	1031	13%	3.4	24%	29.8
4.0	0.1	6222	16.6	1051	17%	1.6	10%	34.6
21.0	25	6960	-35.7	723	10%	1.5	-4%	36.8
20.9	10	5876	25.6	402	7%	3.0	12%	36.9
21.1	5	5189	22.6	560	11%	2.8	12%	39.2
20.9	1	3749	23.4	625	17%	2.6	11%	44.7
21.1	0.5	3251	24.5	636	20%	2.2	9%	45.7
21.2	0.1	2310	26.7	569	25%	0.7	3%	56.2
36.3	25	3702	-41.4	301	8%	0.1	0%	36.7
36.3	10	2944	30.8	166	6%	2.0	7%	40.0
36.3	5	2508	27.6	198	8%	2.0	7%	39.8
36.1	1	1668	27.4	236	14%	1.9	7%	47.7
36.1	0.5	1415	27.9	260	18%	1.4	5%	42.5
36.1	0.1	966	28.1	219	23%	0.1	0%	56.2
54.0	25	1723	-45.6	92	5%	1.7	-4%	33.0
54.0	10	1318	33.6	43	3%	0.9	3%	35.6
54.0	5	1107	29.4	9	1%	0.5	2%	35.0
54.1	1	760	25.6	45	6%	0.1	0%	42.9
54.2	0.5	651	24.8	57	9%	0.8	3%	45.3
54.0	0.1	485	23.0	56	12%	2.3	10%	54.6