

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

ESTUDIO DEL EFECTO DE REJUVENECEDORES EN EL
ASFALTO ECUATORIANO

AUTORES:

Márquez Cueva, María Fernanda
Ureta Chalén, Nancy Esthefany

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **María Fernanda Márquez Cueva y Nancy Esthefany Ureta Chalén**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.

Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, **María Fernanda Márquez Cueva y Nancy Esthefany Ureta Chalén**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, **Estudio del efecto de rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2018

LA AUTORA

LA AUTORA

Márquez Cueva, María Fernanda

Ureta Chalén, Nancy Esthefany



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotras, **María Fernanda Márquez Cueva y Nancy Esthefany Ureta Chalén**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Estudio del efecto de rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2018

LA AUTORA

LA AUTORA

Márquez Cueva, María Fernanda

Ureta Chalén, Nancy Esthefany

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS - URETA Y MÁRQUEZ.docx (D35654466)
Submitted: 2/15/2018 9:54:00 PM
Submitted By: iifiuc.ucatolica@cu.ucsg.edu.ec
Significance: 1 %

Sources included in the report:

TESIS VIASPGuerreroVPazmiño.docx (D25683061)
completa - Copyact.docx (D14607362)

Instances where selected sources appear:

2

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi mayor fuente de amor y esperanza, sin Él nada sería posible en mi vida.

Mi mayor gratitud para mi hermano y su esposa, Manuel y Mireya, por la ayuda incondicional que me han otorgado para cumplir esta importante meta en mi vida. A mis hermanos, Pablo y Jairo, por ser parte de mi inspiración y mi felicidad.

A mi tutor de tesis, PhD. Ing. Rolando Vila, por darme la oportunidad de realizar este importante proyecto bajo su supervisión, por dedicar su tiempo y conocimiento para la culminación de esta investigación.

Al Ing. José Jaramillo, por toda la ayuda brindada durante el desarrollo de este trabajo.

A mi compañera de tesis, por su amistad y por la perseverancia puesta durante todo el proceso de titulación.

María Fernanda Márquez Cueva

AGRADECIMIENTO

Agradezco inmensamente a Dios por estar siempre presente en mis oraciones guiándome en cada decisión y oportunidad que surgen en el camino de mi vida.

A mi familia, siendo un ejemplo de superación y motivación para alcanzar grandes sueños, principalmente a mi mamá y mi tía Nelly que me empujaron y apoyaron incondicionalmente durante toda mi carrera profesional.

A mi tutor, PhD. Ing. Rolando Vila, por ser un guía incondicional, especialmente por la oportunidad y confianza que me dieron para realizar este trabajo. Además, a Pepe Jaramillo por su dedicación, apoyo y tiempo sacrificado a lo largo de la elaboración de esta investigación.

A mi compañera Mafer Márquez, por su actitud positiva, esfuerzo, entusiasmo, y más allá del trabajo en equipo, por una amistad sincera. Y expresar mis sinceros agradecimientos a todas las personas que han formado parte de mi vida y que han hecho posible este logro que hoy puedo compartir.

Nancy Esthefany Ureta Chalén

DEDICATORIA

A mi madre Melania Cueva, por su amor y confianza incondicional, este logro es para ella.

.

María Fernanda Márquez Cueva

DEDICATORIA

A mi mamá y a mi hermana gemela Evelyn por ser parte de mi motivación e inspiración en el camino de mi vida.

Nancy Esthefany Ureta Chalén



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.
TUTOR**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.
DIRECTORA DE CARRERA**

**Ing. Daniel de la Pared, Msc.
OPONENTE**

**Ing. Federico Von Buchwald de Janon, Msc.
COORDINADOR DE ÁREA**

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2. Razones que motivaron el estudio	2
1.3. Justificación del tema	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Alcance.....	3
1.6. Metodología.....	4
CAPÍTULO II.....	6
2. ENSAYOS A CEMENTOS ASFÁLTICOS.....	6
2.1. Cemento asfáltico.....	6
2.1.1. Definición	6
2.1.2. Propiedades químicas.....	6
2.1.3 Propiedades físicas	9
2.2. Aditivos rejuvenecedores	10
2.2.1. Generalidades.....	10
2.2.2. Proceso de mezcla utilizado	11
2.3. Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad.....	13
2.3.1. Ensayo de Viscosidad	14
2.3.2. Ensayo de Penetración	15
2.3.3. Punto de ablandamiento	15
2.3.4. Gravedad específica	16
2.3.5. Punto de inflamación.....	17
2.3.6. Envejecimiento en horno de película delgada.....	18
2.3.7. Ductilidad	19
2.4. Resultados de la clasificación por grado de viscosidad.....	19
2.5. Clasificación por grado de desempeño según tecnología Superpave...	21
2.5.1 Cámara de envejecimiento a presión (PAV)	23
2.5.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)	24
2.5.3 Reómetro de viga a flexión (BBR).....	26
2.6 Resultados de la clasificación por grado de desempeño Superpave	27
CAPÍTULO III.....	31
3. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADA	31
3.1. Curvas Maestras	31
3.1.1. Condiciones de ensayos	31
3.1.2. Configuración de las curvas maestras	32
3.1.3. Curvas Maestras obtenidas en el presente trabajo.....	36
3.2. Diagrama de Black	40
3.2.1. Configuración del Diagrama de Black	40
3.2.2. Análisis ante las Deformaciones Plásticas	40

3.2.3. Análisis ante el Agrietamiento por Fatiga	43
CAPÍTULO IV.....	45
4. PARÁMETROS ADICIONALES.....	45
4.1. Parámetro ΔT_c	45
4.1.1. Resultados del parámetro ΔT_c	46
4.2. Criterio de Kandhal.....	47
4.2.1. Resultados del criterio de Kandhal.....	48
4.3. Criterio de Glover - Rowe	49
4.3.1. Resultados del criterio de Glover - Rowe	50
CAPÍTULO V.....	52
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Recomendaciones.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema coloidal de Pfeiffer	7
Figura 2. Fraccionamiento de SARA.....	8
Figura 3. Control de la temperatura del asfalto base y del rejuvenecedor A	12
Figura 4. Colocación del rejuvenecedor A al asfalto base	12
Figura 5. Mezcla del asfalto base junto con el rejuvenecedor	13
Figura 6. Ensayo de Viscosidad.....	14
Figura 7. Ensayo de Penetración.....	15
Figura 8. Ensayo de Punto de Ablandamiento.....	16
Figura 9. Ensayo de Gravedad Específica.....	17
Figura 10. Ensayo de Punto de Inflamación	17
Figura 11. Ensayo de Envejecimiento en horno de película delgada.....	18
Figura 12. Ensayo de Ductilidad	19
Figura 13. Cámara de envejecimiento a presión.....	24
Figura 14. Reómetro de corte dinámico.....	25
Figura 15. Reómetro de viga a flexión	27
Figura 16. Representación gráfica de una curva maestra (original).....	32
Figura 17. Curva log G^* vs log frecuencia del Asfalto base	33
Figura 18. Curva Maestra del Asfalto Base	34
Figura 19. Curva Maestra del Asfalto Base	35
Figura 20. Curva Log $s(t)$ vs Log tiempo reducido	36
Figura 21. Curva Maestra en estado original	37
Figura 22. Curva Maestra con envejecimiento primario (RTFOT).....	37
Figura 23. Curva Maestra con envejecimiento secundario (PAV).....	38
Figura 24. Comparación de las curvas maestras.....	38
Figura 25. Diagrama de Black en estado original a 50°C	41
Figura 26. Diagrama de Black después del RTFOT a 50°C	42
Figura 27. Diagrama de Black después del PAV a 20°C	44
Figura 28. Incidencia del parámetro ΔT_c en los asfaltos estudiados	47
Figura 29. Variación de la ductilidad con el envejecimiento.....	48
Figura 30. Incidencia del tiempo en PAV respecto al parámetro Glover-Rowe	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Incidencia del % de rejuvenecedor, luego de prueba RTFOT.....	11
Tabla 2. Clasificación por viscosidad a 60°C. Especificación ASTM para cementos asfálticos.	13
Tabla 3. Resultados de los ensayos de la clasificación por viscosidad	20
Tabla 4. Clasificación por grado de desempeño. Especificación AASHTO.	22
Tabla 5. Clasificación por grado de desempeño. Especificación AASHTO .	23
Tabla 6. Clasificación por grado de desempeño PG.....	28
Tabla 7. Rangos de temperaturas en el pavimento de acuerdo con la tecnología Superpave	29
Tabla 8. Rangos de temperaturas de los asfaltos estudiados de acuerdo con la tecnología Superpave	29
Tabla 9. Resultados del programa Bohlin Software Integrated.....	32
Tabla 10. Hoja de cálculo para la construcción de curvas maestras	33
Tabla 11. Configuración del Diagrama de Black en estado Original a 50°C	41
Tabla 12. Configuración del Diagrama de Black después del RTFOT a 50°C	42
Tabla 13. Configuración del Diagrama de Black después del PAV a 20°C..	44
Tabla 14. Resultados del parámetro ΔT_c de los asfaltos estudiados.....	46
Tabla 15. Resultados de las pruebas de ductilidad de los asfaltos estudiados	48
Tabla 16. Resultados del parámetro de Glover – Rowe	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR	58
Anexo 2. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR..	64
Anexo 3. Curvas Maestras del programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR.....	75

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se busca evaluar la implementación de dos aditivos rejuvenecedores aplicados directamente sobre un asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas, denominados como Rejuvenecedor A y Rejuvenecedor B, para analizar los posibles cambios de las propiedades del cemento asfáltico. Así mismo, se realiza la caracterización reológica a los tres ligantes asfálticos por medio de pruebas avanzadas utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR) y un reómetro de viga en flexión (BBR), en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y envejecimiento secundario (PAV). Para cada uno de los asfaltos estudiados se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio que permitieron realizar la clasificación por grado de viscosidad (AC), la clasificación por grado de desempeño (PG), según la metodología Superpave de acuerdo a las normas correspondientes y nuevos parámetros adicionales que proporcionen información del posible desempeño de los ligantes asfálticos en las carreteras durante su vida útil.

Palabras Claves: *Rejuvenecedores, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos, envejecimiento, curvas maestras, diagrama de Black, ΔT_c , Kandhal, Glover-Rowe.*

ABSTRACT

In the present research work we seek to evaluate the implementation of two rejuvenating additives applied directly on base asphalt from the Esmeraldas Refinery, called Rejuvenator A and Rejuvenator B, to analyze possible changes in the properties of asphalt cement. Likewise, the rheological characterization of the three asphalt binders is carried out by means of advanced tests using a dynamic cut-off rheometer (DSR) and a beam bending rheometer (BBR), in its original state, with primary aging (RTFOT) and aging secondary (PAV). For each of the asphalts studied, a series of laboratory tests were carried out that allowed classification by viscosity grade (CA), classification by performance grade (PG), according to the Superpave methodology according to the corresponding standards and new additional parameters that provide information on the possible performance of asphalt binders on roads during their useful life.

Keywords: *Rejuvenating, viscosity, Superpave, asphalt binders, aging, master curves, Black diagram, ΔT_c , Kandhal, Glover-Rowe.*

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los deterioros en la capa asfáltica de un pavimento asfáltico se manifiestan como respuesta a los diferentes agentes externos los cuales pueden ser la magnitud y tiempo de carga o la variación de la temperatura, sin dejar de lado la calidad tanto del agregado mineral como del cemento asfáltico. Por lo que sistemas que tomen en cuenta estos parámetros en el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas tendrían ciertas ventajas sobre los demás sistemas empíricos.

Recién en los últimos años la tecnología Superpave ha venido ganando campo y experiencias en el Ecuador, a pesar de que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) desde el 2002 aceptaba su empleo. Tal vez, el interés que ha venido surgiendo por la metodología Superpave se deba al desarrollo en los conocimientos del empleo de dicha tecnología con el material asfáltico del país desarrollado en las diferentes investigaciones que lleva a cabo el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.2. Razones que motivaron el estudio

En la actualidad, los controles de calidad que se realizan al cemento asfáltico procedente de la Refinería de Esmeraldas indican que presentan problemas con un excesivo endurecimiento al incumplir con cierta frecuencia las especificaciones de la clasificación por viscosidad después del RTFOT, en especial la ductilidad, mostrando características de un asfalto rígido, quebradizo, con poca durabilidad y propenso a presentar agrietamientos. Por esta razón, se busca implementar aditivos rejuvenecedores que permitan analizar los posibles cambios de las propiedades del cemento asfáltico frente a los problemas antes mencionados.

1.3. Justificación del tema

El desarrollo de nuevas investigaciones que permitan analizar y entender de mejor manera el comportamiento del cemento asfáltico del país, es de gran importancia ya que ayudaría en la aportación de información para la mejora de la calidad de nuestro cemento asfáltico y por ende a la durabilidad de los pavimentos asfálticos. Por tal motivo, se busca utilizar la tecnología Superpave y nuevos parámetros que se están desarrollando a nivel mundial para dicho control de calidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto del empleo de productos rejuvenecedores para la mejora del comportamiento ante el envejecimiento del cemento asfáltico producido en la Refinería de Esmeraldas, empleando pruebas convencionales y Superpave.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar los procedimientos experimentales a aplicar en las diferentes pruebas a realizar.
- Preparar las diferentes muestras a caracterizar, contrastando un asfalto representativo con dos muestras modificadas con diferentes aditivos rejuvenecedores.
- Realizar todas las pruebas de acuerdo con los procedimientos vigentes.
- Analizar y comparar los resultados para hacer las recomendaciones pertinentes.

1.5. Alcance

Se estudiará el asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas con dos asfaltos modificados con aditivos rejuvenecedores. Se realizará una caracterización reológica utilizando un reómetro de corte dinámico y un

reómetro de viga en flexión, para los betunes en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y envejecimiento secundario (PAV), determinando para cada uno la clasificación por grado de desempeño, curvas maestras y diagramas de Black. Además, pruebas de ductilidad en condiciones particulares. La información obtenida permitirá realizar comparaciones y hacer recomendaciones sobre las mejores alternativas a utilizar en el país.

1.6. Metodología

El presente trabajo de investigación responde a un método experimental, mediante la evaluación de un asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas, al mezclarse con dos tipos de aditivos rejuvenecedores, mediante ensayos de clasificación por viscosidad y Superpave. Además de la configuración de curvas maestras, diagramas de Black, pruebas de ductilidad en condiciones particulares y parámetros adicionales.

La investigación se basará en 3 etapas:

- 1) Marco teórico
- 2) Desarrollo experimental
- 3) Análisis de resultados

Cada una de ellas, se desarrollarán de la siguiente manera:

1) Marco teórico:

- Estudio bibliográfico.
- Explicación de cada ensayo y procedimiento.

2) Desarrollo experimental:

- Realización de los ensayos al asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas.
- Mezclado de dos tipos de rejuvenecedores en el asfalto procedente de la Refinería de Esmeraldas, en la cuantía necesaria para solucionar los problemas de envejecimiento prematuro del asfalto.

- Ejecución de ensayos al asfalto mezclado con los aditivos rejuvenecedores.
- Desarrollo de estudios avanzados con Curvas Maestras, diagrama de Black, además de parámetros adicionales como Glover Rowe, parámetro ΔT_c y pruebas de ductilidad en condiciones particulares.

3) Análisis de resultados.

- Relación y comparación de los resultados obtenidos de los ensayos.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

CAPÍTULO II

2. ENSAYOS A CEMENTOS ASFÁLTICOS

2.1. Cemento asfáltico

2.1.1. Definición

El cemento asfáltico es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados. Posee componentes viscosos y tiene la capacidad de adherirse a las partículas de los agregados minerales en las mezclas asfálticas. Además, es un material que actúa como impermeabilizante protegiéndolo de los ácidos, sales y álcalis. A temperatura ambiente el asfalto conserva una consistencia semisólida, pero al incrementar la temperatura tiende a cambiar a un estado líquido.

En general los asfaltos provienen de fuentes naturales o del proceso de refinación del petróleo crudo, derivado especialmente de la destilación fraccionada del petróleo, después de ser bombeado, transportado y almacenado en grandes tanques y sometido a elevadas temperaturas expulsando los elementos más volátiles y siendo el residuo o fondos de vacío utilizados como cemento asfáltico.

Siendo uno de los materiales más antiguos que el hombre ha usado, actualmente se aprovecha para la construcción o rehabilitación para pavimentos asfálticos de carreteras, estacionamientos, pistas de aeropuertos, etc. Teniendo la capacidad de resistir agentes químicos, atmosféricos y de grandes esfuerzos bajo la acción de cargas permanentes.

2.1.2. Propiedades químicas

La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en el pavimento es todavía un tema que tiene ciertas incertidumbres. De todas maneras, una breve descripción de la química del asfalto ayudará al entendimiento de la naturaleza del material.

Químicamente, el crudo del petróleo juega un papel importante en la composición ya que éste determinará las propiedades reológicas y físicas del asfalto. La mayor parte de los compuestos orgánicos que constituye el petróleo son eliminados durante la destilación, conservando una amplia variedad de moléculas complejas como carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y elementos pesados.

Según esquema coloidal de Pfeiffer, la estructura molecular del asfalto se divide en dos fases: los asfaltenos y los maltenos que a su vez se componen de resinas y aceites. Las moléculas más pesadas se encuentran en suspensión formando micelas (fase dispersa) mientras las moléculas más ligeras actúan como medio de dispersión a través del líquido intermicelar (fase continua). Ver Figura 1

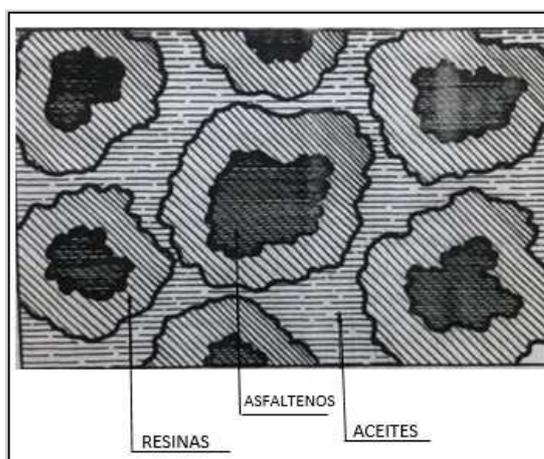


Figura 1. Esquema coloidal de Pfeiffer

Fuente: Tecnología del cemento asfáltico (Arenas, 2006)

Como se ha mencionado anteriormente, la composición química de los cementos asfálticos es muy compleja ya que está conformado por hidrocarburos de peso molecular variable. Investigadores han evaluado el asfalto utilizando técnicas analíticas como SARA, mediante la cual fue posible determinar los grupos de hidrocarburos típicos tales como saturados(S), aromáticos(A), resinas(R) y asfaltenos(A) (Arenas, 2006). El fraccionamiento SARA se basa en la separación del asfalto en asfaltenos y maltenos mediante la digestión en n-heptano y posterior el fraccionamiento de maltenos en saturados, aromáticos y resinas mediante la cromatografía en columna. Ver Figura 2.

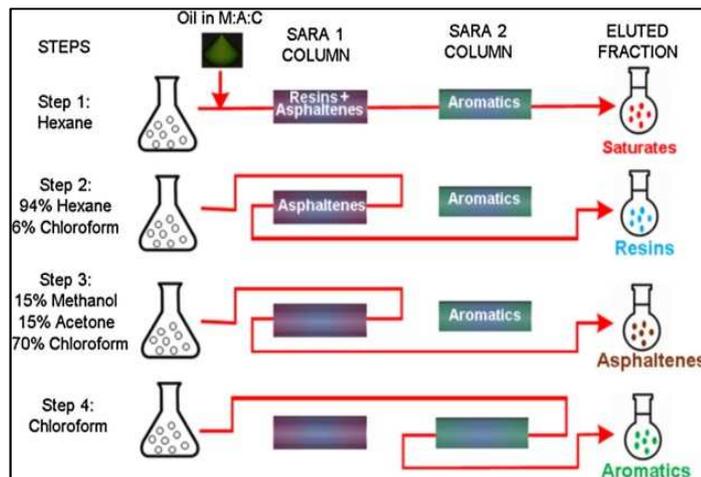


Figura 2. Fraccionamiento de SARA

Fuente: Enhanced separation and quantification of saturates, aromatics, resins and asphaltenes (SARA)

Los asfaltenos contienen partículas sólidas de alto peso molecular que aportan en la dureza y estabilidad. Así mismo, proveen elasticidad, adhesión y resistencia a los asfaltos. Por otro lado, los maltenos contienen partículas de bajo peso molecular, donde las resinas son las responsables de las propiedades cementantes y aglutinantes y proveen ductilidad (viscoelasticidad); los aceites proporcionan la consistencia para hacerlos manejables aumentando la fluidez (plasticidad); y los aromáticos contienen alta capacidad para disolver otros compuestos.

Según la proporción que interviene en su consistencia química regirá las propiedades físicas del asfalto. Con grandes cantidades de aceites, el asfalto actuará como un líquido viscoso, cuando el asfalto está en presencia de altas temperaturas en la planta, se reduce los aceites provocando la unión entre los núcleos de asfaltenos, donde la fricción entre ellos origina el aumento de su viscosidad. Así mismo, durante el proceso de oxidación los aceites protegen al asfalto por su alta estabilidad química, donde grandes contenidos de aceites harán del cemento asfáltico más durable y resistente al envejecimiento. (León & Arenas, 2003).

2.1.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del asfalto tienen una mayor preponderancia a la hora de correlacionarlas con el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, entre las más importante se tiene:

- Buen comportamiento reológico: Depende de la variación de su consistencia cuando es sometido a un cambio de temperatura y al tiempo de aplicación de carga. Para caracterizar este comportamiento, se realizan ensayos de viscosidad y ensayos empíricos de consistencia (penetración, punto de ablandamiento, ductilidad). Por medio de la viscosidad, se puede señalar que a mayor temperatura el asfalto se torna un componente líquido y blando. Por otro lado, a menor temperatura se vuelve un material más denso y viscoso.
- Resistencia al envejecimiento: Los cementos asfálticos están propensos a endurecerse a lo largo de su vida útil. Esta reacción es provocada por la presencia de oxígeno y a las altas temperaturas durante el proceso de mezclado. El proceso de envejecimiento va acompañado por un incremento de la fracción de los asfaltenos. Esto implica que el envejecimiento está asociado a un proceso de oxidación que provoca el aumento en la polaridad de la mezcla y una disminución en la fracción de aromáticos ocasionada por el rompimiento de los anillos durante la oxidación. La disminución de los compuestos aromáticos y de resinas puede ser responsable del endurecimiento observado en los asfaltos (Reyes, Daza, & Rondón, 2012).

El endurecimiento físico o envejecimiento oxidativo fueron considerados como factores de durabilidad que causan cambios en las propiedades de las carpetas asfálticas y por ende afectan su desempeño en el pavimento (Huang & Zeng, 2007).

- Adhesividad a los áridos: Es la propiedad del cemento asfáltico que permite unirse o adherirse a las partículas de los agregados en la elaboración de las mezclas asfálticas. Es importante que exista un buen contacto entre la superficie del árido y el betún, de esta forma se elimina el agua de la superficie y se reduce la viscosidad del ligante para que moje perfectamente los áridos. La adhesividad no solo depende del ligante asfáltico sino de las condiciones o tipos de áridos a utilizar como limpieza y contenido de humedad, temperatura del mezclado, textura, etc.

2.2. Aditivos rejuvenecedores

2.2.1. Generalidades

Los rejuvenecedores son aditivos que se encargan de proporcionar al asfalto envejecido los componentes perdidos de tal forma que recupera sus propiedades originales, además de crear un reacomodo en el asfalto disminuyendo la permeabilidad al agua y al aire. (Sanabria, Correa, Hernandez, & Morales, 2000)

Como se ha mencionado la oxidación es un fenómeno que se produce en un betún asfáltico que puede generar en la superficie del pavimento microfisuras donde inciden los efectos del clima, temperatura, entre otros. En este fenómeno se produce un exceso de asfaltenos, carbenos, y carboides que conllevan a una pérdida de las propiedades iniciales de un asfalto, y por lo tanto afecta directamente a la durabilidad del mismo. La función de los aditivos rejuvenecedores radica en proporcionar los componentes perdidos al betún envejecido, además de peptizar y redispersar los asfaltenos que se encuentren en exceso, y de esta manera poder garantizar una mayor durabilidad del mismo.

Hoy en día los rejuvenecedores se utilizan comúnmente en el reciclaje de mezclas asfálticas, en el cual se busca restaurar su consistencia y sus propiedades reológicas, y poder incluso mejorar las propiedades como ligante en condiciones que se asemejen a las iniciales. Además, se puede

establecer un posible control del grado de desempeño del asfalto, en base a los porcentajes del rejuvenecedor a usar y a la cantidad de RAP.

2.2.2. Proceso de mezcla utilizado

Para la investigación descrita en este trabajo, se utilizaron dos tipos de rejuvenecedores, los cuales fueron aplicados directamente sobre el asfalto base.

Determinación del porcentaje de rejuvenecedor a emplear:

Como fase inicial se necesita determinar el porcentaje de rejuvenecedor a emplear. Por ello para cada rejuvenecedor se prepararon mezclas con 2,5% y 5% en peso respecto al asfalto base, y en todos los casos se aplicaron procesos de envejecimiento según prueba RTFOT y se hicieron pruebas de viscosidad y ductilidad al residuo, para ver si cumplen las exigencias de la clasificación por viscosidad, que son los más problemáticos en el asfalto del Ecuador. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Incidencia del % de rejuvenecedor, luego de prueba RTFOT

Asfalto	%	Viscosidad dinámica a 60°C, Pa.s	Ductilidad, cm (25°C, 5 cm/min)
REJUVENECEDOR A	0%	1504	25,0
	2,5%	1020	44,3
	5%	653	64,0
REJUVENECEDOR B	0%	1504	25,0
	2,5%	1090	40,0
	5%	848	55,0
Exigencia AC - 20		≤ 1000Pa.s	≥ 50cm

Fuente: Autores

En base a estos resultados se seleccionó el porcentaje de rejuvenecedor del 5%.

Procedimiento de mezclado:

1. Seleccionar la cantidad de asfalto a utilizar y en base a esta calcular el peso del rejuvenecedor a añadir, según el porcentaje determinado

previamente. En general 1500gr de asfalto con rejuvenecedor es suficiente.

2. Calentar las cantidades del asfalto y del rejuvenecedor calculado, a una temperatura entre 145°C a 150°C. Ver Figura 2.



Figura 3. Control de la temperatura del asfalto base y del rejuvenecedor

A

Fuente: Autores

3. Añadir la cantidad respectiva de rejuvenecedor al asfalto base, controlando la temperatura en 150°C. Ver Figura 4.



Figura 4. Colocación del rejuvenecedor A al asfalto base

Fuente: Autores

4. Mezclar el asfalto con el rejuvenecedor por un período de 15 minutos, manteniendo la temperatura antes establecida. Ver Figura 5.

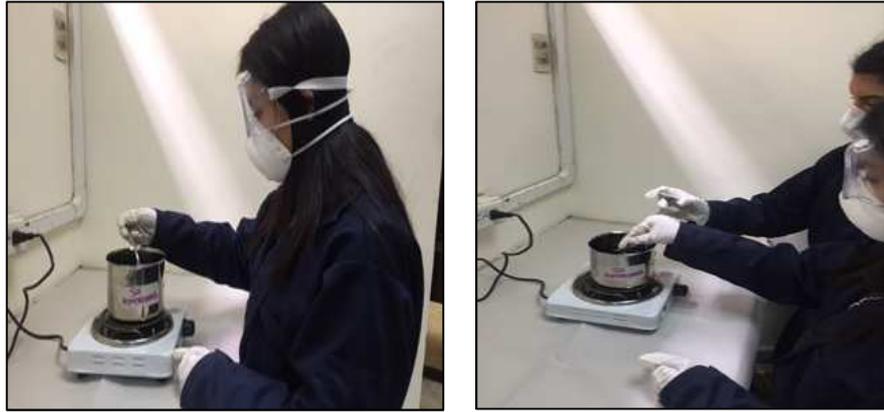


Figura 5. Mezcla del asfalto base junto con el rejuvenecedor
Fuente: Autores

2.3. Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad

Una de las formas más comunes de caracterizar el cemento asfáltico en el Ecuador es por medio del grado de viscosidad, que consiste en determinar la viscosidad absoluta a 60°C, la que define el grado AC correspondiente y luego verificar mediante una serie de pruebas indicadas en la normativa ASTM D3381/D3381M, 2012 (como se muestra en la Tabla 2) el cumplimiento de las propiedades restantes.

Tabla 2. Clasificación por viscosidad a 60°C. Especificación ASTM para cementos asfálticos.

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	220	140	80	60	50	40
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^A	100	75	50	40	25

^A If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

Fuente: Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction¹, 2012

2.3.1. Ensayo de Viscosidad

Dicho ensayo determina inicialmente la consistencia del cemento asfáltico a 60°C (140°F) según la normativa ASTM D2171, cuya temperatura es la estimada como la más alta que puede llegar a tener una calzada de pavimento asfáltico en los días más calientes.

Mientras que el ensayo a 135°C (275°F) cumple con las especificaciones de la ASTM D2170 y es utilizado para la medición de la viscosidad de los asfaltos a elevadas temperaturas para asegurar que los ligantes tengan la suficiente fluidez y sean manejable durante el bombeo, transporte y manipulación en las refinerías hacia las plantas asfálticas.

Debido a que el laboratorio de la UCSG cuenta con un viscosímetro Brookfield (Ver Figura 6), el que puede medir la viscosidad de los cementos asfáltico con una mayor rapidez y facilidad, se procedió a utilizar este equipo siguiendo la norma ASTM D-4402. Dicho ensayo consiste en colocar aproximadamente 10 ± 0.5 gramos de asfalto en una capsula cilíndrica para posteriormente introducirlo en una cámara de temperatura controlada. El funcionamiento del viscosímetro Brookfield se basa en el principio del viscosímetro rotacional; mide la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un spindle inmerso en la muestra de fluido a estudiar.



Figura 6. Ensayo de Viscosidad
Fuente: Autores

2.3.2. Ensayo de Penetración

Se fundamenta en la profundidad que penetra una aguja en una muestra de asfalto bajo las condiciones de carga, tiempo y temperatura especificadas.

Dicha prueba se rige en la norma ASTM D-5 y consiste en que una vez colocado el asfalto caliente en un recipiente normalizado, se deja enfriar a temperatura ambiente y es llevado mediante un Baño de María a una temperatura de 25 °C. Posteriormente se procede a penetrar verticalmente la aguja a la muestra de asfalto con una carga de 100 gramos durante 5 segundos donde se determina la distancia en unidades de decimas de milímetros (0.1 mm). El resultado es el promedio de 3 lecturas tomadas de la muestra que reflejará la dureza o consistencia del asfalto. Ver Figura 7.



Figura 7. Ensayo de Penetración

Fuente: Autores

2.3.3. Punto de ablandamiento

Nos permite determinar la temperatura en la que el cemento asfáltico logra un estado de fluidez por medio del método de “anillo y bola” basado en la norma ASTM D-36. El ensayo consiste en llenar un anillo de latón con asfalto en estado líquido, luego se deja enfriar para enrasar y sumergirlo en agua junto con una bola esférica de 9,51 mm de diámetro. Debido a que la temperatura de agua va aumentando constantemente, la muestra de asfalto se ablanda ocasionando que la bola llegue al fondo envuelta de asfalto y en

donde la temperatura en ese instante determina el punto de ablandamiento. Ver Figura 8.



Figura 8. Ensayo de Punto de Ablandamiento
Fuente: Autores

2.3.4. Gravedad específica

Se define como gravedad específica a la correlación que existe entre los pesos de volúmenes semejantes de cemento asfáltico y de agua, dados a una misma temperatura. Para su determinación, se realiza un ensayo según la norma ASTM D70-03 utilizando un picnómetro debidamente calibrado, el cual se pesa en conjunto con la muestra. Como queda dispuesto un sobrante de su volumen, este es completado con agua. Finalmente se acomoda en un baño a una temperatura de 25°C y se procede a determinar su masa. Ver Figura 9.

Los resultados que se obtienen al ejecutar este procedimiento se consideran útiles para hacer rectificaciones en medidas de volumen cuando las temperaturas, tanto la de ensayo como la de ejecución, no son las mismas. Además, se utiliza para la determinación de los parámetros volumétricos de mezclas asfálticas.



Figura 9. Ensayo de Gravedad Específica
Fuente: Autores

2.3.5. Punto de inflamación

Este ensayo permite conocer la temperatura máxima a la cual se puede someter el asfalto sin que se inicie una combustión. Es realizado mediante la copa abierta de Cleveland y su procedimiento consiste en llenar la copa con la muestra de asfalto hasta un nivel delimitado, después se aplica un incremento rápido de temperatura inicial. A intervalos de tiempo se pasa una pequeña llama sobre su superficie hasta que ocurre una inflamación instantánea de los vapores altamente inflamables, generados por el asfalto a elevadas temperaturas. La determinación de dicha temperatura es importante, ya que sobre ésta existe el riesgo de incendio cuando se realiza el calentamiento del betún según la norma ASTM D92. Ver Figura 10.



Figura 10. Ensayo de Punto de Inflamación
Fuente: Autores

2.3.6. Envejecimiento en horno de película delgada

Debido a que el asfalto sufre un proceso de envejecimiento, el cual sucede principalmente en las diferentes fases de la producción, colocación y vida útil del mismo, se realiza el ensayo rotatorio de película delgada utilizando el RTFOT, según la norma ASTM D-2872, que sirve para reproducir un envejecimiento a corto plazo de una muestra asfáltica y así poder conocer, tras un análisis, las nuevas propiedades que ésta presente.

El ensayo consiste en someter a los efectos del calor y del aire a la muestra, que se encuentra distribuida dentro de recipientes de vidrio en forma de una película delgada, a una temperatura de 163°C durante 85 minutos. El residuo que se obtiene es utilizado para hacer pruebas adicionales como por ejemplo viscosidad, ductilidad, envejecimiento secundario en PAV o pruebas en el equipo DSR. Ver Figura 11.

A través de este método se puede realizar una evaluación de las características que presenta un asfalto durante su proceso de mezclado en caliente a una temperatura aproximada de 150°C, es decir, se puede alcanzar un conocimiento sobre las condiciones que presente el betún, cuando éste es incorporado al pavimento.



Figura 11. Ensayo de Envejecimiento en horno de película delgada

Fuente: Autores

2.3.7. Ductilidad

Se conoce como ductilidad a la capacidad que tiene un material para aceptar grandes deformaciones sin perder su resistencia. Para determinarse en el cemento asfáltico se realiza un ensayo en base a la norma ASTM D-113 en un ductilímetro, que consiste en formar tres moldes de forma y dimensiones estándares para luego ser sometidas a la prueba de tracción dentro de un baño de agua. Se deben establecer las condiciones tanto de temperatura como de velocidad del ensayo, siendo normalmente de 25°C a 5cm por minuto, aunque estas pueden variar. La ductilidad será el promedio de las máximas distancias en centímetros que fueron capaces de alargarse los hilos de las tres muestras del betún hasta el momento de su rotura. Ver Figura 12.

Se considera importante conocer la alta o baja magnitud de ductilidad de una muestra de asfalto, ya que al ser bajo se relaciona con un material frágil al ser sometido a un esfuerzo, en cambio sí es dúctil se considera con mejores propiedades aglomerantes, pero si ésta es demasiado alta, puede presentar problemas de deformación frente a los cambios de temperatura.



Figura 12. Ensayo de Ductilidad
Fuente: Autores

2.4. Resultados de la clasificación por grado de viscosidad

En la Tabla 2 se observa los resultados del cemento asfáltico base procedente de la Refinería de Esmeraldas y de los asfaltos mezclados con

los dos tipos de rejuvenecedores, de acuerdo con las diferentes pruebas establecidas para su clasificación por viscosidad (ASTM D3381/ D3381M, 2012).

Tabla 3. Resultados de los ensayos de la clasificación por viscosidad

CLASIFICACIÓN POR GRADO DE VISCOSIDAD								
Propiedades	Unidad	ASTM D-3381-92				Asfalto de Ecuador Base	Asfalto con Rejuvenecedor A	Asfalto con Rejuvenecedor B
		AC 20		AC 30				
		mín	máx	mín	máx			
LIGANTE ORIGINAL								
Viscosidad dinámica, 60°C	Pa,s	160	240	240	360	245	161	171
Viscosidad cinemática, 135°C	mm ² /s	300	-	350	3000	385	280	280
Penetración, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	60	-	50	-	55	73	77
Grav. específica 25°C/ 25°C	-	-	-	-	-	1,0119	1,0123	1,0114
Punto de inflamación	°C	232	-	232	-	-	290	295
ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT								
Viscosidad dinámica, 60°C	Pa,s	-	1000	-	1500	1504	653	848
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	cm	50	-	40	-	25	64	55
Cambio de masa	% w/w	-	1	-	1	-0,03	-0,165	-0,337

Fuente: Autores

Según los resultados se puede determinar que el asfalto base cumple con un AC-30 en las pruebas correspondientes al estado original, sin embargo, no satisface con las exigencias de viscosidad dinámica a 60°C y ductilidad realizadas al residuo de la prueba RTFOT. Estos resultados indicarían que este asfalto sufrirá un excesivo endurecimiento durante el proceso de mezclado, transporte y tendido de la mezcla.

Dicho asfalto mezclado por separado con los dos tipos de rejuvenecedores permite que la clasificación cambie cumpliendo con la mayoría de las exigencias de un AC-20 para el estado original y después del RTFOT, sin embargo, vale indicar que la única prueba que no cumplió con dichas exigencias es la viscosidad cinemática a 135°C, donde en ambos casos se obtuvo un valor de 280 mm²/s, inferior al mínimo exigido para un AC-20 que es de 300 mm²/s.

Al comparar los resultados de los tres asfaltos estudiados se puede observar que el asfalto base tiene propiedades de un asfalto más duro que los demás y que luego de pasar por el RTFOT sufre un excesivo envejecimiento

provocando su endurecimiento y por tal motivo una pérdida de propiedades como la adhesión y respuesta ante esfuerzo de tracción, a diferencia de los otros dos asfaltos que al ser mezclados con los rejuvenecedores presentan en estado original una consistencia más blanda pero después de exponerse a un proceso de envejecimiento RTFOT, no sufre un endurecimiento tan excesivo como el asfalto base.

2.5. Clasificación por grado de desempeño según tecnología Superpave

Reconociendo las necesidades que existían por entender de mejor manera el comportamiento de los asfaltos y mezclas asfálticas nace el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) que se desarrolló entre los años 1987 y 1993, el cual entre otros, creó un nuevo sistema de clasificación para los ligantes asfálticos llamado Superpave, que permite evaluar las características reológicas asociadas al comportamiento del ligante en condiciones específicas de temperatura durante su vida útil.

Las especificaciones del sistema Superpave permiten analizar el cemento asfáltico en tres etapas importantes a las cuales estarán expuestas, las cuales son:

- Asfalto en estado original: Representa al ligante asfáltico antes de pasar por cualquier proceso de mezclado.
- Asfalto después del RTFOT: Aparenta el endurecimiento durante mezclado, transporte y compactación de la mezcla en obra. (Envejecimiento a corto plazo)
- Asfalto después del PAV: Es el envejecimiento sometido durante un extenso período de tiempo en servicio. (Envejecimiento a largo plazo)

La clasificación por grado de desempeño (PG) permite relacionar la información obtenida en los diferentes ensayos del sistema con el posible comportamiento que tendrá ante los tres mecanismos de fallas más importantes que son: deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. Así mismo, definir las propiedades físicas del

cemento asfáltico que estarán sometidos durante su vida útil bajo las condiciones de temperatura y envejecimiento.

La tecnología Superpave utiliza una serie de equipos avanzados como son: el viscosímetro rotacional (RV), el horno rotativo de película delgada (RTFOT), la cámara de envejecimiento a presión (PAV), el reómetro de corte dinámico (DSR) y el reómetro de viga a flexión (BBR). Estas pruebas permiten determinar el grado de desempeño de acuerdo a las especificaciones AASHTO como se muestran en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Clasificación por grado de desempeño. Especificación AASHTO.

Grado de performance	PG 46			PG 52						PG 58					PG 64																																																
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40																																										
Máx. Temp. de Diseño del Pavimento (promedio de 7 días), °C ^a	< 46			< 52						< 58					< 64																																																
Mín. Temp. de Diseño del Pavimento, °C ^a	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40																																										
Ligante Original																																																															
Punto de inflamación, T48: mín., °C	230																																																														
Viscosidad, ASTM D 4402; ^b	135																																																														
Máx. 3 Pa-s (3000 cP)																																																															
Temp. de Ensayo, °C	135																																																														
Temp. de Ensayo, °C																																																															
Corte Dinámico, TP5: ^c	46			52						58					64																																																
G* / senδ, mín., 1.00 kPa	46			52						58					64																																																
Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	46			52						58					64																																																
Residuo de RIFO (T 240) ó TFO (T 179)																																																															
Pérdida de Masa, máx., %	1.00																																																														
Corte Dinámico, TP5:	46			52						58					64																																																
G* / senδ, mín., 2.20 kPa	46			52						58					64																																																
Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	46			52						58					64																																																
Residuo de PAV (PP1)																																																															
Temperatura del PAV, °C ^d	90			90						100					100																																																
Corte Dinámico, TP5:	10			7			4			25			22			19			16			13			10			7			25			22			19			16			31			28			25			22			19			16					
G* x senδ, máx., 5000 kPa	10			7			4			25			22			19			16			13			10			7			25			22			19			16			31			28			25			22			19			16					
Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	10			7			4			25			22			19			16			13			10			7			25			22			19			16			31			28			25			22			19			16					
Informe																																																															
Endurecimiento Físico ^e	Informe																																																														
Rigidez en Creep, TP1: ^f	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
S, máx., 300 Mpa	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
Valor-m, mín., 0.300	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
Temp. de Ensayo @ 60 seg, °C	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
Tracción Directa, TP3: ^g	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
Def. Especif. de falla, mín., 1.0%	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		
Temp. de Ensayo @ 1.0mm/mm, °C	-24			-30			-36			0			-6			-12			-18			-24			-30			-36			-6			-12			-18			-24			-30			0			-6			-12			-18			-24			-30		

Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos SUPERPAVE

Tabla 5. Clasificación por grado de desempeño. Especificación AASHTO

Grado de Performance	PG 70						PG 76					PG 82				
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Máx. Temp. de Diseño del Pavimento (promedio de 7 días), °C ^a	< 70						< 76					< 82				
Mín. Temp. de Diseño del Pavimento, °C ^a	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
Ligante Original																
Punto de Inflamación, T48: mín., °C	230															
Viscosidad, ASTM D 4402; ^b Máx., 3 Pa-s (3000 cP) Temp. de Ensayo, °C	135															
Corte Dinámico, TP5: ^c G* / senδ, mín., 1.00 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	70						76					82				
Residuo de RTFO (T 240) ó TFO (T 179)																
Pérdida de Masa, Máximo, %	1.00															
Corte Dinámico, TP5: G* / senδ, mín., 2.20 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	70						76					82				
Residuo de PAV (PP1)																
Temperatura del PAV, °C ^d	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Corte Dinámico, TP5: G* x senδ, máx., 5000 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Endurecimiento Físico ^e	Informe															
Rigidez en Creep, TP1: ^f S, máx., 300 Mpa Valor-m, mín., 0.300 Temp. de Ensayo @ 60 seg., °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tacción Directa, TP3 ^g Def. Especif. de falla, mín., 1.0% Temp. de Ensayo @ 1.0mm/mm, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos SUPERPAVE

2.5.1 Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

El envejecimiento del cemento asfáltico producido durante los años de servicios no era considerado en los controles anteriores a la tecnología Superpave. Los investigadores de SHRP desarrollaron el equipo PAV (Ver Figura 13), que permite simular el efecto del envejecimiento durante un periodo aproximado de 7 años de servicio por medio de una cámara a

presión de acero inoxidable con presiones proporcionadas por aire presurizado y bajo temperaturas elevadas.

Para realizar el ensayo, se coloca el asfalto residual de la prueba RTFOT en bandejas de acero inoxidable que son colocados dentro de la cámara de presión durante 20 horas. Luego de pasar por este tiempo se despresuriza lentamente, usualmente se requiere entre 8 a 10 minutos para liberar gradualmente la presión. Si la presión disminuye en menor tiempo, aparecerán excesivas burbujas de aire en la muestra y puede formarse espuma.



Figura 13. Cámara de envejecimiento a presión
Fuente: Autores

2.5.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)

El reómetro de corte evalúa las características elásticas (recuperables) y las viscosas (no recuperables) de los ligantes asfálticos por medio de los componentes de módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ). Estos parámetros dependen principalmente de la frecuencia de carga y la temperatura. El asfalto es considerado un material viscoelástico ya que a elevadas temperaturas se comporta como fluidos viscosos, mientras que a bajas temperaturas se comporta como sólidos elásticos.

El procedimiento de ensayo responde a la normativa AASHTO T 315 la cual consiste en colocar una pequeña muestra de ligante asfáltico entre una placa fija y una oscilante que rota en forma de semicírculo que corresponde

a un ciclo de oscilación. El diámetro de los platillos (placas) dependerá de la temperatura de ensayo y del grado de envejecimiento. Para asfaltos originales y envejecidos en el horno RTFOT se utiliza platillos de 25mm de diámetro con una separación de 1mm, y para asfaltos después del envejecimiento secundario (PAV) se utiliza platillos de 8mm de diámetro con 2mm de separación. Ver Figura 14.

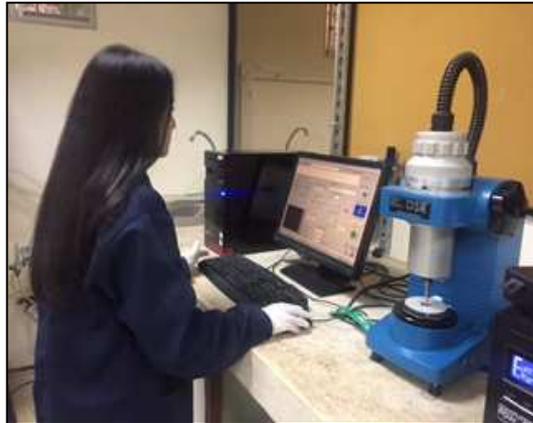


Figura 14. Reómetro de corte dinámico
Fuente: Autores

A continuación, se explica los tipos de fallas que se relacionan con los valores obtenidos en el DSR:

Deformación permanente (Ahuellamiento): Es un fenómeno que sufren los pavimentos asfálticos a elevadas temperaturas de servicio, provocado por el conjunto de pequeñas deformaciones plásticas bajo las cargas cíclicas de los vehículos.

Las especificaciones Superpave (AASHTO M 320, 2010) controla las deformaciones permanentes limitando el valor mínimo de $G^*/\text{sen}\delta$ a 1 kPa en estado original y a 2.2 kPa después del RTFOT.

Para controlar dicha falla, se busca tener un alto valor de módulo complejo y un bajo valor de ángulo de fase. Esto indica que mientras más alto es el módulo complejo, mayor es la rigidez y la resistente a la formación de deformaciones permanentes. Así mismo, a menor ángulo de fase trabaja como un material más elástico ayudando a contrarrestar este problema.

Agrietamiento por Fatiga (piel de cocodrilo): Es una falla causada por la acumulación de fisuras o grietas que se manifiestan en el pavimento asfáltico. Por consiguiente, se ensaya el asfalto envejecido mediante el PAV (envejecimiento a largo plazo) que simula el estado más crítico en condiciones de servicio.

Según las especificaciones de Superpave, se indica $G^* \sin \delta$ como un factor que determina la resistencia ante el agrietamiento por fatiga del cemento asfáltico. Uno de los requerimientos para que esto sea posible, es que el factor $G^* \sin \delta$ debe ser como máximo 5000 kPa en los asfaltos envejecidos después del RTFO y PAV a temperaturas intermedias de servicio. Para lograrlo se necesita un ligante elástica y blando, lo que se alcanza disminuyendo G^* o disminuyendo δ .

2.5.3 Reómetro de viga a flexión (BBR)

Este mide la rigidez del asfalto a bajas temperaturas. Los parámetros que se evalúan con el BBR son la rigidez a la fluencia, que es un indicador de cómo el asfalto resiste a una carga constante y el valor-m, que mide la variación de la rigidez del asfalto al aplicar las cargas. El procedimiento que se debe seguir para realizar este ensayo se basa en la normativa AASHTO T 313.

Inicialmente se debe preparar una viga de asfalto, vaciando el cemento asfáltico precedente del PAV dentro de un molde previamente ensamblado y lubricado con medidas estandarizadas para posteriormente dejarlo enfriar por periodo de 60 ± 5 minutos y luego de este tiempo se enrasa el exceso de asfalto que pudiera existir. Inmediatamente se procede a desmoldar la viga enfriando el molde con la muestra en un congelador durante 5 a 10 minutos. Ver Figura 15.

El BBR usa un eje de punta redonda para aplicar la carga en el centro de la viga simplemente apoyada. El sistema refleja los resultados por medio de un software que controla al equipo y registra los resultados de carga y deflexión.



Figura 15. Reómetro de viga a flexión
Fuente: Autores

2.6 Resultados de la clasificación por grado de desempeño Superpave

A continuación, en la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos para los tres asfaltos estudiados según las especificaciones Superpave. (AASHTO M 320, 2010).

Tabla 6. Clasificación por grado de desempeño PG

PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	ASFALTO BASE	ASFALTO REJUVENECEDOR A	ASFALTO REJUVENECEDOR B	
LIGANTE ORIGINAL							
Punto de Inflamación, °C		AASHTO 48	230 mín	302	290	295	
Viscosidad, Pa*s		AASHTO T 316	3,0 máx	0,385	0,280	0,280	
Mód. De Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	1,0 mín	16	8,04	9,2	
	52°C			7,12	3,4	4,15	
	58°C			3,05	1,48	1,81	
	64°C			1,33	0,657	0,808	
	70°C			0,602	-	-	
DESPUÉS DE RTFOT							
Pérdida de masa, %		AASHTO 48	1 máx	-0,030	-0,165	-0,337	
Mód. De Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	44,4	25,8	29,0	
	52°C			27,2	11,1	13,3	
	58°C			11,9	4,94	6,15	
	64°C			5,38	2,29	2,79	
	70°C			2,43	1,05	1,32	
	76°C			1,17	-	-	
RESIDUO ENVEJECIDO POR PRESIÓN (100°C, 300 psi, 20hr.)							
Mód. De Corte Dinámico (G*.sinδ, 10 rad/seg), kPa	31°C	AASHTO T 315	5000 máx	927	-	-	
	28°C			1340	-	-	
	25°C			1930	1300	1220	
	22°C			2730	1870	1770	
	19°C			3800	2690	2530	
	16°C			5170	3810	3570	
	13°C			-	5320	4960	
	10°C			-	-	6770	
	Rígidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)			AASHTO T 313	300 máx	-	-
Valor m	0,300 mín	-	-		0,2099		
Rígidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	300 máx	318,3065	302,1517		316,5122		
Valor m	0,300 mín	0,2483	0,2774		0,2795		
Rígidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	300 máx	217,5922	187,7108		150,5773		
Valor m	0,300 mín	0,2970	0,3432		0,3166		
Rígidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	300 máx	109,3934	-		-		
Valor m	0,300 mín	0,3355	-		-		
SUPERPAVE GRADO PG		AASHTO M 320			64-22	58-28	58-28

Fuente: Autores

Se aprecia que de acuerdo con la clasificación por grado PG, el cemento asfáltico tomado como base, califica como PG 64-22. Puede notarse que pese a presentar problemas con el excesivo endurecimiento, según las pruebas para la clasificación por viscosidad realizados al residuo (Ver Tabla 3) y relacionado con la pérdida de la adhesión y con los agrietamientos frecuentes de las mezclas en obra, estos no se identifican claramente en la clasificación PG.

En la Tabla 6 se observa que ambos asfaltos mezclados con rejuvenecedores disminuyen el grado alto de temperatura a 58°C y el grado bajo a -28°C. Si bien este último pudiera resultar conveniente para nuestras condiciones de trabajo, lo ideal es que el grado alto hubiese permanecido en 64°C.

Al comparar los rangos de temperaturas máximas y mínimas del pavimento para las tres principales regiones del país (Ver Tabla 7), cuya información se obtuvo de un proyecto de investigación realizado por el laboratorio de carreteras de la UCSG, con los rangos de temperaturas de trabajo para los tres asfaltos estudiados (Ver Tabla 8), se podría considerar que los tres asfaltos satisfacen a la temperatura máxima (58 °C) y mínima (-3 °C) que presentan los pavimentos en el país, lo que indicaría que deberían tener un buen comportamiento en todas las regiones.

Tabla 7. Rangos de temperaturas en el pavimento de acuerdo con la tecnología Superpave

Regiones	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura intermedia (°C)
COSTA	54 a 58	8 a 16	35 a 41
SIERRA	42 a 52	-3 a 8	24 a 34
AMAZONÍA	52 a 57	7 a 15	34 a 40

Fuente: Estudio del Asfalto Ecuatoriano a Temperaturas Intermedias con la Tecnología Superpave, 2017

Tabla 8. Rangos de temperaturas de los asfaltos estudiados de acuerdo con la tecnología Superpave

Asfaltos	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura intermedia (°C)
BASE	64	-22	25
REJUVENECEDOR A	58	-28	19
REJUVENECEDOR B	58	-28	19

Fuente: Autores

Al calcular las temperaturas intermedias de los tres asfaltos, a partir de la semisuma entre la temperatura máxima y la mínima más 4 °C mostradas en la Tabla 8, se obtiene que tanto el asfalto mezclado con el Rejuvenecedor A como con el Rejuvenecedor B tienen una temperatura intermedia de 19°C y finalmente se encuentra el asfalto base con una temperatura de 25°C. La temperatura de 19°C permitiría un mayor rango de temperaturas a las cuales el comportamiento esperado a la fatiga es adecuado.

Si se considera la temperatura que cumple la exigencia $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ kPa, llamada también temperatura crítica a la fatiga, el asfalto PG 64-22 (Asfalto base) satisface esta condición con 16,4 °C, mientras que la temperatura crítica del asfalto PG 58-28 (Rejuvenecedor A) pudiera considerarse de 13,6 °C, y por último de 12,9 °C para el asfalto PG 58-28 (Rejuvenecedor B). Es decir, que el empleo de rejuvenecedores en el asfalto base si mejora de manera indiscutible el comportamiento a la fatiga. En especial para la región Sierra la diferencia aproximada de 3°C que se genera puede explicar una gran cantidad de tráfico.

Sin embargo, las temperaturas altas obtenidas con los rejuvenecedores, 58°C en ambos casos, alertan sobre la obtención de un asfalto más blando para las altas temperaturas de la Costa. En general, los resultados indican que esta modificación sería más conveniente para la región Sierra.

CAPÍTULO III

3. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADA

3.1. Curvas Maestras

Las curvas maestras representan la variación del módulo complejo (G^*) en función de la frecuencia y la temperatura, y permite complementar la información de las propiedades reológicas de los cementos asfálticos. Por otra parte, determinando el G^* se puede calcular el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, parámetro fundamental en el diseño mecanicista de pavimentos (Wahr, Delgadillo, & Rodriguez, 2009).

El grado de desempeño PG de los ligantes asfálticos según la norma AASHTO M320 responde a las características reológicas de los asfaltos para altas, intermedias y bajas temperaturas que puede presentar el pavimento. Para comprender las propiedades de los asfaltos con mayor precisión, expertos han elaborado diversos modelos para la construcción de las curvas maestras como por ejemplo el propuesto por Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM).

3.1.1. Condiciones de ensayos

Para la elaboración de las curvas maestras de los tres asfaltos estudiados se utilizó como base los resultados del programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR. Las consideraciones que se tomaron en cuenta para poder realizar las curvas maestras fueron las siguientes:

- Cada asfalto estudiado fue ensayado en sus tres condiciones: original, luego del RTFOT y después del PAV.
- Se consideró un rango frecuencia de 0,1 hasta 37,5 Hz.
- Se realizaron barridas de temperatura en un rango de 10°C hasta 70°C, con intervalos de 10°C.

Una salida de resultados obtenidos del software Bohlin del DSR con los parámetros antes mencionados, se muestra en la Figura 9.

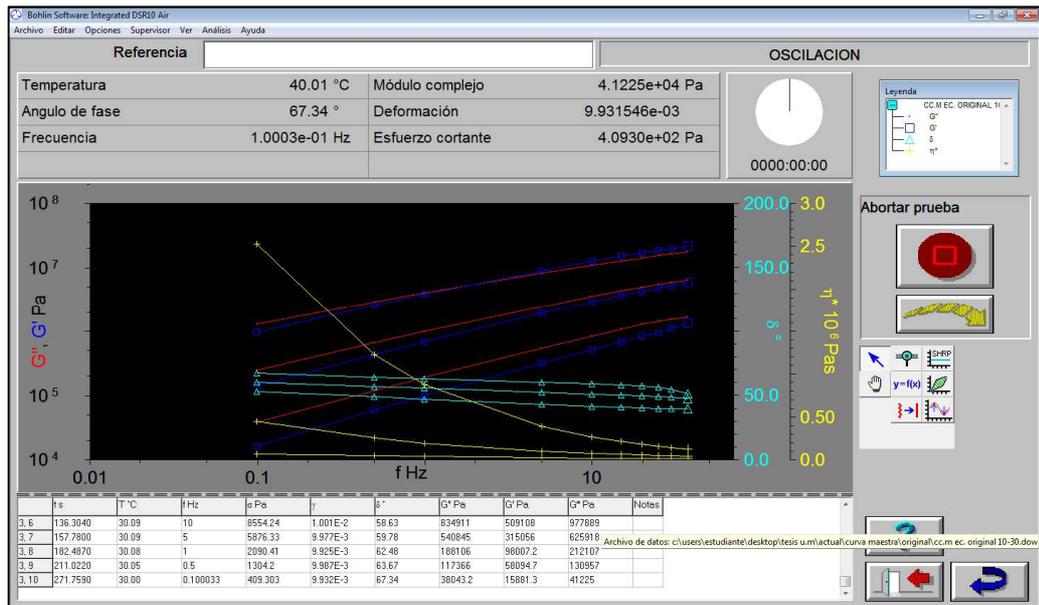


Figura 16. Representación gráfica de una curva maestra (original)
Fuente: Autores

3.1.2. Configuración de las curvas maestras

Adicionalmente el software proporciona una serie de parámetros que son: tiempo (s), temperatura (°C), frecuencia (Hz), módulo elástico (Pa), módulo viscoso (Pa), viscosidad compleja (Pa.s), esfuerzo de corte (Pa) y la tensión, que complementan la información del espécimen estudiado, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del programa Bohlin Software Integrated

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Ángulo de Fase (°)	Módulo Complejo (Pa)	Módulo Elástico (Pa)	Módulo Viscoso (Pa)	Viscosidad Compleja (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Tensión
31,1455	10	3,75E+01	39,38	2,7581E+07	2,1321E+07	1,7497E+07	1,1706E+05	9,9317E+04	4,1041E-03
62,5603	10,01	3,00E+01	39,54	2,5440E+07	1,9620E+07	1,6195E+07	1,3497E+05	9,9530E+04	4,2820E-03
94,0265	10,01	2,50E+01	39,7	2,4056E+07	1,8508E+07	1,5367E+07	1,5315E+05	9,9540E+04	4,4201E-03
125,3985	10	2,00E+01	39,92	2,1902E+07	1,6797E+07	1,4056E+07	1,7429E+05	9,9435E+04	4,7543E-03
156,8948	9,98	1,50E+01	40,44	1,9540E+07	1,4871E+07	1,2675E+07	2,0732E+05	9,9465E+04	5,2391E-03
188,5751	9,98	1,00E+01	41	1,6511E+07	1,2461E+07	1,0833E+07	2,6278E+05	9,9514E+04	6,1181E-03
220,7869	10	5,00E+00	42,9	1,2056E+07	8,8314E+06	8,2074E+06	3,8377E+05	9,9468E+04	8,2914E-03
245,4956	10,01	1,00E+00	46,86	5,5042E+06	3,7639E+06	4,0161E+06	8,7602E+05	5,3881E+04	9,7931E-03
274,0584	10,01	5,00E-01	48,74	3,8288E+06	2,5249E+06	2,8783E+06	1,2188E+06	3,8206E+04	9,9798E-03

Fuente: Autores

Estos resultados son utilizados para dibujar las curvas log G^* vs log frecuencia para todas las temperaturas de ensayo (Figura 17).

Posteriormente se utiliza una hoja de cálculo con la cual se construye la curva maestra utilizando, en nuestro caso, el modelo de Christensen-Anderson-Marasteanu. El procedimiento permite ajustar todas las curvas a una simple curva maestra a una temperatura de referencia con la ayuda de varios parámetros entre los cuales se encuentra el logaritmo de la Frecuencia reducida, el llamado Shift Factor, entre otros, Ver Tabla 10.

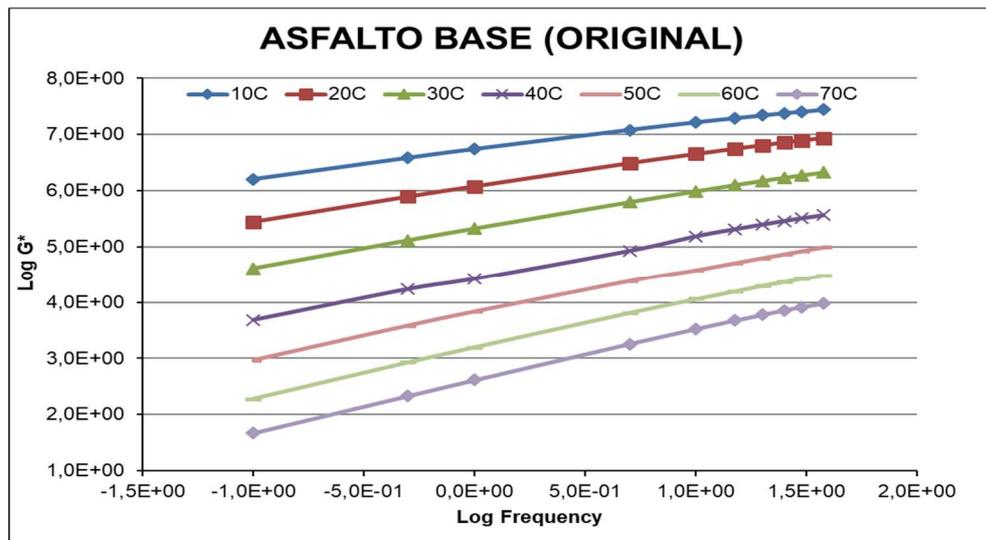


Figura 17. Curva log G* vs log frecuencia del Asfalto base
Fuente: Autores

Tabla 10. Hoja de cálculo para la construcción de curvas maestras

Log de Frecuencia	Log(G*) _{meas.}	Shift Factor	Log de Frecuencia Reducida	Log(G*) _{Calc}	Δ ²	Predicted Phase Angle
1,57E+00	7,44	2,26E+01	8,48E+02	7,50	3,13E-03	34,64
1,48E+00	7,41	2,25E+01	6,76E+02	7,46	2,77E-03	35,33
1,40E+00	7,38	2,25E+01	5,64E+02	7,43	2,06E-03	35,88
1,30E+00	7,34	2,26E+01	4,52E+02	7,39	2,26E-03	36,55
1,18E+00	7,29	2,28E+01	3,42E+02	7,34	2,18E-03	37,42
1,00E+00	7,22	2,28E+01	2,28E+02	7,26	2,03E-03	38,67
6,99E-01	7,08	2,26E+01	1,13E+02	7,13	2,18E-03	40,86
0,00E+00	6,74	2,25E+01	2,25E+01	6,79	2,27E-03	45,97
-3,01E-01	6,58	2,25E+01	1,13E+01	6,63	2,21E-03	48,17

Fuente: Autores

El Shift Factor se determina por medio de la ecuación William-Landel-Ferry (1), en la cual intervienen los coeficientes C_1 y C_2 que corresponden a constantes empíricas obtenidas con la ayuda de la herramienta complementaria de Microsoft Excel llamada SOLVER. Mientras los factores

T y Tr representan la temperatura de ensayo (°C) y la temperatura de referencia (°C) respectivamente.

$$(1). \quad \text{Log } a_T = \frac{C_1 (T + T_R)}{C_2 + T - T_R}$$

La curva maestra relaciona el módulo de corte G^* y la frecuencia reducida en una escala logarítmica (Figura 18). Para obtener los valores ajustados de frecuencia se multiplica la frecuencia de ensayo por los Shift Factors requeridos a cada temperatura para formar la curva maestra.

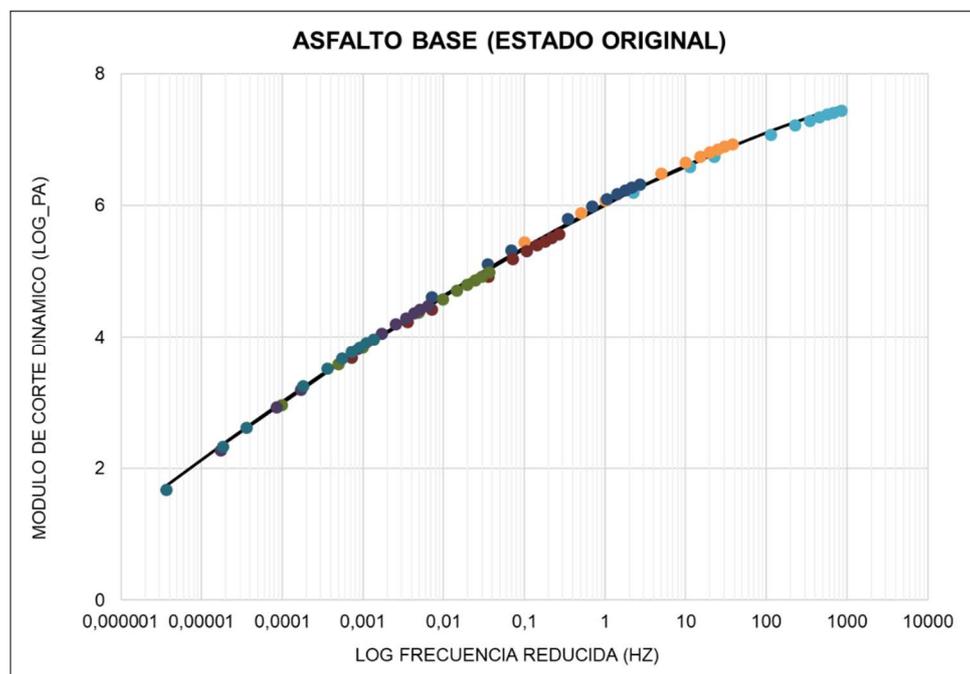


Figura 18. Curva Maestra del Asfalto Base
Fuente: Autores

Otra forma de graficar las curvas maestras es relacionando el módulo de corte G^* y el logaritmo del tiempo reducido (inversa de la frecuencia). Para lo cual, se debe convertir las unidades de frecuencia reducida, expresadas en Hz, a rad/seg ($1\text{Hz} = 2\pi \text{ rad/seg}$), de tal modo que se pueda expresar en términos de tiempo (segundos) mediante la Ecuación (2).

$$(2) \quad t = \frac{1}{2\pi f}$$

A continuación, en la Figura 19 se observa la gráfica de la relación del módulo de rigidez vs el logaritmo del tiempo reducido correspondiente al asfalto base en su estado original.

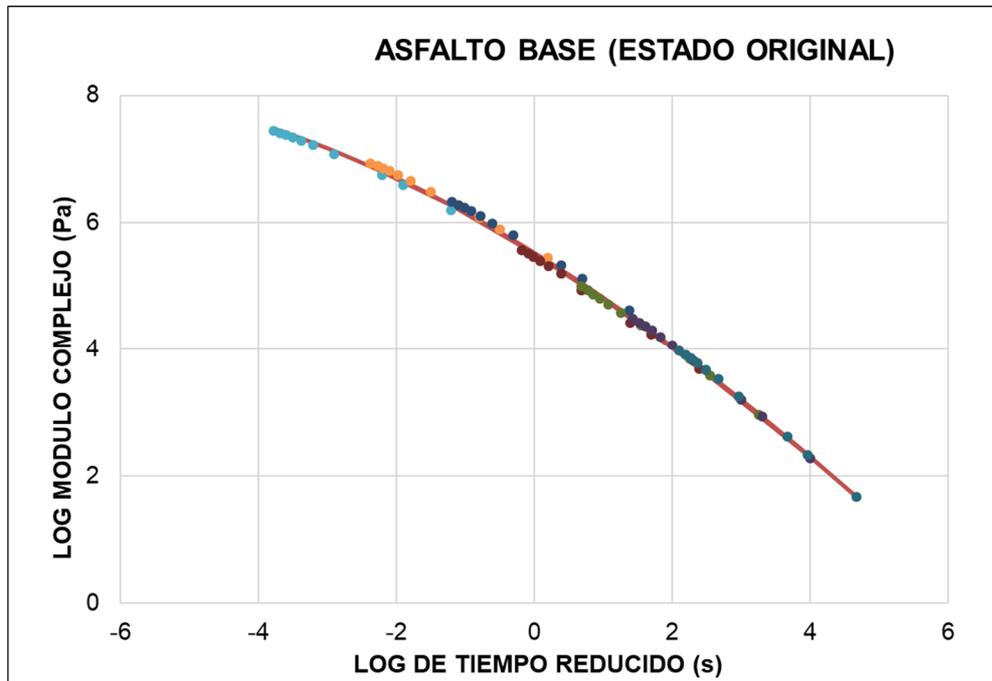


Figura 19. Curva Maestra del Asfalto Base
Fuente: Autores

En las curvas maestros de los cementos asfálticos se pueden identificar tres regiones de comportamiento las cuales son:

- A temperaturas bajas o cortos tiempos de carga (altas frecuencias): El asfalto se comporta como un sólido vítreo. El módulo depende del tiempo o de la rigidez, acercándose a valores aproximados a 10^9 Pa en corte, o de 3×10^9 Pa en tensión-compresión o flexión uniaxial. En esta región, la rigidez es solo ligeramente dependiente de la temperatura y/o tiempo de carga (Anderson, Christensen, & Bahia, 1991).
- A temperaturas o tiempos de carga (frecuencias) intermedios: El asfalto se somete a una transición muy gradual de comportamiento vítreo a fluido. Esta región de transición se caracteriza por un gran retardo o disminución en la elasticidad, significando que el material se comporta como cuero-goma. El módulo cambia drásticamente en esta

región a medida que se altera la temperatura o el tiempo de carga (Anderson, Christensen, & Bahia, 1991).

- A temperaturas altas o tiempos de carga prolongados (bajas frecuencias): el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso. La deformación, en condiciones de bajos o moderados esfuerzos y tasas de deformación puede ser descrita por la ley de fluido newtoniano. La velocidad de deformación cortante es proporcional al esfuerzo cortante (Anderson et al., 1991)

En la figura 20 se representa gráficamente las regiones según el comportamiento viscoelástico y los parámetros asociados al cemento asfáltico.

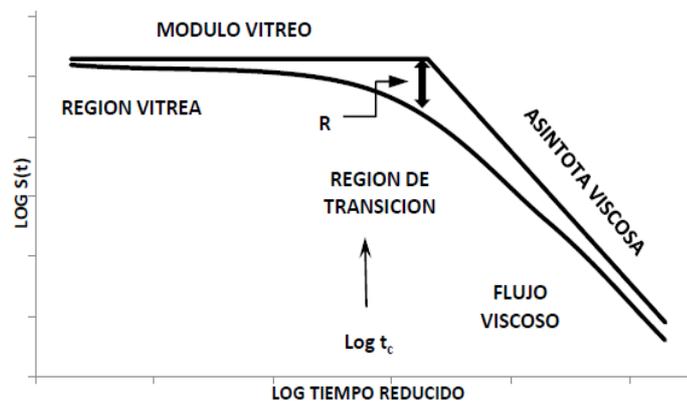


Figura 20. Curva Log $s(t)$ vs Log tiempo reducido

Fuente: *Construcción de las curvas maestras del mastic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y muestras recuperadas de mezclas en servicio, 2012*

3.1.3. Curvas Maestras obtenidas en el presente trabajo

A continuación, se muestra las curvas maestras obtenidas para los tres asfaltos estudiados en su estado original, luego de pasar por RTFOT, y con un envejecimiento secundario (PAV). Ver figuras 21, 22 y 23.

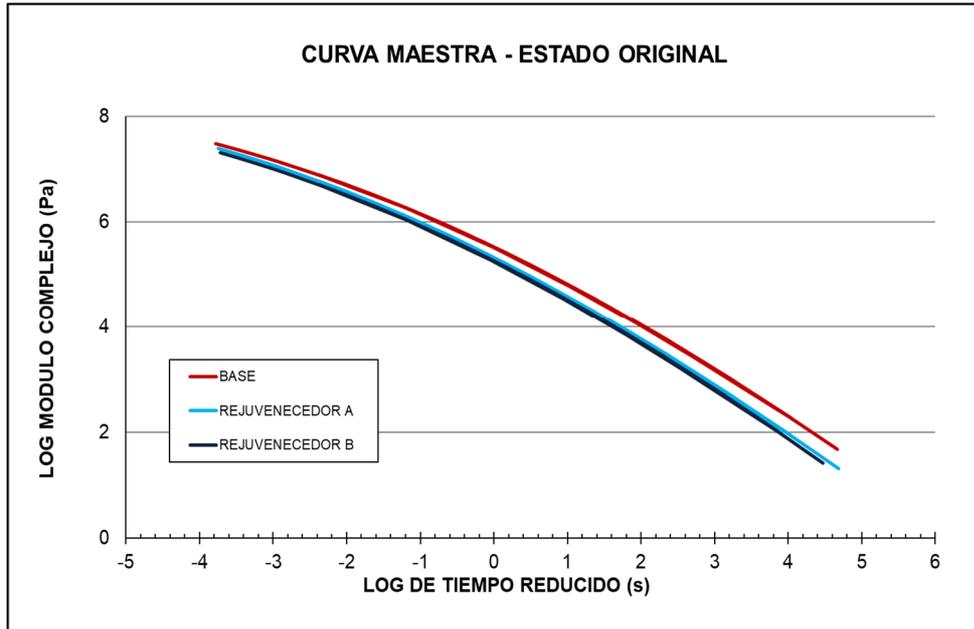


Figura 21. Curva Maestra en estado original
Fuente: Autores

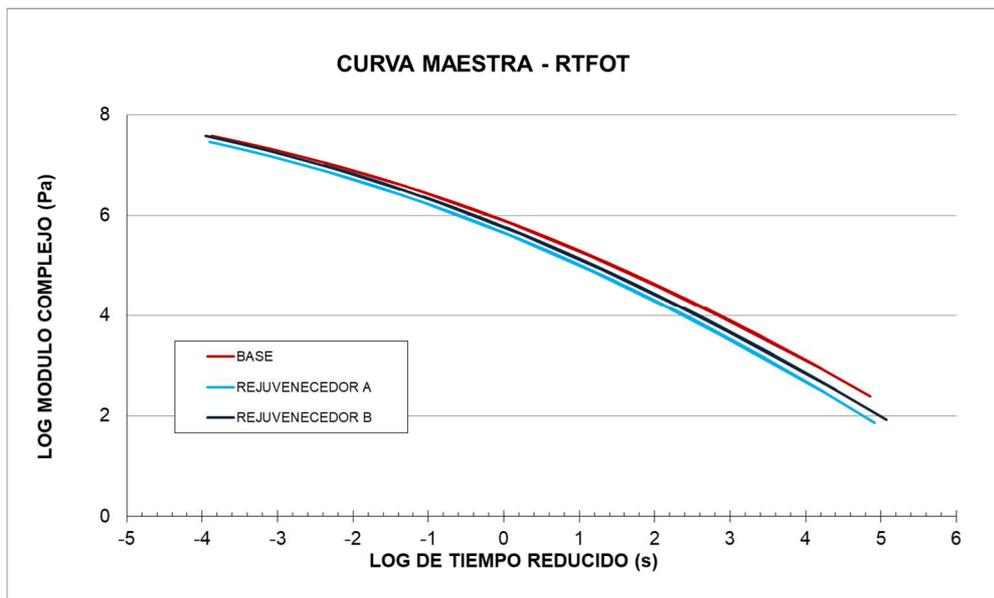


Figura 22. Curva Maestra con envejecimiento primario (RTFOT)
Fuente: Autores

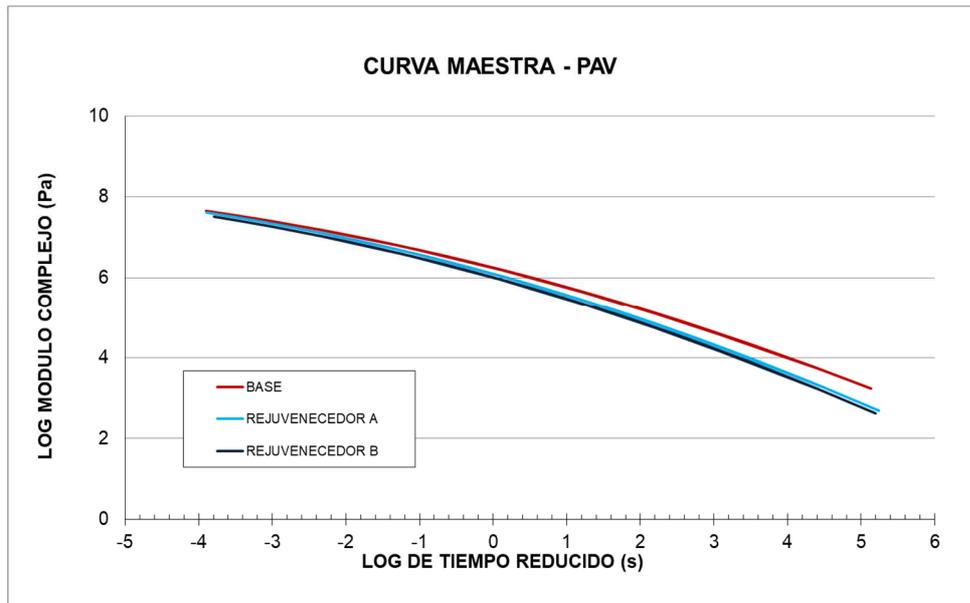


Figura 23. Curva Maestra con envejecimiento secundario (PAV)
Fuente: Autores

A continuación, en la figura 24 se muestra las combinaciones de todas las curvas maestras de los asfaltos estudiados en sus tres estados.

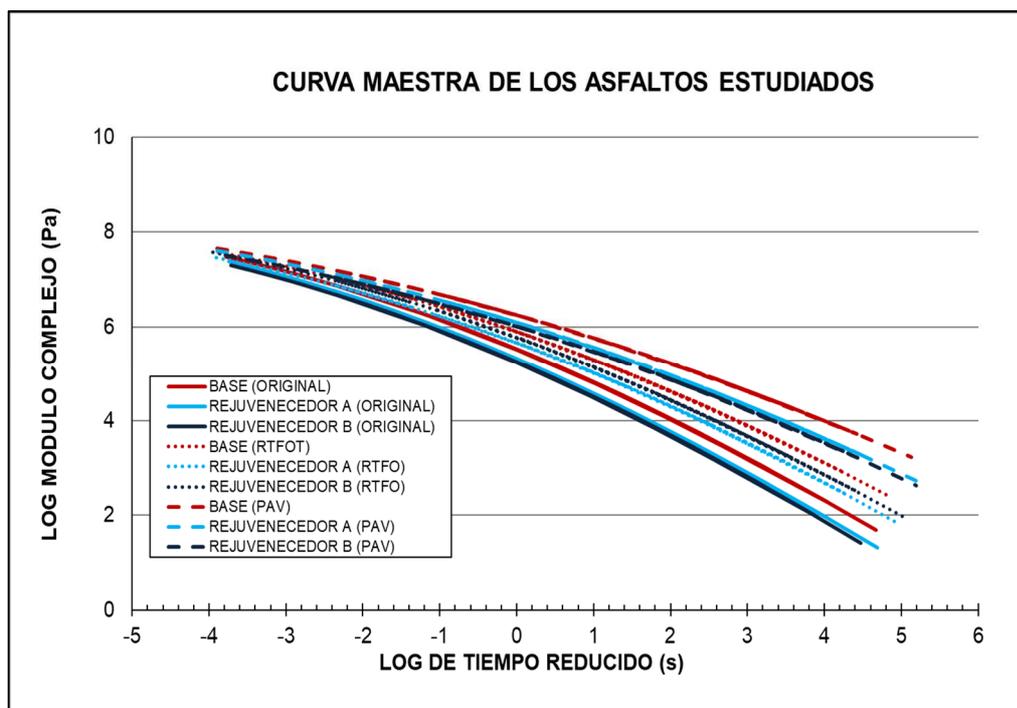


Figura 24. Comparación de las curvas maestras
Fuente: Autores

Se puede observar que el asfalto base presenta valores de G^* mayores con respecto a los asfaltos mezclados con rejuvenecedor en cada uno de los

tres estados estudiados (Figura 21, 22 y 23), mostrando características de un asfalto más duro. Mientras que el comportamiento particular de los asfaltos mezclados con los dos rejuvenecedores es cambiante, puesto que en estado original (Figura 21) y luego del PAV (Figura 23) el asfalto con rejuvenecedor A presenta mayores valores de módulo complejo que el otro. Sin embargo, al pasar por el horno RTFOT (Figura 22), el asfalto con rejuvenecedor B es el que presenta la mayor rigidez entre los dos.

Para tener un mejor desempeño ante las deformaciones plásticas es favorable tener asfaltos que tengan altos valores de rigidez. Bajo este principio el asfalto base tendrá una mejor respuesta al presentar mayores valores de G^* con respecto a los otros dos especialmente en estado original (Figura 21) y después del PAV (Figura 23). Sin embargo, ante el agrietamiento por fatiga favorece tener mezclas asfálticas con mayor flexibilidad, es decir, menores valores de rigidez, por tal razón los asfaltos mezclados con rejuvenecedor tendrán un mejor desempeño ante este tipo de falla.

En la figura 24 se muestran las curvas maestras obtenidas para los tres asfaltos estudiados en estado original, con envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV). Como se observa, en la medida que pasa por un proceso de envejecimiento las curvas se desplazan hacia arriba en el gráfico y se hacen más aplanadas dado al incremento del módulo complejo, lo que es consecuente de la rigidización que provoca dichos envejecimientos en los asfaltos. El incremento del módulo complejo es más evidente al relacionar la rigidez del envejecimiento secundario PAV (línea discontinua) con la rigidez en estado original (línea continua).

Además, se puede observar que a bajas temperaturas o altas frecuencias todos los asfaltos en cualquier estado que se encuentre, tienden a aproximarse al valor límite del G^* de 1,0 Gpa. En esta región, la rigidez es ligeramente dependiente de la temperatura y/o tiempo de carga (Anderson, Christensen, & Bahia, 1991).

3.2. Diagrama de Black

El diagrama de Black permite valorar la relación entre el módulo complejo G^* y el ángulo de fase δ de los cementos asfálticos a la temperatura y rango de frecuencia seleccionado. El cambio del G^* en el comportamiento viscoelástico depende principalmente del tiempo de carga (t) y temperatura (T), por lo que un mismo G^* se puede obtener con diferentes combinaciones de dichos parámetros (Villao, León, Jaramillo, & Vila, 2017).

3.2.1. Configuración del Diagrama de Black

Las condiciones utilizadas para la configuración de los diagramas de Black son las mismas que se manejan para la creación de las curvas maestras, ya que estos parámetros se obtienen del mismo programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR. Para esta investigación los diagramas de Black se crearon a partir del cemento asfáltico en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV), tanto para el asfalto base como para los asfaltos modificados con rejuvenecedores. En cada barrido de frecuencias se consideró una frecuencia inicial de 0.1Hz hasta 37.5Hz.

3.2.2. Análisis ante las Deformaciones Plásticas

Debido a que las deformaciones plásticas se presentan generalmente a temperaturas altas en los pavimentos, se realiza el estudio el diagrama de Black a una temperatura de 50°C, que corresponde a un valor representativo de las altas temperaturas en el Ecuador (ver Tabla 7).

El criterio Superpave que controla a las deformaciones plásticas considerando que $\frac{G^*}{\text{sen}\delta} \geq 1 \text{ kPa}$ para asfaltos en estado original y $\frac{G^*}{\text{sen}\delta} \geq 2,2 \text{ kPa}$ para asfaltos con envejecimiento primario (RTFOT). A partir de dichas expresiones puede observarse que un menor δ y un mayor G^* sería favorable para contrarrestar las deformaciones plásticas.

En la Figura 25 se puede ver que el asfalto base en estado original, presenta para todos los módulos un ángulo de fase menor que los asfaltos mezclados

con los rejuvenecedores, por lo que se puede considerar que el asfalto ecuatoriano tendrá por sí solo un mejor comportamiento ante esta falla.

Al considerar la exigencia del método Superpave $\frac{G^*}{sen\delta} \geq 1 \text{ kPa}$, se puede observar en la Tabla 11 que a medida que la frecuencia disminuye (mayores tiempos de cargas), los ángulos de fase aumentan y el módulo complejo disminuye, provocando que $\frac{G^*}{sen\delta}$ disminuya, acercándose cada vez más a la limitación expuesta. Ya para una frecuencia de 0.1 Hz ninguno de los tres asfaltos cumple con dicha condición.

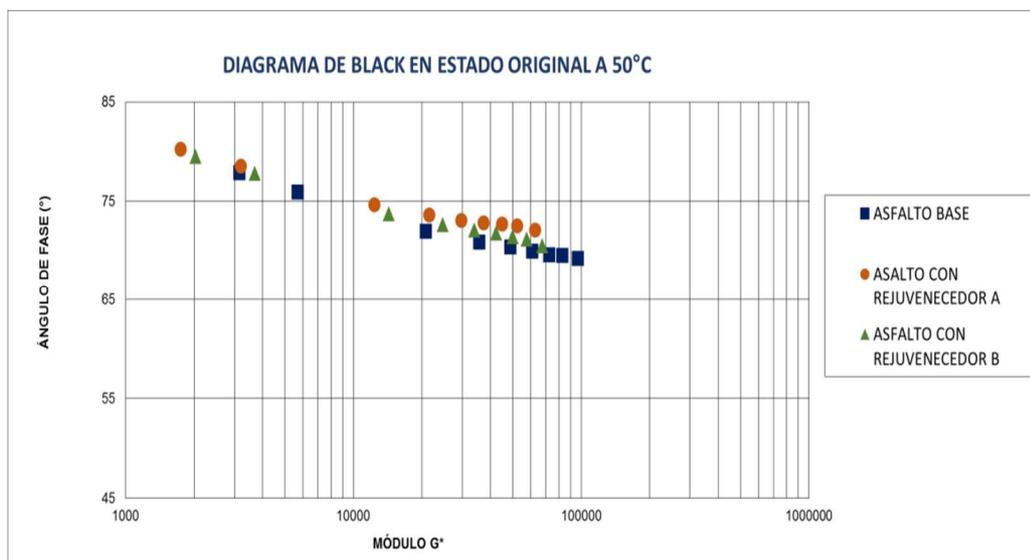


Figura 25. Diagrama de Black en estado original a 50°C
Fuente: Autores

Tabla 11. Configuración del Diagrama de Black en estado Original a 50°C

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	ASFALTO BASE			ASFALTO CON REJUVENECEDOR A			ASFALTO CON REJUVENECEDOR B		
		Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/sen\delta \geq 1$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/sen\delta \geq 1$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/sen\delta \geq 1$ (kPa)
50	3.75E+01	69.22	9.690E+04	104	72.01	6.308E+04	66	70.47	6.769E+04	72
50	3.00E+01	69.53	8.279E+04	88	72.42	5.270E+04	55	71.14	5.774E+04	61
50	2.50E+01	69.59	7.219E+04	77	72.64	4.512E+04	47	71.41	5.018E+04	53
50	2.00E+01	69.95	6.098E+04	65	72.77	3.743E+04	39	71.76	4.235E+04	45
50.01	1.50E+01	70.34	4.888E+04	52	72.99	2.987E+04	31	72.05	3.400E+04	36
50	1.00E+01	70.85	3.564E+04	38	73.52	2.164E+04	23	72.6	2.474E+04	26
50.01	5.00E+00	71.97	2.077E+04	22	74.58	1.240E+04	13	73.73	1.433E+04	15
50	1.00E+00	75.93	5.687E+03	6	78.49	3.212E+03	3	77.79	3.693E+03	4
50	5.00E-01	77.85	3.161E+03	3	80.14	1.750E+03	2	79.51	2.026E+03	2
50	1.00E-01	82.13	7.537E+02	0.8	83.53	4.027E+02	0.4	83.48	4.688E+02	0.5

Fuente: Autores

Luego del RTFOT, como se muestra en la figura 26, se mantiene el asfalto base comportándose de mejor manera debido a que presentan menores δ y mayores G^* para todas las frecuencias ensayadas. En la tabla 12 se identifica de forma más clara que los asfaltos mezclados con los rejuvenecedores no cumplirían la condición $\frac{G^*}{\text{sen}\delta} \geq 2,2 \text{ kPa}$ para la menor frecuencia ensayada (1Hz).

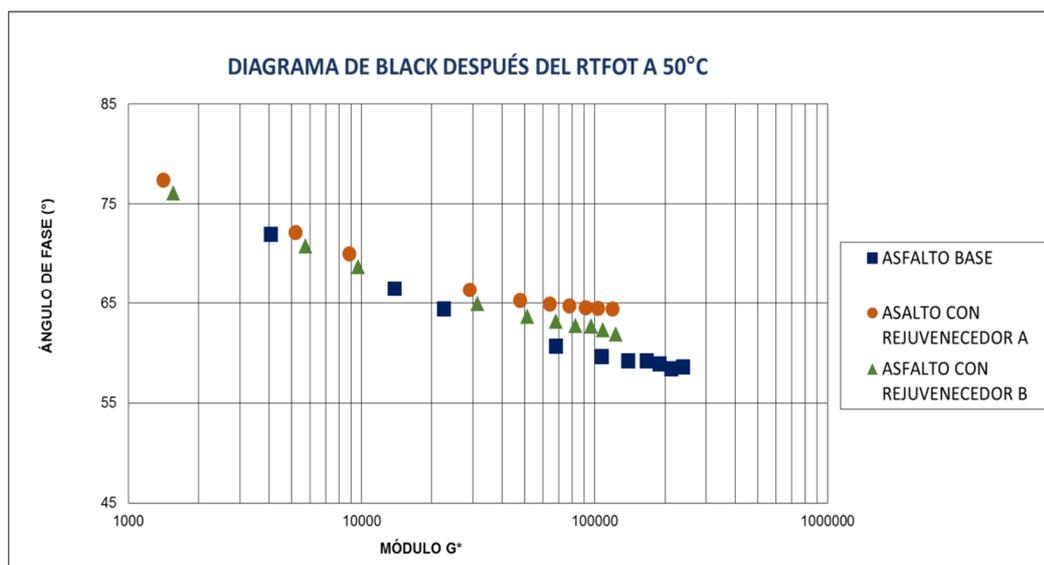


Figura 26. Diagrama de Black después del RTFOT a 50°C
Fuente: Autores

Tabla 12. Configuración del Diagrama de Black después del RTFOT a 50°C

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	ASFALTO BASE			ASFALTO CON REJUVENECEDOR A			ASFALTO CON REJUVENECEDOR B		
		Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/\text{sen}\delta \geq 2,2$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/\text{sen}\delta \geq 2,2$ (kPa)	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^*/\text{sen}\delta \geq 2,2$ (kPa)
50	3.75E+01	58.61	2.400E+05	281	64.3	1.199E+05	133	61.86	1.233E+05	140
50	3.00E+01	58.42	2.134E+05	251	64.4	1.040E+05	115	62.32	1.084E+05	122
50.01	2.50E+01	58.92	1.902E+05	222	64.46	9.183E+04	102	62.69	9.662E+04	109
49.99	2.00E+01	59.23	1.668E+05	194	64.61	7.845E+04	87	62.74	8.283E+04	93
50.01	1.50E+01	59.18	1.393E+05	162	64.81	6.444E+04	71	63.2	6.811E+04	76
50.01	1.00E+01	59.61	1.073E+05	124	65.2	4.813E+04	53	63.63	5.134E+04	57
50.01	5.00E+00	60.68	6.801E+04	78	66.26	2.916E+04	32	64.96	3.137E+04	35
50	1.00E+00	64.39	2.256E+04	25	69.95	8.884E+03	9	68.7	9.678E+03	10
50	5.00E-01	66.44	1.383E+04	15	72.08	5.222E+03	5	70.78	5.760E+03	6
50.01	1.00E-01	71.96	4.082E+03	4	77.33	1.416E+03	1.5	76.12	1.557E+03	1.6

Fuente: Autores

3.2.3. Análisis ante el Agrietamiento por Fatiga

El problema del agrietamiento por fatiga se produce en los pavimentos principalmente a temperaturas intermedias, por esta razón el análisis en el diagrama de Black se lleva a cabo a una temperatura de 20°C con un rango de frecuencia similar al empleado anteriormente.

La fatiga es un fenómeno controlado típicamente por esfuerzo en pavimentos con grandes espesores de mezcla asfáltica y un fenómeno controlado por deformación en capas asfálticas delgadas. Dado que se sabe que el agrietamiento por fatiga es más frecuente en pavimentos delgados, los investigadores del SHRP supusieron que debía considerarse principalmente un fenómeno controlado por deformación (Querol et al, 2009)

En las estructuras de poco espesor de mezcla asfáltica, donde las deformaciones van a ser grandes, interesa la máxima recuperación elástica, es decir una curva de relajación rápida. Además, tomando como referencia el criterio Superpave ante el agrietamiento por fatiga, donde se exige: $G^* \text{Sen} \delta \leq 5000 \text{ kPa}$ para asfaltos con envejecimiento secundario (PAV), puede deducirse que un menor δ y un menor G^* serían favorables para prevenir el agrietamiento por fatiga (Jaramillo, León, Vila, & Villao, 2017).

En la Figura 27 puede observarse que la tendencia en el comportamiento de los diferentes asfaltos respecto a la magnitud tanto de G^* como de δ se mantiene. Por esta razón, se podría interpretar que los asfaltos con rejuvenecedor tendrían un mejor desempeño ante la fatiga. Sin embargo, al chequear en la Tabla 13, los valores $G^* \text{Sen} \delta$ que cumplen con el máximo de 5000 kPa, se pudiera suponer que el aporte del rejuvenecedor B y A es mínimo.

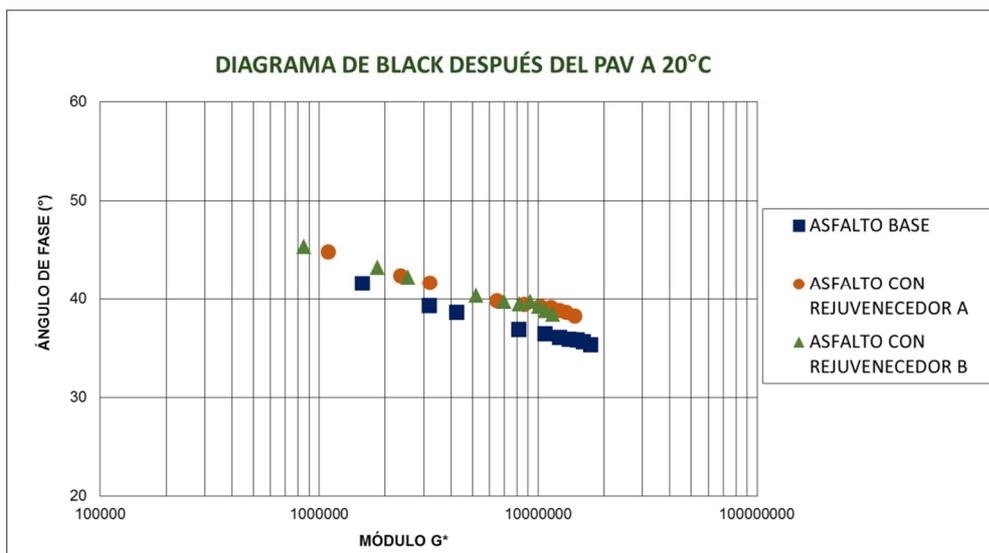


Figura 27. Diagrama de Black después del PAV a 20°C
Fuente: Autores

Tabla 13. Configuración del Diagrama de Black después del PAV a 20°C

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	ASFALTO BASE			ASFALTO CON REJUVENECEDOR A			ASFALTO CON REJUVENECEDOR B		
		Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^* \cdot \text{sen} \delta \leq 5000$	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^* \cdot \text{sen} \delta \leq 5000$	Ángulo de fase δ (°)	Módulo Complejo G^* (Pa)	$G^* \cdot \text{sen} \delta \leq 5000$
20.01	3.75E+01	35.33	1.7354E+07	10036	38.21	1.48E+07	9131	38.43	1.17E+07	7252
20.01	3.00E+01	35.61	1.6051E+07	9346	38.53	1.35E+07	8440	38.83	1.08E+07	6773
20.02	2.50E+01	35.81	1.5064E+07	8814	38.72	1.26E+07	7879	39.22	1.01E+07	6374
20.02	2.00E+01	35.91	1.3891E+07	8147	39.05	1.15E+07	7255	39.71	9.22E+06	5893
20.01	1.50E+01	36.05	1.2512E+07	7363	39.2	1.02E+07	6477	39.5	8.23E+06	5236
20.01	1.00E+01	36.41	1.0714E+07	6359	39.36	8.68E+06	5507	39.74	6.97E+06	4458
20	5.00E+00	36.88	8.1633E+06	4899	39.76	6.51E+06	4164	40.37	5.20E+06	3367
20	1.00E+00	38.63	4.2473E+06	2652	41.58	3.22E+06	2139	42.27	2.54E+06	1706
20.01	5.00E-01	39.27	3.1903E+06	2019	42.36	2.37E+06	1595	43.25	1.85E+06	1266
20.01	1.00E-01	41.6	1.5690E+06	1042	44.76	1.11E+06	780	45.38	8.52E+05	606

Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

4. PARÁMETROS ADICIONALES

Respecto a la predicción del comportamiento a temperaturas intermedias es conocido que el parámetro de control empleado por el Superpave “ $G^*.sin\delta$ ”, se correlaciona pobremente con la fatiga de la mezcla asfáltica. Este significativo problema ha sido analizado por diferentes investigadores desde el comienzo de la tecnología Superpave para asfaltos y hasta la actualidad (Soenen, H. et al, 2000; Bahia, H. et al, 2001; Shenoy, A., 2001; Stuart, K.D. et al, 2002; Tsai, B. et al, 2005 y Walker, D., 2011)

Recientemente un experto del Instituto del Asfalto opinó: “El próximo paso en la evolución de la tecnología de los asfaltos es fijar un parámetro para el control de los ligantes a las temperaturas intermedias, es decir, relacionado con los deterioros asociados a las fisuras por fatiga y la durabilidad. Un grupo de nuevas pruebas y parámetros han sido propuestos: Barrido lineal de amplitud (LAS), Valor-R, Glover-Rowe, ΔT_c y tensión en doble borde con muesca (DENT) por citar algunos, pero los estudiosos del asfalto tienen todavía que ponerse de acuerdo sobre la que ellos consideren que mejor se relaciona con el agrietamiento a las temperaturas intermedias” (Anderson, 2016).

Por otra parte, es conocido que a medida que los pavimentos envejecen estos comienzan a presentar grietas y desprenderse los agregados. Aunque los esfuerzos producidos por el tráfico incrementan las destrucciones, la evolución de las propiedades reológicas del asfalto envejecido puede ser lo suficientemente dañina por si sola para causar fisuras en bloques debido a los esfuerzos provocados por los gradientes térmicos (King et al, 2012).

4.1. Parámetro ΔT_c

Este parámetro fue desarrollado por el Instituto del Asfalto (Anderson, 2011), y se determina al realizar cálculos adicionales con los datos obtenidos de la

prueba con el equipo BBR. Cabe recalcar que el parámetro ΔT_c se determina utilizando la ecuación 5.

$$\Delta T_c = T_{c,m} - T_{c,S}$$

En la medida que el asfalto se envejece, el valor de “ ΔT_c ” se incrementa, indicando lo que se considera una pérdida en las propiedades de relajamiento. Se establece que cuando ΔT_c alcanza un valor de 2,5 °C implicaría el inicio del agrietamiento y si alcanza un valor superior a 5 °C presentaría problemas serios de agrietamientos. Si bien este parámetro se obtiene a bajas temperaturas, el mismo es un indicador de la calidad y durabilidad del ligante que puede correlacionarse muy bien con otros parámetros vinculados a las temperaturas intermedias (Anderson et al, 2011; King et al, 2012).

4.1.1. Resultados del parámetro ΔT_c

Los resultados obtenidos al determinar este parámetro se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados del parámetro ΔT_c de los asfaltos estudiados

ASFALTO	CLASIFICACIÓN PG	T _{c, m} , °C	T _{c, s} , °C	ΔT_c , °C
BASE	64-22	-17,53	-22,91	5,38
REJUVENECEDOR A	58-28	-21,94	-23,89	1,95
REJUVENECEDOR B	58-28	-20,68	-23,40	2,72

Fuente: Autores

A partir de estos valores, se muestra en la Figura 28 el comportamiento de los cementos asfálticos estudiados según el criterio de durabilidad para ΔT_c .

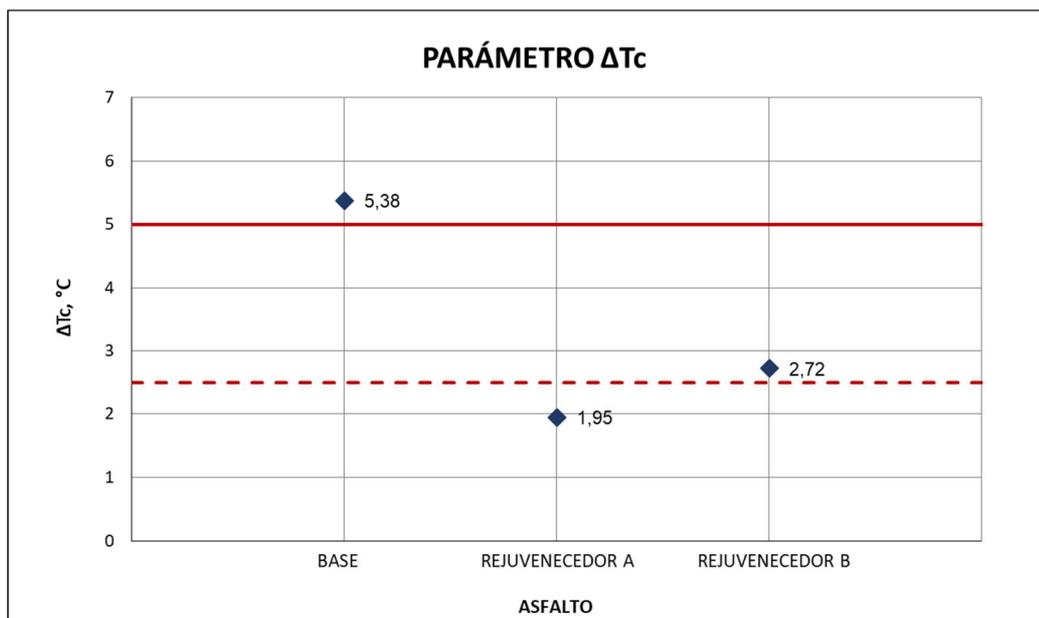


Figura 28. Incidencia del parámetro ΔT_c en los asfaltos estudiados
Fuente: Autores

Puede observarse que la muestra correspondiente al asfalto base presenta serios problemas de agrietamientos al tener un valor de ΔT_c superior a 5 °C. En cambio, los asfaltos mezclados con los dos rejuvenecedores muestran un mejor comportamiento ante las temperaturas intermedias. El rejuvenecedor B permite disminuir el valor de ΔT_c del asfalto base a 2,7°C, lo que disminuye la intensidad de las posibles grietas, mientras que el rejuvenecedor A permite que el asfalto ecuatoriano teóricamente se localice en la zona de no agrietamiento, al alcanzar un valor de ΔT_c por debajo a 2,5°C.

4.2. Criterio de Kandhal

Este criterio (Kandhal,1977) relaciona la ductilidad a baja temperatura del asfalto con el daño debido al envejecimiento que se produce en los pavimentos. Dentro del criterio se define que cuando la ductilidad (15,6°C y 1cm/min) se encuentra por debajo de los 10cm se comienza a presentar una pérdida de finos superficiales y por debajo de los 8cm existe la pérdida de agregado grueso. En cuanto al problema de agrietamiento establece que por debajo de los 5cm los pavimentos empiezan a agrietarse y por debajo de los 3cm el agrietamiento es grave y las condiciones de la superficie se consideran muy pobres. Si bien este parámetro es de naturaleza empírica,

razón por la cual no se conoce la propiedad que se mide mediante la prueba, es un valor deseable ya que indica el rendimiento de un pavimento (Nikolaides, 2015).

4.2.1. Resultados del criterio de Kandhal

Los resultados obtenidos de las pruebas de ductilidad (15,6°C y 1cm/min) se presentan a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados de las pruebas de ductilidad de los asfaltos estudiados

DUCTILIDAD 15,6°C			
HORAS	BASE	REJUVENECEDOR A	REJUVENECEDOR B
0	10.08	19.00	18.00
20	4.38	5.50	6.00
40	3.33	4.00	3.50

Fuente: Autores

A partir de estos valores, se muestra en la Figura 29 el comportamiento de los cementos asfálticos estudiados según el criterio de Kandhal.

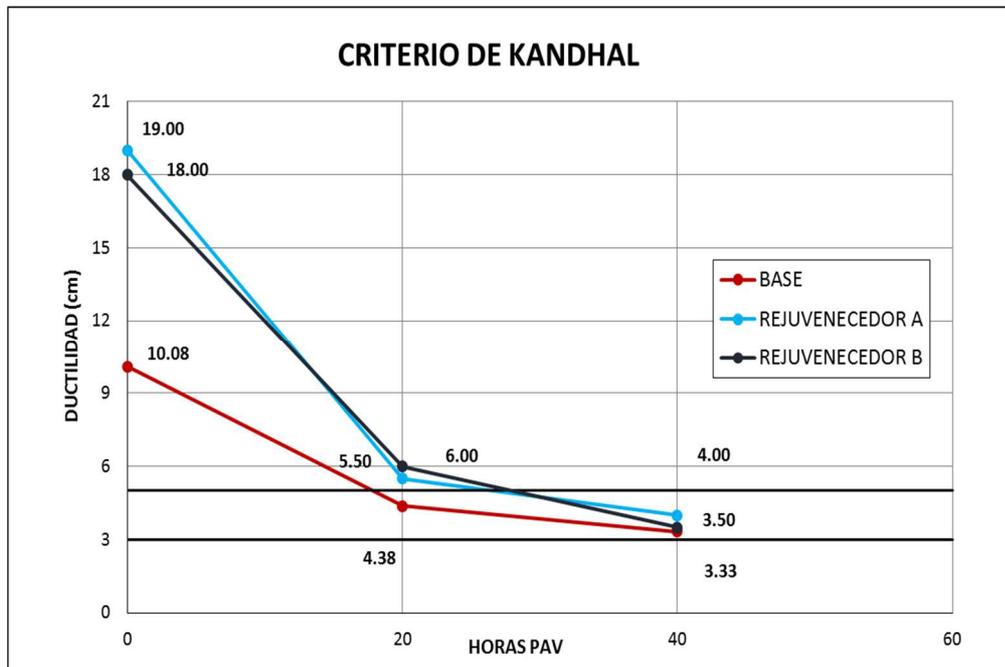


Figura 29. Variación de la ductilidad con el envejecimiento

Fuente: Autores

En la Figura 29 se puede observar que el asfalto base presentará problemas de agrietamiento luego de 18 horas con 20 minutos, seguido por el asfalto con el rejuvenecedor A después de 27 horas y por último presentando el mejor comportamiento se encuentra el asfalto con el rejuvenecedor B al entrar en zona de agrietamiento luego de 28 horas. No obstante, al cabo de las 40 horas de análisis, el mejor desempeño lo tuvo el asfalto con el rejuvenecedor A, con un valor de 4cm. Como se observa, los rejuvenecedores ayudan que el asfalto base llegue al sector de inicio de grietas más tarde y por ende tener una mayor durabilidad. Se recuerda que 20 horas en el PAV representan de 7 a 10 años del asfalto colocado en obra.

4.3. Criterio de Glover - Rowe

El criterio de Glover – Rowe es desarrollado por Rowe al ofrecer una simplificación del parámetro de fatiga de Glover, $G' / (\eta' / G')$, al encontrarse una alta correlación con la ductilidad del asfalto. Este parámetro se encontró utilizando la expresión:

$$G * \frac{(\cos\delta)^2}{\text{sen}\delta}$$

Obtenidas de pruebas DSR con barrido de frecuencia a 15°C y 0,005 rad/s (Mogawer, Austerman, Troy, Salmans, & Planche, 2016).

Dado que el parámetro se calcula a una frecuencia fija, Rowe lo expresó únicamente en términos de G^* y del ángulo de fase δ con el fin de evaluar la falla basada en la ductilidad en diagramas de Black, que comparan el cambio del módulo complejo con un cambio en el ángulo de fase.

El criterio de Glover – Rowe propone límites para determinar cuándo puede iniciar el agrietamiento en el pavimento (Asphalt Paving Technology, 2015) y cuándo habrá problemas importantes de este tipo, como se indica a continuación:

$$G * \frac{(\cos\delta)^2}{\text{sen}\delta} = 180 \text{ kPa} \quad \text{Inicio de daño}$$

$$G * \frac{(\cos\delta)^2}{\text{sen}\delta} = 450 \text{ kPa} \quad \text{Grietas significativas}$$

4.3.1. Resultados del criterio de Glover - Rowe

Los resultados obtenidos al determinar este parámetro se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados del parámetro de Glover – Rowe

HORAS	BASE			REJUVENECEDOR A			REJUVENECEDOR B		
	δ	G*	LOG G*	δ	G*	LOG G*	δ	G*	LOG G*
0	54,53	62052,8	4,79	60,59	41721,1	4,62	60,31	47788	4,68
20	48,60	155795	5,19	49,73	121241	5,08	49,76	169617	5,23
40	39,44	392118	5,59	42,58	234450	5,37	45,49	357292	5,55

Fuente: Autores

A partir de estos valores, se procedió a graficar los puntos dentro del diagrama de Black como se muestra en la Figura 30.

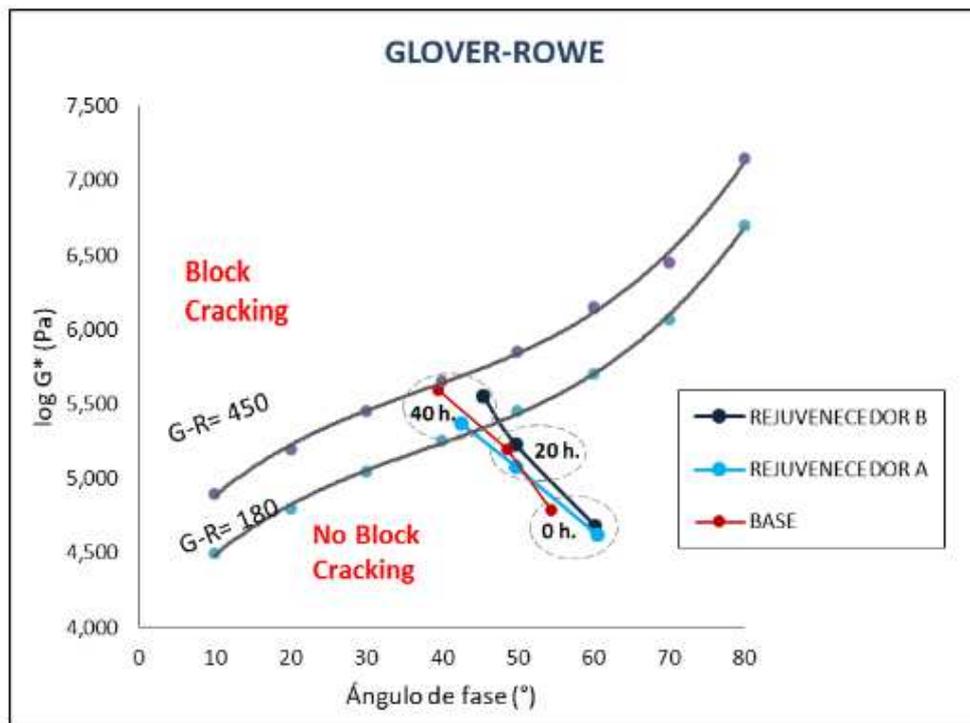


Figura 30. Incidencia del tiempo en PAV respecto al parámetro Glover-Rowe

Fuente: Autores

En la Figura 30 se puede observar que para 0 y 20 horas en el PAV los tres asfaltos estudiados se encuentran en la zona de no agrietamiento, con la

particularidad que 20 horas en el PAV los tres asfaltos tienen un ángulo de fase y módulo complejo parecido. Sin embargo, a 40 horas de envejecimiento existe una diferencia más marcada, ya que el asfalto base cuenta con un mayor G^* y menor δ encontrándose casi en zona de fisuras de bloque y los otros dos se localizan en zona de daño, siendo el asfalto mezclado con el rejuvenecedor A el de mejor comportamiento.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas clasificó por grado de viscosidad en estado original como un AC-30, sin embargo, después del envejecimiento en el horno RTFO, no cumple con las exigencias de la normativa ASTM, lo que permite suponer un comportamiento posiblemente inadecuado en obra luego del proceso del mezclado, transporte y compactación. Esta situación no se identificó en la clasificación por Superpave, donde el mismo clasificó como un PG 64-22, el cual sería un grado adecuado para las condiciones climáticas del Ecuador.

El asfalto base al ser mezclado con los dos tipos de rejuvenecedores cumplen con la mayoría de las exigencias de un AC-20 para el estado original y después del RTFO según la clasificación por viscosidad. Al aplicar la clasificación PG se obtuvo que tanto el asfalto mezclado con el rejuvenecedor A como con el rejuvenecedor B clasifican como un PG 58-28. Esto indica una disminución de las temperaturas alta y baja, pasando de 64°C a 58°C y de -22°C a -28°C.

Las curvas maestras de los asfaltos mezclados con los dos rejuvenecedores tienen un comportamiento semejante, presentando menores valores de módulo complejo G^* en sus tres estados en comparación con el asfalto base. Esto se atribuye al efecto de los rejuvenecedores en la recuperación de las propiedades químicas originales del asfalto que han sido alteradas durante el proceso de oxidación.

Los diagramas de Black muestran que el asfalto base tiene por sí solo un mejor comportamiento ante las deformaciones plásticas, debido a que presentan mayores valores de G^* y menores ángulos de fase δ a una temperatura de 50°C, en comparación a los asfaltos mezclados con los rejuvenecedores. Mientras que el comportamiento de estos asfaltos mezclados con rejuvenecedor después del envejecimiento en el PAV a una

temperatura de 20°C, presentan una ligera mejora al tener menores valores de G^* indicando una menor rigidez, lo cual podría ayudar a tener un mejor comportamiento ante la fatiga.

Con respecto a los resultados del parámetro ΔT_c , se puede estimar que el asfalto base presentará serios problemas de agrietamientos debido al valor superior a 5°C obtenido. Por otro lado, los rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano ayudarían a disminuir la intensidad del agrietamiento, especialmente el rejuvenecedor A.

Los estudios adicionales aplicando los criterios de Kandhal y Glover-Rowe permiten observar de manera clara el efecto del envejecimiento. Llama la atención que al aplicar el criterio de Kandhal, el asfalto base a las 20 horas ya se encuentra en zona de desarrollo de daño por fisuras, no así los asfaltos mezclados con rejuvenecedores. Por otra parte, a las 40 horas los tres asfaltos se encuentran dentro de dicha zona, pero el valor mayor lo ofrece el asfalto con rejuvenecedor A. Mientras que al aplicar el criterio Glover-Rowe, ninguno de los tres asfaltos se localiza en zona de agrietamiento luego de 20 horas en el PAV, lo cual no concuerda con el criterio anterior, y a 40 horas si se encontrarían los tres asfaltos en zona de agrietamiento, aunque el asfalto base en una peor situación.

5.2. Recomendaciones

1. Ampliar el estudio utilizando diferentes porcentajes de rejuvenecedor, con el fin de encontrar la cantidad que permita tener el mejor comportamiento del asfalto a utilizar.
2. Complementar el estudio con otros parámetros adicionales que han sido propuestos por investigadores para el control de los ligantes asfálticos ante las temperaturas intermedias tales como: Barrido lineal de amplitud (LAS), Valor-R, y tensión en doble borde con muesca (DENT), que no fueron realizadas en esta investigación.

3. Evaluar el efecto de los rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas ante las diferentes fallas que se pueden presentar en el pavimento.

REFERENCIAS

- Anderson, A., Christensen, D., Bahia, H., Dongre, R., Sharma, M., & Antle, C. (1994). *Binder Characterization and Evaluation* (3rd ed.).
- Anderson, D., Christensen, D., & Bahia, H. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*.
- Anderson, R., King, G., Hanson, D., & Blankenship, P. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 80.
- Araya, F., González, A., Delgadillo, R., Wahr, C., García, G., & Zúñiga, R. (2012). Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. *Ingeniería de Construcción*, 27(3), 198-210.
- Arenas, H. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico* (5ta ed.). Cali: Fundación para Actividades de Investigación y Desarrollo.
- Asphalt Paving Technology 2015* (Vol. 84). (2015). Portland, Oregon.
- Bahia, H. U., & Anderson, D. (1995). *The new proposed rheological properties of asphalt binders: why are they required and how do they compare to conventional properties*. Obtenido de The Physical Properties of Asphalt Cement Binders: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=574873>
- Boosherian, A., Mogawer, W., & Bonaquist, R. (2013). How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between rap and virgin Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, (págs. 1813-1821).

- Cuadro, C., & Osorio, J. (2012). *Construcción de las curvas maestras del mastic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y muestras recuperadas de mezclas en servicio*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Huang, S., & Zeng, M. (2007). Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems. *International Journal of Pavement Engineering*, 8.
- Jaramillo, J., León, A., Vila, R., & Villao, A. (2017). CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE ASFALTOS EMPLEADOS EN ECUADOR.
- León, H., & Arenas, L. (2003). *Tecnología del cemento asfáltico*. Popayán: Editorial FAID.
- Luis Sanabria, J. C. (2000). *EVALUACION DEL ADITIVO REJUVENECEDOR DE ASFALTOS Y PAVIMENTOS*. Obtenido de file:///C:/Users/jorge/Downloads/Evaluacion_Aditivo_Rejuvenecedor%20RESUMEN%20(1).pdf
- Mogawer, W., Austerman, A., Troy, P., Salmans, S., & Planche, J.-P. (2016). *Determination of the Binder Grade and Performance of High Percentage RAP-HMA Mixes*. Boston.
- Nikolaides, A. (Ed.). (2015). *Bituminous Mixtures and Pavements VI* (Primera ed.). Taylor & Francis Group.
- Reyes, F., Daza, C., & Rondón, H. (2012). Determinación de las fracciones Sara de asfaltos. *Revista EIA*, 47-56.
- Sanabria, L., Correa, J., Hernandez, L., & Morales, P. C. (2000). *EVALUACION DEL ADITIVO REJUVENECEDOR DE ASFALTOS Y PAVIMENTOS*. Obtenido de file:///C:/Users/jorge/Downloads/Evaluacion_Aditivo_Rejuvenecedor%20RESUMEN%20(1).pdf
- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., & Troya, H. (noviembre de 2017). ESTUDIO DEL ASFALTO ECUATORIANO A TEMPERATURAS

INTERMEDIAS CON LA TECNOLOGÍA SUPERPAVE. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

Villao, A., León, A., Jaramillo, J., & Vila, R. (2017). Caracterización reológica de asfaltos empleados en Ecuador.

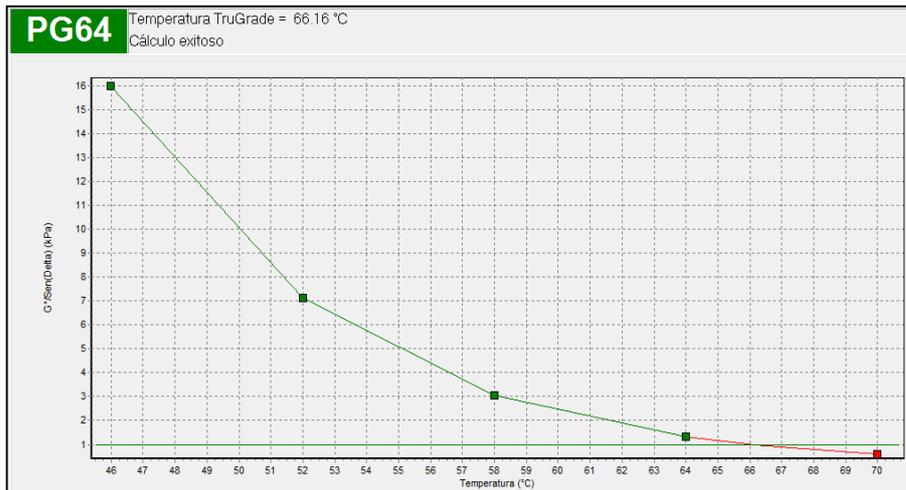
Wahr, C., Delgadillo, R., & Rodriguez, R. (2009). Estudiando la Aplicabilidad en Chile de la Guía de Diseño Empírico Mecanicista NCHRP 1-37 A. *Anales XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, (págs. 22-27). Lisboa.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR

PG64		Temperatura TruGrade = 66.16 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	16	7.12	3.05	1.33	0.602	
Notas						
Angulo de fase (°)	72.2	75.8	79.1	81.5	82.9	
Módulo complejo (kPa)	15.2	6.9	2.99	1.32	0.598	
Temperatura (°C)	45.99	52.01	58.01	64.00	69.99	
Deformación (%)	12.12	11.90	12.01	12.02	11.98	
Esfuerzo cortante (Pa)	1845.37	819.725	358.596	157.443	71.1505	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	

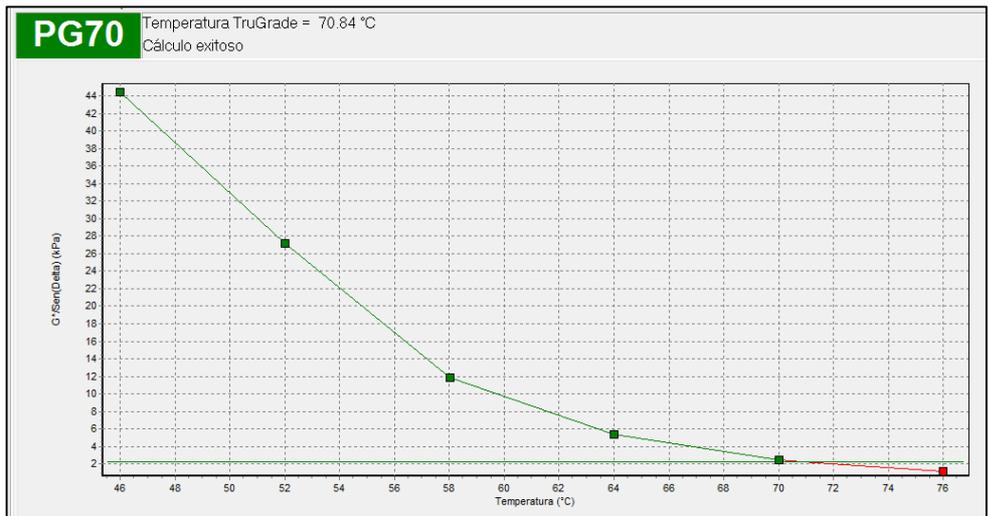
Asfalto Base (ORIGINAL)



Gráfica del Asfalto Base (ORIGINAL)

PG70		Temperatura TruGrade = 70.84 °C Cálculo exitoso					
	1	2	3	4	5	6	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	44.4	27.2	11.9	5.38	2.43	1.17	
Notas	21		21				
Angulo de fase (°)	65.4	64.3	68.3	72.2	75.7	78.5	
Módulo complejo (kPa)	40.4	24.5	11	5.12	2.36	1.15	
Temperatura (°C)	46.00	52.00	58.01	63.99	70.01	76.00	
Deformación (%)	8.06	10.12	5.77	9.78	9.75	9.93	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.68	2477.07	636.158	499.856	228.999	113.44	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	

Asfalto Base (RTFO)

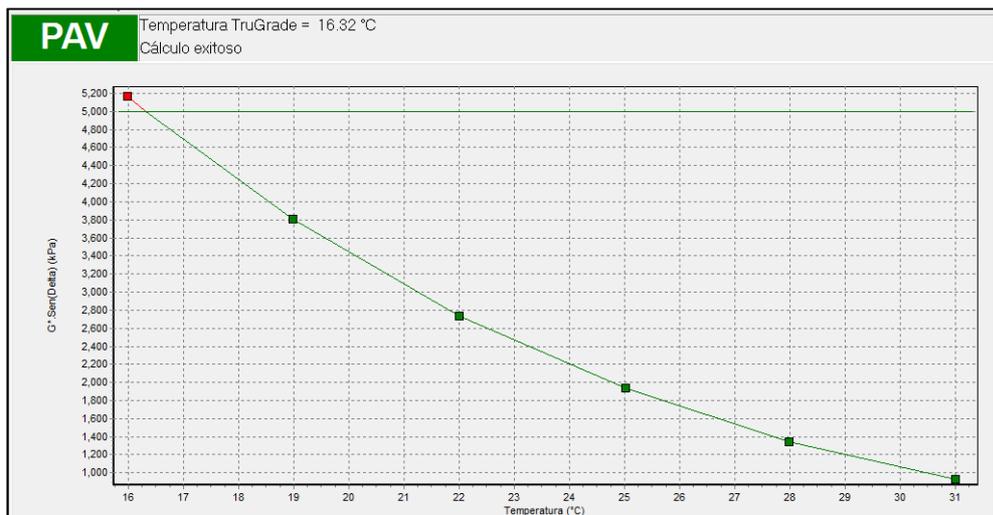


Gráfica del Asfalto Base (RTFO)

PAV Temperatura TruGrade = 16.32 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	927	1.34E3	1.93E3	2.73E3	3.8E3	5.17E3
Notas						
Angulo de fase (°)	44.2	42.3	40.4	38.5	36.7	34.9
Módulo complejo (kPa)	1.33E3	1.99E3	2.99E3	4.39E3	6.36E3	9.03E3
Temperatura (°C)	31.00	27.98	25.01	22.00	18.99	15.99
Deformación (%)	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
Esfuerzo cortante (Pa)	13321	19987.7	29927.2	44134.5	63922.6	91000.1
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

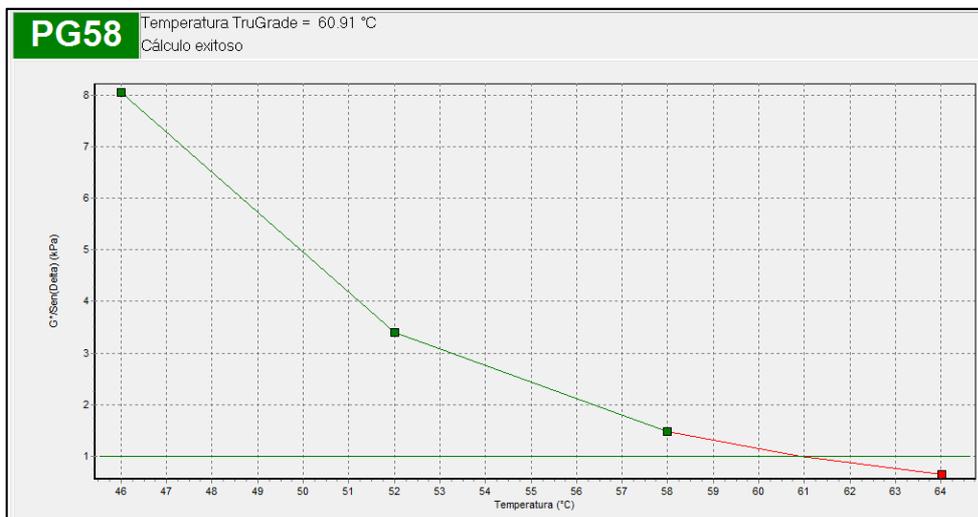
Asfalto Base (PAV)



Gráfica del Asfalto Base (PAV)

PG58		Temperatura TruGrade = 60.91 °C Cálculo exitoso			
	1	2	3	4	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	8.04	3.4	1.48	0.657	
Notas					
Angulo de fase (°)	75.4	78.7	81.2	82.9	
Módulo complejo (kPa)	7.78	3.34	1.47	0.652	
Temperatura (°C)	46.00	52.00	58.00	64.01	
Deformación (%)	12.14	11.99	12.03	11.98	
Esfuerzo cortante (Pa)	944.01	398.974	175.512	77.5868	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	

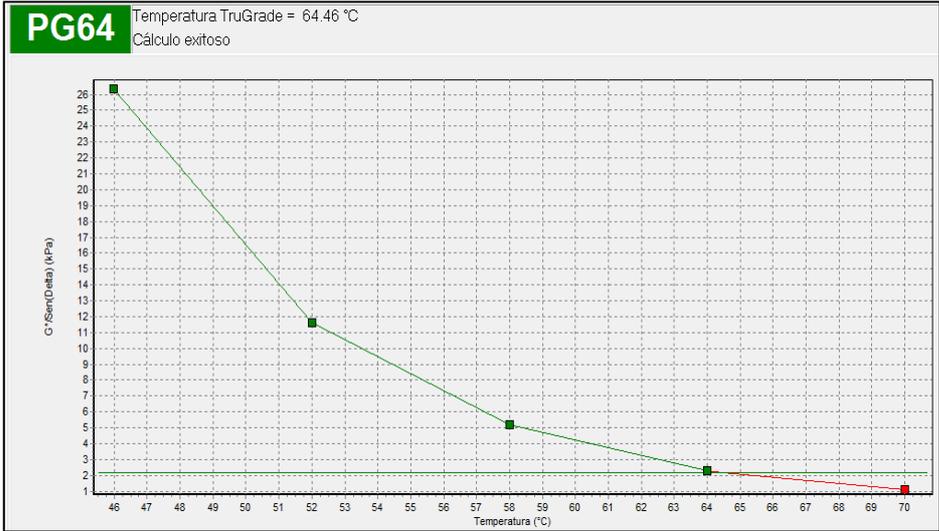
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (ORIGINAL)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor A (ORIGINAL)

PG64		Temperatura TruGrade = 64.46 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	26.3	11.6	5.2	2.33	1.12	
Notas						
Angulo de fase (°)	65.6	69.3	72.9	76.4	79.2	
Módulo complejo (kPa)	24	10.9	4.97	2.26	1.1	
Temperatura (°C)	45.99	52.00	58.01	64.01	70.00	
Deformación (%)	10.08	9.93	10.01	10.00	10.02	
Esfuerzo cortante (Pa)	2414.28	1080.15	496.448	225.048	109.169	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	28/11/201	28/11/201	28/11/201	28/11/201	28/11/201	

Asfalto Base con Rejuvenecedor A (RTFO)

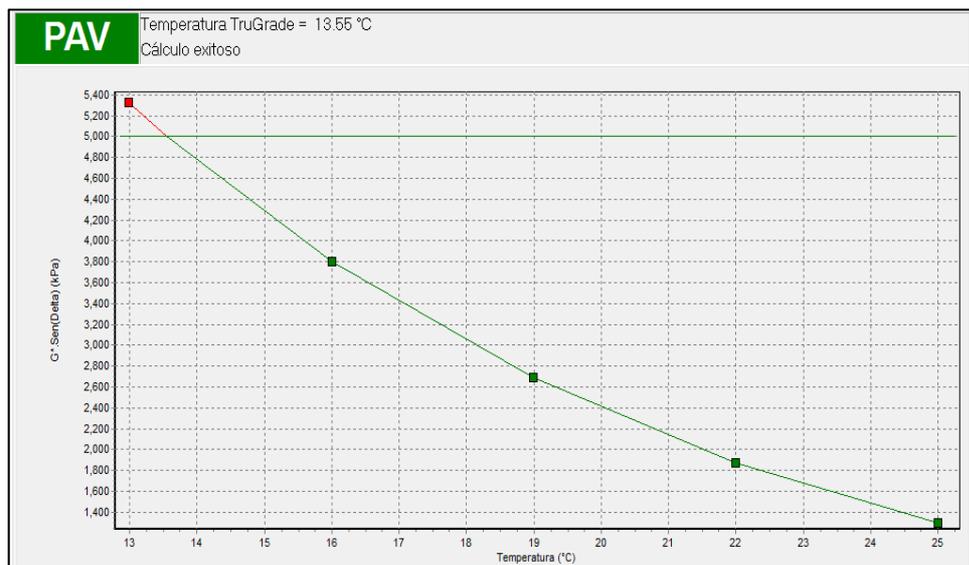


Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor A (RTFO)

PAV Temperatura TruGrade = 13.55 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G* Sen(Delta) (kPa)	1.3E3	1.87E3	2.69E3	3.81E3	5.32E3
Notas					
Angulo de fase (°)	43.9	42.1	40.2	38.3	36.4
Módulo complejo (kPa)	1.88E3	2.79E3	4.16E3	6.14E3	8.97E3
Temperatura (°C)	25.00	22.00	18.99	16.00	12.99
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Esfuerzo cortante (Pa)	18853.5	28003.8	41840.7	61779.8	90258.5
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

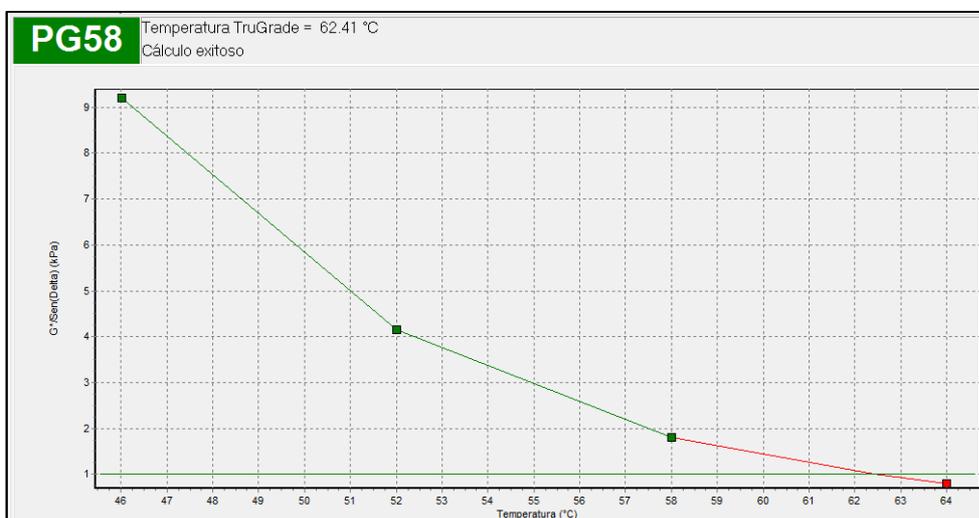
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (PAV)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor A (PAV)

PG58	Temperatura TruGrade = 62.41 °C			
	Cálculo exitoso			
	1	2	3	4
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*/Sen(Delta) (kPa)	9.2	4.15	1.81	0.808
Notas				
Angulo de fase (°)	74.8	77.9	80.9	83.5
Módulo complejo (kPa)	8.87	4.06	1.79	0.803
Temperatura (°C)	46.01	52.01	58.00	63.99
Deformación (%)	12.01	11.98	12.00	11.93
Esfuerzo cortante (Pa)	1064.38	485.441	213.604	95.3337
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

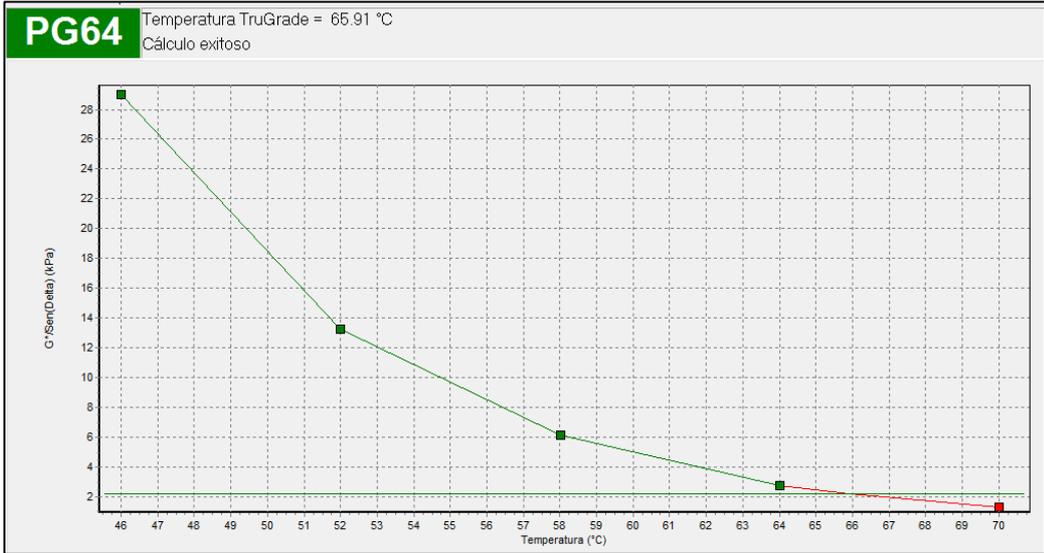
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (ORIGINAL)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (ORIGINAL)

PG64	Temperatura TruGrade = 65.91 °C				
	Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*/Sen(Delta) (kPa)	29	13.3	6.15	2.79	1.32
Notas					
Angulo de fase (°)	64.5	68.2	71.9	75.7	79.1
Módulo complejo (kPa)	26.2	12.3	5.84	2.7	1.3
Temperatura (°C)	46.01	52.00	58.01	64.00	70.01
Deformación (%)	10.10	9.91	10.04	9.98	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	2641.54	1219	584.962	268.713	129.287
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

Asfalto Base con Rejuvenecedor B (RTFO)

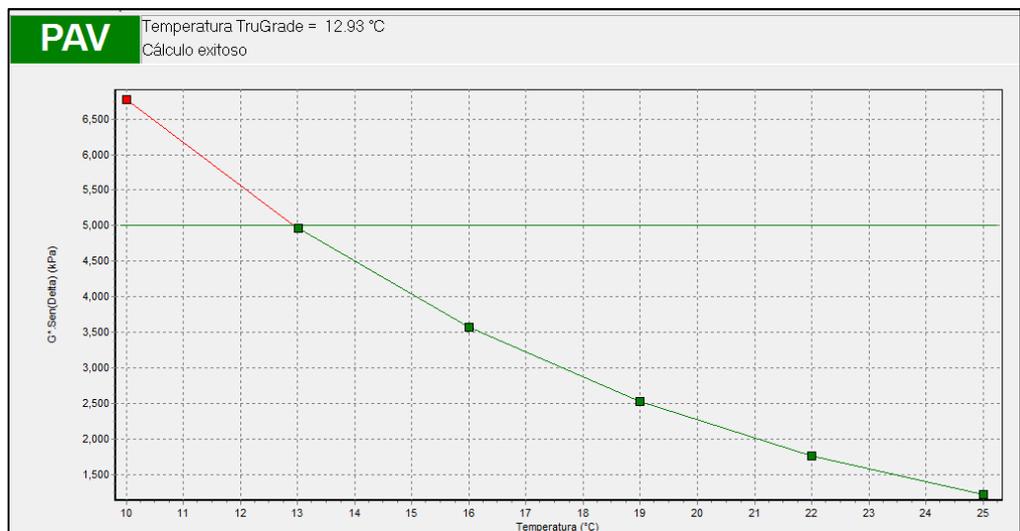


Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (RTFO)

PAV Temperatura TruGrade = 12.93 °C
Cálculo exitoso

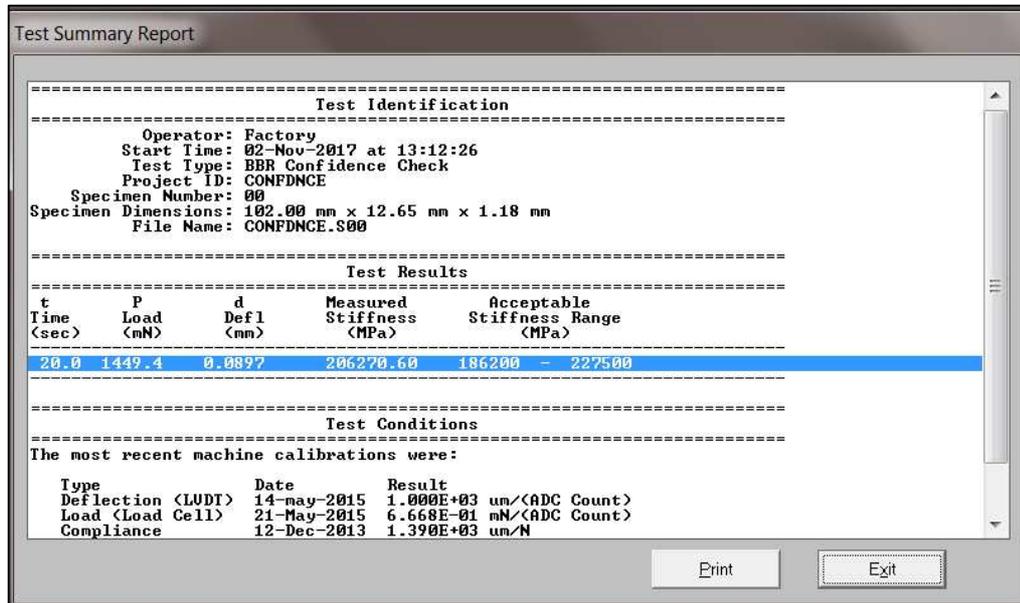
	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	1.22E3	1.77E3	2.53E3	3.57E3	4.96E3	6.77E3
Notas						21
Angulo de fase (°)	43.7	41.9	40.1	38.2	36.3	34.4
Módulo complejo (kPa)	1.77E3	2.65E3	3.94E3	5.77E3	8.37E3	1.2E4
Temperatura (°C)	25.00	22.00	19.00	16.00	13.01	10.00
Deformación (%)	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	0.83
Esfuerzo cortante (Pa)	17757.4	26668.2	39485.7	57974.1	84234.1	99368
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

Asfalto Base con Rejuvenecedor B (PAV)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (PAV)

Anexo 2. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR



Calibración del Asfalto Base (-24°C)

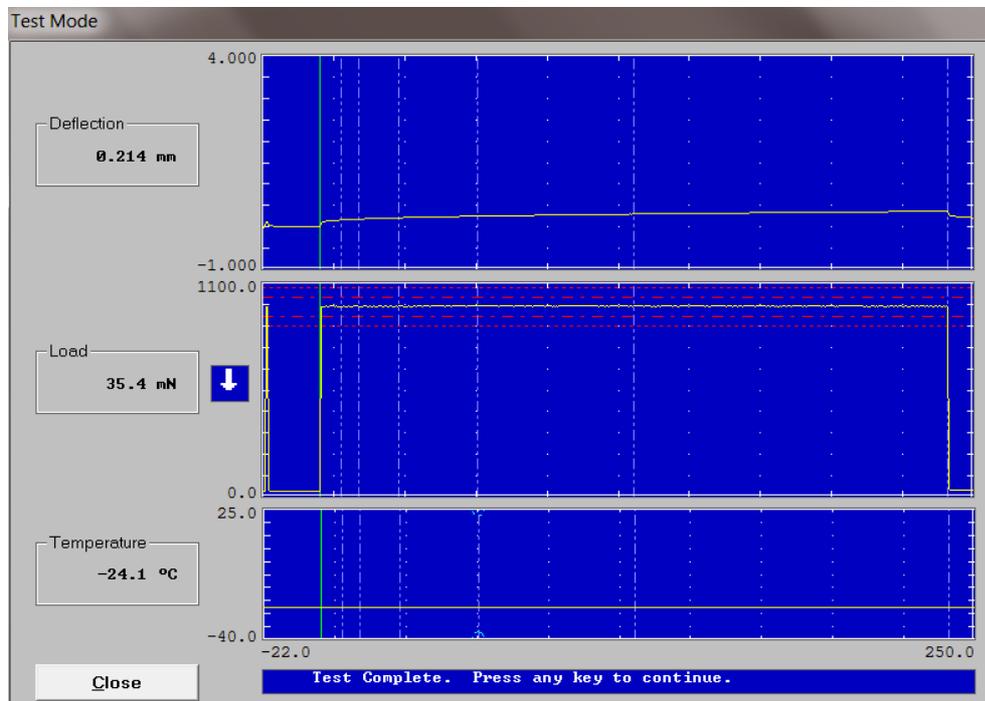


Gráfico del Asfalto Base (-24°C)

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: TESIS
 Start Time: 02-Nov-2017 at 13:19:19
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS
 Specimen Number: 22
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.36 mm
 File Name: TESIS.S22

=====

Test Results

=====

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	m-value
0.0	30.8	0.0050	--	--	--	--
0.5	977.1	0.1020	--	--	--	--
8.0	980.2	0.1631	489.8816	489.4854	-0.080879	0.178809
15.0	980.3	0.1842	433.8313	434.4735	0.148042	0.200504
30.0	980.8	0.2131	375.2386	374.9774	-0.069609	0.224426
60.0	980.4	0.2513	317.9388	318.8605	0.098016	0.245348 *
120.0	980.4	0.3002	266.2345	265.7569	-0.179383	0.272270
240.0	980.4	0.3665	218.0480	218.2340	0.085324	0.296192
250.0	35.4	0.2140	--	--	--	--

=====

Correlation Coefficient R^2 = 0.9999911

Print Exit

Asfalto Base (-24°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient R^2 = 0.9999911
 Regression Coefficients: A = 5.818815, B = -0.107042, C = -0.039734

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 977.1 and 981.5 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 980.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 1.0 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -24.1 and -24.0 C.

=====

Test Conditions

=====

This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUPT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	02-Nov-2017	2.063E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:
 TESIS -24C

Print Exit

Asfalto Base (-24°C)

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: Factory
 Start Time: 01-Nov-2017 at 14:17:02
 Test Type: BBR Confidence Check
 Project ID: CONFDNCE
 Specimen Number: 00
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 1.18 mm
 File Name: CONFDNCE.S00

=====

Test Results

=====

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Acceptable Stiffness Range <MPa>
20.0	1459.4	0.0913	204129.10	186200 - 227500

=====

Test Conditions

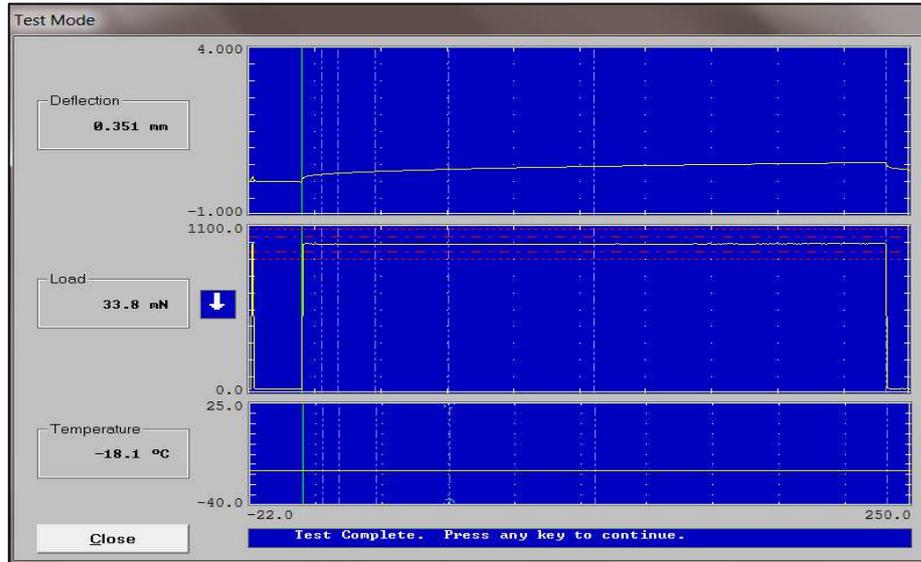
=====

The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUPT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N

Print Exit

Calibración del Asfalto Base (-18°C)



Gráfica del Asfalto Base (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: ING
 Start Time: 01-Nov-2017 at 14:26:43
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: C
 Specimen Number: .S4
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.36 mm
 File Name: C.S.S4

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	31.2	0.0067	---	---	---	---
0.5	979.7	0.1093	---	---	---	---
8.0	979.8	0.2145	372.3678	371.7403	-0.168517	0.234597
15.0	979.3	0.2509	318.1888	318.8131	0.195226	0.254070
30.0	978.9	0.3013	264.8457	265.3515	0.191003	0.295542
60.0	979.5	0.3665	217.8796	217.5922	-0.131924	0.292014 *
120.0	979.4	0.4530	176.2593	175.7928	-0.264634	0.318486
240.0	980.4	0.5722	139.6751	139.9250	0.178960	0.339958
250.0	33.8	0.3510	---	---	---	---

Correlation Coefficient R² = 0.9999835

Print Exit

Asfalto Base (-18°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient R² = 0.9999835
 Regression Coefficients: A = 5.753015, B = -0.170181, C = -0.035664

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 978.7 and 981.4 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 980.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 0.9 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 1.4 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.1 and -18.0 C.

Test Conditions

This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID ATS BBR 01, using software version 5.01.

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

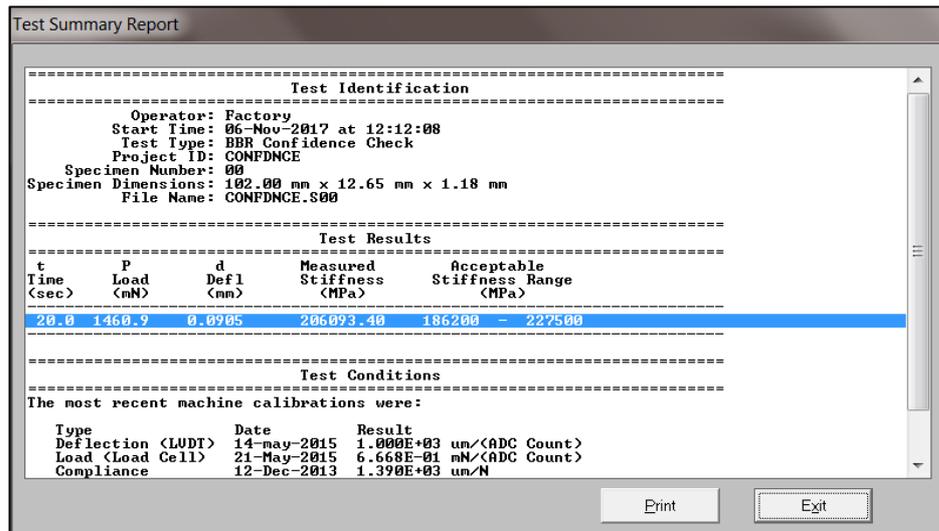
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.660E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	01-Nov-2017	2.041E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

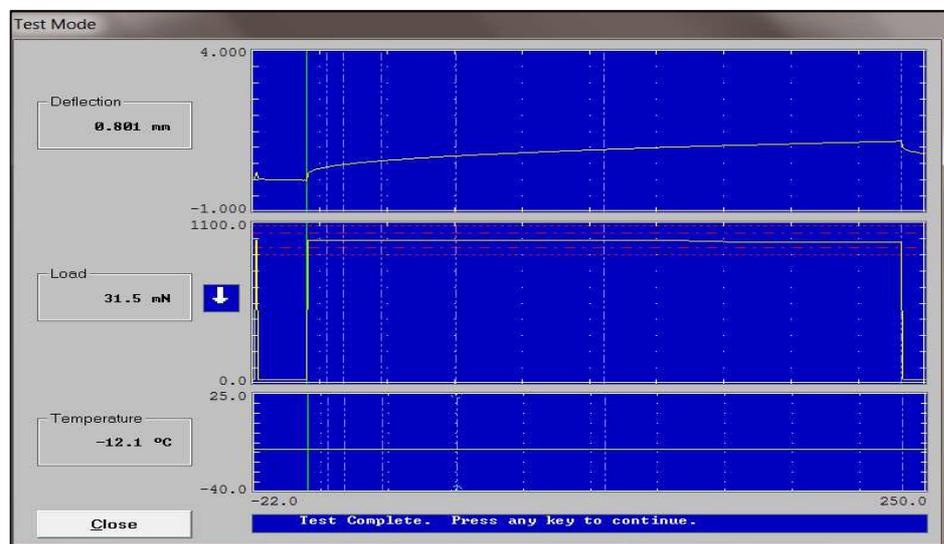
NOTES:
 C.P A -18C

Print Exit

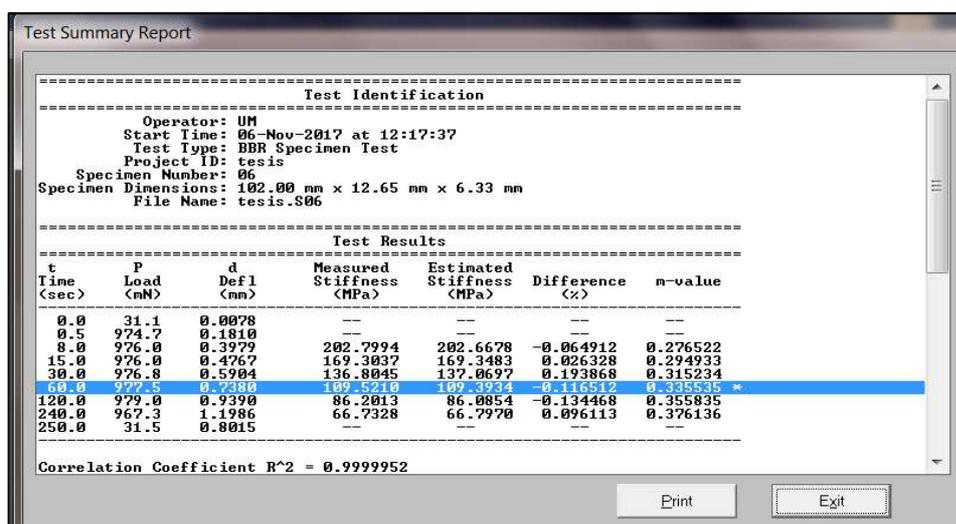
Asfalto Base (-18°C)



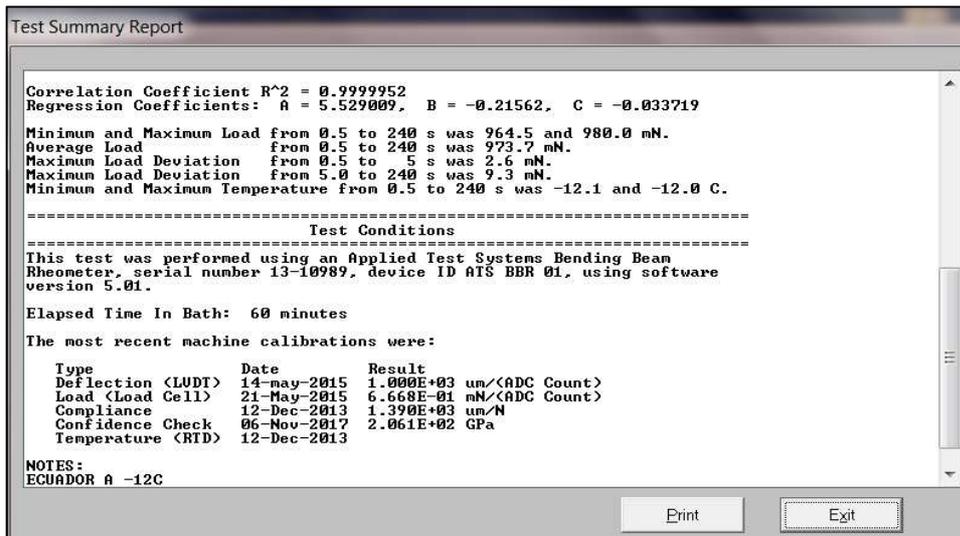
Calibración del Asfalto Base (-12°C)



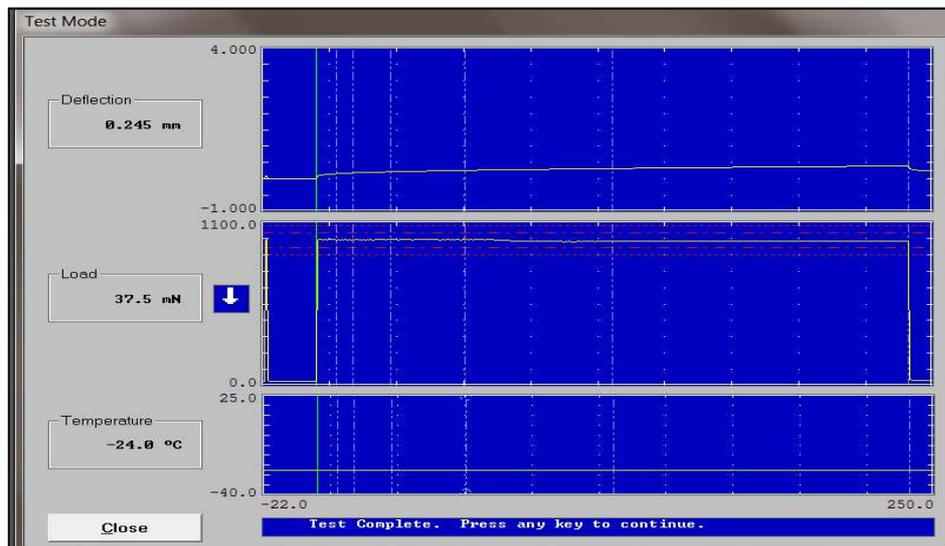
Gráfica del Asfalto Base (-12°C)



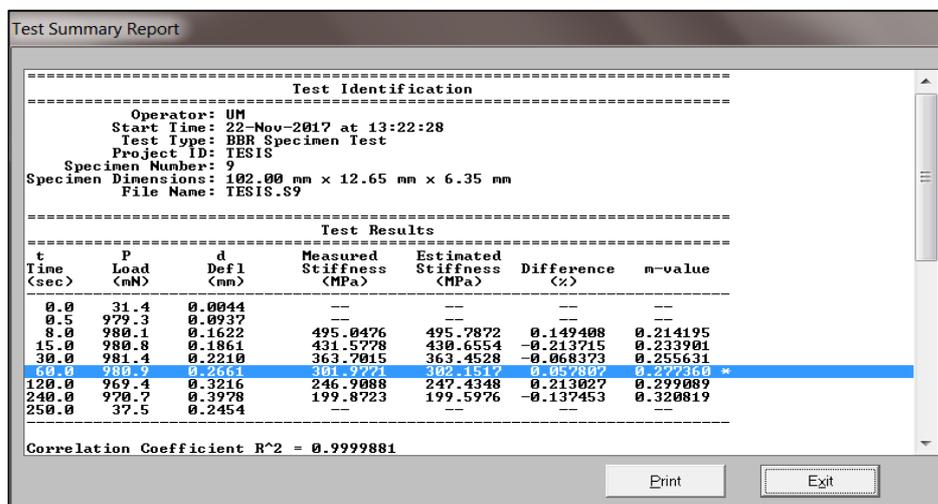
Asfalto Base (-12°C)



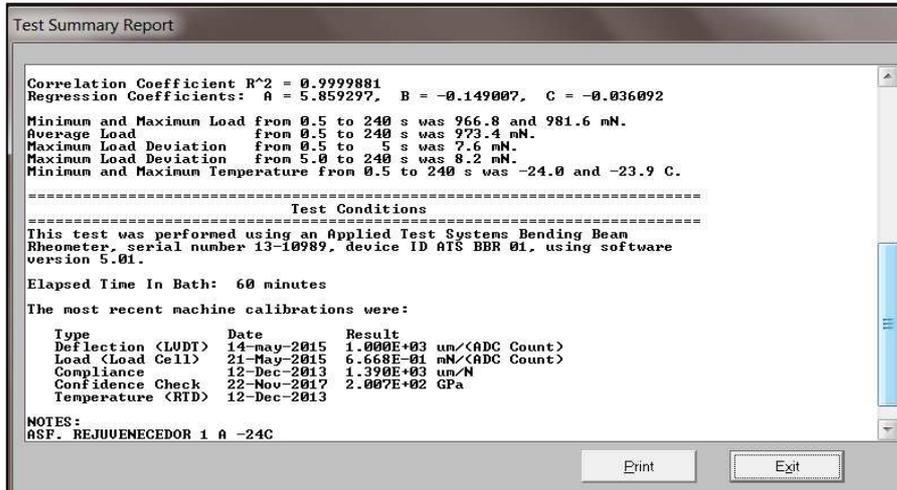
Asfalto Base (-12°C)



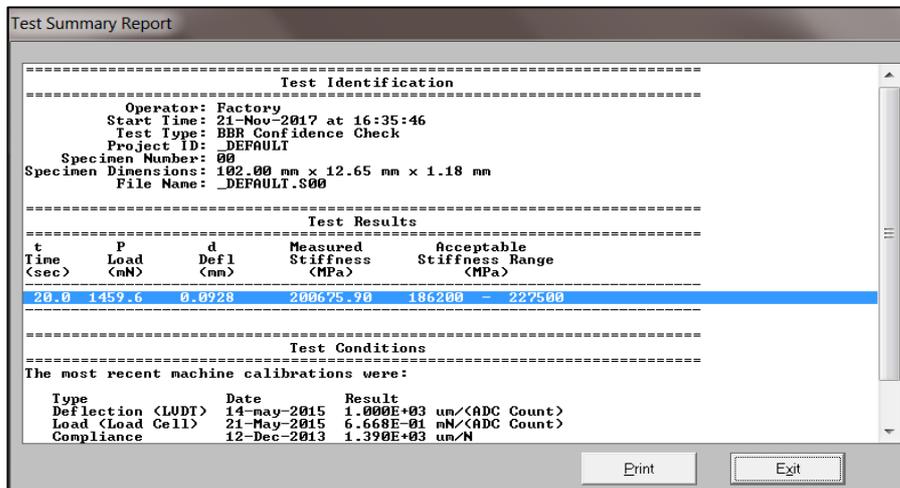
Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-24°C)



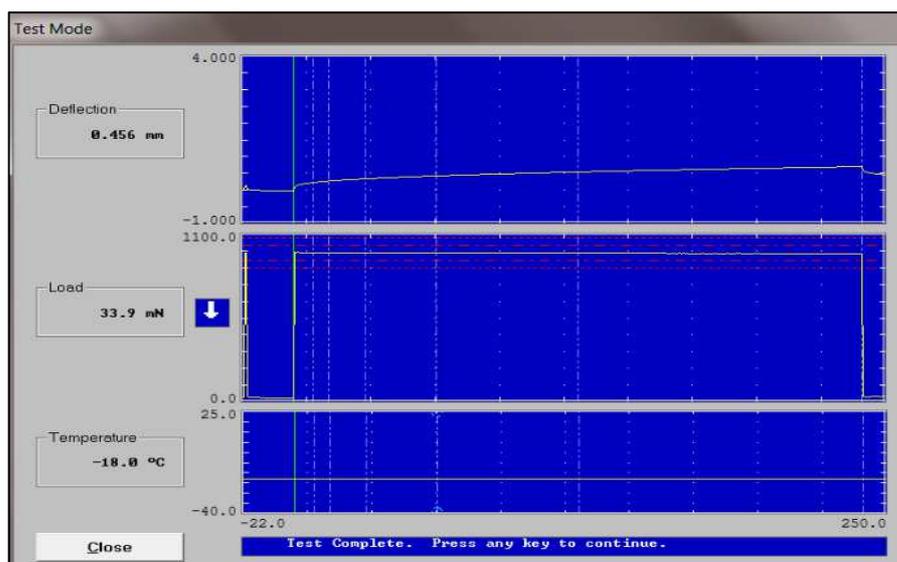
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-24°C)



Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-24°C)



Calibración del Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-18°C)



Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: UM
 Start Time: 21-Nov-2017 at 17:02:37
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS UM
 Specimen Number: 1
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.35 mm
 File Name: TESIS UM.S1

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	24.8	0.0225	---	---	---	---
0.5	980.8	0.0948	---	---	---	---
8.0	976.6	0.2262	353.7141	353.3312	-0.108244	0.284630
15.0	975.9	0.2726	293.2473	293.7539	0.172754	0.302901
30.0	976.1	0.3382	236.4245	236.4661	0.017594	0.323048
45.0	975.1	0.4257	177.4087	177.7103	0.016972	0.343158
120.0	975.1	0.5429	149.1051	146.9415	-0.111126	0.363342
240.0	973.3	0.7034	113.3417	113.4320	0.079615	0.383489
250.0	33.9	0.4555	---	---	---	---

 Correlation Coefficient R² = 0.9999966

Print Exit

Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-18°C)

Test Summary Report

 Correlation Coefficient R² = 0.9999966
 Regression Coefficients: A = 5.777937, B = -0.224189, C = -0.033464
 Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 972.8 and 980.8 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 975.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 5.8 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.8 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.1 and -18.0 C.

Test Conditions

 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LVDT)	14-May-2015	1.000E+03 un/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 un/N
Confidence Check	21-Nov-2017	2.007E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:
 Asf. con rejuvenecedor 1 a -18C

Print Exit

Asfalto Base con Rejuvenecedor A (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: Factory
 Start Time: 08-Jan-2018 at 16:00:53
 Test Type: BBR Confidence Check
 Project ID: CONFIDNCE
 Specimen Number: 00
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 1.18 mm
 File Name: CONFIDNCE.S00

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Acceptable Stiffness Range (MPa)
20.0	1452.9	0.0934	198659.70	186200 - 227500

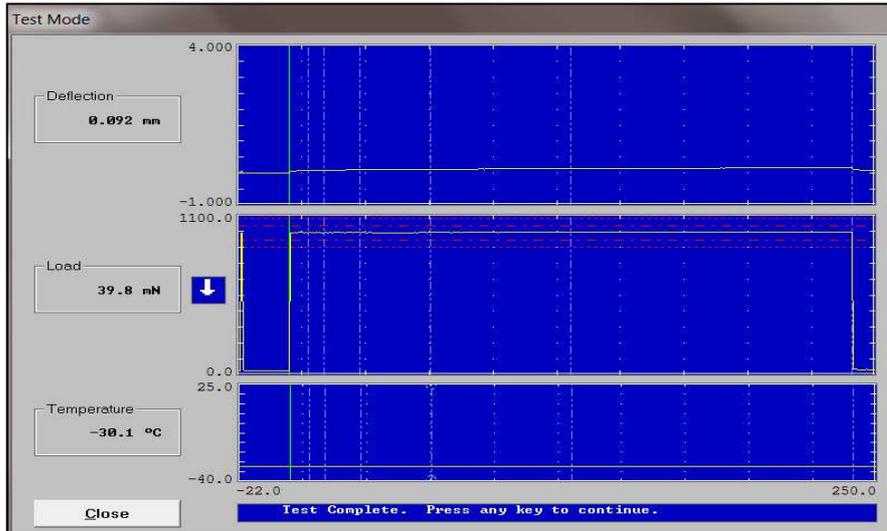
Test Conditions

 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LVDT)	14-May-2015	1.000E+03 un/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 un/N

Print Exit

Calibración del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-30°C)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-30°C)

Test Summary Report

----- Test Identification -----
 Operator: U.M
 Start Time: 08-Jan-2018 at 16:07:22
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS
 Specimen Number: 23
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.32 mm
 File Name: TESIS.S23

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	32.5	0.0019	---	---	---	---
0.5	978.5	0.0598	---	---	---	---
8.0	980.1	0.0863	944.0127	945.1774	0.123382	0.150233
15.0	980.2	0.0948	858.6453	854.9853	-0.426253	0.168847
30.0	980.7	0.1084	751.8722	755.1641	0.437820	0.189372
60.0	984.3	0.1211	639.4401	639.9262	0.007459	0.203377 *
120.0	981.6	0.1440	566.4765	564.5091	-0.347301	0.230421
240.0	982.3	0.1711	477.0793	477.7690	0.144544	0.250946
250.0	39.8	0.0917	---	---	---	---

Correlation Coefficient R² = 0.9999191

Print Exit

Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-30°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient R² = 0.9999191
 Regression Coefficients: A = 6.083384, B = -0.008659, C = -0.034091

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 978.5 and 984.0 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.1 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.4 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -30.1 and -30.0 C.

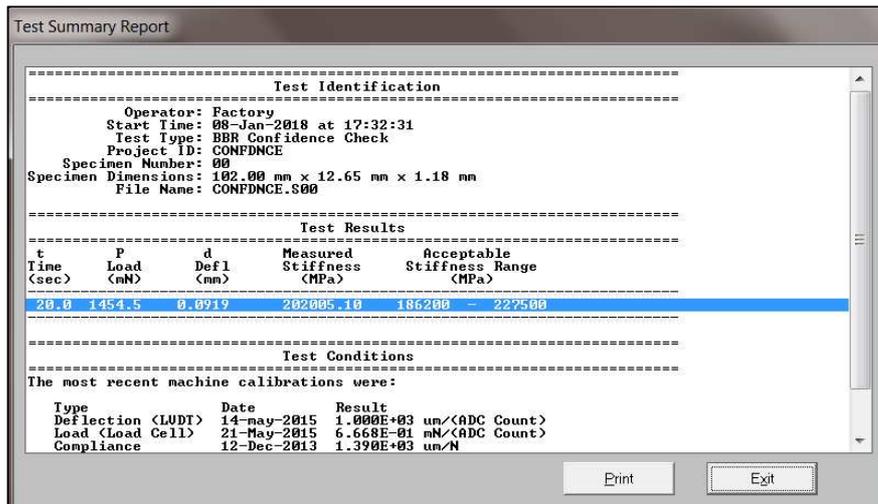
----- Test Conditions -----
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUPT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	08-Jan-2018	1.987E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

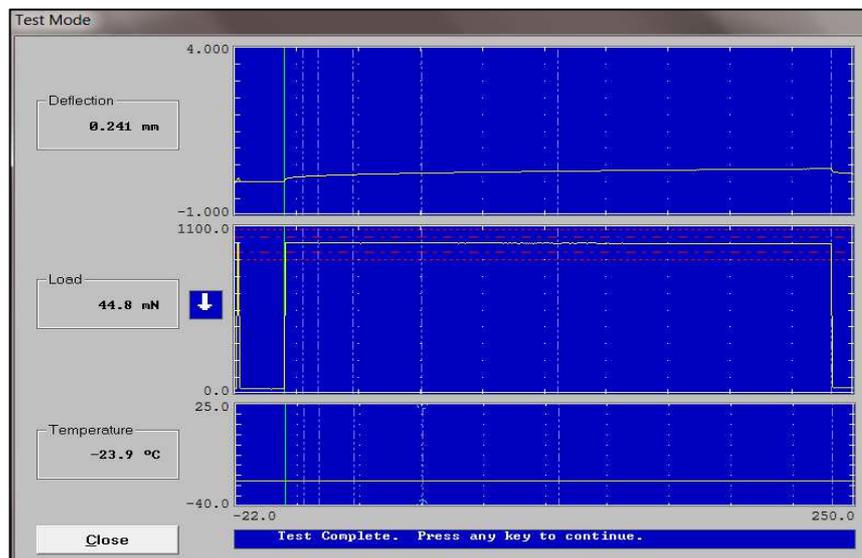
NOTES:
 REJUJENECEADOR B -30C

Print Exit

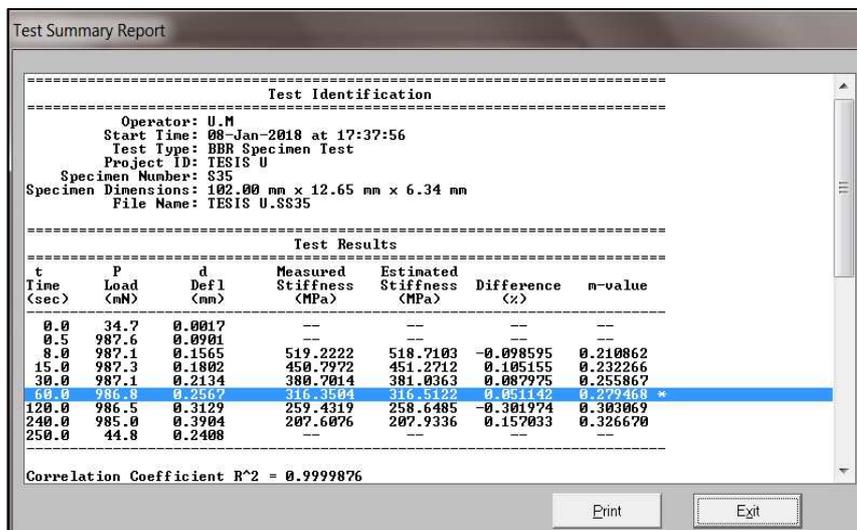
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-30°C)



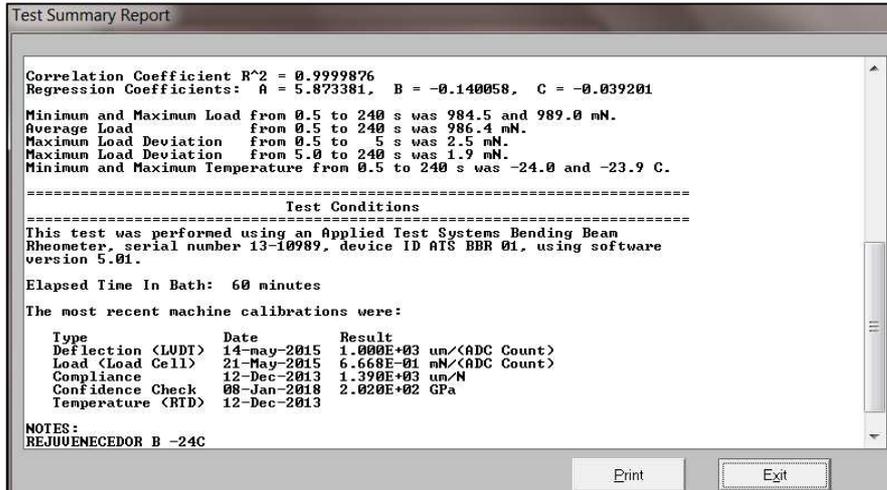
Calibración del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-24°C)



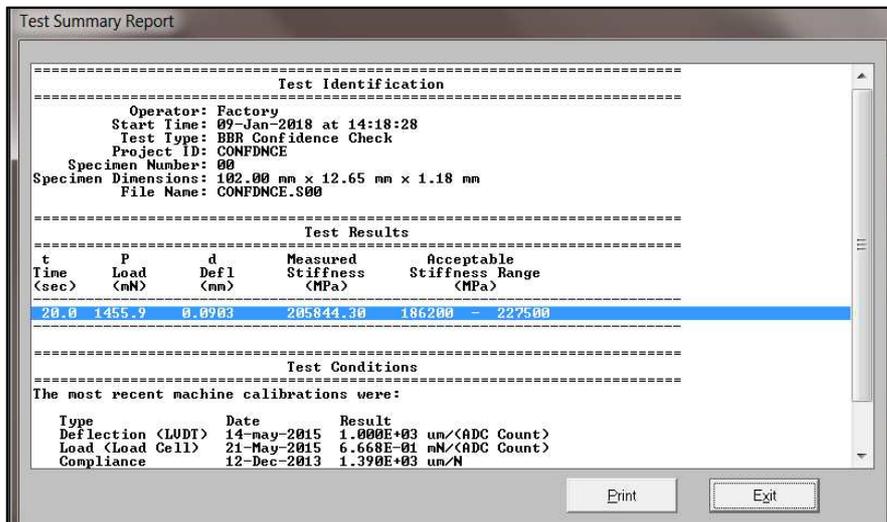
Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-24°C)



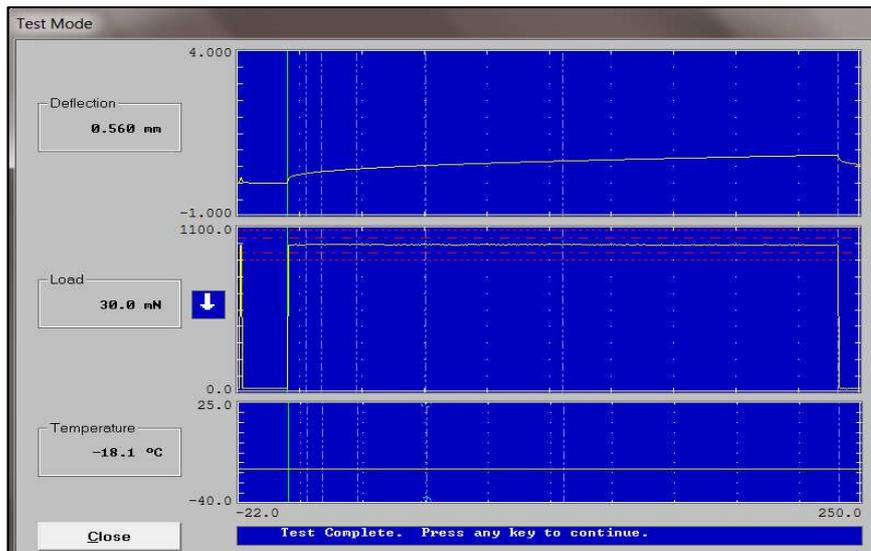
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-24°C)



Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-24°C)



Calibración del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-18°C)



Gráfica del Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: UM
 Start Time: 09-Jan-2018 at 14:25:18
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS UM
 Specimen Number: 8
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS UM.S8

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	29.3	0.0003	--	--	--	--
0.5	978.4	0.1478	--	--	--	--
8.0	980.5	0.2998	269.1538	268.8071	-0.128819	0.258659
15.0	980.9	0.3561	226.7034	227.1748	0.207966	0.276727
30.0	980.8	0.4337	186.1205	186.2338	0.060850	0.296649
45.0	981.6	0.5819	150.0613	150.1574	-0.006392	0.315372 *
120.0	980.6	0.6721	120.0709	120.0779	0.005869	0.336495
240.0	980.3	0.8546	94.3977	94.4429	0.047891	0.356417
250.0	30.0	0.5602	--	--	--	--

Correlation Coefficient R² = 0.9999933

Print Exit

Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-18°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient R² = 0.9999933
 Regression Coefficients: A = 5.636045, B = -0.198891, C = -0.033091

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 978.4 and 981.4 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 980.4 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 2.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 1.1 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.1 and -18.0 C.

Test Conditions

 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID ATS BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

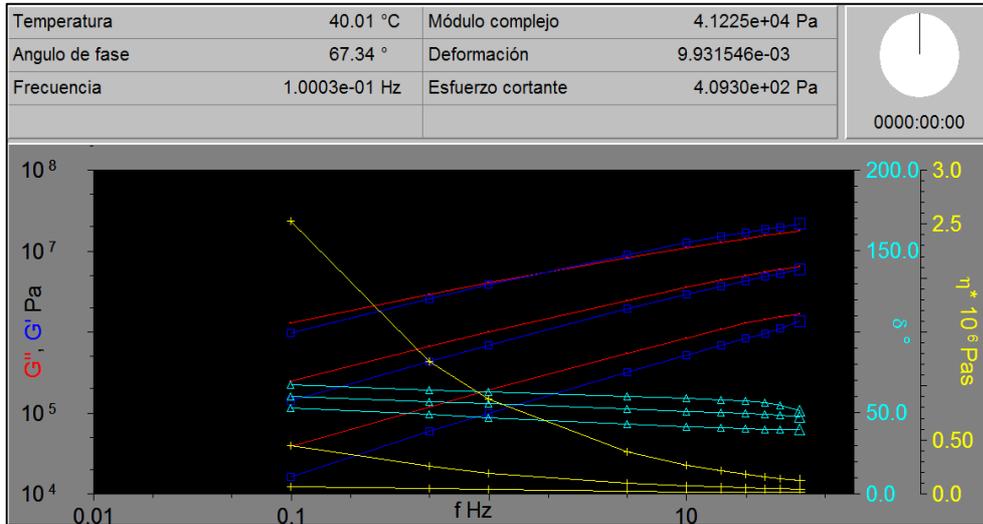
Type	Date	Result
Deflection (LUFT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	09-Jan-2018	2.058E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:
 REJUVENECADOR B -18C

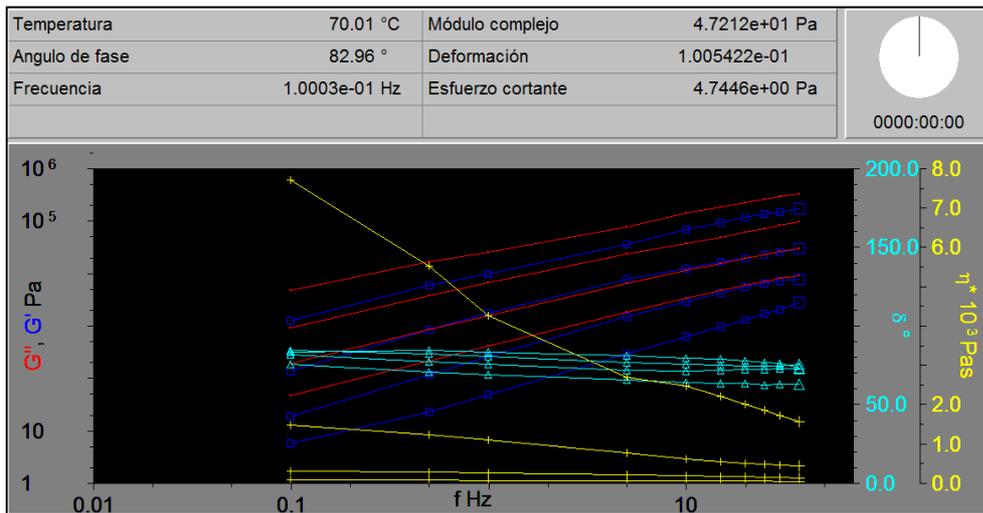
Print Exit

Asfalto Base con Rejuvenecedor B (-18°C)

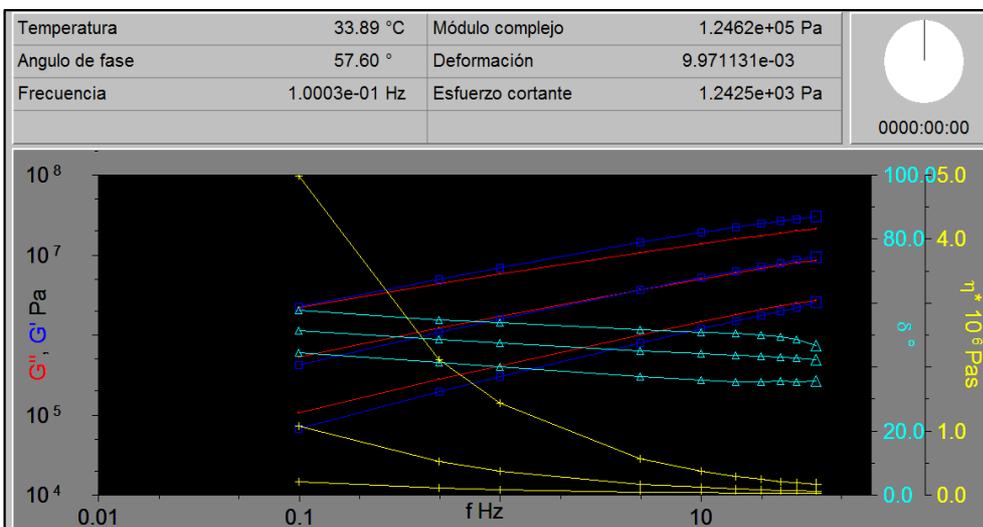
Anexo 3. Curvas Maestras del programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR



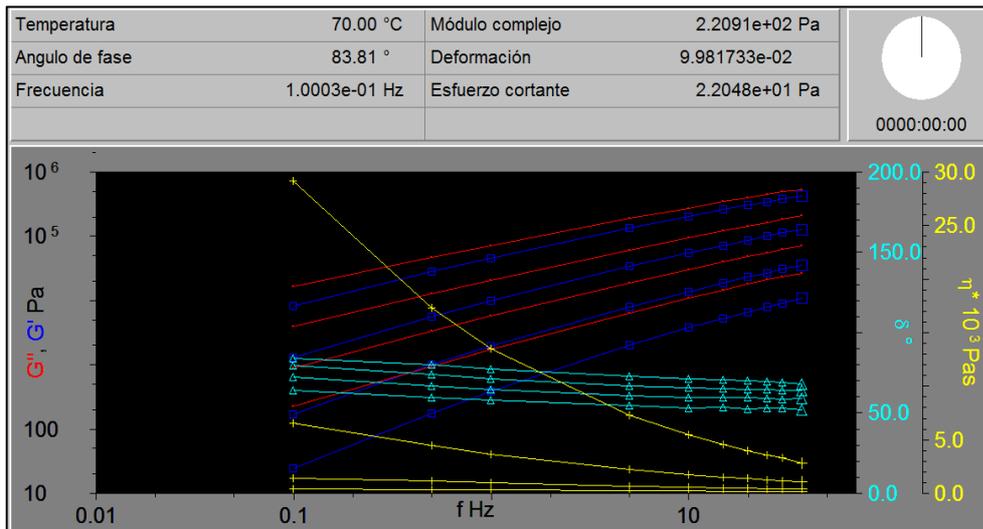
Asfalto Base (ORIGINAL). Temperaturas: 10-30 °C.



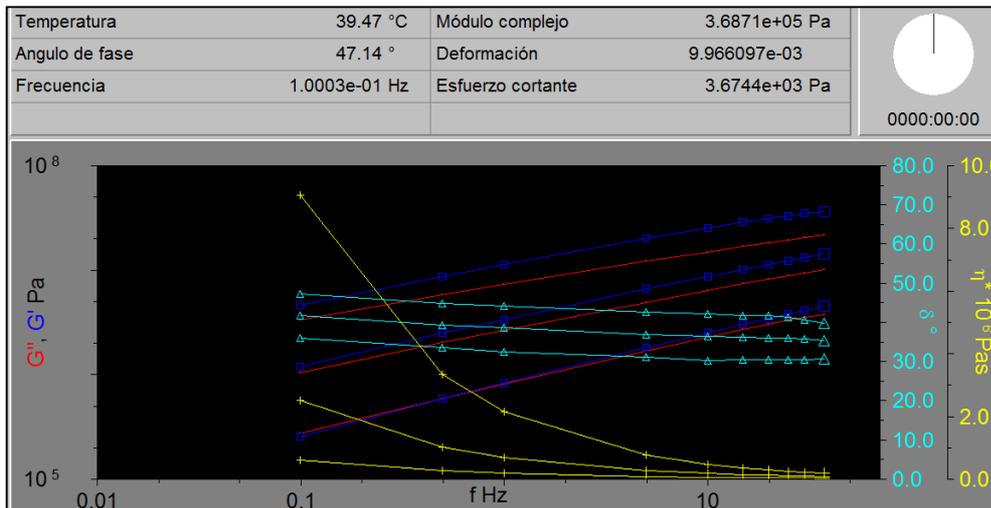
Asfalto Base (ORIGINAL). Temperaturas: 40-70 °C.



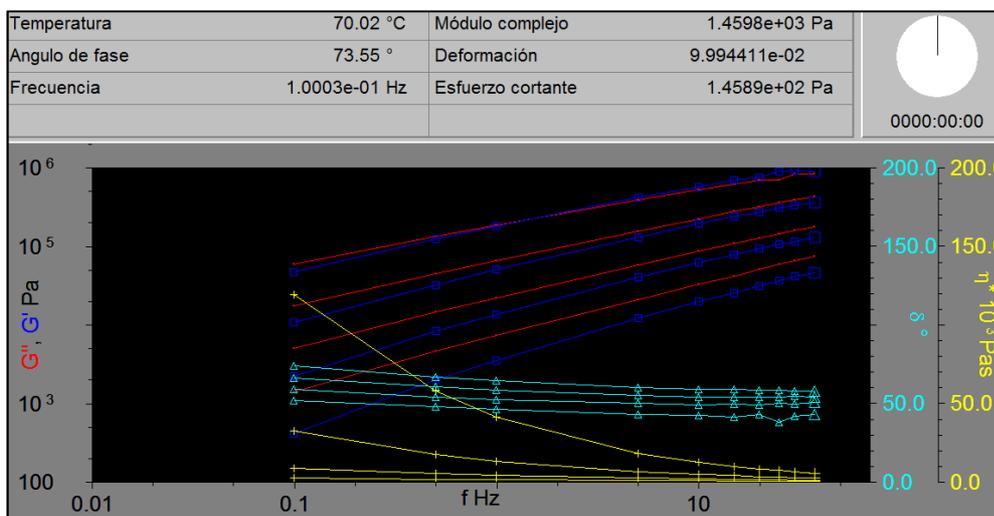
Asfalto Base (RTFO). Temperaturas: 10-30 °C.



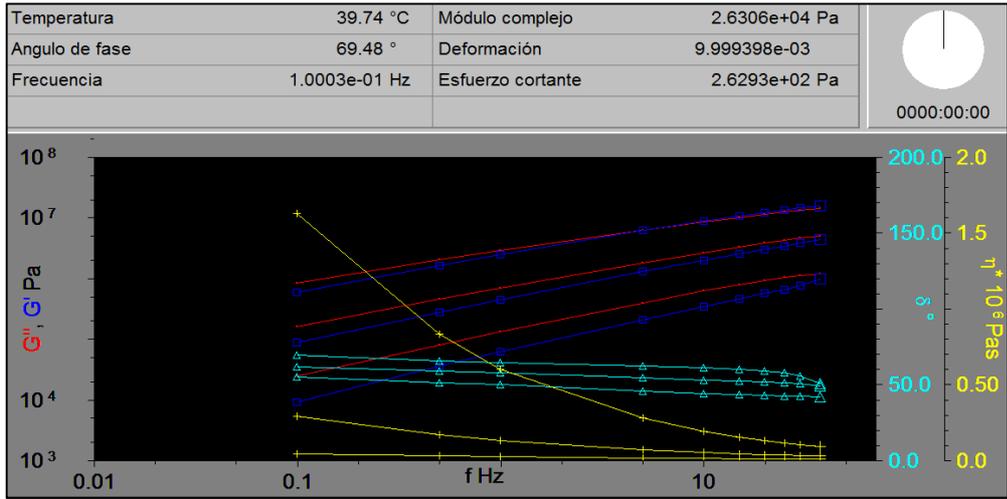
Asfalto Base (RTFO). Temperaturas: 40-70 °C.



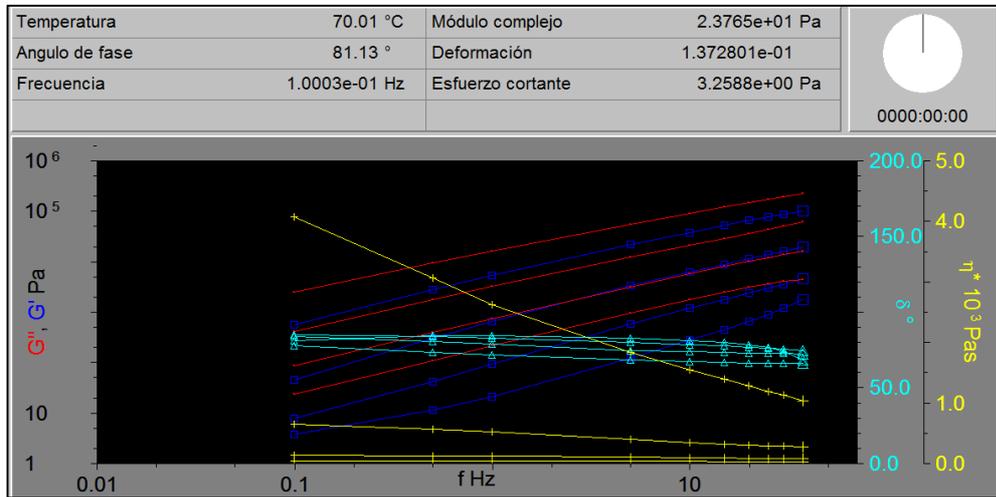
Asfalto Base (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



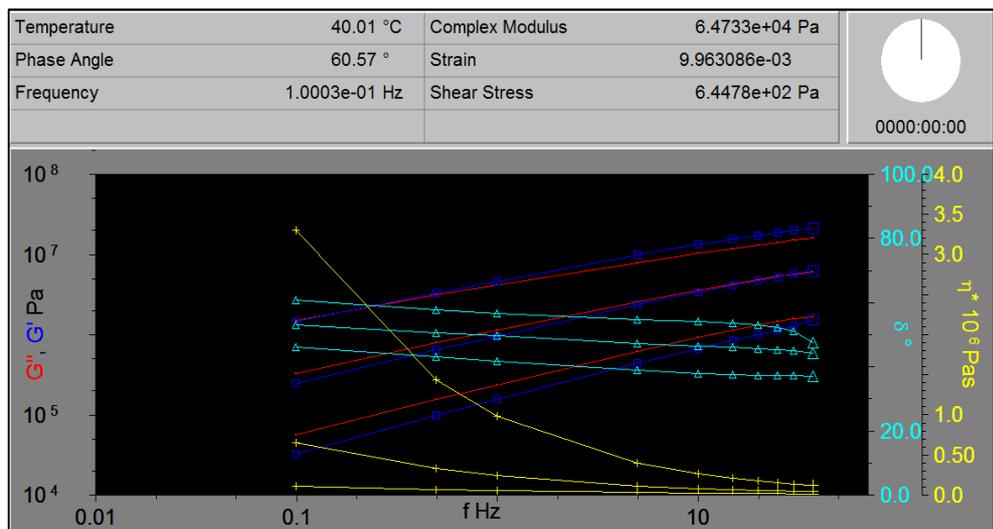
Asfalto Base (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



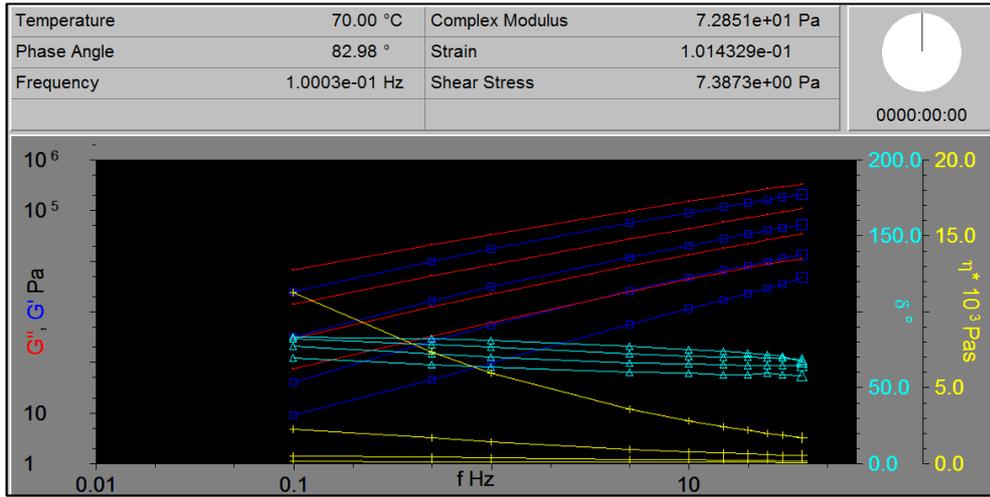
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (ORIGINAL). Temperaturas: 10-30 °C.



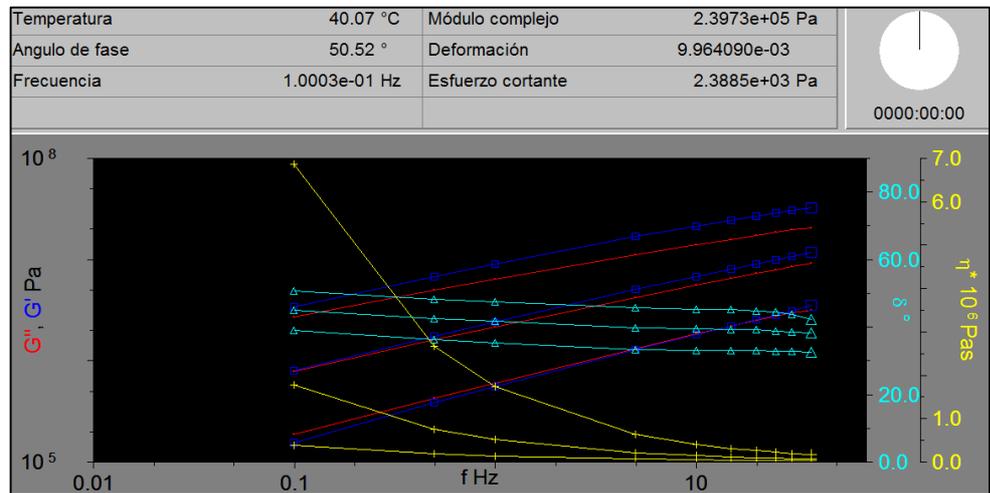
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (ORIGINAL). Temperaturas: 40-70 °C.



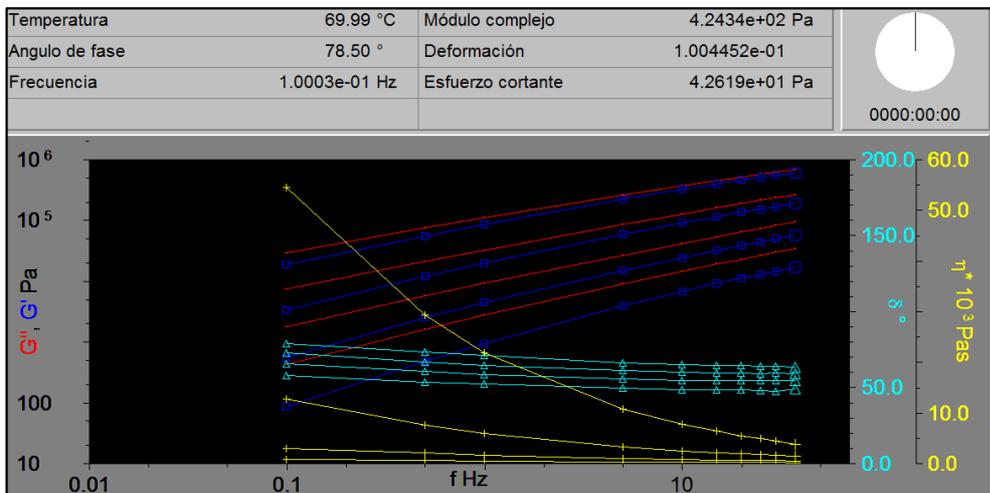
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (RTFO). Temperaturas: 10-30 °C.



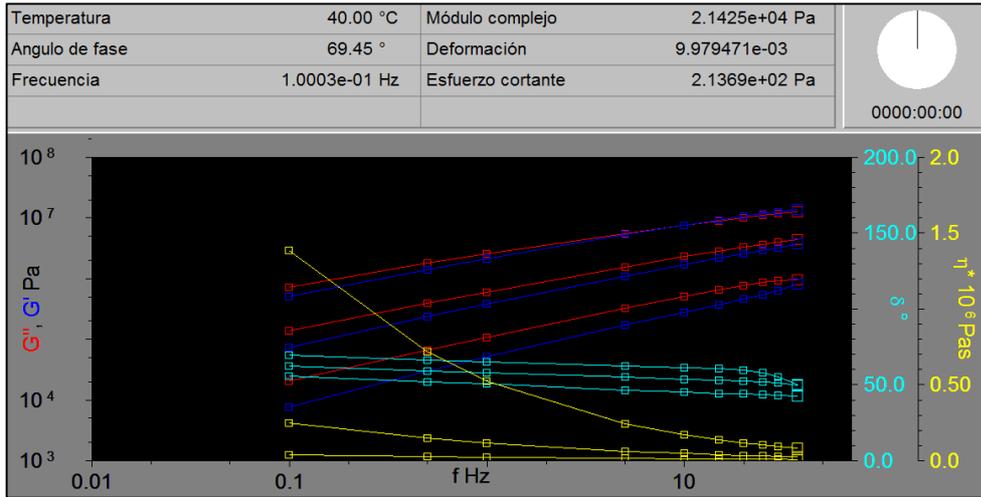
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (RTFO). Temperaturas: 40-70 °C.



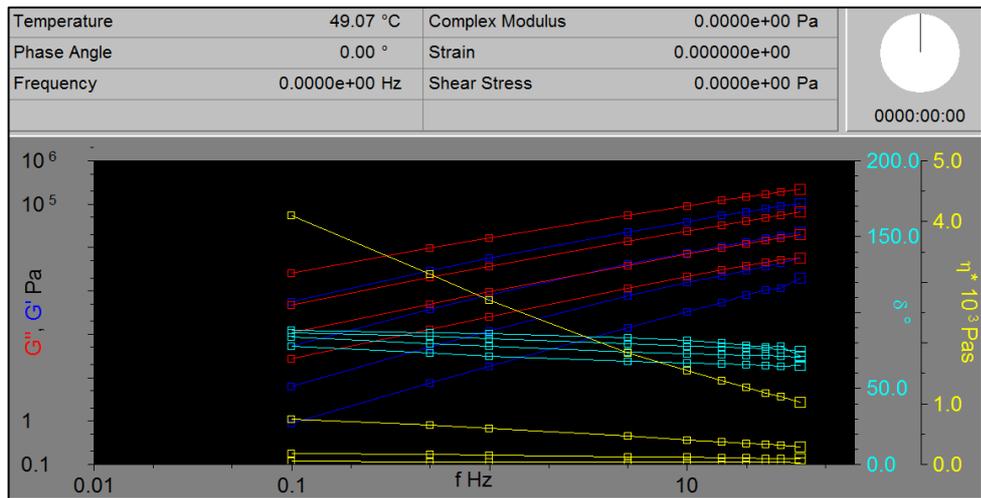
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



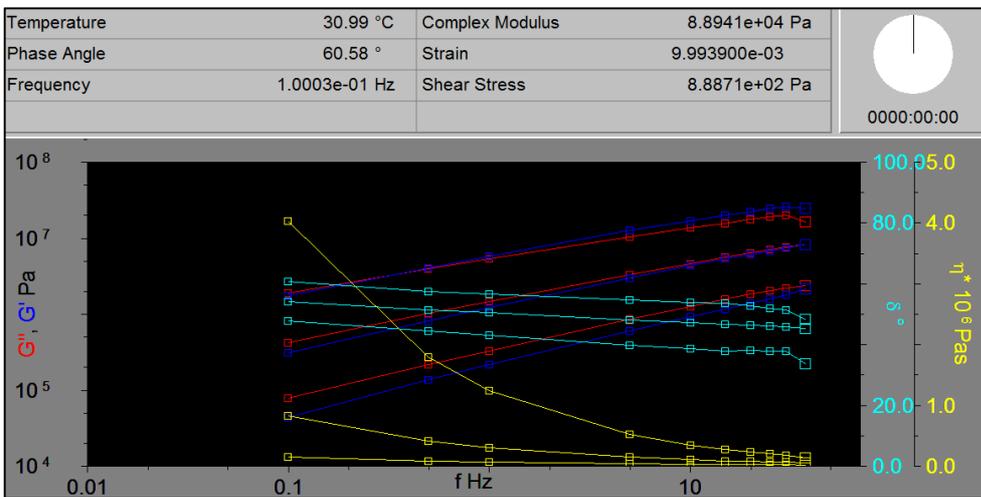
Asfalto Base con Rejuvenecedor A (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



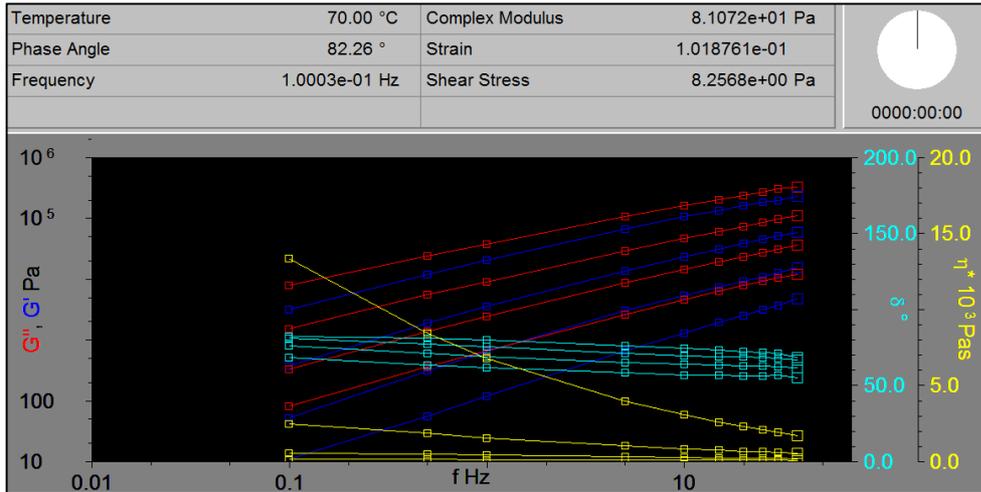
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (ORIGINAL). Temperaturas: 10-30 °C.



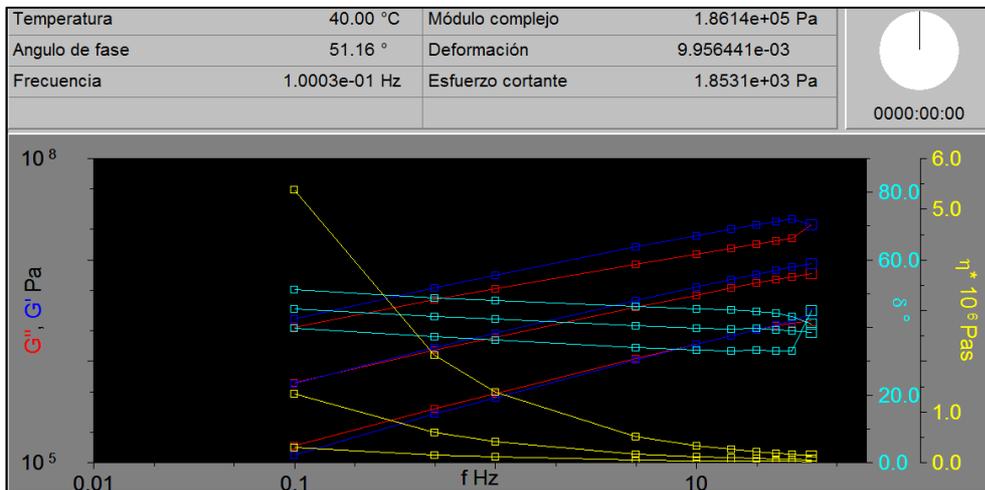
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (ORIGINAL). Temperaturas: 40-70 °C.



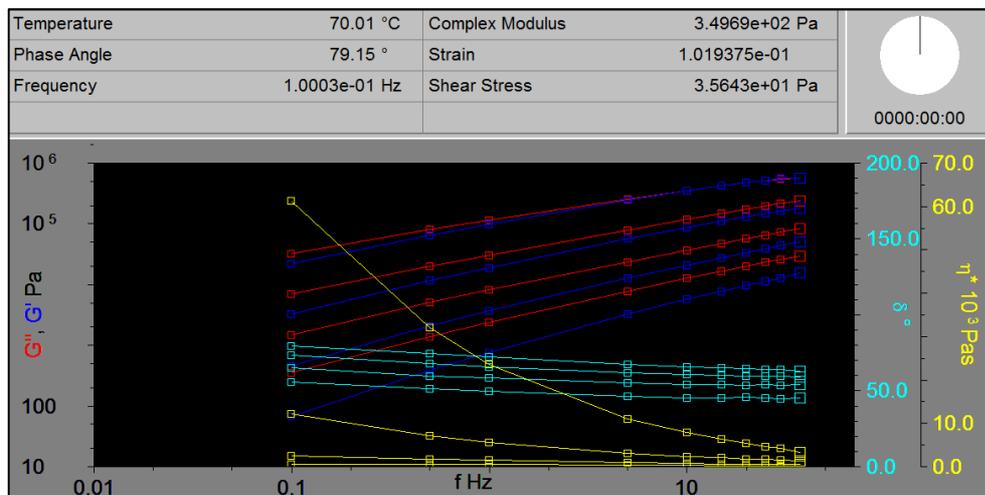
Asfalto Base con Rejuvenecedor B (RTFO). Temperaturas: 10-30 °C.



Asfalto Base con Rejuvenecedor B (RTFO). Temperaturas: 40-70 °C.



Asfalto Base con Rejuvenecedor B (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



Asfalto Base con Rejuvenecedor B (PAV). Temperaturas: 40-70



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotras, **Márquez Cueva, María Fernanda y Ureta Chalén, Nancy Esthefany**, con C.C: # **1105199887** y # **0926602475** autoras del trabajo de titulación: **Estudio del efecto de rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **28** de Febrero del **2018**

f. _____

Nombre: **Márquez Cueva María Fernanda**

C.C: **1105199887**

f. _____

Nombre: **Ureta Chalén Nancy Esthefany**

C.C: **0926602475**



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Estudio del efecto de rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano		
AUTOR(ES)	María Fernanda Máquez Cueva - Nancy Esthefany Ureta Chalén		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Rolando Vila Romaní		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	28 de Febrero de 2018	No. DE PÁGINAS:	98
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	<i>Rejuvenecedores, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos, envejecimiento, curvas maestras, diagrama de Black, ΔT_c, Kandhal, Glover-Rowe.</i>		
RESUMEN:	<p>En el presente trabajo de investigación se busca evaluar la implementación de dos aditivos rejuvenecedores aplicados directamente sobre un asfalto base procedente de la Refinería de Esmeraldas, denominados como Rejuvenecedor A y Rejuvenecedor B, para analizar los posibles cambios de las propiedades del cemento asfáltico. Así mismo, se realiza la caracterización reológica a los tres ligantes asfálticos por medio de pruebas avanzadas utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR) y un reómetro de viga en flexión (BBR), en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y envejecimiento secundario (PAV). Para cada uno de los asfaltos estudiados se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio que permitieron realizar la clasificación por grado de viscosidad (AC), la clasificación por grado de desempeño (PG), según la metodología Superpave de acuerdo a las normas correspondientes y nuevos parámetros adicionales que proporcionen información del posible desempeño de los ligantes asfálticos en las carreteras durante su vida útil.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	+593-9-92732859	E-mail: esthefany.ureta@gmail.com E-mail: fernanda_marquezc94@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Glas Cevallos Clara		
	Teléfono: +593-9-84616792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			