



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

“CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADA DE
ASFALTOS”

AUTORES:

León Arias, Angie Andrea
Villao Franco, Ariana Katherine

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL

**TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Angie Andrea León Arias y Ariana Katherine Villao Franco**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, **Angie Andrea León Arias y Ariana Katherine Villao Franco**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, **Caracterización reológica avanzada de asfaltos** 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 mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2017

LA AUTORA

LA AUTORA

León Arias, Angie Andrea

Villao Franco, Ariana Katherine



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotras, **Angie Andrea León Arias y Ariana Katherine Villao Franco**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Caracterización reológica avanzada de asfaltos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de marzo del año 2017

LA AUTORA

LA AUTORA

León Arias, Angie Andrea

Villao Franco, Ariana Katherine



**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. Gustavo García Caputi
OPONENTE**

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

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por ser mi guía y por darme la fuerza necesaria para culminar esta etapa de mi vida. A mi madre, quien me da el aliento necesario para continuar mi camino, protegiéndome en todo momento y sé que desde el cielo estará orgullosa de mí por esta meta alcanzada. También agradezco inmensamente a mi papá, ejemplo de fortaleza, lucha, constancia y por ser mi pilar fundamental todos estos años, brindándome su apoyo incondicional.

Quiero expresar mi total gratitud a todos los docentes que aportaron en mi preparación universitaria, en especial a mi tutor, PhD. Ing. Rolando Vila, por ser un gran profesor durante mi etapa estudiantil y por dedicar su tiempo junto con sus conocimientos en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Al Ing. José Jaramillo, por el apoyo incondicional otorgado en este tiempo y por ofrecer sus conocimientos sin ningún interés alguno para la ejecución del trabajo.

A mi compañera de tesis por la paciencia brindada mutuamente y por su dedicación todos estos meses.

Angie Andrea León Arias

AGRADECIMIENTO

En primera instancia, quiero agradecer a Dios por darme sabiduría y fuerza en todo momento, sin perder nunca la Fe.

A mi padre, Héctor, por ser ejemplo de perseverancia, lucha y constancia, por el valor demostrado de salir adelante sin importar los obstáculos que se presenten y sobre todo, por su infinito amor y apoyo incondicional. A mi madre, Arianna, por la confianza brindada sin medida, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

A mi tutor de tesis, PhD. Ing. Rolando Vila, por abrirme las puertas del laboratorio de asfaltos y permitirme realizar tan importante proyecto de titulación bajo su supervisión, una persona admirable a quien también agradezco por las enseñanzas adquiridas tanto en mi formación académica como en el proceso de titulación.

Al Ing. José Jaramillo, quien desde un principio y durante el proceso de nuestro proyecto de titulación nos brindó su tiempo y apoyo de manera desinteresada.

A mi compañera de tesis, por su amistad y dedicación durante el proceso de titulación.

Ariana Villao Franco

DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones brindadas desde el colegio, a mis padres Carlos y Elizabeth, por ser mis mentores e inculcarme desde pequeña que nada es imposible en esta vida y que todo se puede lograr con esfuerzo. A toda mi familia hermanos, abuelos, tíos y primos, por el apoyo brindado, siendo mi símbolo de unión y fortaleza, gracias por todo el cariño y consejos que me han dado en cada etapa de mi vida, con amor les dedico éste logro, sé que lo compartirán junto a mí con mucha alegría.

Angie Andrea León Arias

DEDICATORIA

Por sobre todas las cosas a Dios, por estar conmigo en todo momento. A mis padres, quienes han sido el cimiento en mi formación tanto académica como personal, siendo ambos el mejor ejemplo de amor y sabiduría. De igual manera a mis hermanos, Héctor y Lucas, por el infinito afecto y cariño mutuo. A mi abuelito Lucas, quien en vida inculcó en mi familia la perseverancia y constancia para alcanzar nuestros sueños. Y a un pilar importante en mi vida, Christopher, quien día a día me ha brindado su amor, paciencia, siendo apoyo incondicional desde hace varios años. Mis logros se los debo a ellos y este es uno que quiero incluir.

Ariana Villao Franco

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	17
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Antecedentes.....	17
1.2. Razones que motivaron el estudio.....	18
1.3. Justificación del tema.....	18
1.4. Objetivos.....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivo específicos.....	19
1.5. Alcance.....	19
1.6. Metodología.....	20
CAPITULO II.....	22
2. ENSAYOS A CEMENTOS ASFÁLTICOS Y ASFALTOS MODIFICADOS.....	22
2.1. Cemento asfáltico, características y pruebas.....	22
2.2. Asfaltos modificados, características y pruebas.....	24
2.2.1. Cemento asfáltico modificado con polímero SBS.....	25
2.2.2. Cemento asfáltico modificado con polímero ELVALOY.....	27
2.2.3. Cemento asfáltico modificado con caucho.....	29
2.3. Pruebas convencionales para la calificación de ligantes asfálticos.....	31
2.3.1. Viscosidad.....	31
2.3.2. Penetración.....	32
2.3.4. Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT).....	34
2.3.5. Ductilidad.....	35
2.3.6. Recuperación Elástica.....	36
2.4. Pruebas para la clasificación por grado de desempeño según la tecnología Superpave.....	37
2.4.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV).....	40
2.4.2. Reómetro de corte directo (DSR).....	41
Ahuellamientos.....	42
Fatiga.....	42
2.4.3. Reómetro de viga a flexión (BBR).....	43
Agrietamiento térmico.....	44
CAPITULO III.....	45
3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD.....	45
3.1. Pruebas por viscosidad a asfaltos sin modificar.....	45
3.2. Clasificación estándar de asfaltos modificados con polímeros.....	46
3.2.1. Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con SBS.....	47
3.2.2. Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con ELVALOY.....	47
3.2.3. Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con caucho.....	47
3.3. Resultados de la clasificación por grados de desempeño del Superpave.....	48
3.3.1. Generalidades.....	48
3.3.2. Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador.....	48

3.3.3	Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Texas.	49
3.3.4	Observaciones sobre los resultados obtenidos.	50
3.3.5	Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador modificado con SBS.	51
3.3.6	Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG), asfalto Ecuador modificado con ELVALOY.	52
3.3.7	Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador modificado con caucho.	53
CAPITULO IV		55
4.	PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADA DE ASFALTOS.....	55
4.1.	Curvas maestras	55
4.1.1.	Condiciones de ensayo	55
4.1.2.	Parámetros de la curva maestra.....	57
4.1.3.	Configuración de Curvas Maestras	59
4.2	Curvas maestras obtenidos de los ligantes asfálticos sin y con modificación.....	63
4.2.1	Gráfica de ensayo de curvas maestras del asfalto de Ecuador (Original)	63
4.2.2	Gráfica de ensayo de curvas maestras de los asfalto modificado con SBS, ELVALOY y Caucho	66
4.3	Análisis de los parámetros reológicos obtenidos en las curvas maestras de los asfaltos.....	68
4.3.1	Comparación de las curvas maestras de Ecuador y Texas	68
4.3.2.	Comparación de las curvas maestras de asfaltos modificados con SBS, ELVALOY y caucho.	71
4.3.3.	Comparación de las curvas maestras de asfaltos sin y con modificación.....	75
4.4.	Diagrama de Black	75
4.4.1.	Configuración de los diagramas de Black.....	76
CAPITULO V		79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
5.1	Conclusiones.....	79
5.3.	Recomendaciones.....	81

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Polímero SBS.....	25
Figura 2. Proceso de mezclado con SBS.....	26
Figura 3. Polímero ELVALOY.....	27
Figura 4. Proceso de mezclado con ELVALOY.....	28
Figura 5. Ripio de caucho.....	29
Figura 6. Proceso de mezclado don caucho.....	30
Figura 7. Ensayo en el Viscosímetro Brookfield a 60°C.....	32
Figura 8. Ensayo de penetración.....	33
Figura 9. Ensayo de punto de ablandamiento.....	34
Figura 10. Horno rotatorio RTFOT.....	35
Figura 11. Ensayo de Ductilidad a 25°C.....	36
Figura 12. Ensayo de Elongación.....	37
Figura 13. Cámara de envejecimiento de asfalto PAV.....	40
Figura 14. Muestra de asfalto en molde de silicón.....	41
Figura 15. Ensayo en el reómetro de corte dinámico (DSR).....	42
Figura 16. Equipo de Reómetro de viga a flexión.....	43
Figura 17. Ejemplo de Curva maestra de Asfalto Ecuador (RTFOT).....	56
Figura 18. Parámetros dinámicos de la curva maestra para asfaltos.....	58
Figura 19. Curva log G* vs log frecuencia: Esmeraldas (RTFOT).....	61
Figura 20. Curva maestra Asfalto de Esmeraldas (RTFOT).....	63
Figura 21. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Ecuador ...	64
Figura 22. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Texas.....	64
Figura 23. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Ecuador y Texas.....	65
Figura 24. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con SBS.....	66
Figura 25. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con ELVALOY.....	67
Figura 26. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con caucho...	67
Figura 27. Parámetros. Asfalto de Ecuador.....	69
Figura 28. Parámetros. Asfalto de Texas.....	70
Figura 29. Curvas Maestras de asfaltos en diferentes estados de envejecimiento.....	71
Figura 30. Parámetros. Asfalto de Ecuador modificado con SBS.....	72
Figura 31. Parámetros. Asfalto de Ecuador modificado con Elvaloy.....	73
Figura 32. Parámetros. Asfalto modificado con Caucho.....	74
Figura 33. Diagrama de Black. Ligante asfáltico modificado II, original.....	76
Figura 34. Diagrama de Black asfalto Ecuador original.....	77
Figura 35. Diagrama de Black asfalto Ecuador RTFOT.....	77
Figura 36. Diagrama de Black asfalto Ecuador PAV.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación INEN para cementos asfálticos. Clasificación por viscosidad a 60°C.	23
Tabla 2. Especificación ASTM para cementos asfálticos. Clasificación por viscosidad a 60°C.	24
Tabla 3. Composición del asfalto modificado con SBS. Valores en función del peso total del ligante.	25
Tabla 4. Requerimientos para asfaltos modificados con polímeros SBS Tipo IV.	26
Tabla 5. Composición del asfalto modificado con ELVALOY. Valores en función del peso total del ligante.	27
Tabla 6. Requerimientos para asfaltos modificados con polímeros ELVALOY Tipo III.	29
Tabla 7. Requerimientos para asfaltos modificados con caucho.	30
Tabla 8. Especificación AASHTO para clasificación por Superpave.	38
Tabla 9. Especificación AASHTO para clasificación por Superpave.	39
Tabla 10. Resultados de clasificación por viscosidad.	45
Tabla 11. Resultados de la clasificación de asfaltos modificados Tipo IV	47
Tabla 12. Resultados de la clasificación de asfaltos modificados Tipo III.	47
Tabla 13. Resultados de la clasificación a asfaltos modificados con caucho.	47
Tabla 14. Clasificación por grado de desempeño PG a asfalto de Ecuador con la metodología Superpave.	48
Tabla 15. Clasificación por grado de desempeño PG a asfalto de Texas con la metodología Superpave.	49
Tabla 16. Clasificación por grado de desempeño PG a asfalto modificado con SBS con tecnología Superpave.	51
Tabla 17. Clasificación por grado de desempeño PG asfalto modificado con ELVALOY con metodología Superpave.	52
Tabla 18. Clasificación por grado de desempeño PG asfalto modificado con caucho con metodología Superpave.	53
Tabla 19. Parámetros de corridas a varias temperaturas realizadas en el DSR.	60
Tabla 21. Hoja de cálculo para las gráficas de curvas maestras.	61
Tabla 22. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador.	69
Tabla 23. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador.	69
Tabla 24. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Texas.	70
Tabla 25. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Texas.	70
Tabla 26. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con SBS.	72
Tabla 27. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con SBS.	72
Tabla 28. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con ELVALOY.	73

Tabla 29. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con ELVALOY.	73
Tabla 30. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con caucho.	74
Tabla 31. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con caucho.	74
Tabla 32. Valores del parámetro R correspondientes a las curvas maestras de los diferentes tipos de asfaltos.	75
Tabla 33. Valores del parámetro t_c correspondientes a las curvas maestras de los diferentes tipos de asfaltos.	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR.....	84
Anexo 2. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR ..	94
Anexo 3. Gráfica de resultados del programa Bohlin.	120
Anexo 4. Graficas de Curvas maestras.....	130
Anexo 5. Curva maestra. Asfalto de Ecuador con caucho (PAV)	137

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza la caracterización reológica por medio de pruebas avanzadas a dos diferentes tipos de ligantes asfálticos procedentes de Ecuador y Texas, además de tres asfaltos modificados con SBS, Elvaloy y Caucho.

Para cada tipo de asfalto se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio, que permitieron realizar la clasificación por grado de viscosidad (AC) y la clasificación por grado de desempeño (PG) según la metodología Superpave de acuerdo a las normas correspondientes. Estas clasificaciones realizadas a través de diversas pruebas normalizadas, facilitaron el análisis de las características de los ligantes asfálticos por medio del envejecimiento primario y secundario que simulan el comportamiento en campo.

A partir de los resultados de las pruebas en el laboratorio se realizaron comparaciones de los diferentes tipos de asfaltos por medio de tabulaciones y graficas de curvas maestras, las cuales muestran las características de los ligantes al estar expuestos a condiciones de carga y temperatura.

Palabras Claves: Reológica, Elvaloy, SBS, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos, curvas maestras, temperatura, envejecimiento.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En diferentes carreteras del país se pueden observar numerosas fallas como el agrietamiento por fatiga (piel de cocodrilo) o por bloques que originan malestar en los usuarios. Esta realidad ha provocado que al pasar de los años se considere la implementación de nuevos métodos para el control y diseño de mezclas asfálticas lo cual incluye nuevas tecnologías de clasificación de cementos asfálticos con el fin de lograr una mayor durabilidad y evitar realizar trabajos de rehabilitación temprana.

Es importante mencionar que la preservación de un pavimento, también se encuentra ligada a los trabajos de mantenimiento que deben ser realizados en tiempos determinados y de manera escrupulosa. El deterioro de un pavimento asfáltico finalmente se presenta como respuesta a agentes externos como la magnitud y velocidad de las cargas y, a la variación del clima (temperaturas y lluvias) sin dejar de lado factores importantes como la calidad tanto del agregado mineral como del cemento asfáltico, más el proceso constructivo.

El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) desarrolló un proyecto de investigación que consiste en nuevos ensayos para medir las propiedades de los cementos asfálticos, los cuales realizan un estudio más profundo sobre la reología de estos. El producto final del Programa de Investigaciones SHRP es un nuevo sistema denominado SUPERPAVE, el cual representa una mejora en las especificaciones para materiales, diseños, análisis y predicción del comportamiento de mezclas asfálticas.

Adicionalmente, es conveniente realizar un estudio avanzado al cemento asfáltico para analizar las diferentes fases de su comportamiento:

- El comportamiento a altas temperaturas donde el asfalto se presenta mayormente como un líquido viscoso y fluye produciéndose las deformaciones plásticas.

- El comportamiento a bajas temperaturas donde el asfalto se muestra como un sólido elástico, es decir se deforma al ser cargado y retorna a su forma original al ser descargado. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva.
- El comportamiento ante temperaturas intermedias, donde resaltan las propiedades viscoelásticas, siendo precisamente estas temperaturas las predominantes en Ecuador.

1.2. Razones que motivaron el estudio

El presente trabajo pretende estudiar uno de los principales elementos de las mezclas asfálticas: el cemento asfáltico, para coadyuvar en el control y mejoras en cuanto al funcionamiento de nuestros pavimentos, los cuales en la actualidad presentan:

- Deterioros prematuros en las capas asfálticas tanto a pavimentos nuevos como rehabilitados.
- Controles de calidad insuficientes y desfasados con las mejores prácticas internacionales respecto al asfalto y a las mezclas asfálticas.

1.3. Justificación del tema

En los últimos años se han desarrollado a nivel internacional, investigaciones que han permitido entender de una mejor manera el comportamiento de los asfaltos ante los diferentes tipos de fallas. En la actualidad, para los controles de calidad de los cementos asfálticos en el Ecuador, se realizan un conjunto de ensayos empíricos establecidos en la clasificación por viscosidad, sin embargo, estos no proporcionan suficiente información que permitan entender en su totalidad, la reacción ante los esfuerzos actuantes y las variaciones de temperaturas.

Por esta razón, es importante aplicar nuevas tecnologías que proporcionen mayor información de los ligantes asfálticos. La constante investigación sobre el

comportamiento de los asfaltos permitirá lograr un mejor desempeño de las carreteras durante su vida útil, siendo este un constante problema en el país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

El objetivo de esta investigación es obtener una caracterización reológica y clasificación avanzada para un grupo de cementos asfálticos tradicionales o modificados con polímeros, utilizados a gran escala o solo a nivel experimental en el Ecuador

1.4.2. Objetivo específicos

- Clasificar los cementos asfálticos por medio de la clasificación por grado de viscosidad y grado de desempeño (PG).
- Preparar las diferentes muestras a caracterizar, dos con asfaltos tradicionales y tres con asfaltos modificados con diferentes polímeros.
- Realizar las pruebas de acuerdo a los procedimientos vigentes convencionales y Superpave.
- Realizar pruebas de caracterización avanzada: Curvas Maestras y Diagrama de Black, que mejoren la comprensión del comportamiento de los cementos asfálticos.
- Analizar y comparar los resultados que permitan hacer recomendaciones para la inclusión de la tecnología Superpave en el Ecuador.

1.5. Alcance

Se estudiarán cinco tipos de asfaltos, dos del tipo tradicional provenientes de la refinería de Esmeraldas en Ecuador y de Texas en USA, y de tres asfaltos modificados con diferentes polímeros tomando como base el asfalto nacional. Los

polímeros a emplear serán el SBS, ELVALOY y caucho proveniente de las llantas de vehículos.

Se realizará una caracterización reológica utilizando un reómetro de corte dinámico y un reómetro de viga en flexión, para los ligantes 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. Se realizarán 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 es de tipo experimental y se realizará mediante un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en clasificar dos asfaltos procedentes de la refinería de Esmeraldas y de Texas, además de analizar la incidencia de tres tipos de aditivos modificadores en el asfalto de Esmeraldas, a través de ensayos de clasificación por viscosidad y Superpave realizados a cada uno de ellos.

La investigación constará de 3 etapas, las cuales son:

1. Marco teórico
2. Desarrollo experimental
3. Análisis de resultados

Cada una de las diferentes etapas se dividirá específicamente en:

1. Marco teórico.
 - Estudio bibliográfico
2. Desarrollo experimental.
 - Realización de ensayos a asfaltos procedentes de Esmeraldas y Texas.

- Utilización de tres tipos de aditivos con el asfalto procedente de la Refinería de Esmeraldas: SBS, ELVALOY, caucho y preparación de las muestras correspondientes.
- Ejecución de ensayos a los asfaltos modificados con los tres polímeros.
- Desarrollo de estudios avanzados con Curvas Maestras a todos los tipos de asfalto y Diagrama de Black.

3. Análisis de resultados.

- Comparación de los resultados de ensayos obtenidos.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

CAPITULO II

2. ENSAYOS A CEMENTOS ASFÁLTICOS Y ASFALTOS MODIFICADOS

2.1. Cemento asfáltico, características y pruebas.

El asfalto es considerado como un material bituminoso, cementante, altamente adhesivo, impermeable y duradero. Además, es resistente a agentes externos como los álcalis, ácidos y sales. Puede producirse naturalmente a través del proceso de destilación durante millones de años, pudiendo ser libre de impurezas o contaminado con ciertas proporciones de agua, minerales y otras sustancias. Suele hallarse también en depósitos naturales, específicamente dentro de rocas porosas, conocido como asfalto de rocas o roca asfáltica. Mayormente es obtenido como residuo del proceso de refinación del petróleo al ser separado de las fracciones volátiles. Se lo distingue según su origen el cual aporta diferencias a través de su composición química y propiedades reológicas. (León H.)

Los cementos asfálticos son diferentes entre una refinería y otra debido a la naturaleza del petróleo y las operaciones implicadas en la producción, por lo que las propiedades que estas posean se verán reflejadas en el comportamiento del pavimento. Un parámetro significativo para la diferenciación, es la cantidad relativa en cuanto a composición química se refiere, en donde se encuentran las grandes moléculas de asfaltenos rodeadas por aromáticos polares y no polares suspendidas en aceites saturados, siendo estos parte de los constituyentes peptizados en una solución coloidal. Los asfaltenos son responsables de parámetros como la resistencia, la rigidez y la estructura coloidal del asfalto. Las resinas proporcionan adherencia, plasticidad y ductilidad. Los saturados y aromáticos son responsables de la viscosidad y la fluidez del ligante.

La clasificación del asfalto procedente de Esmeraldas y Texas es realizada mediante la clasificación por viscosidad, el cual su principio fundamental es la determinación de la viscosidad absoluta a 60°C y de acuerdo al resultado establecer el grado AC

correspondiente, verificando que los requisitos restantes se encuentren dentro del rango para el grado AC previamente establecido en la normativa. Ver tablas 1 y 2.

Tabla 1. Clasificación INEN para cementos asfálticos. Clasificación por viscosidad a 60°C.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^C	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^B		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^A , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^A Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^B Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen-20 SP}{50 \log pen-SP-120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s												
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^C Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 2515. Enmienda1

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

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D.2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100 ^A	100	75	50	40	25

Fuente: Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, según el Reglamento Técnico Centroamericano, 2011.

2.2. Asfaltos modificados, características y pruebas.

En los últimos años, se han desarrollado de manera experimental la modificación del ligante asfáltico mediante la disolución de diferentes tipos de polímeros, los cuales producen un cambio en sus características físicas y reológicas.

En el trabajo de investigación se emplearon tres tipos de aditivos modificadores los cuales se mezclaron con el asfalto de Ecuador proveniente de la refinería de Esmeraldas. La clasificación de estos se realizó por medio de especificaciones estándares para asfaltos mezclados con polímeros recogidos en el Volumen 04.03 de la norma ASTM 2001, el cual se detalla a continuación:

- **Asfalto modificado con polímeros SBS:** Especificación estándar para asfalto modificado con SBS Tipo IV ASTM D-5892.
- **Asfalto modificado con polímeros ELVALOY:** Especificación estándar para asfalto modificado con ELVALOY Tipo III ASTM D-5841.
- **Asfalto modificado con caucho:** Especificación estándar para asfalto modificado con caucho Tipo II ASTM D-6114.

2.2.1. Cemento asfáltico modificado con polímero SBS

El polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) es un modificador fabricado con base de bloques de estireno, es un tipo de elastómero radial tribloque, que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es utilizado en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con altos índices de tránsito, puede ser empleado en zonas donde existan climas fríos y cálidos. (F. Araya, et al., 2012).

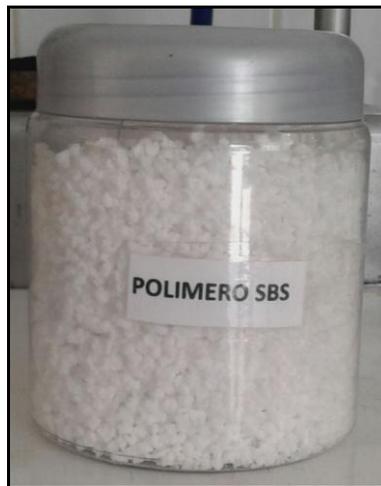


Figura 1. Polímero SBS.

Fuente: Autores.

El asfalto modificado con SBS T161P (FINOTECH), tiene la siguiente composición con el respectivo proceso de mezclado:

Tabla 3. Composición del asfalto modificado con SBS. Valores en función del peso total del ligante.

Fluidificante	1.00%
SBS	3.00%
Catalizador	0.03.%

Fuente: Autores

Proceso de mezclado:

1. Se calienta el asfalto a temperaturas entre 120°C y 130°C.
2. Al llegar a la temperatura antes mencionada, se coloca el fluidificante como se muestra en la Figura 2(a) y durante 10 minutos se mezcla constantemente.

3. Inmediatamente se aumenta la temperatura dentro del rango de 180°C a 190°C, luego se agrega el polímero SBS como se aprecia en la Figura 2(b) y se mezcla nuevamente durante un tiempo estimado de 60 a 90 minutos.
4. Se agrega el catalizador y se mezcla por 15 minutos adicionales.

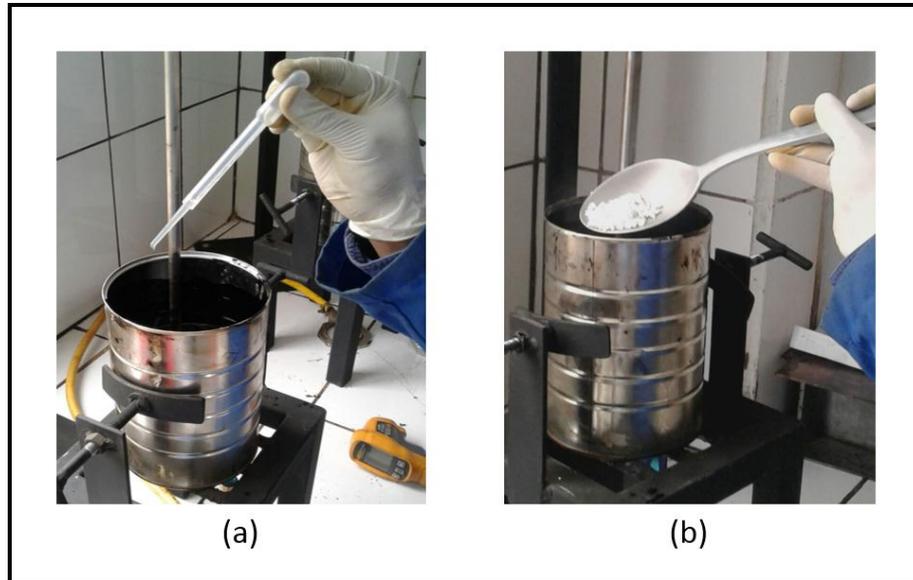


Figura 2. Proceso de mezclado con SBS.

Fuente: Autores.

Las propiedades físicas a evaluar para los asfaltos modificados con SBS deberán cumplir las exigencias mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Requerimientos para asfaltos modificados con polímeros SBS Tipo IV.

Ensayos	IV-A		IV-B		IV-C		IV-D		IV-E		IV-F	
	min	max										
Penetración a 25°C, 100g, 5 s	90		75		65		50		50		35	
Viscosidad, 60°C (140°F), 1s ⁻¹ Pa.s	125(1250)		400(4000)		250(2500)		600(6000)		450(4500)		800(8000)	
Viscosidad, 135°C (275°F), mm ² /s		3000		3000		3000		3000		3000		3000
Punto de inflamación COC, °C(°F)	232(450)		232(450)		232(450)		232(450)		232(450)		232(450)	
Solubilidad en tricloroetano	99		99		99		99		99		99	
Envejecimiento RTFOT												
Elongación a 25°C (77°F)	60		70		60		70		60		70	
Penetración a 4°C, 200g, 60s	20		20		15		15		10		10	

Fuente: Norma ASTM D-5892

2.2.2. Cemento asfáltico modificado con polímero ELVALOY

Según F. Araya y Cols (2010), el polímero Etil-Vinil-Acetato es un modificador de ligantes asfálticos fabricado con base de tipo elastómero, logra mejorar la resistencia de las mezclas asfálticas, disminuyendo la susceptibilidad ante las variaciones de temperaturas a las que se encuentra expuesto. Es utilizado en climas calientes, para carpetas estructurales en pavimentos con índices de tránsito muy altos y también en emulsiones para tratamientos superficiales.

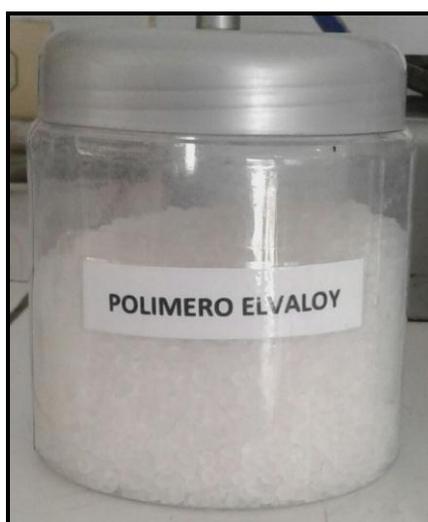


Figura 3. Polímero ELVALOY.
Fuente: Autores.

El asfalto modificado con ELVALOY (DUPONT), tiene la siguiente composición con el respectivo proceso de mezclado:

Tabla 5. Composición del asfalto modificado con ELVALOY. Valores en función del peso total del ligante.

Fluidificante	1.00%
ELVALOY	1.30%
Catalizador	0.02%

Fuente: Autores

Proceso de mezclado:

1. Se calienta el asfalto a temperaturas entre 120°C y 130°C.
2. Al llegar a la temperatura antes mencionada, se coloca el fluidificante como se muestra en la Figura 4(a) y durante 10 minutos se mezcla constantemente.
3. Inmediatamente se aumenta la temperatura dentro del rango de 180°C a 190°C, luego se agrega el polímero ELVALOY como se aprecia en la Figura 4(b) y se mezcla nuevamente durante un tiempo estimado de 60 a 90 minutos.
4. Se agrega el catalizador y se mezcla por 15 minutos adicionales.

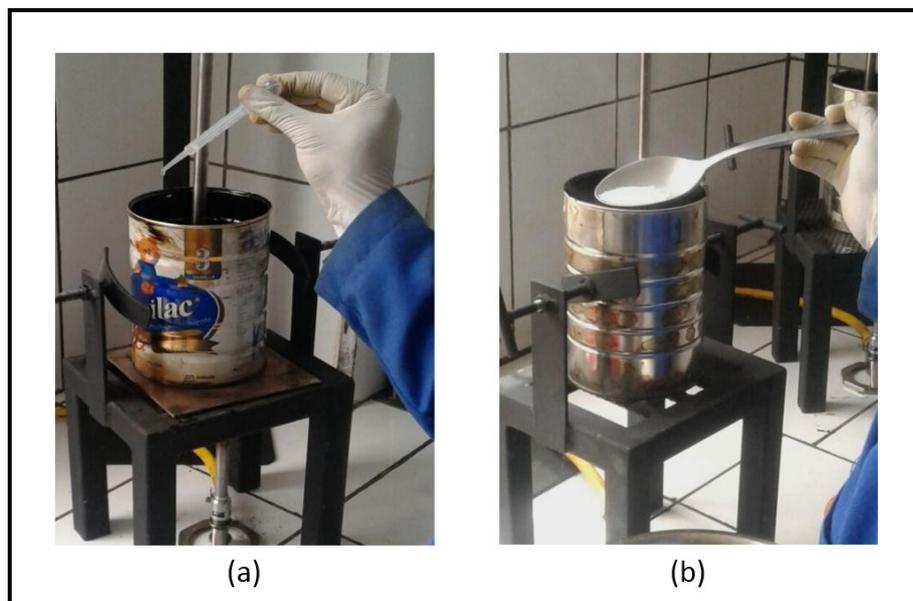


Figura 4. Proceso de mezclado con ELVALOY.

Fuente: Autores.

Para el caso del polímero ELVALOY, la especificación se presenta a continuación con las propiedades físicas requeridas en la Tabla 6.

Tabla 6. Requerimientos para asfaltos modificados con polímeros ELVALOY Tipo III.

Ensayos	III-A		III-B		III-C		III-D		III-E	
	min	max								
Penetración a 4°C, 200g, 60s	48		35		28		22		18	
Penetración a 25°C, 100g, 5 s	30	150	30	150	30	150	30	150	30	150
Viscosidad, 135°C (275°F), mm ² /s	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500	150	1500
Punto de inflamación COC, °C(°F)	425(218)		425(218)		425(218)		425(218)		425(218)	
Punto de ablandamiento, R and B, °F(°C)	125(52)		130(54)		135(57)		140(60)		145(63)	
Solubilidad en tricloroetano	99		99		99		99		99	
Envejecimiento RTFOT										
Penetración a 4°C, 200g, 60s	24		18		14		11		9	

Fuente: Norma ASTM D-5841

2.2.3. Cemento asfáltico modificado con caucho

Es un modificador de ligantes asfálticos que mejora la resistencia a tensión de las mezclas asfálticas, así como también aumenta su flexibilidad, esto logra la reducción de grietas que aparecen en daños por fatiga y los cambios bruscos de temperatura. Este polímero se obtiene en base a la molienda de neumáticos por ciertos modelos estandarizados. Es empleado en pavimentos con carpetas estructurales delgadas y granulometría abierta. (F. Araya, et al., 2012).



Figura 5. Ripio de caucho.

Fuente: Autores.

El asfalto modificado con partículas de caucho se realizó con un valor de 5% del mismo en función del peso total.

Proceso de mezclado:

1. Se calienta el asfalto a temperaturas entre 180°C y 190°C.
2. Inmediatamente se agrega el caucho como se muestra en la Figura 6 y se mezcla constantemente durante un tiempo estimado de 60 a 90 minutos.



Figura 6. Proceso de mezclado con caucho.

Fuente: Autores.

Las propiedades físicas de los cementos asfálticos modificados con caucho se presentan a continuación con los requerimientos respectivos en la Tabla 7.

Tabla 7. Requerimientos para asfaltos modificados con caucho.

Ensayos	Tipo I Tipo II Tipo III			
Viscosidad aparente, 175°C (347°F):cP	min	1499	1500	1501
Penetración a 25°C, 100g, 5 s	min	25	25	50
	max	75	75	100
Penetración a 4°C, 200g, 60s	min	10	15	25
Punto de ablandamiento, R and B, °F (°C)	min	57.2	54.4	51.7
Resiliencia, 25°C (77°F):%	min	25	20	10
Punto de inflamación COC, °C(°F)	min	232.2	232.2	232.2
Envejecimiento RTFOT				
Penetración a 4°C, 200g, 60s	min	75	75	75

Fuente: Norma ASTM D-6114.

2.3. Pruebas convencionales para la calificación de ligantes asfálticos

2.3.1. Viscosidad

Según E. Ray y Cols (2009), la viscosidad es la propiedad que indica la resistencia del ligante asfáltico al fluir, suministrando información sobre el comportamiento a altas temperaturas. El ensayo es realizado a 60°C y 135°C, siendo estos representativos en el primer caso, al comportamiento de un día con temperaturas elevadas y en el segundo a la fluidez alcanzada para la manipulación, bombeo en las refinerías, terminales y trayectos hacia los reservorios de las planta asfálticas respectivamente.

Según la norma ASTM D-2171 el ensayo a 60°C consiste en usar un viscosímetro capilar sumergido en agua con una temperatura controlada, después aplicar un vacío que permita la fluidez del asfalto y por último controlando el tiempo en segundos que se tarde en fluir de la marca de un lado al otro, que al ser multiplicada por la constante de calibración genera como resultado la viscosidad en poises.

En la actualidad según la norma ASTM D-4402, para el viscosímetro Brookfield suele realizarse la prueba de viscosidad a 60°C, escogiendo el spindle correspondiente como por ejemplo el spindle 27 o 28. En nuestro caso, en el laboratorio de asfaltos contamos con este equipo, por lo que el ensayo realizó colocando 10 ± 0.5 gramos de asfalto en una cápsula, para luego ser depositada y ensayada en el viscosímetro Brookfield como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Ensayo en el Viscosímetro Brookfield a 60°C.
Fuente: Autores

Valores de viscosidad por debajo del rango normalizado en ensayos a 60°C, indican que el ligante se presenta como un material rígido, lo cual provocará la posible existencia de problemas de fatiga provocando grietas en el mismo; valores por encima del rango, indica la posible existencia de problemas de ahuellamientos al tener características elasto-plástica.

Para asfaltos modificados se puede realizar el mismo procedimiento del ensayo de viscosidad verificando los rangos según la Especificación Estándar para Cementos Asfálticos Modificados con Polímeros SBS, ELVALOY y caucho.

2.3.2. Penetración

Ensayo empírico realizado para obtener la medida de consistencia del cemento asfáltico a 25°C, temperatura promedio de servicio controlada termostáticamente con Baño María. Por medio de este ensayo es posible determinar si un asfalto es elástico o rígido lo que podría tener como consecuencia problemas de ahuellamientos o fatiga respectivamente.

Luego de que la muestra ha sido colocada en un recipiente mediano, se enfría a temperatura ambiente y después es sumergida en agua a 25°C para proceder con el

ensayo. Según la norma ASTM D-5 el ensayo consiste en dejar caer tres veces consecutivas una aguja normalizada con un peso adicional logrando un total de 100 gramos desde exactamente la superficie de la muestra por el lapso de cinco segundos en donde la profundidad de penetración es el resultado que se mide en unidades de decimas de milímetros (0.1 mm) como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Ensayo de penetración.

Fuente: Autores

Para asfaltos modificados se puede realizar el mismo procedimiento del ensayo de penetración cambiando la temperatura a 4°C y el peso a 200 gramos según lo establezca la Especificación Estándar para Cementos Asfálticos Modificados con Polímeros SBS, ELVALOY y caucho.

2.3.3. Punto de ablandamiento

Ensayo que determina la temperatura a la que el asfalto empieza a fluir realizado según la ASTM D-36 con los denominados “anillo y bola”, colocando asfalto fundido en el anillo de latón con dimensiones normalizadas y luego enrazando para lograr una superficie plana. Posteriormente, en un recipiente con agua a baja temperatura (4°C) se colocan el anillo y bola previo al ensayo, estas son colocados a una altura determinada con la bola sobre la superficie de ligante asfáltico logrando una graduación de incremento de temperatura equivalente a 5 grados centígrados por minuto cuando este se encuentre expuesto al fuego como se muestra en la Figura 9.

La temperatura que determina el punto de ablandamiento es el instante en el que la bola cae y toca la superficie de latón.



Figura 9. Ensayo de punto de ablandamiento.

Fuente: Autores

Para asfaltos modificados se puede realizar el mismo procedimiento del ensayo de punto de ablandamiento verificando los rangos según lo establezca la Especificación Estándar para Cementos Asfálticos Modificados con Polímeros ELVALOY y Caucho.

2.3.4. Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT)

Ensayo realizado para la evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento durante procesos de mezclado sumado a factores ambientales que afecten durante su vida útil, genera resultados de pérdida o ganancia de masa comparada con la cantidad de masa original previo al calentamiento. Según la norma ASTM D-2872, dicho ensayo aparenta el envejecimiento a corto plazo que sucede cuando se elaboran las mezclas a altas temperaturas en las plantas asfálticas, incluyendo el proceso de transportación a obra y su extensión. (S. Shuler, et al., 1994)

El ensayo se realiza vertiendo el ligante en las botellas que se encuentran rotando en el horno a 325°F (163°C) permitiendo la entrada de aire caliente por el orificio de cada una de ellas, como se muestra en la Figura 10.

El objetivo del ensayo es originar un asfalto envejecido y usarlo para realizar pruebas adicionales de acuerdo a las normativas que se estén empleando, como por ejemplo los ensayos de viscosidad o en equipos DSR y PAV.



Figura 10. Horno rotatorio RTFOT.
Fuente: Autores

Para asfaltos modificados se puede realizar el mismo procedimiento del ensayo de envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT) según la Especificación Estándar para Cementos Asfálticos Modificados con Polímeros SBS, ELVALOY y caucho, a partir de este se realizan pruebas como penetración y recuperación elástica como lo requiere la norma.

2.3.5. Ductilidad

Según León, H. el ensayo de ductilidad mide la capacidad que tiene un asfalto de alargarse hasta la rotura. Los ligantes con mayor ductilidad poseen una mejor capacidad de soportar deformaciones plásticas, muchas veces inducidas por el tráfico. Es importante mencionar que esta propiedad es muy susceptible a los cambios de temperaturas ya que estos pueden hacer variar su consistencia.

Según la ASTM D-113, el ensayo es realizado en un ductilímetro y consiste en medir la resistencia a la rotura de una probeta de ligante asfáltico por medio del

alargamiento del mismo a una velocidad constante de 5 centímetros por minuto mientras que las muestras se encuentran sumergidas en agua a una temperatura de 25°C como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Ensayo de Ductilidad a 25°C.
Fuente: Autores

2.3.6. Recuperación Elástica

La prueba de recuperación elástica se la ejecuta para los asfaltos modificados con polímeros SBS, el cual tiene como objetivo medir la capacidad que tiene el ligante asfáltico en recuperarse después de un estiramiento a una distancia normalizada como se aprecia en la Figura 12.

Según la asignación ASTM D-6084 el ensayo consiste en aplicar la muestra de asfalto en un molde de dimensiones normalizadas, la misma que se utiliza en el ensayo de ductilidad con una pequeña variación a temperatura ambiente, luego es sumergido en agua a 25°C durante 90 minutos, una vez transcurrido el tiempo, se ensaya introduciendo los moldes en el ductilímetro, el cual debe tener una velocidad constante de ensayo, cuando la elongación sea 10 cm se detiene el equipo y con ayuda de una tijera se realiza un corte a la mitad de la muestra, luego se deja reposar por 60 minutos y finalmente se mide la separación existente entre ellas.

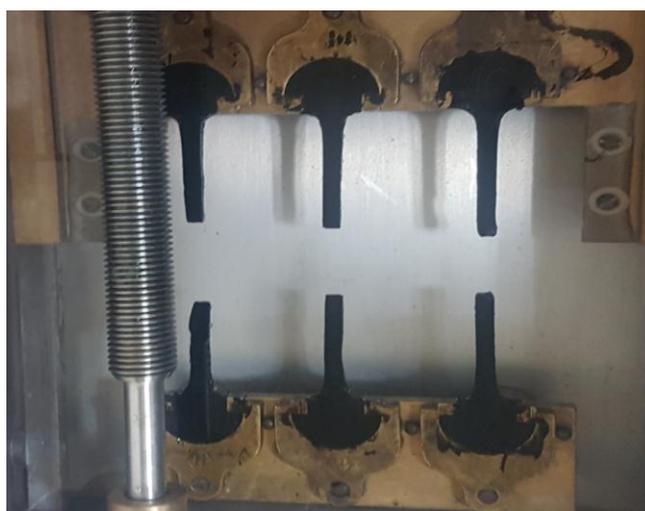


Figura 12. Ensayo de Elongación

Fuente: Autores

2.4. Pruebas para la clasificación por grado de desempeño según la tecnología Superpave

Según R. Mc Gennis y Cols, el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) fue desarrollado en los Estados Unidos entre Octubre de 1987 y Marzo de 1993. Este programa dio como resultado el sistema Superpave, que incluye nuevas especificaciones para cementos asfálticos y agregados.

El sistema Superpave incluye una especificación por grado de desempeño (PG) para cementos asfálticos, diseñado para cumplir dos objetivos principales:

- Medir las propiedades físicas de los cementos asfálticos que pueden ser relacionadas con los parámetros de desempeño en terreno para tres fallas críticas: ahuellamientos, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.
- Caracterizar las propiedades físicas de los cementos asfálticos según las temperaturas y efectos del envejecimiento a los que estarán sometidos durante el proceso de construcción y su vida útil.

La especificación para ligantes asfálticos por medio de la tecnología Superpave se basa en datos como las variaciones de temperaturas climáticas para establecer el cuadro PG en una región específica, es decir, considerando las temperaturas existentes en un determinado pavimento. El grado PG establece una temperatura

alta correspondiente al promedio de las temperaturas máximas diarias de los 7 días consecutivos más calurosos del año, registrados a 20 mm de profundidad y una baja que identifica la temperatura mínima anual media en la superficie.

Esta tecnología implementada en varios países de América termina siendo un sistema mejorado de especificaciones para la clasificación de asfaltos por medio de ensayos al igual que en la clasificación por grado de viscosidad, en equipos como: viscosímetro rotativo (RV) y horno rotativo de película delgada (RTFOT). Además, cámara de envejecimiento a presión (PAV), reómetro de corte directo (DSR) y reómetro de viga a flexión (BBR). A continuación se muestra la especificación para la clasificación por grado de desempeño PG proporcionado por la norma AASHTO en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Especificación AASHTO para clasificación por Superpave.

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 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	46			52						58				64							
Residuo de RTFO (T 240) ó TFO (T 179)																					
Pérdida de Masa, máx., %	1.00																				
Corte Dinámico, TP5: G* / senδ, mín., 2.20 kPa 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: G* x senδ, máx., 5000 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Endurecimiento Físico ^e Informe																					
Rigidez en Creep, TP1: ^f S, máx., 300 Mpa Valor-m, mín., 0.300 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 Def. Específ. de falla, mín., 1.0% 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 9. Especificación AASHTO para clasificación por Superpave.

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-n, 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
Tracción Directa, TP3 ^f Def. Específ. 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

2.4.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

Ensayo que representa una segunda etapa de envejecimiento y normalmente se realiza después de haber sido ensayado en el horno RTFOT. El presente ensayo simula el envejecimiento que el pavimento sufriría luego de varios años de servicio.

Según la norma ASTM 6521 el ensayo se realiza en un plato con 50 gramos de cemento asfáltico provenientes del horno RTFOT, posteriormente es expuesto a una temperatura de 90°C a 100°C según el clima en donde el pavimento será construido y 1MPa de presión dentro de la cámara del PAV durante 20 horas como se muestra en la Figura 13.

La finalidad del ensayo es exponer la muestra a una condición de entre 7 y 10 años de servicio, es decir que aparenta un comportamiento que luego será constatado cuantitativamente por en el ensayo realizado en el DSR con dicha muestra.



Figura 13. Cámara de envejecimiento de asfalto PAV.

Fuente: Autores

2.4.2. Reómetro de corte directo (DSR)

El presente ensayo mide las características reológicas del asfalto, su objetivo es determinar los módulos de corte complejo y ángulos de fase de los ligantes a altas temperaturas. La prueba de acuerdo a la norma se la realiza por medio de movimientos oscilatorios, donde un ciclo posee una frecuencia de 10 rad/seg el cual corresponde a una velocidad del tráfico de 90 km/h.

Para el ensayo según AASHTO T 315 se emplea una muestra del ligante asfáltico colocada en un molde de silicón como se aprecia en la Figura 14, luego es confinada en platillos paralelos de 25mm de diámetro y 1mm de espesor o de 8mm de diámetro y 2mm de espesor dependiendo del origen del asfalto (original, RTFOT o PAV) como se muestra en la Figura 15. El proceso se realiza a una temperatura que se asemeje a la que éste pudiera estar expuesto durante su vida útil. Durante el ensayo, el platillo superior oscila a frecuencias y amplitudes de deformaciones controladas presentando resultados digitalizados.



Figura 14. Muestra de asfalto en molde de silicón.

Fuente: Autores



Figura 15. Ensayo en el reómetro de corte dinámico (DSR).

Fuente: Autores

El ensayo responde directamente a fallas como:

Ahuellamientos

Falla que se presenta a altas temperaturas de servicio, causada por la acumulación de deformaciones de tipo plástico en la mezcla asfáltica como resultado de las repeticiones de carga de tránsito. Las propiedades del cemento asfáltico, del propio agregado y características de la mezcla influyen de manera importante en esta falla.

El grupo SHRP, basado en medidas de la magnitud de esas deformaciones no recuperables a altas temperaturas en el cemento asfáltico, definió al factor $G^*/\sin\delta$, como medida de la rigidez del ligante o resistencia al ahuellamientos a altas temperaturas. (R. Mc Guennis, et al., 1994).

Fatiga

La fatiga de las capas asfálticas se produce por lo general al final de la vida útil de un pavimento, lo que requiere que el asfalto a ensayar sea sometido a envejecimiento a largo plazo mediante el PAV.

La especificación usa el factor de fatiga $G^*\sin\delta$, el cual representa la resistencia a la fatiga del cemento asfáltico. La especificación además, tiene un límite máximo de

5000 KPa para el factor $G^*\text{sen}\delta$ del cemento asfáltico, envejecido a través de los procedimientos del PAV y RTFOT, considerando una temperatura media de servicio.

2.4.3. Reómetro de viga a flexión (BBR)

Ensayo que caracteriza las propiedades de rigidez del ligante asfáltico a bajas temperaturas. Es decir, un cemento asfáltico muy rígido a temperaturas mínimas de servicio tiende a fisurarse por los cambios bruscos de temperaturas altas a bajas.

Para la realización del ensayo se vierte asfalto caliente dentro de un molde previamente untado con desmoldante, logrando llenar todas las esquinas sin dejar vacíos y luego de minutos se enraza para obtener la forma de viga o probeta necesaria para el ensayo. Posteriormente se deja enfriar la probeta a temperatura ambiente y luego se coloca en un congelador para luego de 10 minutos desmoldar y ensayar.

El ensayo según la norma AASHTO T 313 se realiza ubicando la viga entre los apoyos como se muestra en la Figura 16 y midiendo las deflexiones que sufre el ligante bajo las cargas al cual será sometido teniendo en consideración una temperatura que represente la más baja de un asfalto puesto en servicio. Por medio de esto, podemos determinar la rigidez a la fluencia y la variación de la misma en función del tiempo.



Figura 16. Equipo de Reómetro de viga a flexión.

Fuente: Autores.

El ensayo responde directamente a fallas como:

Agrietamiento térmico

Falla que se manifiesta con la aparición de fisuras transversales en la superficie del pavimento evaluada mediante los ensayos con reómetro de viga a flexión y de tracción directa. La rigidez del asfalto bajo condiciones de creep no debe ser mayor a 300 MPa y el valor de la pendiente de la curva $S(t)$ vs tiempo a los 60 segundos (m) debe ser mayor de 0,30.

CAPITULO III

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD

3.1. Pruebas por viscosidad a asfaltos sin modificar

La Tabla 10 muestra los resultados de los diferentes ensayos que indican las especificaciones tanto la nacional: INEN 2515-2010 como la internacional: ASTM D3381-92 a los cementos asfálticos según la clasificación por grado de viscosidad.

Tabla 10. Resultados de clasificación por viscosidad.

PROPIEDADES	UNIDAD	ASFALTO ECUADOR ORIGINAL	ASFALTO TEXAS ORIGINAL	NTE INEN 2515:2010/ENMIENDA 1				ASTM D3381-92			
				AC 20		AC 30		AC 20		AC 30	
				MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
PENETRACIÓN, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	65	71					60		50	
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°C	50	47								
INDICE DE PENETRACIÓN	-	-0.6	-1.2	-1.5	1.5	-1.5	1.5				
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 25°C/25°C	-										
FLASH POINT, COPA CLEVELAND	°C			232		232		232		232	
VISCOSIDAD DINÁMICA, 60°C	Pa.s	256	208	160	240	240	360	160	240	240	360
VISCOSIDAD CINEMÁTICA, 135°C	mm²/s	347.5	335	300	-	350	-	300		350	
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILNO	%w			99		99		99		99	
RTFOT											
DUCTILIDAD, 25°C, 5 cm/min	cm	38	80	50		40		50		40	
VISCOSIDAD DINÁMICA, 60°C	Pa.s	1220	893		800		1200		1000		1500

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos para los cementos asfálticos procedente de la refinería de Esmeraldas y Texas, establecen que en el estado original, el cemento asfáltico procedente de la refinería de Esmeraldas clasifica como un AC-30 al tomar en cuenta el principal parámetro de la clasificación por viscosidad el cual es la viscosidad dinámica a 60°C en estado original. Sin embargo en estado de envejecimiento primario (RTFOT), el parámetro de ductilidad no cumple con las

exigencias establecidas por la normativa Ecuatoriana y tampoco por la ASTM. Lo que indicaría que el asfalto Procedente de Esmeraldas sufre un excesivo endurecimiento durante el proceso de oxidación que se produce durante el mezclado, transporte y compactación. En cuanto a la viscosidad dinámica, después de haber sido ensayado en el horno RTFOT, tampoco se encontraría dentro de las exigencias según la normativa Ecuatoriana, sin embargo, al comparar este parámetro con la normativa ASTM, los valores sí estarían dentro de dicha exigencia.

En el asfalto procedente de Texas se observa que la viscosidad dinámica a 60°C en estado original es de 208 Pa.s, cumpliría como un asfalto AC-20 con todas las exigencias de los ensayos en estado original, tanto para la normativa Ecuatoriana como para la ASTM. Sin embargo, al pasar por el proceso de envejecimiento primario (RTFOT), se observa que se encuentra dentro de las exigencias ASTM de los ensayos de ductilidad y viscosidad dinámica, pero al comparar estos resultados con las exigidas por la Normativa Ecuatoriana, el valor de viscosidad dinámica sobrepasaría dicha exigencia, lo cual podría interpretarse como un posible endurecimiento del cemento asfáltico.

Al comparar los resultados de ambos cementos asfálticos se puede observar que el asfalto procedente de la refinería de Esmeraldas sufre un mayor y excesivo envejecimiento provocando su endurecimiento y de esta manera pérdidas de propiedades como la adhesión y respuesta ante esfuerzo de tracción, a diferencia del asfalto de Texas, que sus propiedades después de haber sido expuesto a un proceso de envejecimiento (RTFOT), no sufre un endurecimiento tan excesivo como el de Esmeraldas.

3.2 Clasificación estándar de asfaltos modificados con polímeros

Para los cementos asfálticos modificados con SBS, ELVALOY y caucho, se deben realizar las pruebas según lo indica la especificación ASTM para cada tipo de polímero ya que poseen características reológicas diferentes y no poseen un mismo comportamiento al estar en contacto con el ligante asfáltico. Los resultados de las pruebas realizadas se presentan a continuación con su respectiva interpretación. Vale aclarar que ciertas pruebas no pudieron realizarse por no contar con el equipo necesario.

3.2.1 Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con SBS

Tabla 11. Resultados de la clasificación de asfaltos modificados Tipo IV

PROPIEDADES	UNIDAD	ASFALTO DE ECUADOR MODIFICADO CON SBS	ASTM D-5892-00	
			ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS SBS TIPO IV-F	
			MIN	MAX
VISCOSIDAD DINÁMICA, 60°C	Pa.s	1800	800	-
VISCOSIDAD CINEMÁTICA, 135°C	mm ² /s	1454	-	3000
PENETRACIÓN, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	47	35	-
ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT				
PENETRACIÓN, 4°C, 200g, 60s	0,1 mm	39	10	-
ELONGACIÓN, 25°C	cm	70	70	-

Fuente: Autores.

3.2.2 Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con ELVALOY

Tabla 12. Resultados de la clasificación de asfaltos modificados Tipo III

PROPIEDADES	UNIDAD	ASFALTO DE ECUADOR MODIFICADO CON ELVALOY	ASTM D-5841	
			ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS ELVALOY TIPO III-D	
			MIN	MAX
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°c	66	60	-
PENETRACIÓN, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	63	30	150
PENETRACIÓN, 4°C, 200g, 60s	0,1 mm	45	22	-
ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT				
PENETRACIÓN, 4°C, 200g, 60s	0,1 mm	27	11	-

Fuente: Autores

3.2.3 Resultados de los ensayos para el asfalto de Ecuador modificado con caucho.

Tabla 13. Resultados de la clasificación a asfaltos modificados con caucho.

PROPIEDADES	UNIDAD	ASFALTO DE ECUADOR MODIFICADO CON CAUCHO	ASTM D-6114	
			ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR PARA ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO TIPO II	
			MIN	MAX
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	°c	60	54.4	-
PENETRACIÓN, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	38	25	75
PENETRACIÓN, 4°C, 200g, 60s	0,1 mm	36	15	-
ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT				
PENETRACIÓN, 4°C, 200g, 60s	0,1 mm	75	70	-

Fuente: Autores

3.3 Resultados de la clasificación por grados de desempeño del Superpave.

3.3.1 Generalidades

La tecnología Superpave se basa en datos en los que intervienen las variaciones de temperaturas climáticas a los que se encuentran expuestos los ligantes asfálticos y así poder establecer el grado de desempeño (PG). Para ello se deben realizar los ensayos de reómetro de corte directo (DSR), viscosímetro rotativo (RV), reómetro de viga a flexión (BBR), horno rotativo de película delgada (RTFO) y cámara de envejecimiento a presión (PAV). Los cuales se muestran a continuación con sus respectivos resultados.

3.3.2 Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador.

A continuación, en la Tabla 14 se muestran los grados PG obtenidos para el asfalto de Ecuador

Tabla 14. Clasificación por grado de desempeño PG a asfalto de Ecuador con la metodología Superpave.

PRUEBAS DE CLASIFICACION SUPERPAVE PARA ASFALTOS				
RESULTADOS - ESMERALDAS				
PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS
LIGANTE ORIGINAL				
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	-
Viscosidad (Pa.s)	135°C	AASHTO T 316	3,0 máx	347.5
	46°C			18.60
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	52°C	AASHTO T 315	1,0 mín	7.86
	58°C			3.34
	64°C			1.47
	70°C			0.66
	70°C			0.66
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)				
Pérdida de masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx	-
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	58.70
	52°C			25.80
	58°C			11.00
	64°C			4.87
	70°C			2.20
	76°C			1.16
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)				
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	31°C	AASHTO T 315	5000 máx	708
	28°C			1020
	25°C			1480
	22°C			2160
	19°C			3060
	16°C			4230
	13°C			5800
	Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)			-30°C
Valor m	0,300 mín	0.199		
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	457
Valor m			0,300 mín	0.262
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C	AASHTO T 313	300 máx	240
Valor m			0,300 mín	0.317
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	--	64-28

Fuente: Autores

3.3.3 Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Texas.

En la Tabla 15 se observan los grados PG obtenidos para el asfalto de Texas.

Tabla 15. Clasificación por grado de desempeño PG a asfalto de Texas con la metodología Superpave.

PRUEBAS DE CLASIFICACION SUPERPAVE PARA ASFALTOS				
RESULTADOS - TEXAS				
PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS
LIGANTE ORIGINAL				
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	-
Viscosidad (Pa.s)	135°C	AASHTO T 316	3,0 máx	335
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	1,0 mín	20.20
	52°C			8.07
	58°C			3.40
	64°C			1.50
	70°C			0.72
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)				
Pérdida de masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx	-
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	62.80
	52°C			25.90
	58°C			10.60
	64°C			4.50
	70°C			2.04
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)				
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	31°C	AASHTO T 315	5000 máx	1150
	28°C			1630
	25°C			2300
	22°C			3230
	19°C			4500
	16°C			6190
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	523
Valor m			0,300 mín	0.261
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C		300 máx	271
Valor m			0,300 mín	0.312
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	--	64-28

Fuente: Autores

3.3.4 Observaciones sobre los resultados obtenidos.

En las tablas 14 y 15 se aprecian que los dos tipos de cementos asfálticos tienen la misma clasificación Superpave de acuerdo a la norma AASHTO. Sin embargo los resultados exactos de cumplimiento de las especificaciones indican que el asfalto de Texas presenta una susceptibilidad térmica levemente menor y una mayor fluidez a bajas temperaturas que el asfalto de Esmeraldas. La temperatura de cumplimiento de la temperatura intermedia es mayor en el asfalto de Texas.

Al considerar la clasificación por grado de desempeño Superpave de los dos cementos asfálticos mencionados, se puede pensar que son dos asfaltos con características similares, a pesar que la clasificación por grado de viscosidad manifiesta que el asfalto procedente de Ecuador presenta un mayor endurecimiento y características de un asfalto más rígido que el asfalto procedente de Texas. Por lo cual se puede interpretar que la clasificación PG a pesar de generar una mayor información del comportamiento reológico de los cementos asfálticos, no manifiesta el endurecimiento prematuro de los asfaltos, y existe un vacío en cuanto a la información del comportamiento a temperaturas intermedias.

Varios estudios han mostrado que el parámetro de temperatura intermedia empleado por el Superpave: $G^*\sin\delta$, se correlaciona pobremente con la fatiga de la mezcla asfáltica. Situación que se ha visto analizada por diferentes investigadores como: Soenen, H. et al (2000); Bahia, H. et al (2001); Shenoy, A. (2001); Stuart, K.D. et al (2002); Tsai, B. et al (2005); Walker, D. (2011) y Safaei, F. et al (2014).

La especificación Superpave no puede predecir de forma fiable el comportamiento a la fatiga del ligante debido a su dependencia de las mediciones en el rango viscoelástico lineal de su comportamiento.

3.3.5 Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador modificado con SBS.

En la Tabla 16 se muestran los grados PG obtenidos para el asfalto de Ecuador modificado con SBS.

Tabla 16. Cclasificación por grado de desempeño PG a asfalto modificado con SBS con tecnología Superpave.

PRUEBAS DE CLASIFICACION SUPERPAVE PARA ASFALTOS				
RESULTADOS - ESMERALDAS MODIFICADO CON SBS				
PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS
LIGANTE ORIGINAL				
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	-
Viscosidad (Pa.s)	135°C	AASHTO T 316	3,0 máx	1454
	46°C			52.70
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	52°C	AASHTO T 315	1,0 mín	26.90
	58°C			13.30
	64°C			6.79
	70°C			3.38
	76°C			1.73
	82°C			0.92
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)				
Pérdida de masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx	-
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	125.00
	52°C			65.30
	58°C			33.30
	64°C			17.30
	70°C			9.79
	76°C			5.54
	82°C			3.21
	88°C			1.82
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)				
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	37°C	AASHTO T 315	5000 máx	551
	34°C			759
	31°C			1070
	28°C			1500
	25°C			2070
	22°C			2820
	19°C			3800
	16°C			5050
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	271
Valor m			0,300 mín	0.254
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C	AASHTO T 313	300 máx	204
Valor m			0,300 mín	0.290
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-12°C	AASHTO T 313	300 máx	100
Valor m			0,300 mín	0.319
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	--	76-22

Fuente: Autores

3.3.6 Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG), asfalto Ecuador modificado con ELVALOY.

La Tabla 17 muestra los grados PG obtenidos para el asfalto de Ecuador modificado con ELVALOY.

Tabla 17. Clasificación por grado de desempeño PG asfalto modificado con ELVALOY con metodología Superpave.

PRUEBAS DE CLASIFICACION SUPERPAVE PARA ASFALTOS				
RESULTADOS - ESMERALDAS MODIFICADO CON ELVALOY				
PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS
LIGANTE ORIGINAL				
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	-
Viscosidad (Pa.s)		AASHTO T 316	3,0 máx	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	135°C	AASHTO T 315	1,0 mín	25.30
	46°C			13.10
	52°C			7.20
	58°C			4.05
	64°C			2.38
	70°C			1.45
	76°C			0.92
	82°C			
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)				
Pérdida de masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx	-
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	57.90
	52°C			31.70
	58°C			17.20
	64°C			9.64
	70°C			5.57
	76°C			3.39
	82°C			2.14
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)				
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	37°C	AASHTO T 315	5000 máx	392
	34°C			544
	31°C			762
	28°C			1100
	25°C			1580
	22°C			2250
	19°C			3160
	16°C			4410
	13°C			6140
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	471
Valor m			0,300 mín	0.260
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)			300 máx	218
Valor m			0,300 mín	0.316
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	--	76-28

Fuente: Autores

3.3.7 Resultados de los ensayos para la clasificación por grado de desempeño (PG) a asfalto de Ecuador modificado con caucho.

Los grados PG obtenidos para el asfalto de Ecuador modificado con caucho se muestran a continuación en la Tabla 18.

Tabla 18. Clasificación por grado de desempeño PG asfalto modificado con caucho con metodología Superpave.

PRUEBAS DE CLASIFICACION SUPERPAVE PARA ASFALTOS					
RESULTADOS - ESMERALDAS MODIFICADO CON CAUCHO					
PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADOS	
LIGANTE ORIGINAL					
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	-	
Viscosidad (Pa.s)		AASHTO T 316	3,0 máx		
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	1,0 mín	38.00	
	52°C			18.20	
	58°C			8.62	
	64°C			4.51	
	70°C			2.43	
	76°C			1.41	
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)					
Pérdida de masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx	-	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	46°C	AASHTO T 315	2,2 mín	90.20	
	52°C			43.80	
	58°C			22.20	
	64°C			10.90	
	70°C			5.83	
	76°C			3.12	
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)					
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	37°C	AASHTO T 315	5000 máx	355	
	34°C			521	
	31°C			761	
	28°C			1090	
	25°C			1540	
	22°C			2130	
	19°C			2920	
	16°C			3970	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	360	
Valor m			0,300 mín	0.269	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C		300 máx	161	
Valor m			0,300 mín	0.304	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-12°C		300 máx	94	
Valor m			0,300 mín	0.321	
GRADO PG SUPERPAVE			AASHTO M 320	--	76-28

Fuente: Autores

Los asfaltos modificados con caucho y ELVALOY clasifican como asfaltos PG 76-28 indicando un mayor rango de temperaturas que el asfalto mezclado con SBS el cual clasifica como PG 76-22. Además se puede observar que los tres asfaltos modificados presentan un valor similar para los resultados exactos de cumplimiento de las especificaciones. Respecto a las temperaturas intermedias, el asfalto modificado con caucho presenta una temperatura más baja para el cumplimiento del parámetro comparado a los otros dos modificados, lo que conceptualmente podría ser un indicador de mejor desempeño ante agrietamiento con temperaturas intermedias.

Sin embargo al determinar la viscosidad de los cementos asfálticos modificados se puede observar que presentan características de un ligante muy rígido, lo cual puede ser perjudicial al adherirse a los agregados minerales de las mezclas asfálticas, y aumentan las posibilidades de fallas por bloque debido a posibles mezclas asfálticas rígidas.

CAPITULO IV

4. PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADA DE ASFALTOS

4.1. Curvas maestras

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de los cementos asfálticos y mezclas asfálticas. Actualmente, con la determinación del módulo complejo (G^*) del cemento asfáltico se puede estimar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, propiedad clave en los diseños mecanicistas de pavimentos. Para obtener el valor de G^* se realizan ensayos en el equipo DSR con ciertas variaciones de temperaturas y frecuencias.

La clasificación por desempeño de los asfaltos según AASHTO M 320 proporciona las características reológicas de los ligantes asfálticos a altas, intermedias y bajas temperaturas del pavimento. Para caracterizar con mayor precisión los cementos asfálticos, diversos investigadores han desarrollado modelos para la realización de las curvas maestras como por ejemplo el propuesto por Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM).

4.1.1. Condiciones de ensayo

Las curvas maestras fueron realizadas para cementos asfálticos en estado original, envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV). Las barridas de frecuencias se elaboraron para diferentes temperaturas que van en un rango de 10°C hasta 70°C, con intervalo de temperatura de 10°C. Se consideró un rango de frecuencia inicial de 0.1 Hz hasta 37.5 Hz. El módulo complejo de corte (G^*) varía mayoritariamente al estar expuesto a bajas frecuencias y se estabiliza a frecuencias altas, por esta razón, cada barrido de frecuencias se plasmó usando una escala logarítmica, con la finalidad de tomar una mayor cantidad de frecuencias bajas para las mediciones.

Para determinar los parámetros a utilizar en la realización de las curvas maestras se utilizó el programa Bohlin Software Integrated DSR a cinco tipos de cementos asfálticos los cuales fueron:

- Asfalto procedente de Esmeraldas.
- Asfalto procedente de Texas.
- Asfalto procedente de Esmeraldas mezclado con SBS.
- Asfalto procedente de Esmeraldas mezclado con ELVALOY.
- Asfalto procedente de Esmeraldas mezclado con caucho.

Los resultados obtenidos en el programa Bohlin como se muestra en la Figura 17, proporciona información que será analizada y tabulada en hojas de cálculo que están hechas en función del modelo de CAM para la realización de las curvas maestras.

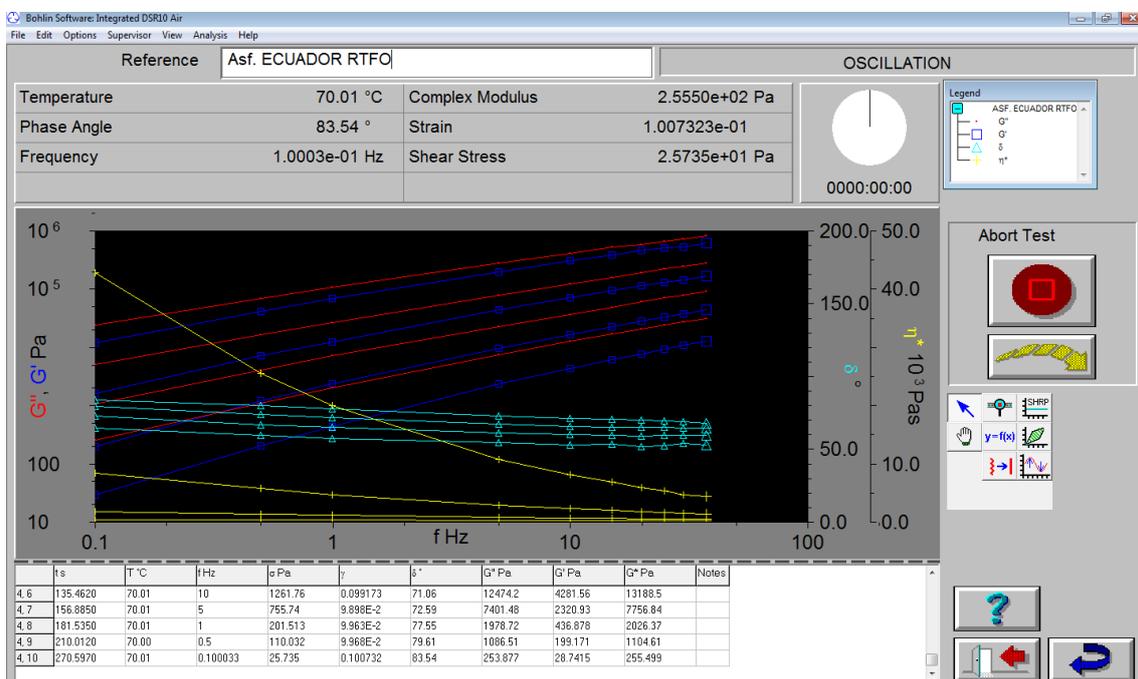


Figura 17. Ejemplo de Curva maestra de Asfalto Ecuador (RTFOT).
Fuente: Autores

4.1.2. Parámetros de la curva maestra

Para interpretar las propiedades de las curvas maestras, es necesario identificar y analizar cuatro parámetros primarios que permiten caracterizar completamente las propiedades de cualquier cemento asfáltico. (Anderson, et al., 1994). La definición de los mismos se presenta a continuación y se resume en la Figura 18.

- **Módulo Vítreo, G^*_g :** Es el valor del módulo complejo o el módulo de rigidez que aproximadamente se tendría a temperaturas bajas y a altas frecuencias (tiempos de carga cortos), donde el asfalto se comporta como un sólido vítreo. El módulo vítreo es normalmente muy cercano a 1 GPa en cargas de corte para la mayoría de los cementos de asfalto, por lo general se asume este valor para la mayoría de casos.
- **Viscosidad estacionaria, η_0 :** Es la viscosidad en la región del flujo viscoso la misma que en pruebas dinámicas se aproxima al límite de la viscosidad dinámica, η^* , cuando el ángulo de fase es cercano a 90° . Cuando se ubica a 45° , es indicativo que la línea dinámica de la curva maestra se aproxima a frecuencias bajas, el cual se refiere a menudo como la asíntota viscosa, siendo un indicativo de la viscosidad estacionaria de un asfalto específico.
- **Frecuencia de cruce, ω , o tiempo de cruce, t_c :** Se refiere a la frecuencia de una temperatura dada en la que la $\tan \delta$ es 1. En este punto, el módulo de almacenamiento y el de pérdida son iguales. Para la mayoría de los cementos asfálticos, la frecuencia de cruce es casi igual al punto en el que la asíntota viscosa se intersecta con el módulo vítreo.

La frecuencia de cruce puede considerarse como un parámetro de dureza que indica la consistencia general de un asfalto a una temperatura seleccionada. La frecuencia de cruce (ω_c) es el recíproco al tiempo de cruce (t_c) como se lo muestra en la siguiente ecuación:

$$t_c = 1/\omega_c.$$

- **Índice reológico, R:** El índice reológico es directamente proporcional al ancho de relajación de la curva maestra e indica el tipo de reología que posee

un asfalto. R , es la diferencia entre el Logaritmo del módulo vítreo y el logaritmo del módulo dinámico. No es una medida de temperatura, pero refleja el cambio del módulo con respecto a la frecuencia o tiempo de cruce y por lo tanto es una medida que depende de la velocidad de corte del cemento asfáltico.

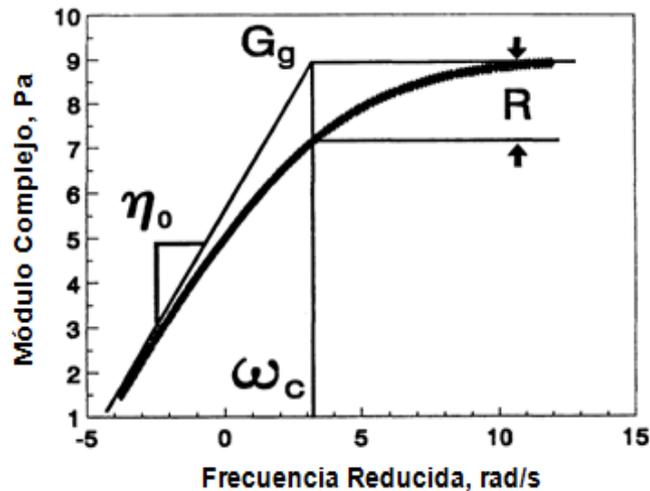


Figura 18. Parámetros dinámicos de la curva maestra para asfaltos.

Fuente: Caracterización física de asfaltos SHRP-A-369

- **Descripción de la incidencia de los parámetros de la curva maestra**

El tiempo de cruce t_c se relaciona con la rigidez del ligante. A medida que disminuye el tiempo de cruce, disminuye la dureza. Si el valor del índice reológico (R) aumenta, la curva maestra se vuelve más plana, más gradual será el cambio hacia un comportamiento viscoso o hacia el flujo en estado estacionario. Esta región de transición se caracteriza por un gran retardo en la elasticidad, significando que el material se comporta como un cuero-goma.

El módulo cambia drásticamente en esta región a medida que se altera la temperatura o el tiempo de carga (Anderson et al., 1991). Normalmente, R es mayor para los asfaltos oxidados.

Todos los ligantes serán analizados con los parámetros del índice reológico (R), el tiempo de cruce (t_c), por medio de la confección de las curvas maestras y aumentando los niveles de envejecimiento para observar la dureza y la sensibilidad del asfalto ante estos estados.

Para la resistencia a ahuellamientos, los valores altos de G^* resultan favorable porque esto representa una alta resistencia total a la deformación y a bajos δ es favorable porque refleja una mayor componente elástica (recuperación) del total de la deformación. A temperaturas intermedias entre 10°C y 25°C, los asfaltos son generalmente duros y más elásticos que a temperaturas altas. El modo de falla que prevalece a estas temperaturas es el daño por fatiga, el cual es causado por ciclos de cargas repetidas a niveles más bajos que la fuerza estática del material (Bahia & Anderson, 1995).

4.1.3. Configuración de Curvas Maestras

Para la elaboración de las curvas maestras se requiere utilizar un reómetro de corte dinámico (DSR) a varias temperaturas. Las pruebas en el DSR se realizaron de acuerdo con la normativa AASHTO T 315 (2011a).

La curva maestra caracteriza la rigidez de los cementos asfálticos en una amplia gama de tiempos de carga y temperaturas. En consecuencia, la rigidez del asfalto se midió a varias temperaturas y luego se combinó en una única curva maestra, el cual es el conjunto de cambio de rigidez individual de cada curva a determinadas frecuencias y así se obtuvo una independiente a una temperatura de referencia. La curva maestra resultante y sus factores por cambio de temperatura proporcionan una caracterización rigidez-temperatura de un ligante asfáltico. (R. Bonaquist et al., 2013)

Para la construcción de las curvas maestras de los ligantes asfálticos se comienza con la medición del módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), utilizando un rango de frecuencias escogidos para diferentes temperaturas con el reómetro de corte dinámico (DSR).

Se utilizó el programa Bohlin Software Integrated DSR, al cual se ingresaron diferentes condiciones de temperaturas y frecuencias de ensayo. Para temperaturas en el intervalo de 10°C a 30°C se utilizó el platillo de 8 mm de diámetro y para temperaturas superiores a 30°C se utilizó el platillo de 25 mm de diámetro.

La salida de resultados que se obtienen en el software del DSR arrojan los resultados de los parámetros característicos de un determinado ligante asfáltico,

como se muestran en la Tabla 19, los cuales son el tiempo (s), temperatura (°C), frecuencia (Hz), ángulo de fase (grado), módulo complejo (Pa), módulo elástico (Pa), módulo viscoso (Pa), viscosidad compleja (Pa.s), esfuerzo de corte (Pa) y tensión.

Tabla 19. Parámetros de corridas a varias temperaturas realizadas en el DSR

TIEMPO	TEMPERATURA	FRECUENCIA	ÁNGULO DE FASE	MÓDULO COMPLEJO	MÓDULO ELÁSTICO	MÓDULO VISCOSO	VISCOSIDAD COMPLEJA	ESFUERZO DE CORTE	TENSIÓN
(s)	(°C)	(Hz)	(°)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pas)	(Pa)	
31.283	39.99	3.75E+01	41.14	1.30E+06	9.78E+05	8.54E+05	5.51E+03	3.26E+03	2.55E-03
62.6199	40	3.00E+01	39.21	1.31E+06	1.02E+06	8.31E+05	6.97E+03	3.25E+03	2.50E-03
93.9991	40	2.50E+01	39.08	1.21E+06	9.42E+05	7.65E+05	7.73E+03	3.26E+03	2.70E-03
125.4494	40	2.00E+01	37.87	1.12E+06	8.86E+05	6.89E+05	8.93E+03	3.26E+03	2.92E-03
157.0523	40	1.50E+01	38.93	1.01E+06	7.85E+05	6.34E+05	1.07E+04	3.26E+03	3.24E-03
188.719	40	1.00E+01	39.1	8.90E+05	6.91E+05	5.61E+05	1.42E+04	3.26E+03	3.67E-03
220.9674	40	5.00E+00	39.07	6.52E+05	5.06E+05	4.11E+05	2.07E+04	3.26E+03	5.00E-03

Fuente: Autores

Estos resultados proporcionados por el software son utilizados para inicialmente realizar las curvas log G^* vs log frecuencia para todas las temperaturas de ensayo, como se muestra en la Figura 19, para posteriormente utilizar una hoja de cálculo que permita llevar todas las curvas a una independiente en función de una temperatura de referencia.

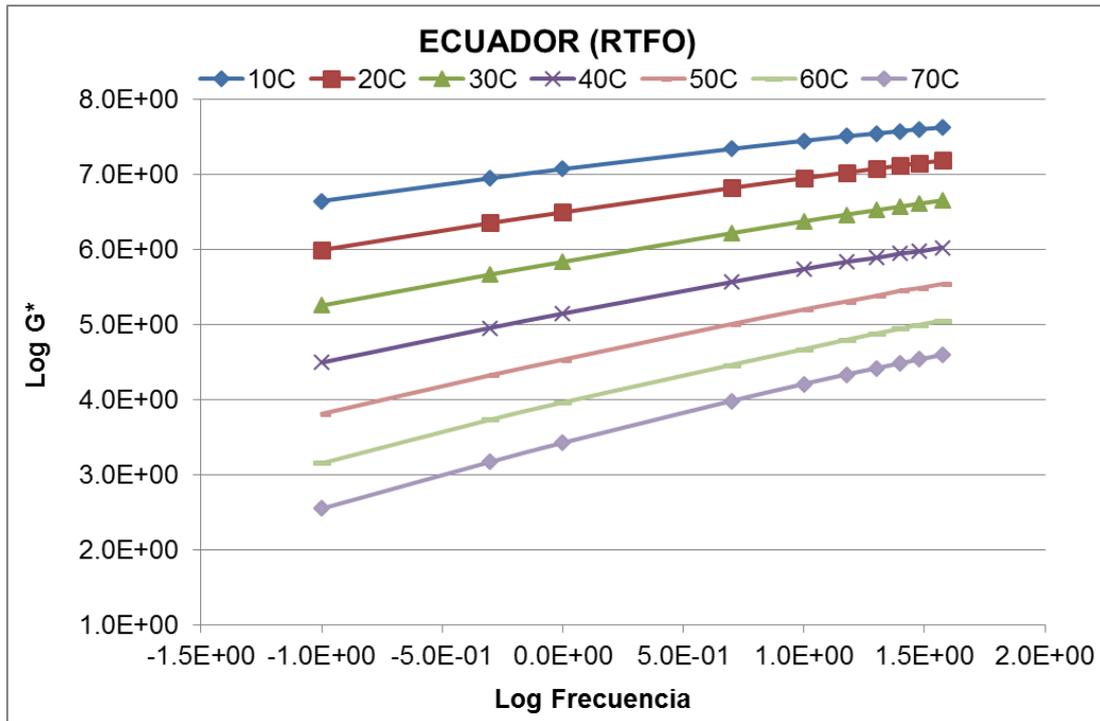


Figura 19. Curva log G* vs log frecuencia: Esmeraldas (RTFOT)
Fuente: Autores

Los parámetros antes mencionados proporcionan los datos necesarios para tabularlos en la hoja de cálculo con la cual se construye la curva maestra utilizando el modelo de CAM, el cual utiliza los parámetros de la Tabla 19 y otras características como, Shift Factor, logaritmo de la Frecuencia reducida, logaritmo del módulo complejo de esfuerzo de corte, los cuales se obtienen en una hoja de cálculo, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Hoja de cálculo para las gráficas de curvas maestras.

Log Frequency	Log(G*) _{meas.}	Shift Factor	Log Reduced Frequency	Log(G*) _{Calc}	Δ ²	Predicted Phase Angle
1.57E+00	7.43	1.95E+01	7.31E+02	7.76	1.10E-01	42.66
1.48E+00	7.41	1.94E+01	5.83E+02	7.73	1.07E-01	43.38
1.40E+00	7.38	1.95E+01	4.87E+02	7.71	1.06E-01	43.95
1.30E+00	7.35	1.95E+01	3.90E+02	7.68	1.09E-01	44.66
1.18E+00	7.31	1.95E+01	2.92E+02	7.64	1.11E-01	45.58
1.00E+00	7.25	1.95E+01	1.95E+02	7.58	1.14E-01	46.88
6.99E-01	7.13	1.94E+01	9.72E+01	7.48	1.23E-01	49.10
0.00E+00	6.85	1.94E+01	1.94E+01	7.23	1.43E-01	54.12
-3.01E-01	6.73	1.94E+01	9.72E+00	7.11	1.47E-01	56.23
-1.00E+00	6.42	1.94E+01	1.94E+00	6.82	1.61E-01	60.90

Fuente: Autores

Para la elaboración de las curvas maestras es necesario determinar el Shift Factor el cual se determina con la Fórmula (1), en la cual intervienen los coeficientes C1 y C2, siendo valores empíricos determinados por medio del programa de complemento de Microsoft Excel llamado SOLVER y, los factores T y Tr, hacen referencia a la temperatura de ensayo y a la temperatura de referencia respectivamente.

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

Para realizar la curva maestra a partir del modelo de Christensen–Anderson–Marasteanu (CAM), se debe determinar el logaritmo de frecuencia reducida el cual se lo obtiene a partir de la multiplicación del Shift Factor y la frecuencia. A su vez, el logaritmo de módulo complejo de esfuerzo de corte se calculó con la Fórmula (2) y por último el Angulo de Fase se halló con la Fórmula (3), el que intervienen la frecuencia reducida y la rigidez (K).

$$(2) \quad G^*(f_R) = (G^*)_g * \left[1 + \left(\frac{f_c}{f} \right)^k \right]^{-\frac{m_e}{k}}$$

$$(3) \quad \delta(f_R) = \frac{90}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^k \right]}$$

Al encontrar todos los parámetros mencionados, es posible realizar las curvas maestras para los diferentes asfaltos analizados en esta investigación, ver figura 20.

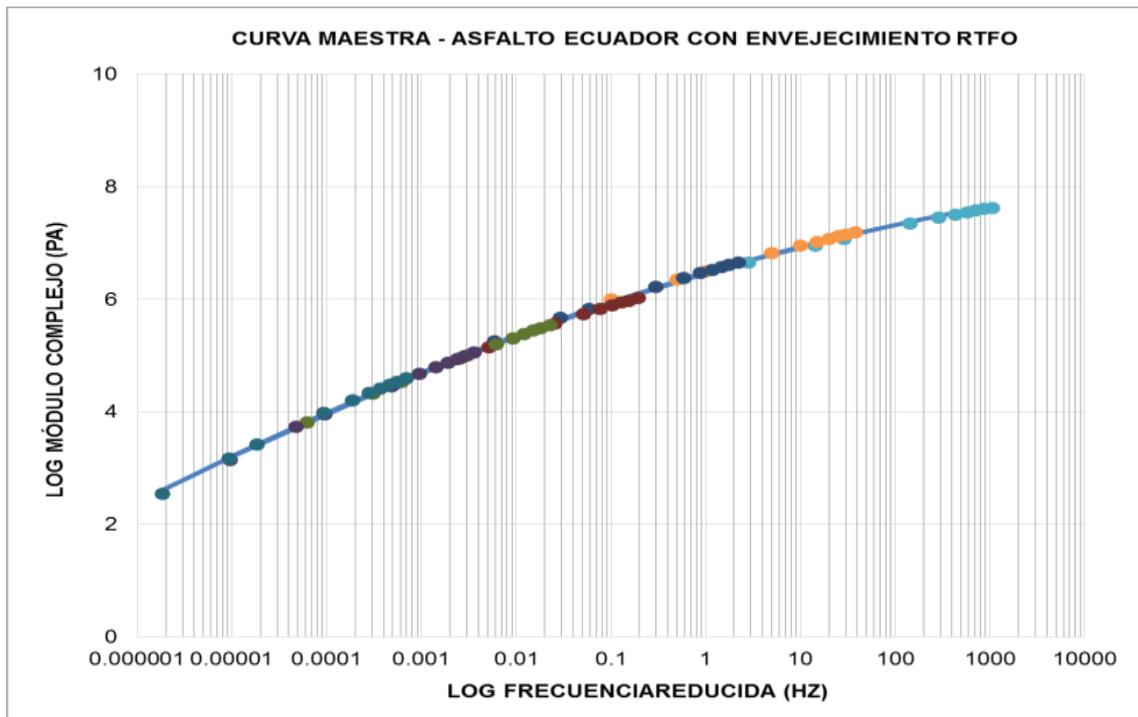


Figura 20. Curva maestra Asfalto de Esmeraldas (RTFOT)
Fuente: Autores

4.2 Curvas maestras obtenidos de los ligantes asfálticos sin y con modificación

4.2.1. Gráfica de ensayo de curvas maestras del asfalto de Ecuador (Original)

En las figuras 21 y 22 se pueden observar seis curvas maestras, las cuales corresponden a los asfaltos procedentes de la refinería de Esmeraldas y de Texas en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV) correspondientemente.

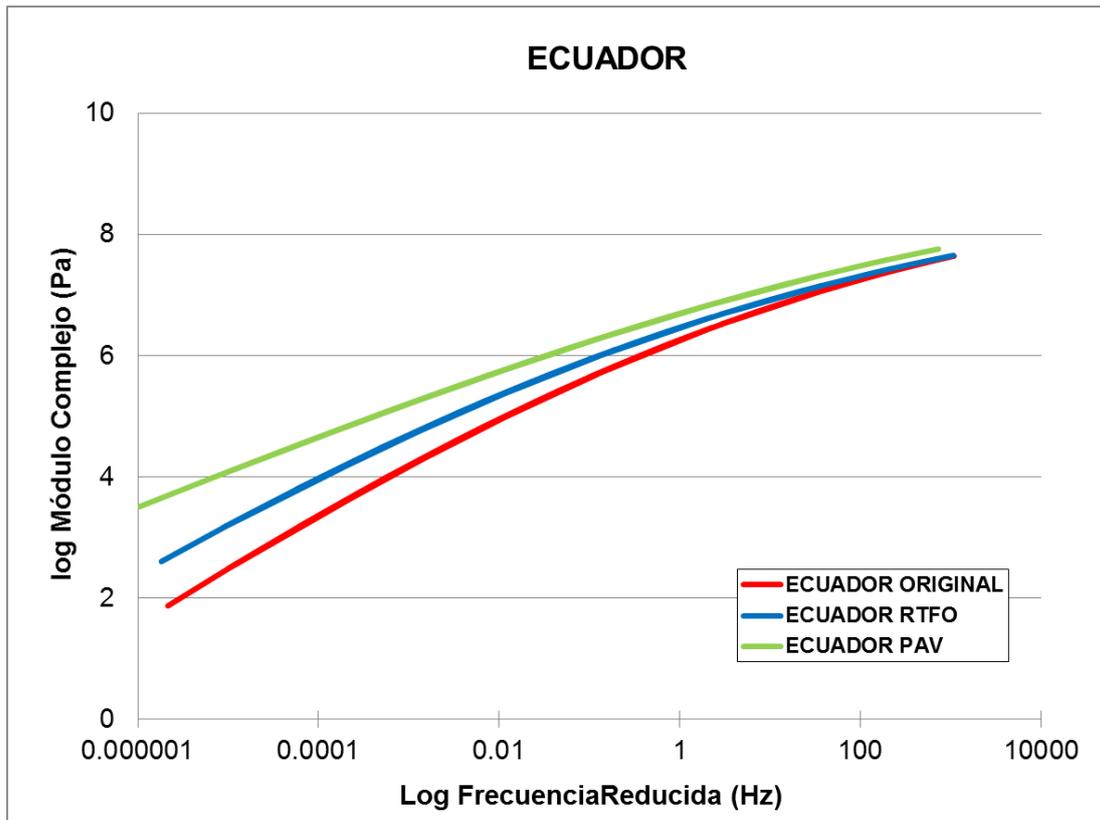


Figura 21. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Ecuador
Fuente: Autores

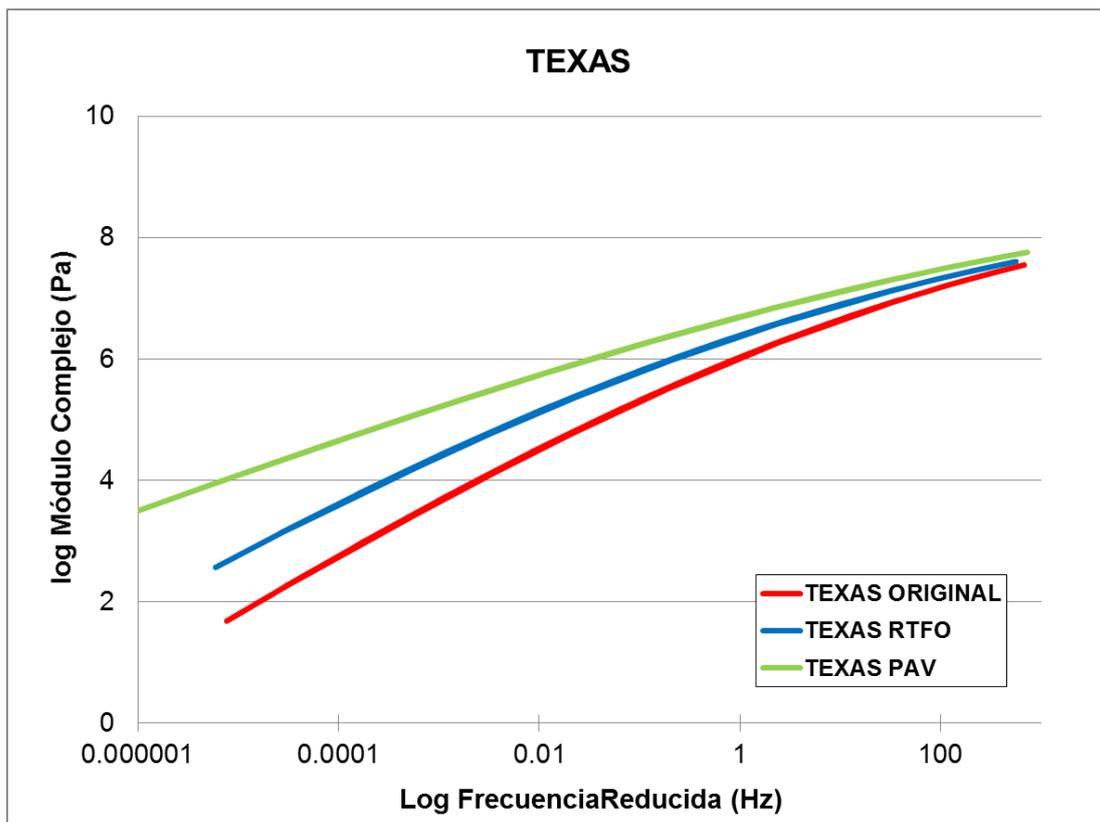


Figura 22. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Texas

Fuente: Autores

El envejecimiento primario (color azul) de los dos cementos asfálticos antes mencionados, provocan un aumento de su rigidez, lo cual evidencia con el aumento del módulo complejo G^* . El aumento de la rigidez es más notoria al comparar los valores de G^* del envejecimiento secundario (color verde) con los valores del cemento asfáltico en estado original (color rojo). Sin embargo, para valores de frecuencias muy altos, los valores de rigidez tienden a parecerse.

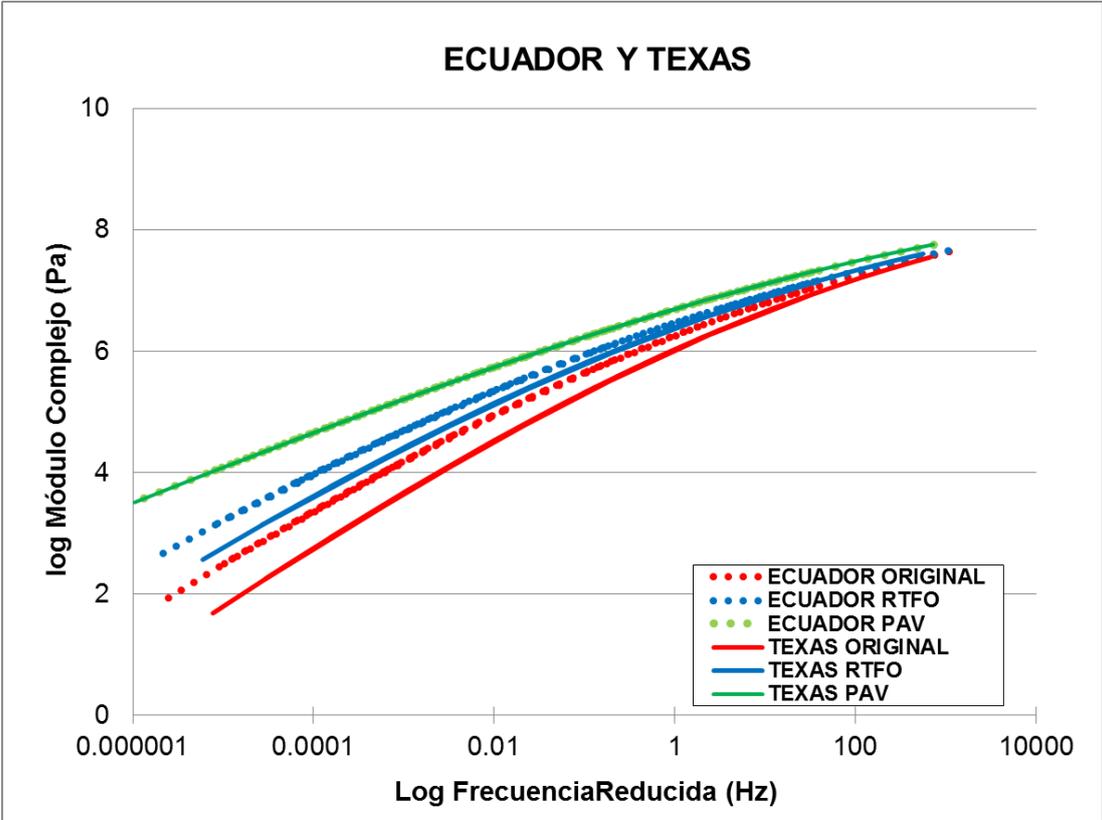


Figura 23. Gráfica de curvas maestras del cemento asfáltico de Ecuador y Texas

Fuente: Autores

Al comparar las curvas maestras de los dos cementos asfálticos como se muestra en la Figura 23, se puede apreciar que el asfalto de Ecuador presenta características de un ligante más rígido que el asfalto de Texas debido a que tiene valores de módulo complejo mayores tanto para el asfalto original como para el residuo de TFOT, sin embargo, para el residuo del PAV esta diferencia es despreciable, comportándose de manera parecida.

A pesar de que ambos asfaltos clasifican como un PG 64-28 según la tecnología Superpave, por medio de la curva maestra se puede observar que ambos no poseen las mismas características y tampoco reaccionan de igual manera ante un proceso de envejecimiento.

4.2.1 Gráfica de ensayo de curvas maestras de los asfalto modificado con SBS, ELVALOY y Caucho

A continuación en las figuras 24, 25 y 26 se observan tres curvas maestras en cada una de ellas, correspondientes al asfalto de la refinería de Esmeraldas modificados con SBS, ELVALOY y caucho respectivamente, en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV) para cada uno de ellos.

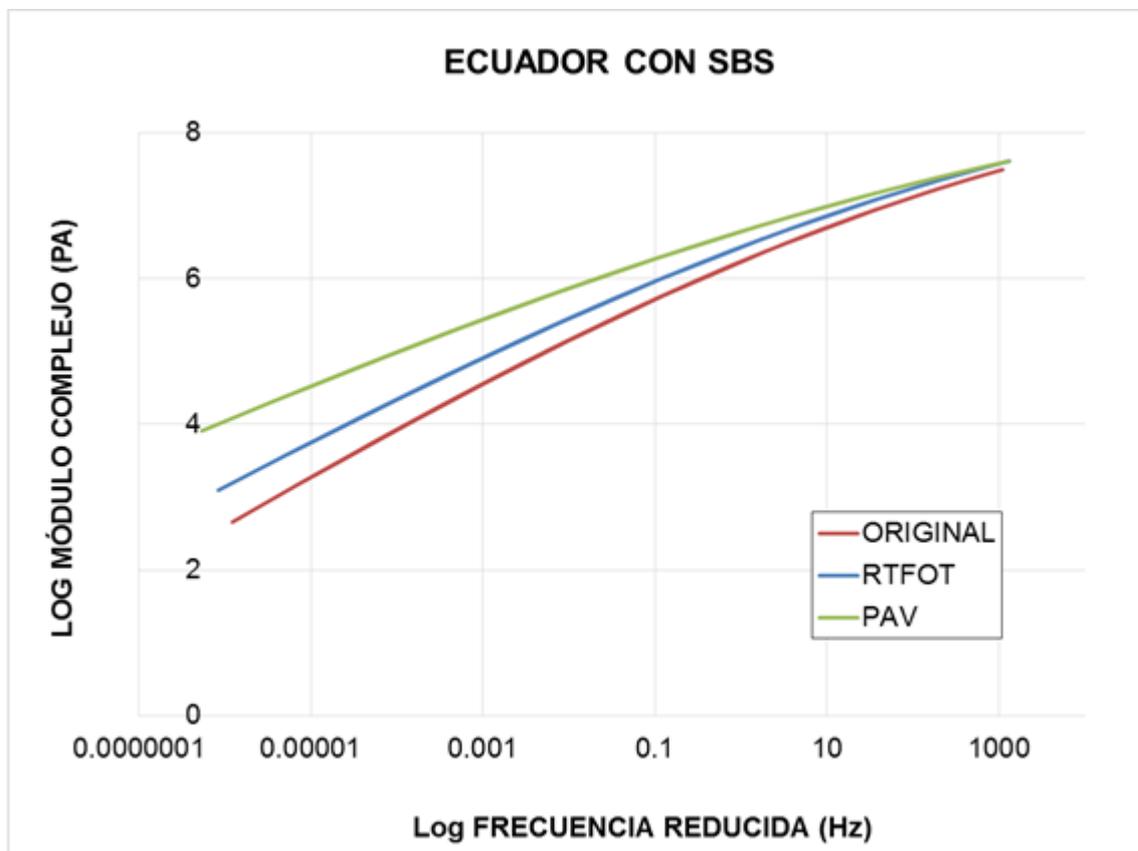


Figura 24. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con SBS
Fuente: Autores

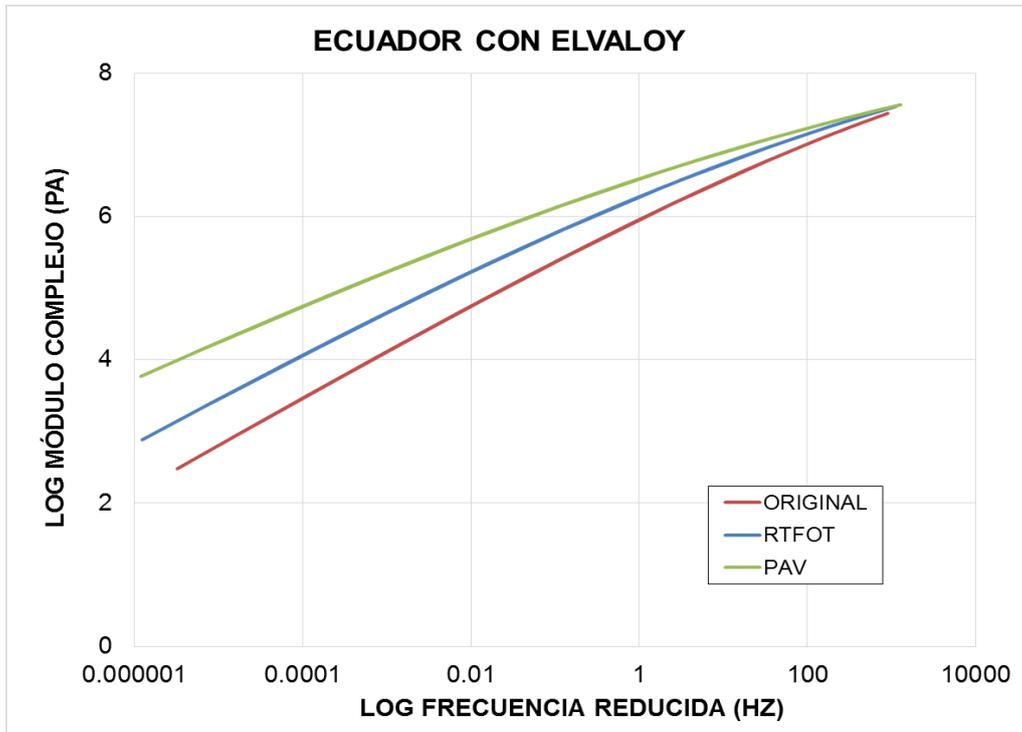


Figura 25. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con ELVALOY

Fuente: Autores

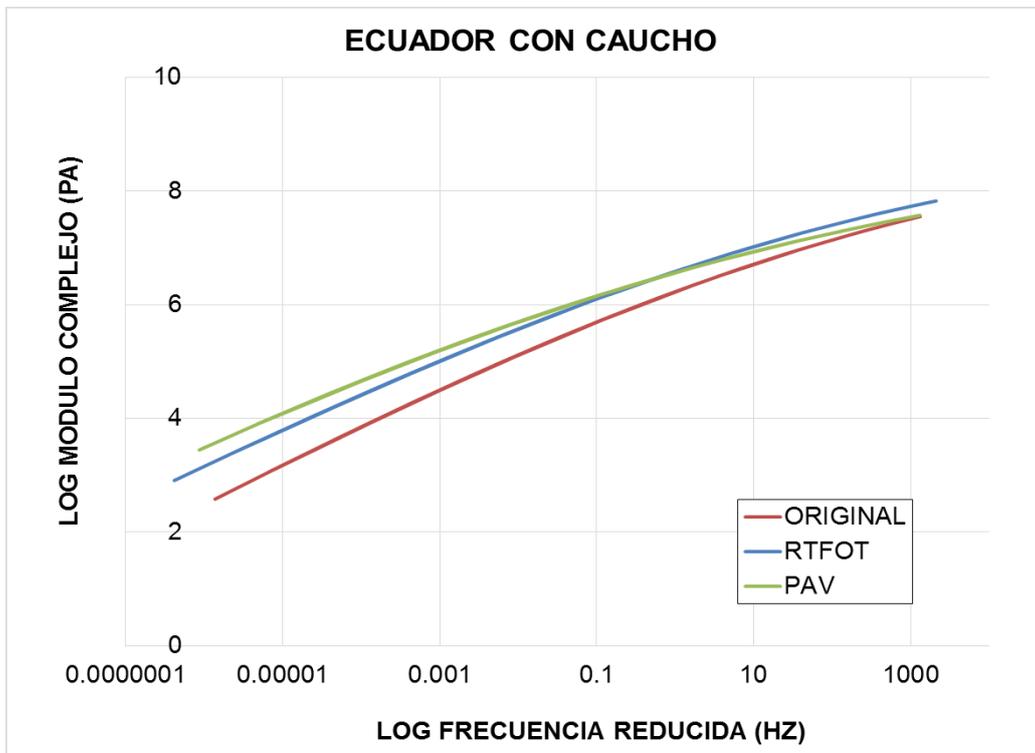


Figura 26. Gráfica de curvas maestras de asfalto modificado con caucho

Fuente: Autores

Las curvas maestras de los tres asfaltos modificados tienen un comportamiento similar, obteniendo valores de G^* muy altos en comparación con los primeros asfaltos sin modificar en todas las temperaturas.

Desde el estado original los tres asfaltos modificados presentan valores de G^* muy altos, lo cual se puede atribuir al proceso de mezclado con los polímeros, ya que este proceso se realiza a temperaturas muy altas y por un tiempo prolongado. Por consiguiente es evidente pensar que los asfaltos modificados presentan un mayor valor de G^* que los asfaltos procedentes de Esmeraldas y Texas durante su estado original y con envejecimiento primario (RTFOT) para frecuencias bajas donde existen menos posibilidades de error. Pero la tendencia cambia después del envejecimiento secundario (PAV) ya que los cinco asfaltos alcanzan valores muy parecidos de G^* entre ellos, lo cual indicaría que el nivel de envejecimiento alcanzado en este nivel de oxidación es muy alto.

Al analizar los valores del ángulo de fase de los asfaltos modificados y sin modificar, se observa que para las temperaturas bajas de ensayo, el comportamiento de las componentes elásticas y viscosas de los cinco asfaltos son muy parecidas entre sí. Sin embargo, a temperaturas altas de ensayo el ángulo de fase aumenta significativamente en los asfaltos sin modificar. En los asfaltos modificados las componentes elásticas y viscosas son parecidas cuantitativamente, es decir cerca de un ángulo de 45° .

4.3 Análisis de los parámetros reológicos obtenidos en las curvas maestras de los asfaltos.

4.3.1 Comparación de las curvas maestras de Ecuador y Texas

De la Figura 27, confeccionada con otro formato para el asfalto del Ecuador, se pueden obtener los valores mostrados en las tablas 21 y 22. Usualmente se considera el módulo vítreo igual a 1GPa, el cual se ha denominado como “teórico”, siendo entonces el índice reológico (R teórico) medido a partir del mismo. Por otro lado, el módulo complejo que se refleja, es obtenido con los respectivos tiempos de cruce correspondientes a los diferentes estados de envejecimiento del asfalto a ensayar.

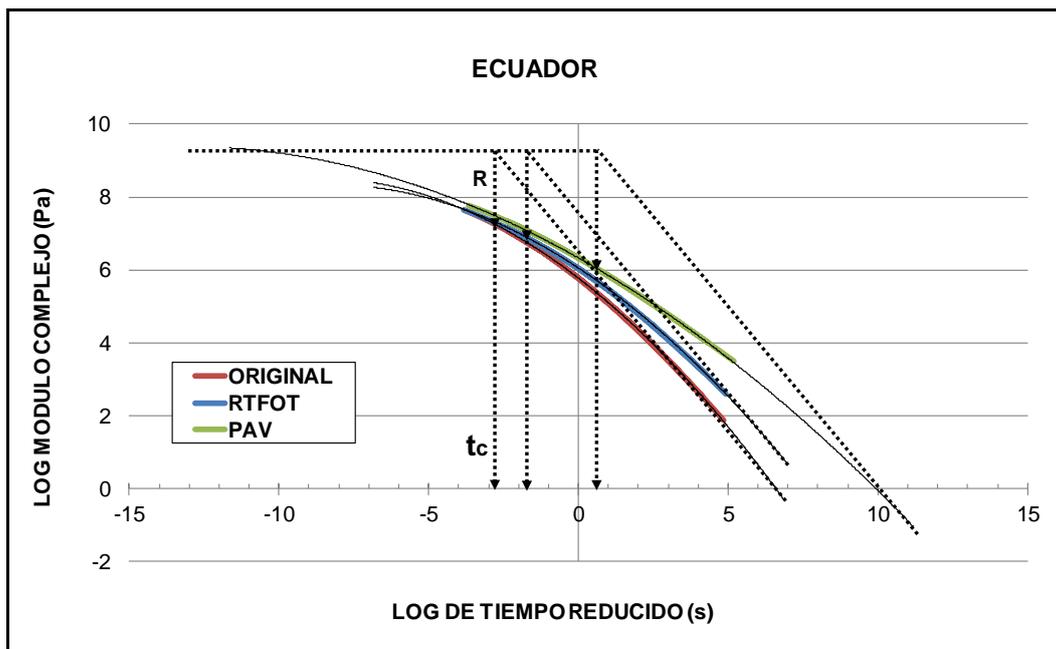


Figura 27. Parámetros. Asfalto de Ecuador.

Fuente: Autores

Tabla 21. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador.

ESTADO	Gvítreo calculado	Gvítreo teórico	R calculado	R teórico	tc calculado	tc calculado (s)
ORIGINAL	9.37	9.00	2.07	1.73	-2.84	0.0014
RTFOT	9.37	9.00	2.38	2.04	-1.92	0.0120
PAV	9.37	9.00	3.28	2.94	0.55	3.5481

Fuente: Autores

Tabla 22. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador.

ESTADO	Log G* (Pa)	G* (Pa)
ORIGINAL	7.22	16,595,869
RTFOT	6.99	9,772,372
PAV	6.10	1,258,925

Fuente: Autores

De manera similar, en la Figura 28, para el asfalto de Texas, se pueden obtener los valores mostrados en las tablas 23 y 24.

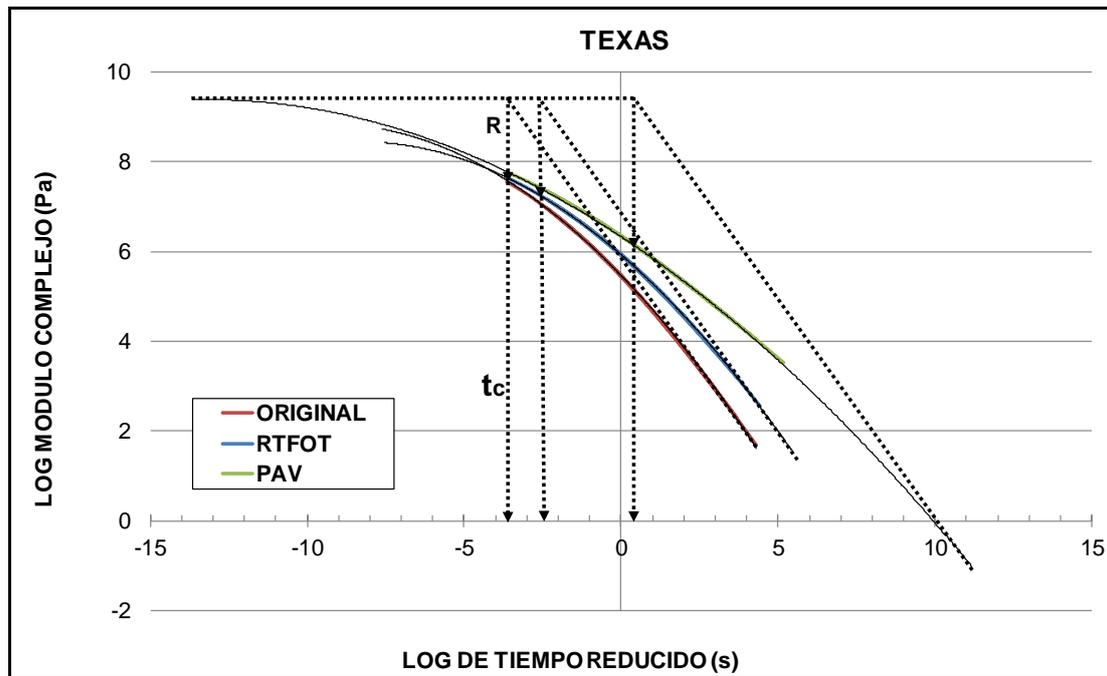


Figura 28. Parámetros. Asfalto de Texas.
Fuente: Autores.

Tabla 23. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Texas.

ESTADO	Gvítreo calculado	Gvítreo teórico	R calculado	R teórico	tc calculado	tc calculado (s)
ORIGINAL	9.58	9.00	1.85	1.42	-3.60	0.0003
RTFOT	9.58	9.00	2.19	1.76	-2.48	0.0033
PAV	9.58	9.00	3.26	2.83	0.40	2.5119

Fuente: Autores

Tabla 24. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Texas.

ESTADO	Log G* (Pa)	G* (Pa)
ORIGINAL	8.55	354,813,389
RTFOT	8.21	162,181,010
PAV	6.55	3,548,134

Fuente: Autores

El comportamiento obtenido en las curvas en los diferentes estados de envejecimiento respecto a las variaciones de índice reológico (R) y tiempos de cruce (tc), coinciden con prácticas internacionales conocidas (Lyngdal, 2015). Puede observarse en la Figura 29 comparaciones similares a los determinados en este estudio.

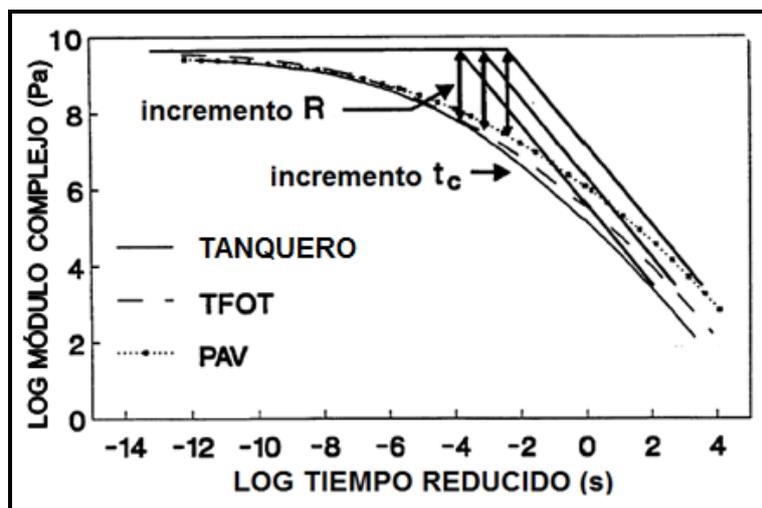


Figura 29. Curvas Maestras de asfaltos en diferentes estados de envejecimiento.

Fuente: Análisis crítico de PH y PG+ con métodos de ensayo para ligantes asfálticos. (Lyngdal, E. 2015)

A partir de estos parámetros, se puede concluir que la curva maestra del asfalto de Esmeraldas como se muestra en la Tabla 21 generó valores del índice reológico (R) mayores en comparación al asfalto de Texas para los tres estados analizados, obteniéndose una curva que se va aplanando gradualmente a medida que aumenta R.

Esto indica que en el asfalto ecuatoriano existe un mayor efecto del envejecimiento provocado por las pruebas RTFOT y PAV, lo que implica una mayor rigidez en comparación con el ligante de Texas, es decir, será más propenso a sufrir daños por agrietamiento. A su vez el tiempo de cruce (t_c), que es el encargado de medir la dureza del ligante (rigidez), arrojó valores superiores para el asfalto de Esmeraldas, por lo que se corrobora que posee un mayor endurecimiento en los tres estados. Ver tablas 21 y 23.

4.3.2. Comparación de las curvas maestras de asfaltos modificados con SBS, ELVALOY y caucho.

Así como se realizó para asfaltos sin modificación, a continuación en la Figura 30, para el asfalto de Ecuador con SBS, se pueden obtener los valores mostrados en las tablas 25 y 26.

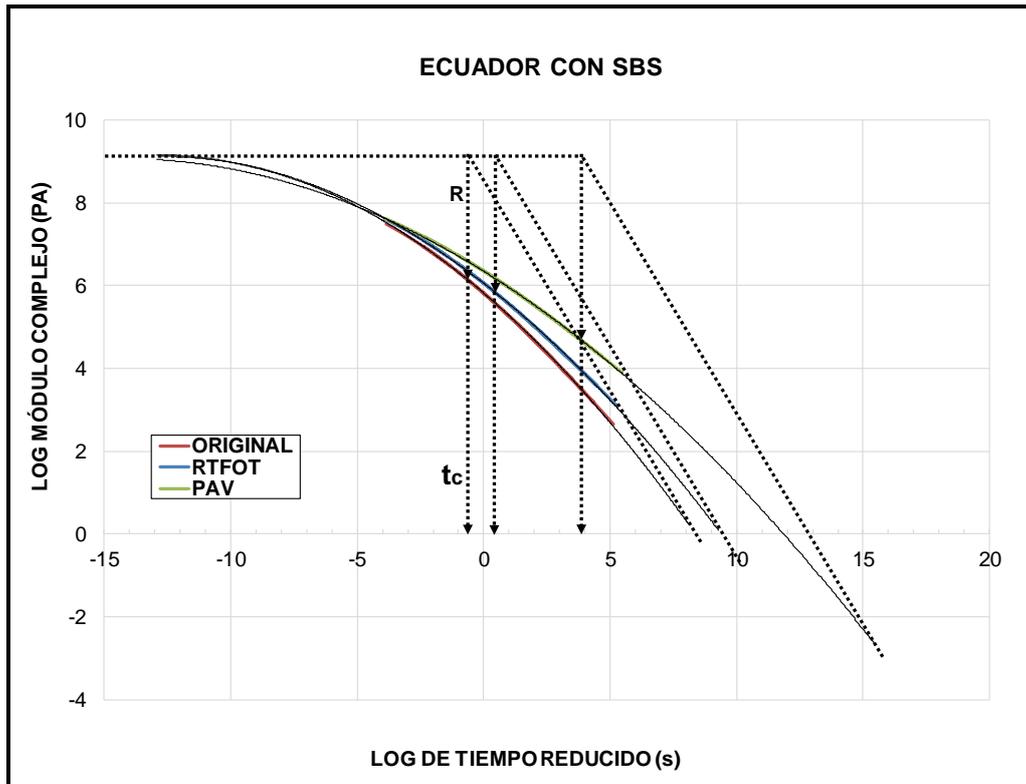


Figura 30. Parámetros. Asfalto de Ecuador modificado con SBS
Fuente: Autores.

Tabla 25. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con SBS.

ESTADO	Gvítreo calculado	Gvítreo teórico	R calculado	R teórico	tc calculado	tc calculado (s)
ORIGINAL	9.17	9.00	3.02	2.85	-0.64	0.2291
RTFOT	9.17	9.00	3.31	3.14	0.43	2.6915
PAV	9.17	9.00	4.47	4.30	3.85	7079.4578

Fuente: Autores

Tabla 26. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con SBS.

ESTADO	Log G* (Pa)	G* (Pa)
ORIGINAL	6.16	1,445,440
RTFOT	5.85	707,946
PAV	4.17	14,791

Fuente: Autores

De manera similar, en la Figura 31, para el asfalto de Ecuador con ELVALOY, se pueden obtener los valores mostrados en las tablas 27 y 28.

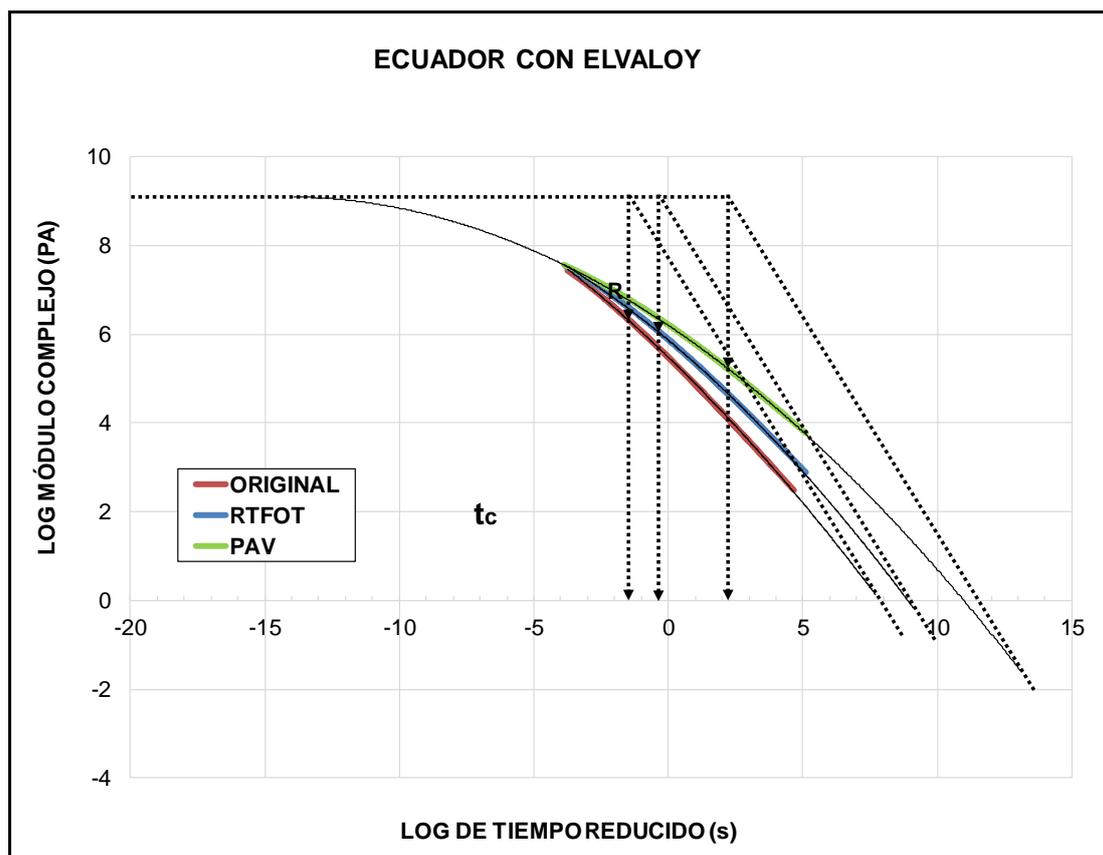


Figura 31. Parámetros. Asfalto de Ecuador modificado con Elvaloy.
Fuente: Autores.

Tabla 27. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con ELVALOY.

ESTADO	Gvítreo calculado	Gvítreo teórico	R calculado	R teórico	tc calculado	tc calculado (s)
ORIGINAL	9.16	9.00	2.80	2.62	-1.50	0.0316
RTFOT	9.16	9.00	3.08	2.90	-0.35	0.4467
PAV	9.16	9.00	3.87	3.69	2.23	169.8244

Fuente: Autores

Tabla 28. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con ELVALOY.

ESTADO	Log G* (Pa)	G* (Pa)
ORIGINAL	6.35	2,238,721
RTFOT	6.06	1,148,154
PAV	5.26	181,970

Fuente: Autores

A continuación, en la Figura 32, para el asfalto de Ecuador con caucho, se pueden obtener los valores mostrados en las tablas 29 y 30.

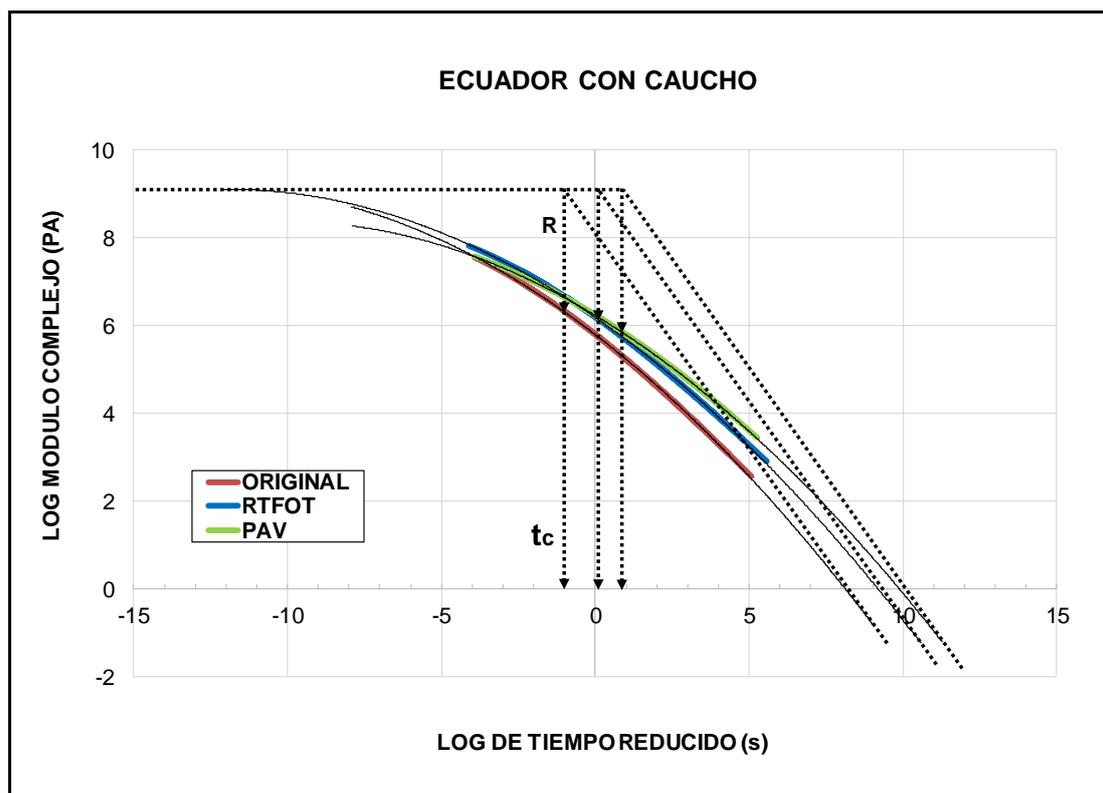


Figura 32. Parámetros. Asfalto modificado con Caucho.

Fuente: Autores.

Tabla 29. Resultados de los parámetros de la curva maestra. Asfalto de Ecuador con caucho.

ESTADO	Gvítreo calculado	Gvítreo teórico	R calculado	R teórico	tc calculado	tc calculado (s)
ORIGINAL	9.15	9.00	2.80	2.63	-1.01	0.0977
RTFOT	9.15	9.00	2.98	2.81	0.12	1.3183
PAV	9.15	9.00	3.25	3.08	0.86	7.2444

Fuente: Autores

Tabla 30. Valores del módulo complejo correspondientes a los tiempos de cruce. Asfalto de Ecuador con caucho.

ESTADO	Log G* (Pa)	G* (Pa)
ORIGINAL	6.34	2,187,762
RTFOT	6.14	1,380,384
PAV	5.88	758,578

Fuente: Autores

4.3.3. Comparación de las curvas maestras de asfaltos sin y con modificación

Tabla 31. Valores del parámetro R correspondientes a las curvas maestras de los diferentes tipos de asfaltos.

ESTADO	R calculado				
	ECUADOR	TEXAS	SBS	ELVALOY	CAUCHO
ORIGINAL	2.07	1.85	3.02	2.80	2.80
RTFOT	2.38	2.19	3.31	3.08	2.98
PAV	3.28	3.26	4.47	3.87	3.25

Fuente: Autores

Tabla 32. Valores del parámetro t_c correspondientes a las curvas maestras de los diferentes tipos de asfaltos.

ESTADO	t_c calculado (s)				
	ECUADOR	TEXAS	SBS	ELVALOY	CAUCHO
ORIGINAL	0.0014	0.0003	0.2291	0.0316	0.0977
RTFOT	0.0120	0.0033	2.6915	0.4467	1.3183
PAV	3.5481	2.5119	7079.4578	169.8244	7.2444

Fuente: Autores

En las tablas 31 y 32 se pueden observar que para los asfaltos modificados (SBS, ELVALOY y caucho), los valores calculados del índice reológico son mayores en comparación con los asfaltos de Ecuador y Texas, lo cual indicaría de cierta manera un mayor efecto del envejecimiento.

Los ligantes asfálticos modificados con SBS y ELVALOY poseen índices reológicos superiores al ligante con caucho, siendo este último el que presenta un mejor comportamiento ante problemas de endurecimiento, además del valor del tiempo de cruce, que al ser más bajo, indica menor rigidez. En el caso de los asfaltos modificados no necesariamente implicará un desempeño malo a la fatiga.

4.4. Diagrama de Black

Los diagrama de Black son representaciones del ángulo de fase vs el módulo complejo. Permiten detectar posibles errores en las mediciones y además identificar tipos de modificadores y ligantes. Los parámetros que se utilizan para la confección de los Diagramas de Black se obtienen a partir de los datos de los ensayos

realizados para obtener las curvas maestras, debido a que las condiciones son las mismas que las utilizadas para realizar dichas curvas.

4.4.1. Configuración de los diagramas de Black

Los diagramas de Black fueron confeccionadas considerando los diferentes tipos de cementos asfálticos en estado original, con envejecimiento primario (RTFOT) y con envejecimiento secundario (PAV). Los parámetros de temperaturas y frecuencias de ensayos son las mismas que se consideró para la realización de las curvas maestras. Las temperaturas abarcadas fueron desde 10°C hasta 70°C, midiéndose cada 10°C y para el rango de frecuencias se consideró desde 0.1 Hz hasta 37.5 Hz. Se puede observar a continuación en la Figura 33, la gráfica del diagrama de Black, obtenido de un documento de Chile, donde se relaciona el módulo complejo G^* y el ángulo de fase a las temperaturas deseadas.

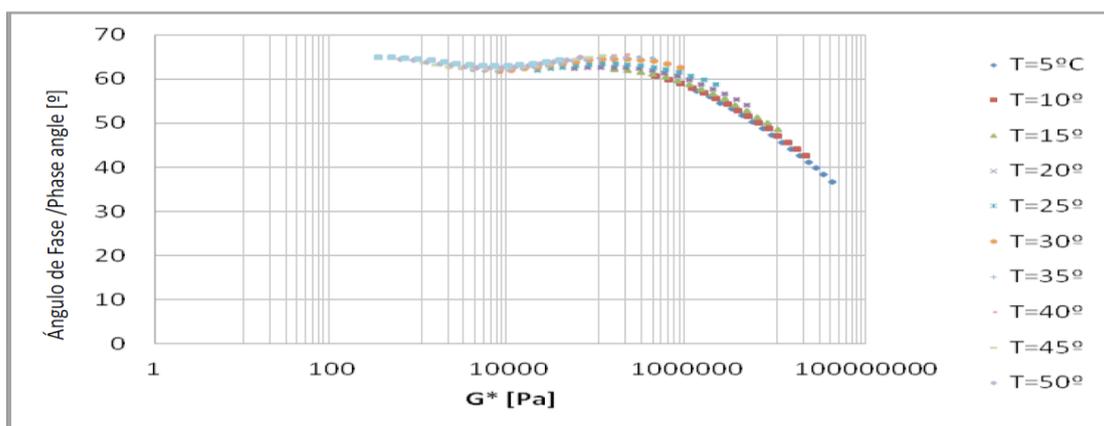


Figura 33. Diagrama de Black. Ligante asfáltico modificado II, original.

Fuente: Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. (F. Araya, et al., 2012).

A continuación en las figuras 34, 35 y 36, se muestran ejemplos de los diagramas de Black para el asfalto de Ecuador en su estado original, RTFOT y PAV, a diferentes rangos de temperaturas establecidas.

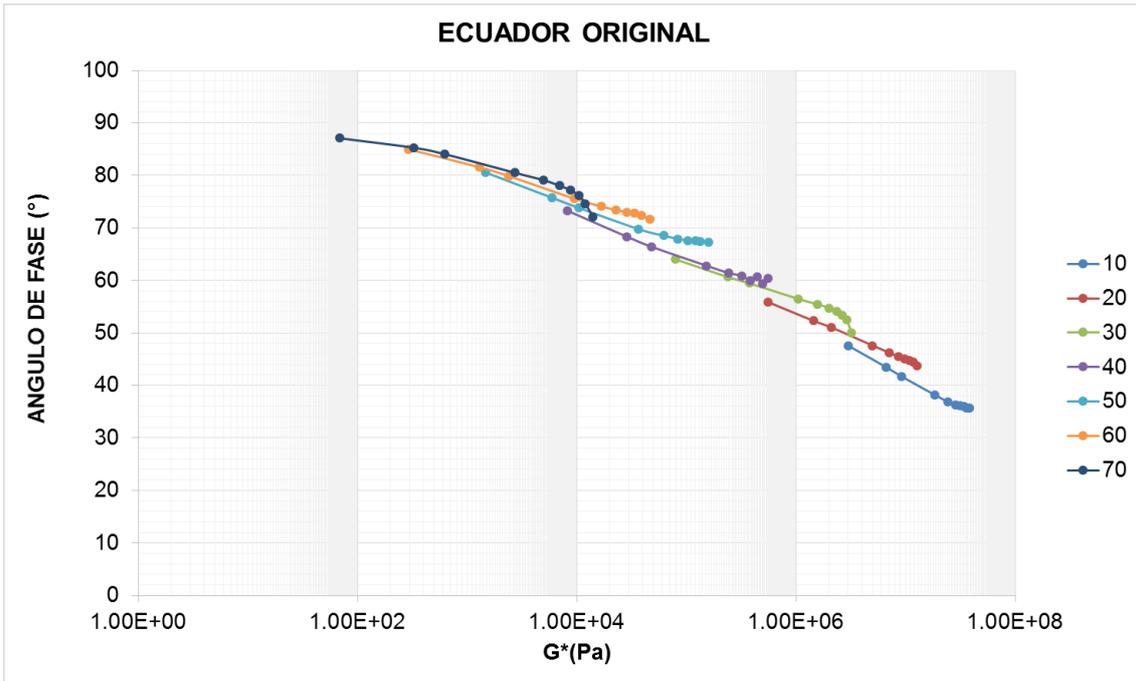


Figura 34. Diagrama de Black asfalto Ecuador original
Fuente: Autores

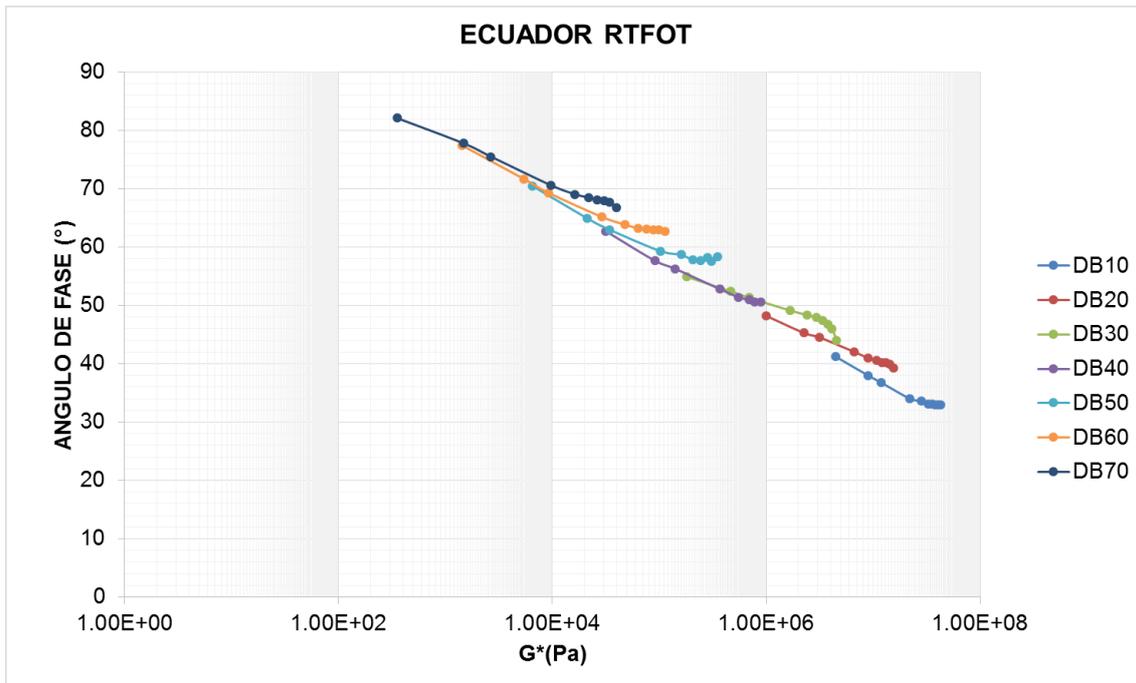


Figura 35. Diagrama de Black asfalto Ecuador RTFOT
Fuente: Autores

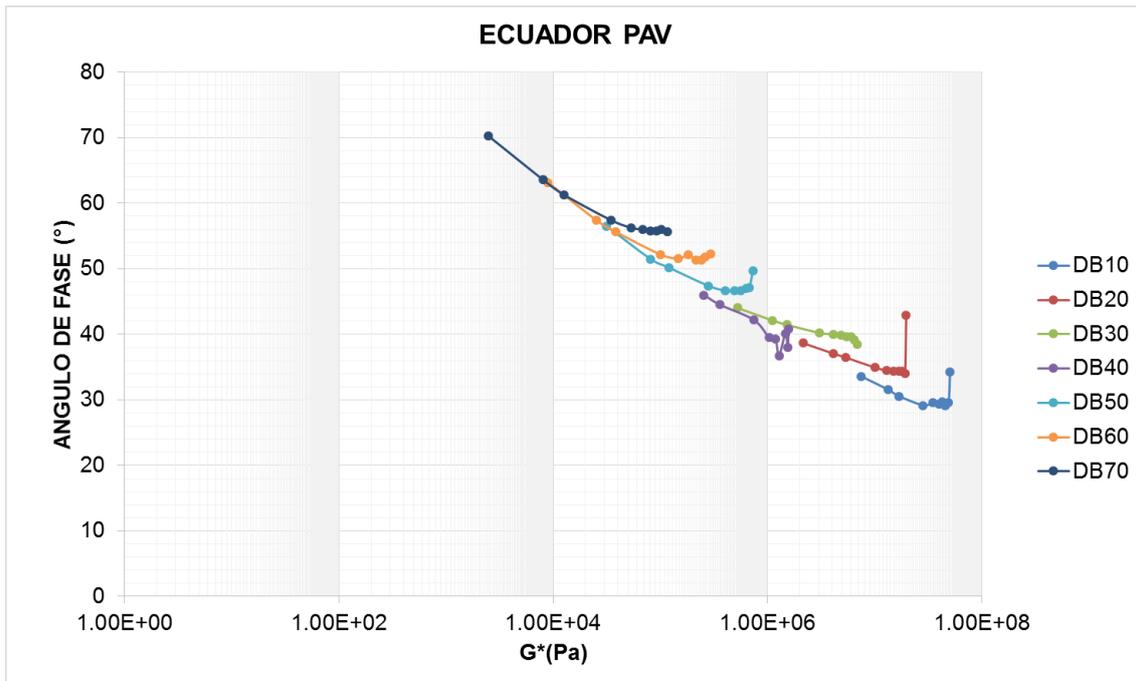


Figura 36. Diagrama de Black asfalto Ecuador PAV

En las gráficas anteriores puede observarse un comportamiento significativo al final del trazo correspondiente a cada temperatura, en el cual se aprecia una ligera distorsión hacia abajo o hacia arriba provocada por el rango de frecuencias altas. Esto en general requerirá estudios más detallados.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En el trabajo se ha tenido la oportunidad de comparar el asfalto producido en la Refinería de Esmeraldas con otro de características supuestamente similares, procedentes de Texas. Lamentablemente no se ha podido conocer en particular la refinería de procedencia de este último. Si bien al asfalto producido en Esmeraldas se le suele llamar AC-20, en realidad por los resultados de las pruebas de clasificación por viscosidad este se aproxima más a un AC-30, aunque no cumple todas las exigencias para ello en ninguna de las dos normativas empleadas. Las propiedades más críticas corresponden al residuo del asfalto en la prueba TFOT.

Por otra parte, el asfalto de Texas muestra una calidad superior y clasificaría como AC-20 de acuerdo a la norma ASTM. Se llama la atención a que en la normativa INEN la viscosidad exigida al residuo es muy baja respecto a la ASTM y no guarda relación con las ductilidades exigidas, que son iguales en ambas normas.

Los criterios anteriores son un tanto contrapuestos con la clasificación por grados de desempeño de Superpave, donde ambos asfaltos: Ecuador y Texas, tienen un mismo grado PG 64-28, y en realidad según la clasificación por viscosidad ambos presentan marcadas diferencias.

El trabajo con los asfaltos modificados, en este caso empleando tres productos comunes en el mercado: SBS, ELVALOY y CAUCHO, nos permitió valorar su efecto sobre algunas de las propiedades del asfalto original, según los estándares para los diferentes tipos de polímeros desarrollados por la ASTM. Las modificaciones realizadas en general cumplen las exigencias evaluadas de acuerdo a nuestro equipamiento, con la excepción de la prueba de penetración en el residuo TFOT del asfalto modificado con caucho. Debe notarse que el efecto de los polímeros no se evalúa empleando las exigencias de la clasificación por viscosidad de los asfaltos convencionales.

Al aplicar la clasificación por grados PG se obtuvo que los asfaltos modificados con ELVALOY y CAUCHO clasifican como asfaltos PG 76-28 indicando un mayor rango de temperaturas de trabajo que el asfalto modificado con SBS el cual clasifica como PG 76-22. Es decir, que en los tres casos se obtuvo una mejora significativa en el grado alto de temperatura, asociado al deterioro por ahuellamientos, pero no ocurre lo mismo respecto al grado bajo de temperatura, donde en dos casos se mantuvo el valor de -28 y en otro aumentó a -22, tomando como referencia que el asfalto original de Esmeraldas clasificó como PG 64-28. Es decir, que no se mejora el comportamiento al agrietamiento a bajas temperaturas.

Las curvas maestras construidas para los diferentes tipos de cementos asfálticos, permiten determinar la rigidez para diferentes temperaturas y frecuencias de cargas. Por cierto, el módulo complejo de cada ligante se puede utilizar para la estimación del módulo dinámico de la capa asfáltica para los diseños de pavimentos por criterios mecanicistas modernos.

Las gráficas de curvas maestras permiten comparar los parámetros fundamentales (índice reológico "R" y tiempo de cruce "tc") que definen el comportamiento reológico de cada asfalto en sus tres estados: original, TFOT Y PAV. Con un mayor nivel de envejecimiento en los asfaltos tanto "R" como "tc" se incrementan. En particular, la comparación entre los asfaltos de Esmeraldas y Texas muestra que para todos los estados los valores de "R" y "tc" son mayores en el asfalto ecuatoriano que en el de Texas, lo que indica un mayor efecto del envejecimiento y por ende un peor comportamiento a la fatiga.

En el comportamiento de los asfaltos modificados, el ligante mezclado con CAUCHO es el que presenta un mejor desempeño, respecto a los otros asfaltos modificados con SBS y ELVALOY. El mismo presentó los menores "R" y valores bajos de "tc" en especial luego del PAV.

Las curvas maestras de los tres asfaltos modificados tienen un comportamiento similar, obteniendo valores de G^* muy altos en comparación con el asfalto base de Esmeraldas en todas las temperaturas. Esto se puede atribuir al proceso de mezclado con los polímeros que se realiza a temperaturas muy altas y por un tiempo prolongado.

La confección de los diagramas de Black presentó algunas dispersiones en su trazado y se considera debe ser estudiada con mayor detenimiento. Es probable que se requiera ajustar los rangos de frecuencia en la prueba DSR.

5.2. Recomendaciones

1. Profundizar las investigaciones que permitan esclarecer las diferencias observadas entre la clasificación por viscosidad y por grados de desempeño de Superpave.
2. Continuar con los estudios sobre los diferentes parámetros de la curva maestra, los cuales aportan una mejor interpretación de las características de los ligantes asfálticos.
3. Impulsar las investigaciones relacionadas con los diagramas de Black bajo ciertas condiciones de ensayo, para vincularla a los fallos por agrietamiento en bloques, de acuerdo a criterios de la Universidad de Texas A & M.

REFERENCIAS

McGennis R., Shuler S. y Bahia H. (1994). *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. Lexington: Ediciones CIC-LEMIT.

Brown R., Kandhal P., Roberts F., Kim R., Lee D. y Kennedy T. (2009). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. Lanham: NAPA Research and education foundation.

León H. *Tecnología del cemento asfáltico*. Colombia: editorial Fa.

ASTM (2001). “Especificación estándar para cementos asfálticos modificados Tipo IV”. D-5976, West Conshohocken, Pensilvania.

ASTM (2001). “Especificación estándar para cementos asfálticos modificados Tipo III-D”. D-5841, West Conshohocken, Pensilvania.

ASTM (2001). “Especificación estándar para cementos asfálticos modificados con caucho”. D-6114, West Conshohocken, Pensilvania.

INEN 2515 (2010). “Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (clasificación por viscosidad). Requisitos”. Quito-Ecuador.

Anderson A., Christensen D., Bahia H., Dongre R., Sharma M. y Antle C. (1994). *Binder Characterization and Evaluation*. (3rd ed., p. 25).

Boosherian A., Mogawer W. y 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, (p.3).

Lyngdal E. (2015). *Critical analysis of PH and PG asphalt binder test methods*. University of Wisconsin-Madison.

Cuadro C. y 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*. Pontífica universidad Javeriana, Bogotá.

Araya F., González A., Delgadillo R., Wahr C., García G. y Zúñiga R. (2012). *Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile*. Revista Ingeniería de Construcción. (Vol. 27 N°3, p. 4-7).

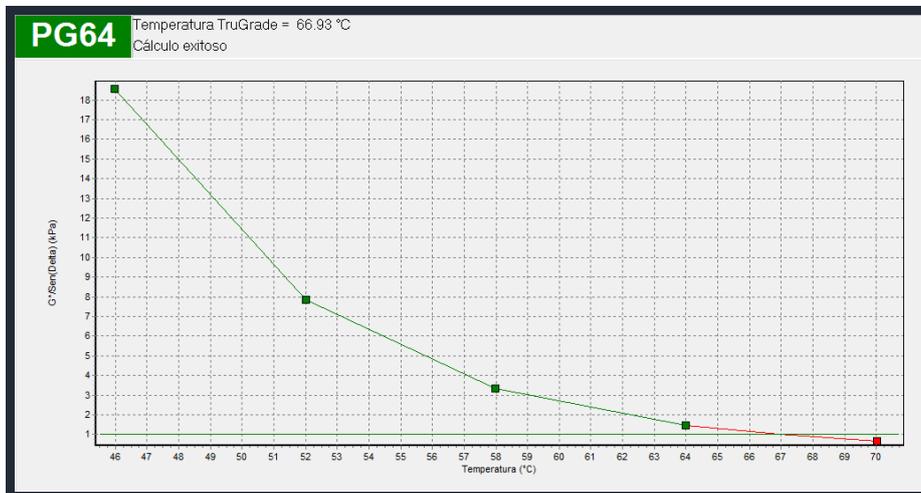
Anderson, D. A., Christensen, D. W., & Bahia, H. (1991). *physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 60. Recuperado de: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=486835>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR.

PG64		Temperatura TruGrade = 66.93 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	18.6	7.86	3.34	1.47	0.666	
Notas						
Angulo de fase (°)	73.2	76.7	79.9	82.4	84.1	
Módulo complejo (kPa)	17.8	7.65	3.29	1.46	0.663	
Temperatura (°C)	45.99	52.00	57.98	64.00	70.02	
Deformación (%)	12.15	11.93	12.02	11.96	11.99	
Esfuerzo cortante (Pa)	2157.39	910.695	394.162	173.463	79.0862	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	21/10/201	21/10/201	21/10/201	21/10/201	21/10/201	

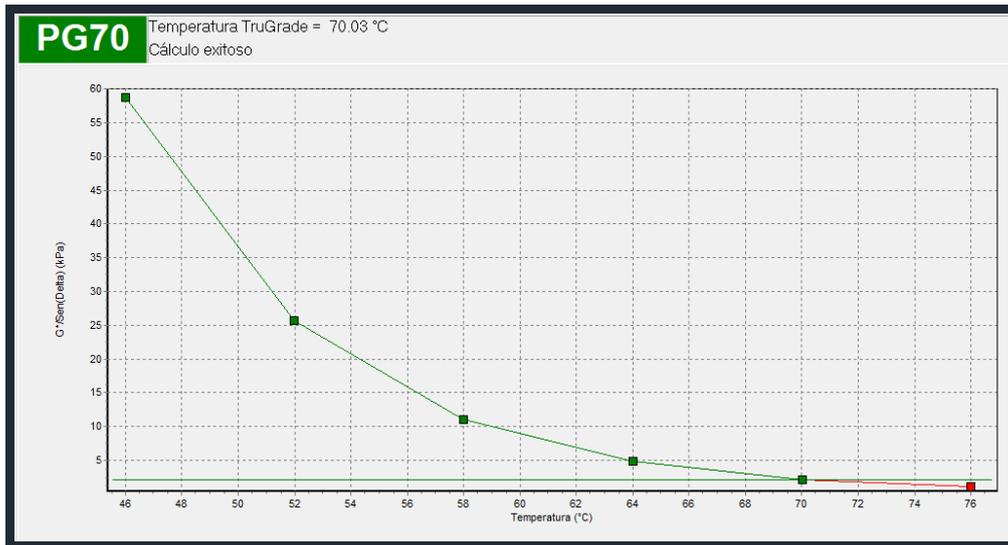
Asfalto de Esmeraldas (Original)



Gráfica del Asfalto de Esmeraldas (Original)

PG70		Temperatura TruGrade = 70.03 °C Cálculo exitoso					
	1	2	3	4	5	6	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	58.7	25.8	11	4.87	2.2	1.16	
Notas	21		21				
Angulo de fase (°)	62.7	66.5	70.5	74.3	78.0	80.4	
Módulo complejo (kPa)	52.2	23.6	10.4	4.69	2.16	1.14	
Temperatura (°C)	46.01	51.99	57.99	64.00	70.01	76.00	
Deformación (%)	6.24	10.11	6.91	9.82	10.37	9.81	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.66	2387.54	715.211	459.695	222.511	111.315	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	22/10/201	22/10/201	22/10/201	22/10/201	22/10/201	22/10/201	

Asfalto de Esmeraldas (RTFOT)

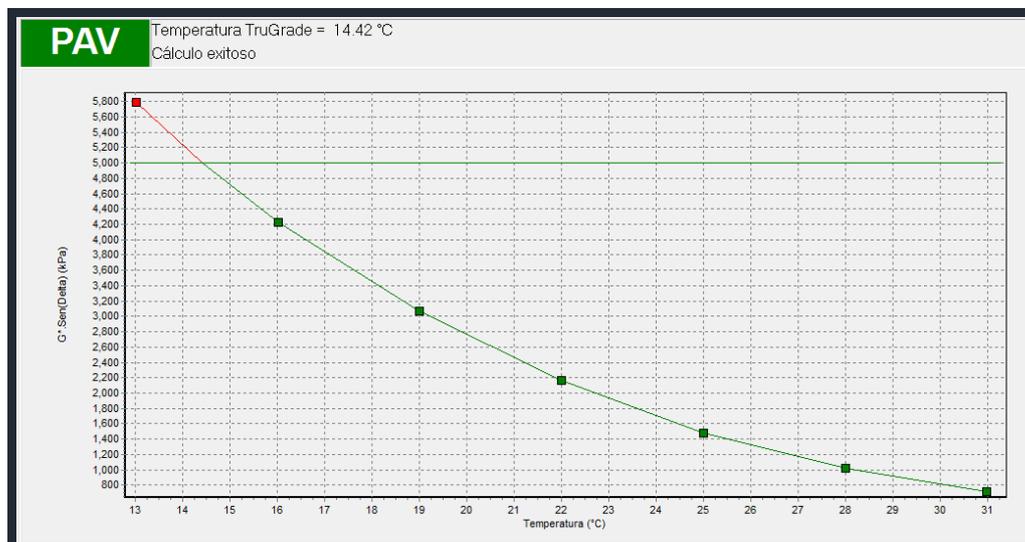


Gráfica del Asfalto de Esmeraldas (RTFOT)

PAV Temperatura TruGrade = 14.42 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6	7
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	708	1.02E3	1.48E3	2.16E3	3.06E3	4.23E3	5.8E3
Notas							
Angulo de fase (°)	46.9	44.9	43.0	41.0	39.0	37.1	35.0
Módulo complejo (kPa)	971	1.44E3	2.17E3	3.3E3	4.87E3	7E3	1.01E4
Temperatura (°C)	30.99	28.00	25.00	22.00	18.99	16.01	13.02
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.99
Esfuerzo cortante (Pa)	9732.71	14499.1	21720.1	33200.6	49113	70764.4	99370.2
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	01/11/201	01/11/201	01/11/201	01/11/201	01/11/201	01/11/201	01/11/201

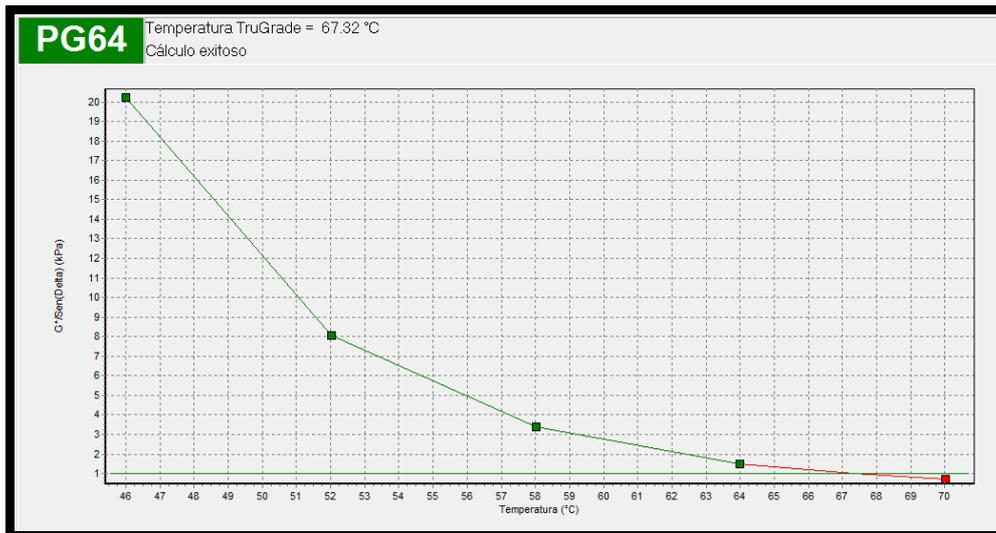
Asfalto de Esmeraldas (PAV)



Gráfica del Asfalto de Esmeraldas (PAV)

PG64		Temperatura TruGrade = 67.32 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*Sen(Delta) (kPa)	20.2	8.07	3.4	1.5	0.721	
Notas						
Angulo de fase (°)	78.1	81.0	83.2	84.9	86.2	
Módulo complejo (kPa)	19.8	7.97	3.38	1.49	0.719	
Temperatura (°C)	46.01	52.02	58.01	63.98	70.02	
Deformación (%)	11.99	11.95	12.01	12.00	11.96	
Esfuerzo cortante (Pa)	2369.91	951.791	405.113	178.784	85.8085	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	11/11/201	11/11/201	11/11/201	11/11/201	11/11/201	

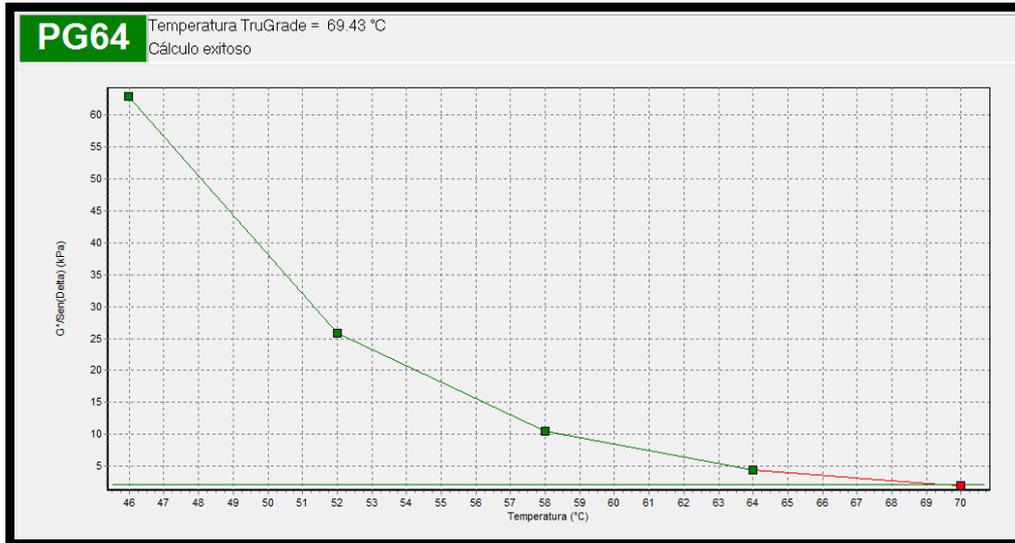
Asfalto de Texas (Original)



Gráfica del Asfalto de Texas (Original)

PG64		Temperatura TruGrade = 69.43 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*Sen(Delta) (kPa)	62.8	25.9	10.6	4.5	2.04	
Notas	21		21			
Angulo de fase (°)	68.7	72.2	75.8	78.9	81.7	
Módulo complejo (kPa)	58.5	24.6	10.2	4.42	2.02	
Temperatura (°C)	45.99	52.01	57.99	63.99	69.99	
Deformación (%)	5.56	10.15	5.46	9.88	9.56	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.73	2496.68	558.608	435.72	192.791	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	15/11/201	15/11/201	15/11/201	15/11/201	15/11/201	

Asfalto de Texas (RTFOT)

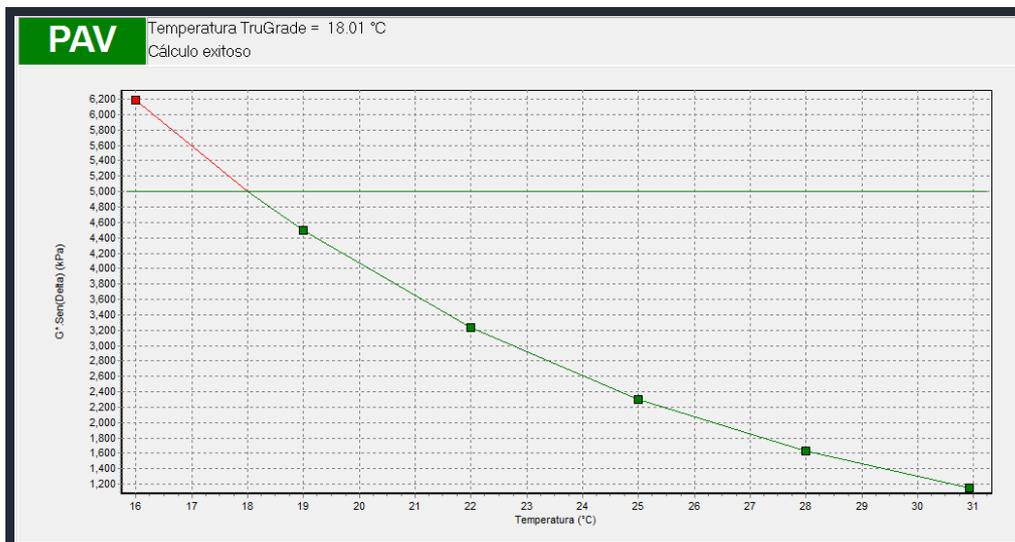


Gráfica del Asfalto de Texas (RTFOT)

PAV Temperatura TruGrade = 18.01 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*.Sen(Delta) (kPa)	1.15E3	1.63E3	2.3E3	3.23E3	4.5E3	6.19E3
Notas						
Angulo de fase (°)	47.1	44.8	42.7	40.6	38.5	36.5
Módulo complejo (kPa)	1.57E3	2.31E3	3.4E3	4.96E3	7.23E3	1.04E4
Temperatura (°C)	30.93	27.99	25.00	22.00	19.00	16.00
Deformación (%)	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	0.96
Esfuerzo cortante (Pa)	15708	23203.4	34145.9	49971.6	72749.3	99368.1
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	17/11/201	17/11/201	17/11/201	17/11/201	17/11/201	17/11/201

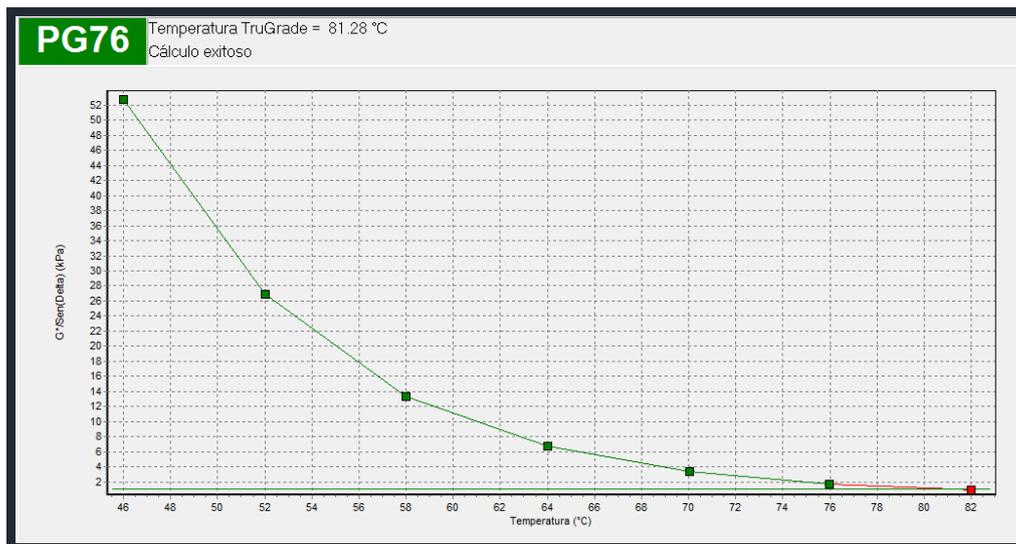
Asfalto de Texas (PAV)



Gráfica del Asfalto de Texas (PAV)

PG76		Temperatura TruGrade = 81.28 °C Cálculo exitoso						
	1	2	3	4	5	6	7	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	52.7	26.9	13.3	6.79	3.38	1.73	0.926	
Notas	21							
Angulo de fase (°)	55.7	56.7	59.3	63.6	68.9	73.4	76.4	
Módulo complejo (kPa)	43.6	22.5	11.4	6.08	3.16	1.66	0.9	
Temperatura (°C)	46.00	52.01	58.00	64.00	70.02	75.99	82.01	
Deformación (%)	7.47	12.25	11.88	12.00	12.06	11.97	11.99	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.66	2749.9	1353.48	726.428	378.671	197.432	106.821	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	

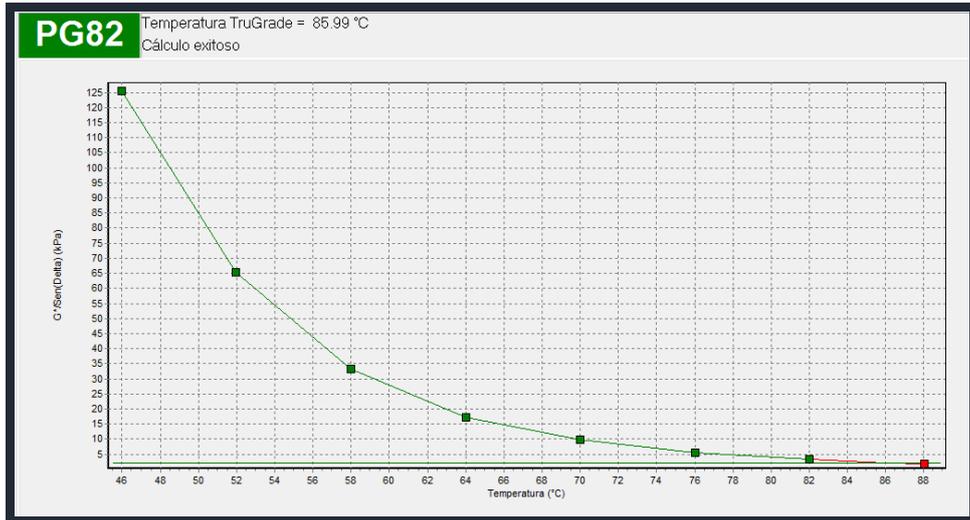
Asfalto de Ecuador con SBS (Original)



Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (Original)

PG82		Temperatura TruGrade = 85.99 °C Cálculo exitoso							
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	125	65.3	33.3	17.3	9.79	5.54	3.21	1.82	
Notas	21	21							
Angulo de fase (°)	51.0	52.7	54.1	55.2	56.3	58.2	61.0	64.5	
Módulo complejo (kPa)	97.5	51.9	27	14.2	8.14	4.71	2.81	1.64	
Temperatura (°C)	46.00	51.94	57.99	63.99	70.01	76.01	81.99	88.02	
Deformación (%)	3.34	6.27	10.34	9.77	9.96	10.01	10.07	10.01	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.61	3255.62	2783.1	1386.29	807.879	469.478	280.685	162.042	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	08/12/201	08/12/201	08/12/201	08/12/201	08/12/201	08/12/201	08/12/201	08/12/201	

Asfalto de Ecuador con SBS (RTFOT)

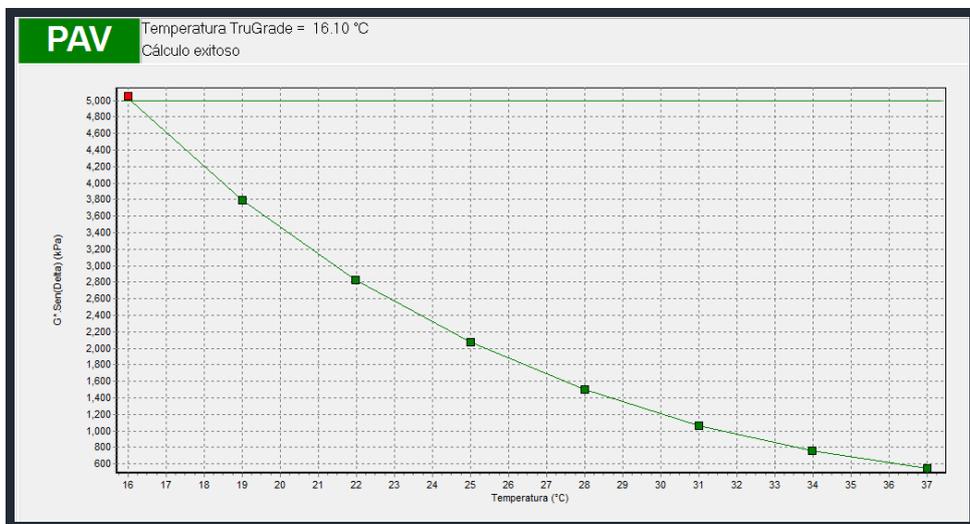


Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (RTFOT)

PAV Temperatura TruGrade = 16.10 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6	7	8
Resultado	Pasa	No pasa						
G*Sen(Delta) (kPa)	551	759	1.07E3	1.5E3	2.07E3	2.82E3	3.8E3	5.05E3
Notas								
Angulo de fase (°)	41.2	40.0	38.6	37.3	35.9	34.7	33.3	31.9
Módulo complejo (kPa)	837	1.18E3	1.71E3	2.48E3	3.53E3	4.97E3	6.91E3	9.54E3
Temperatura (°C)	37.00	33.99	31.00	28.00	25.00	21.99	19.00	16.00
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Esfuerzo cortante (Pa)	8374.51	11856.9	17154.6	24940.6	35555.4	50022.8	69703.7	96303.1
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	09/12/201	09/12/201	09/12/201	09/12/201	09/12/201	09/12/201	09/12/201	09/12/201

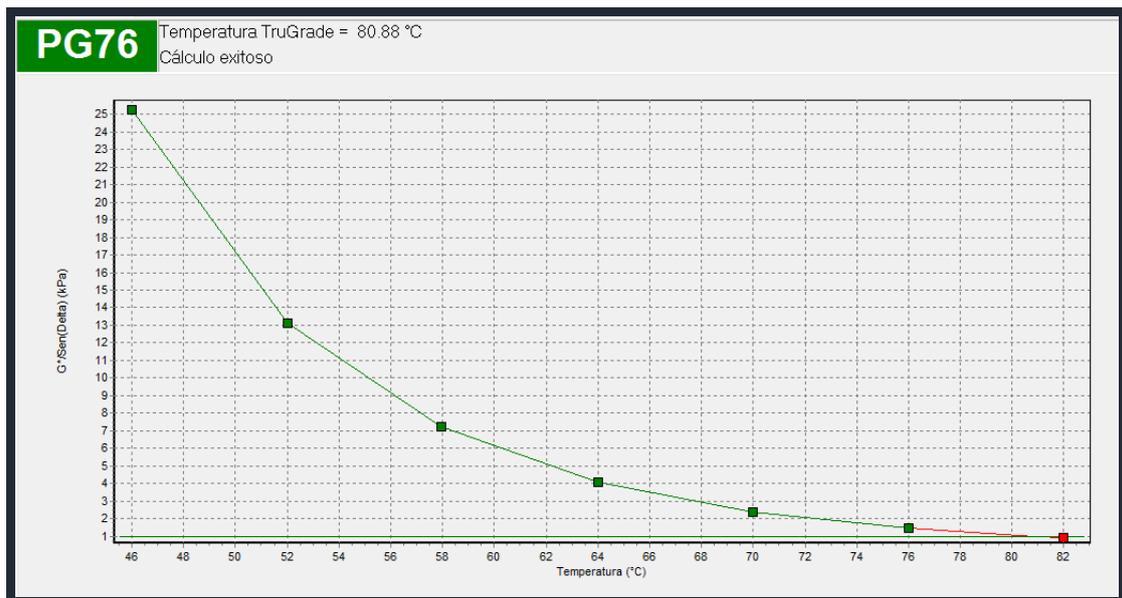
Asfalto de Ecuador con SBS (PAV)



Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (PAV)

PG76		Temperatura TruGrade = 80.88 °C Cálculo exitoso						
	1	2	3	4	5	6	7	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	25.3	13.1	7.2	4.05	2.38	1.45	0.92	
Notas								
Angulo de fase (°)	58.4	57.8	57.1	56.6	56.7	57.2	58.0	
Módulo complejo (kPa)	21.5	11.1	6.04	3.38	1.99	1.22	0.78	
Temperatura (°C)	46.00	52.01	57.97	64.00	70.00	76.00	81.99	
Deformación (%)	12.02	11.94	11.93	12.00	11.94	11.93	11.93	
Esfuerzo cortante (Pa)	2583.55	1321.39	718.06	402.461	234.803	142.151	90.3038	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	07/12/201	

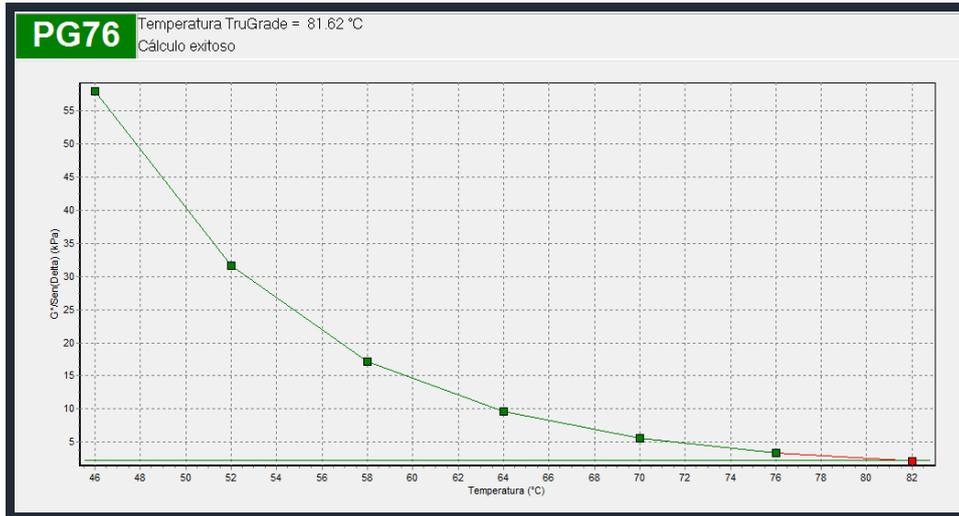
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (Original)



Gráfica del Asfalto de Ecuador con ELVALOY (Original)

PG76		Temperatura TruGrade = 81.62 °C Cálculo exitoso						
	1	2	3	4	5	6	7	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	57.9	31.7	17.2	9.64	5.57	3.39	2.14	
Notas	21		21					
Angulo de fase (°)	53.7	53.6	53.6	53.1	53.3	53.7	54.6	
Módulo complejo (kPa)	46.7	25.5	13.8	7.71	4.46	2.73	1.74	
Temperatura (°C)	46.01	52.00	58.01	64.00	69.99	76.00	82.00	
Deformación (%)	6.98	10.06	2.35	9.82	10.25	10.01	9.96	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.64	2563.53	324.309	754.345	454.58	270.659	170.965	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	06/12/201	06/12/201	06/12/201	06/12/201	06/12/201	06/12/201	06/12/201	

Asfalto de Ecuador con ELVALOY (RTFOT)

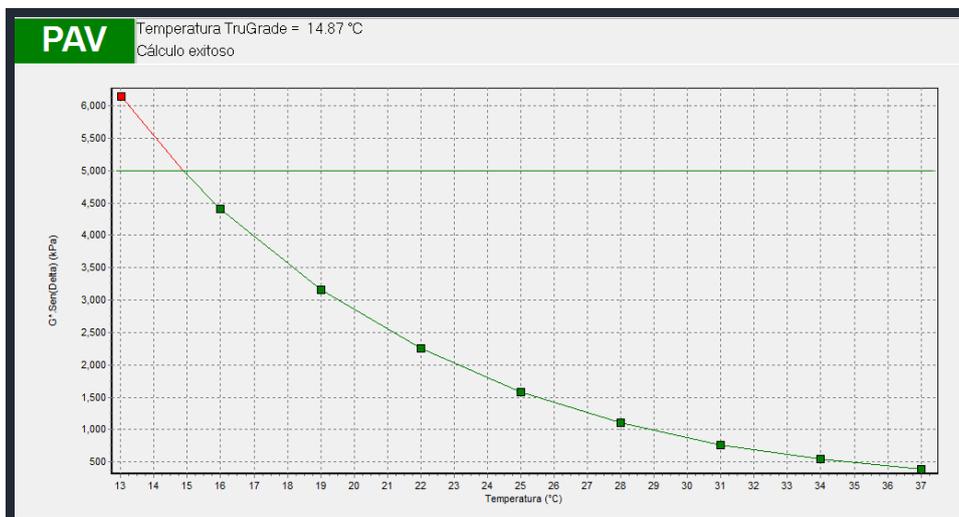


Gráfica del Asfalto de Ecuador con ELVALOY (RTFOT)

PAV Temperatura TruGrade = 14.87 °C
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Resultado	Pasa	No pasa							
G*.Sen(Delta) (kPa)	392	544	762	1.1E3	1.58E3	2.25E3	3.16E3	4.41E3	6.14E3
Notas									21
Angulo de fase (°)	45.1	44.0	42.9	41.6	40.3	38.9	37.4	35.8	34.1
Módulo complejo (kPa)	553	783	1.12E3	1.66E3	2.44E3	3.58E3	5.21E3	7.55E3	1.1E4
Temperatura (°C)	37.00	34.00	31.00	28.00	25.00	22.00	19.00	16.00	13.01
Deformación (%)	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.91
Esfuerzo cortante (Pa)	5487.83	7792.72	11181.6	16570.4	24483	35941.2	52364.9	76127.8	99370
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201	13/12/201

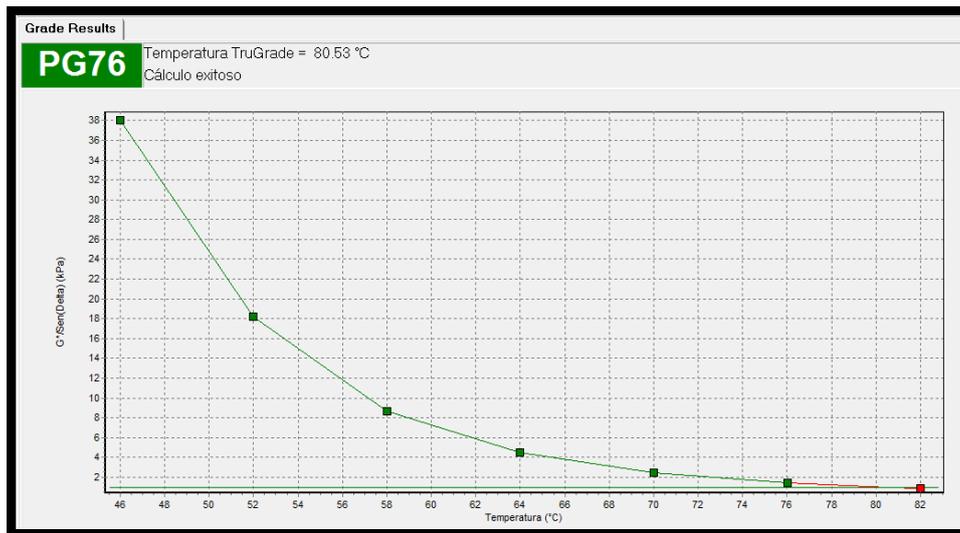
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (PAV)



Gráfica de Asfalto de Ecuador con ELVALOY (PAV)

PG76		Temperatura TruGrade = 80.53 °C Cálculo exitoso						
	1	2	3	4	5	6	7	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	38	18.2	8.62	4.51	2.43	1.41	0.892	
Notas	21							
Angulo de fase (°)	60.9	62.8	64.5	65.2	65.2	63.5	59.7	
Módulo complejo (kPa)	33.2	16.2	7.78	4.1	2.21	1.27	0.77	
Temperatura (°C)	46.01	51.99	58.00	63.99	70.00	76.01	82.01	
Deformación (%)	9.81	12.19	11.58	12.07	12.06	11.98	12.08	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.63	1968.71	899.352	492.271	264.285	149.303	90.4467	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	09/01/201	09/01/201	09/01/201	09/01/201	09/01/201	09/01/201	09/01/201	

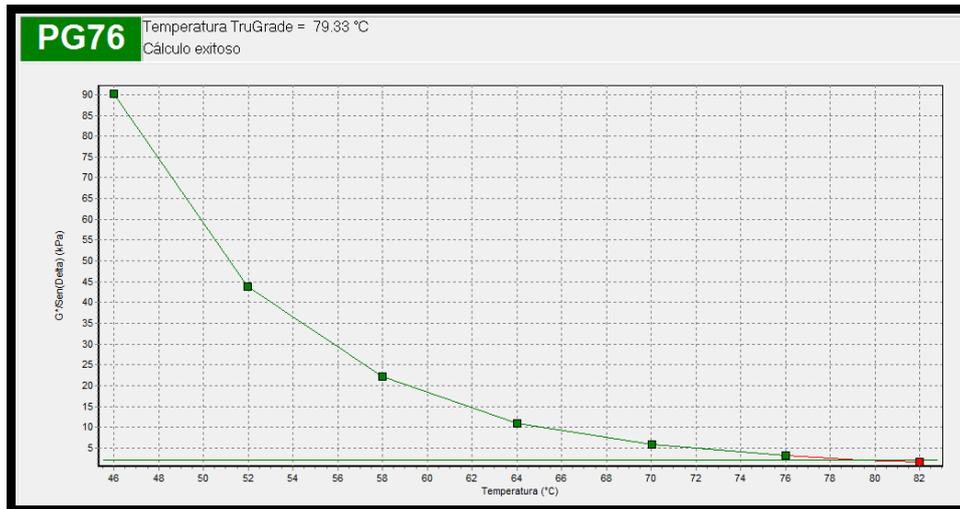
Asfalto de Ecuador con caucho (Original)



Gráfica del Asfalto de Ecuador con caucho (Original)

PG76		Temperatura TruGrade = 79.33 °C Cálculo exitoso						
	1	2	3	4	5	6	7	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	90.2	43.8	22.2	10.9	5.83	3.12	1.67	
Notas	21	21						
Angulo de fase (°)	54.1	57.1	59.6	62.5	64.8	67.0	68.6	
Módulo complejo (kPa)	73.1	36.8	19.1	9.71	5.28	2.87	1.55	
Temperatura (°C)	46.00	51.98	57.99	64.02	70.01	75.99	81.99	
Deformación (%)	4.46	8.85	10.22	9.73	10.01	9.95	10.01	
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.79	3255.76	1950.87	942.52	526.14	283.951	153.542	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	18/01/201	18/01/201	18/01/201	18/01/201	18/01/201	18/01/201	18/01/201	

Asfalto de Ecuador con caucho (RTFOT)

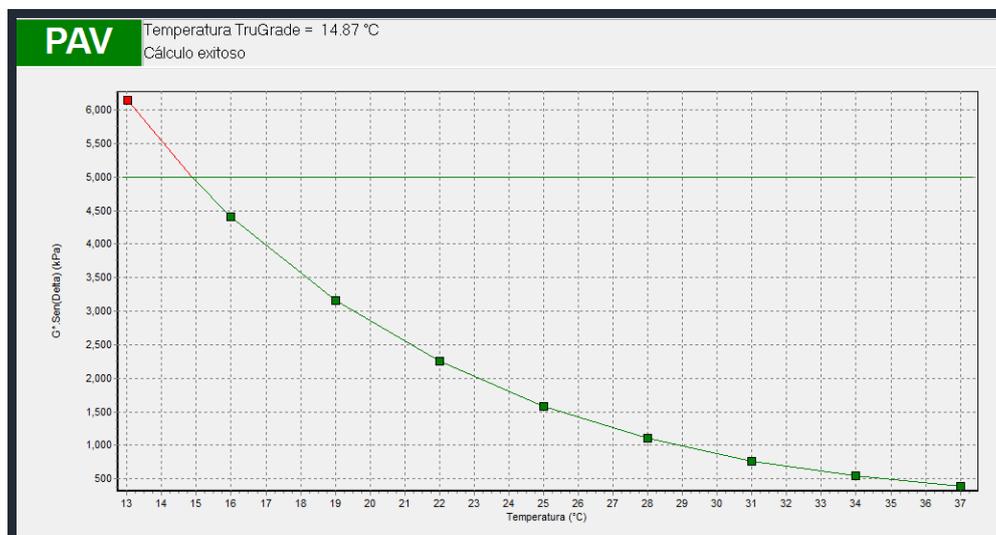


Gráfica del Asfalto de Ecuador con caucho (RTFOT)

PAV Temperatura TruGrade = 13.63 °C
Cálculo exitoso

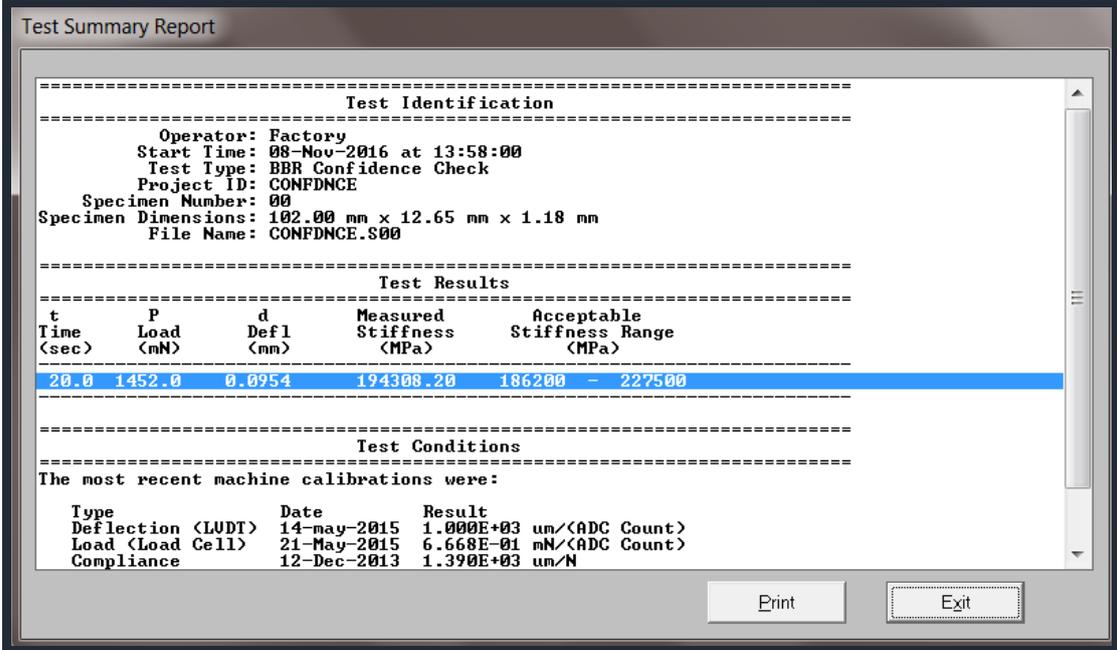
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Resultado	Pasa	No pasa							
G*Sen(Delta) (kPa)	355	521	761	1.09E3	1.54E3	2.13E3	2.92E3	3.97E3	5.31E3
Notas									
Angulo de fase (°)	43.6	42.1	40.5	39.0	37.5	36.1	34.6	33.3	31.9
Módulo complejo (kPa)	515	777	1.17E3	1.73E3	2.53E3	3.62E3	5.13E3	7.23E3	1.01E4
Temperatura (°C)	37.00	33.99	30.99	28.00	25.01	22.00	19.00	16.00	13.01
Deformación (%)	0.98	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.99
Esfuerzo cortante (Pa)	4999.87	7777.23	11749.3	17416	25376.1	36406.3	51756.4	73020.3	99366.8
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201	19/01/201

Asfalto de Ecuador con caucho (PAV)

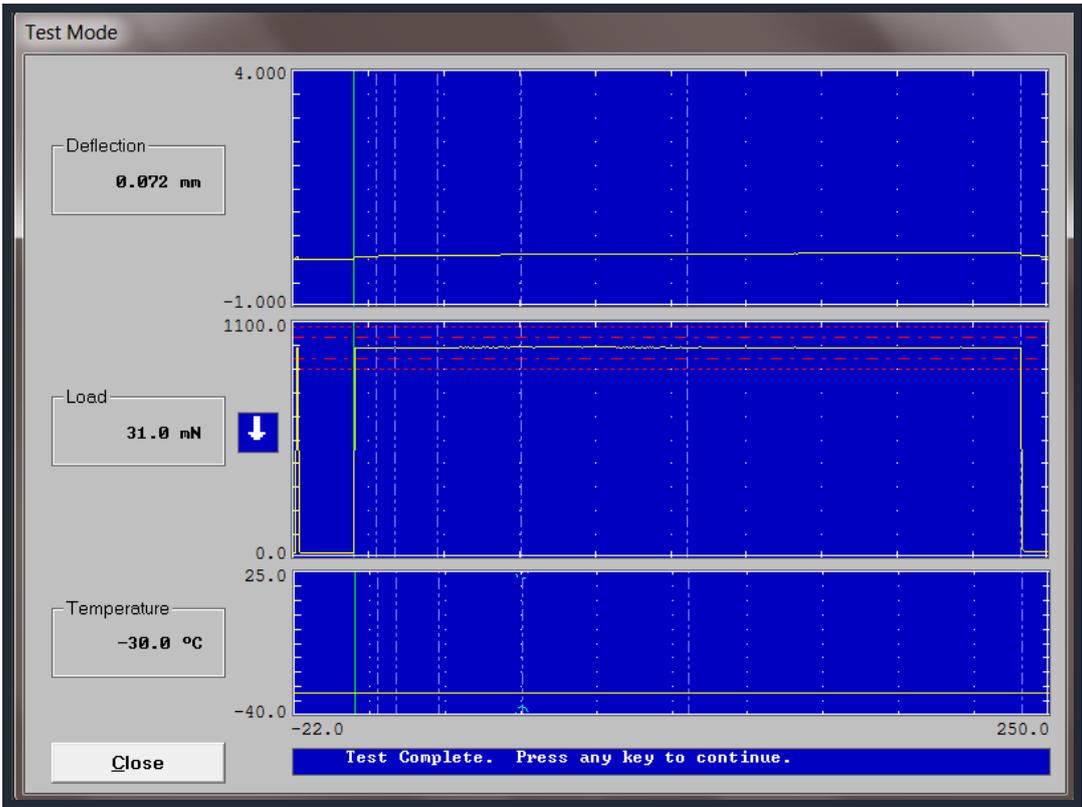


Gráfica de Asfalto de Ecuador con caucho (PAV)

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



Asfalto de Ecuador (-30°C)



Gráfica del Asfalto de Ecuador (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: L.U
 Start Time: 08-Nov-2016 at 14:19:21
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: Ecu
 Specimen Number: -30.S01
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.70 mm x 6.40 mm
 File Name: Ecu.S-30.S01

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	25.8	0.0001	--	--	--	--
0.5	976.5	0.0549	--	--	--	--
8.0	980.2	0.0760	1027.4930	1029.4930	0.194659	0.144822
15.0	980.4	0.0832	938.8111	934.9594	-0.410281	0.161629
30.0	980.2	0.0943	828.3349	830.5167	0.263400	0.180160
60.0	980.7	0.1071	729.6848	728.3254	-0.186294	0.198692 *
120.0	980.1	0.1242	628.8309	630.5565	0.274409	0.217223
240.0	980.0	0.1447	539.6668	538.9443	-0.133874	0.235755
250.0	31.0	0.0723	--	--	--	--

.Asfalto de Ecuador (-30°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient $R^2 = 0.9999322$
 Regression Coefficients: A = 6.118308, B = -0.089228, C = -0.03078

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 976.5 and 981.2 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 980.1 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 1.1 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -30.0 and -29.9 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.

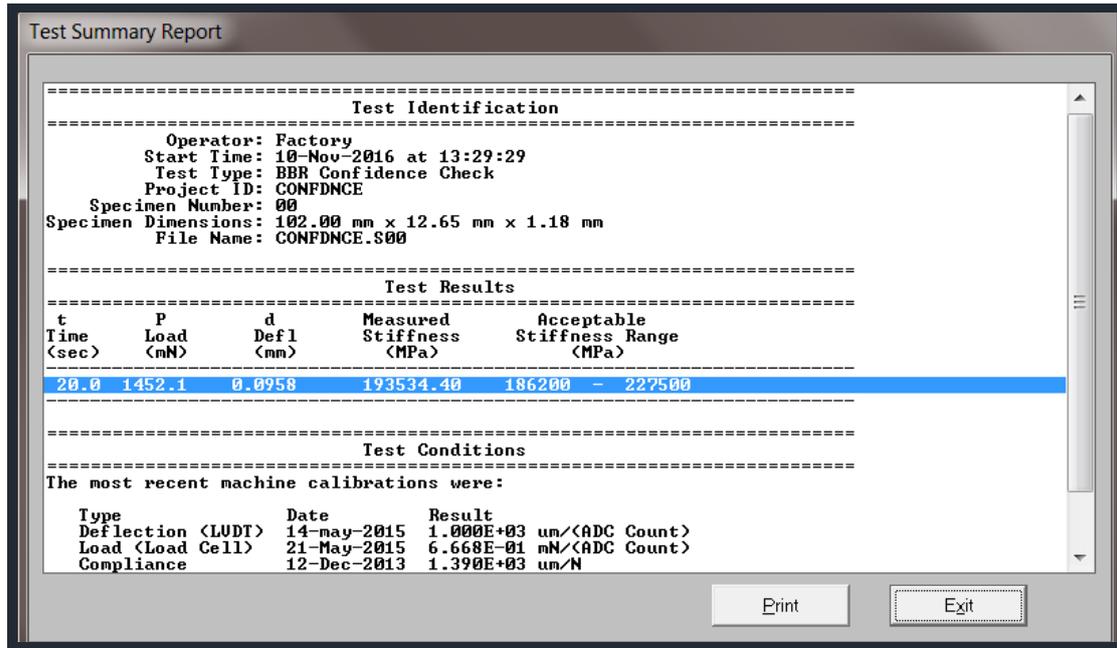
Elapsed Time In Bath: 60 minutes

The most recent machine calibrations were:

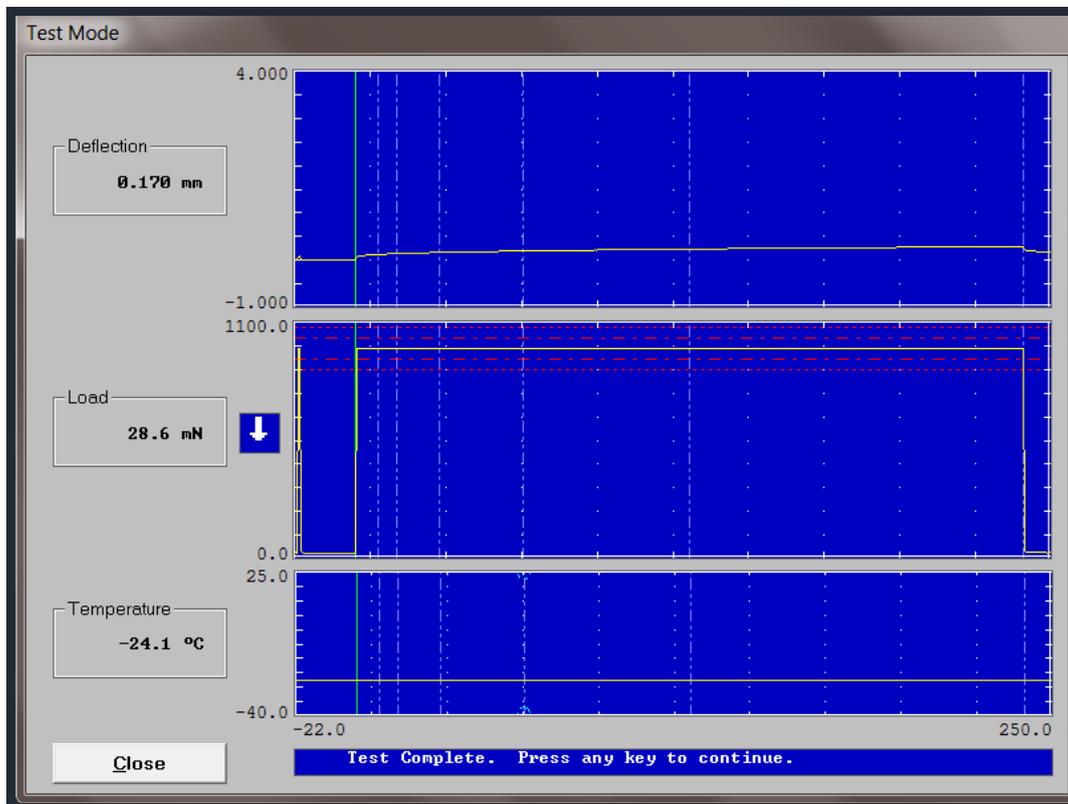
Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	08-Nov-2016	1.943E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:

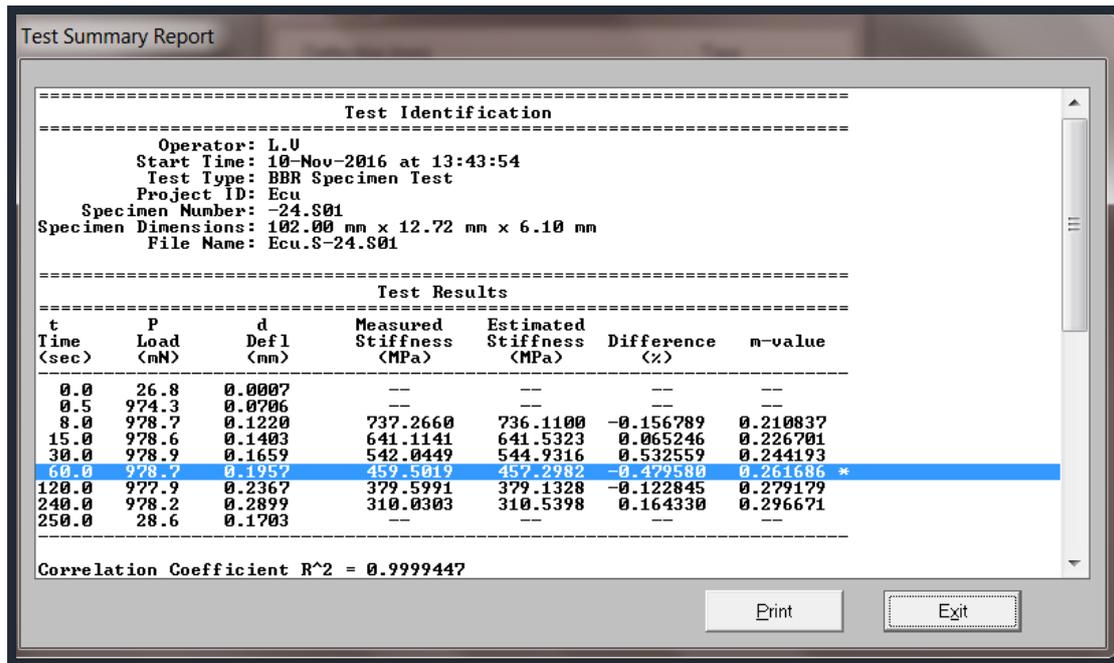
Asfalto de Ecuador (-30°C)



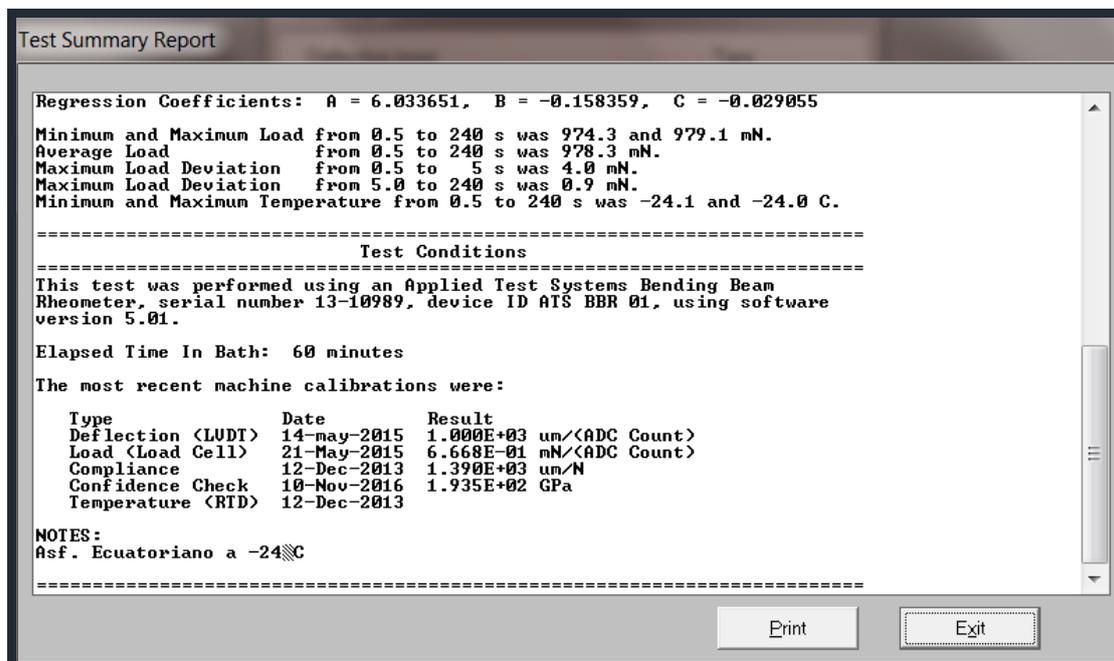
Asfalto de Ecuador (-24°C)



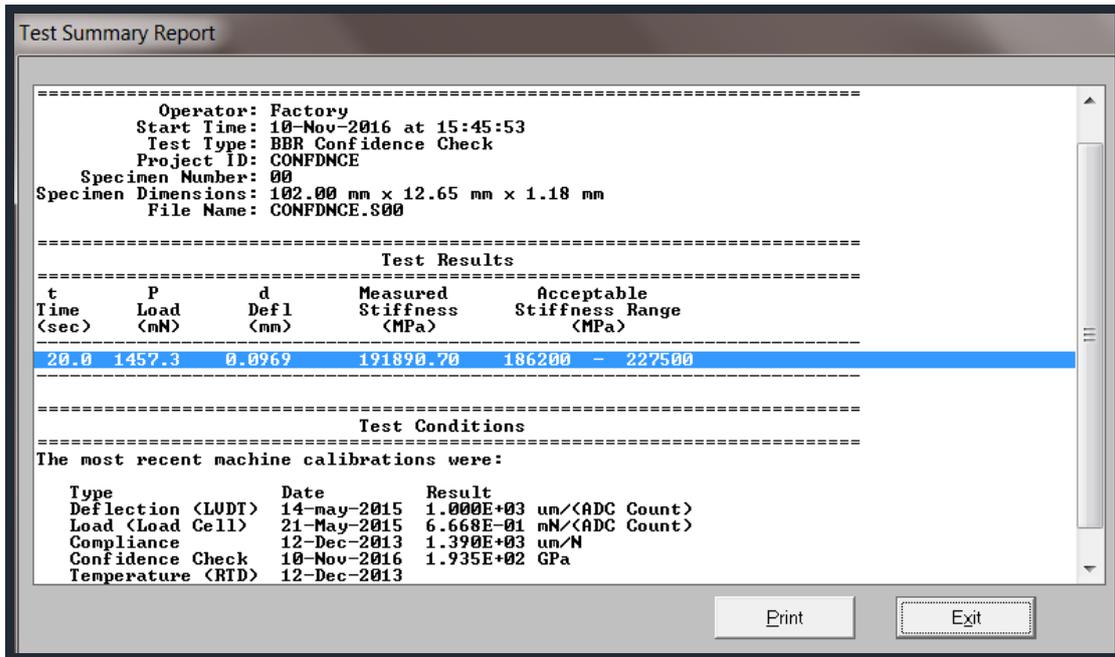
Gráfica del Asfalto de Ecuador (-24°C)



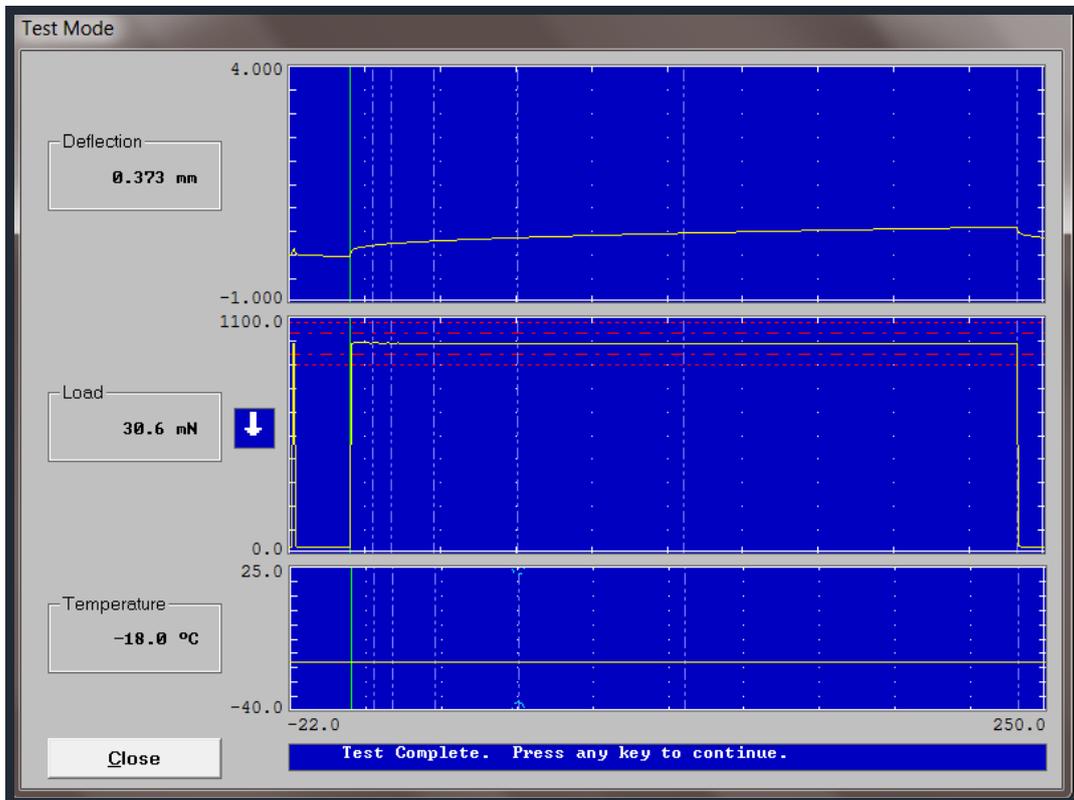
Asfalto de Ecuador (-24°C)



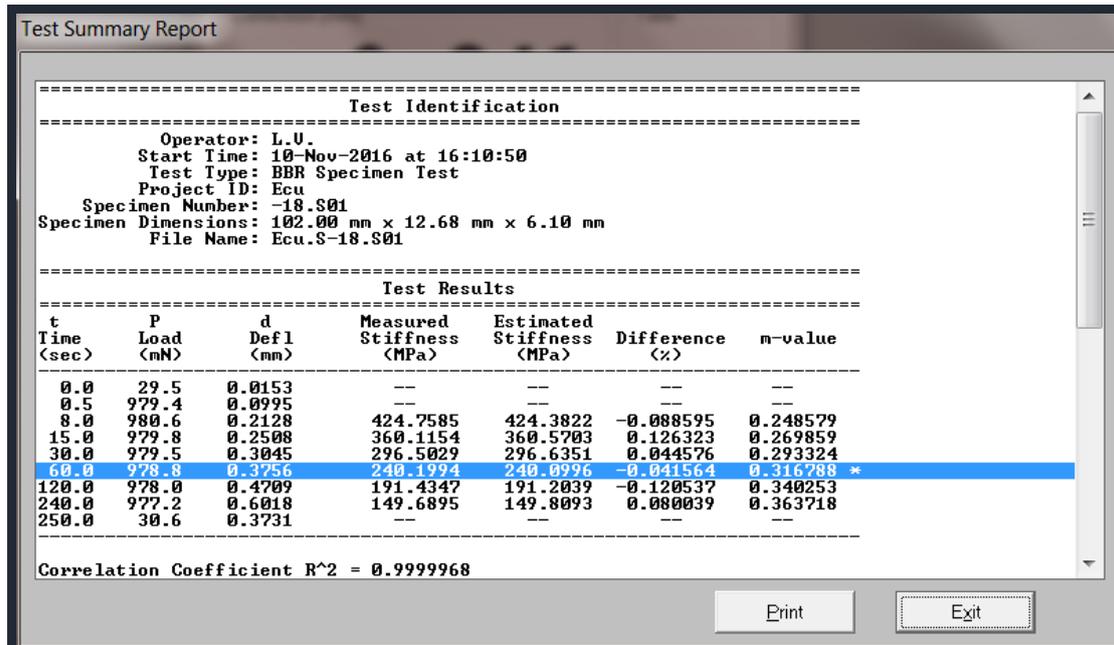
Asfalto de Ecuador (-24°C)



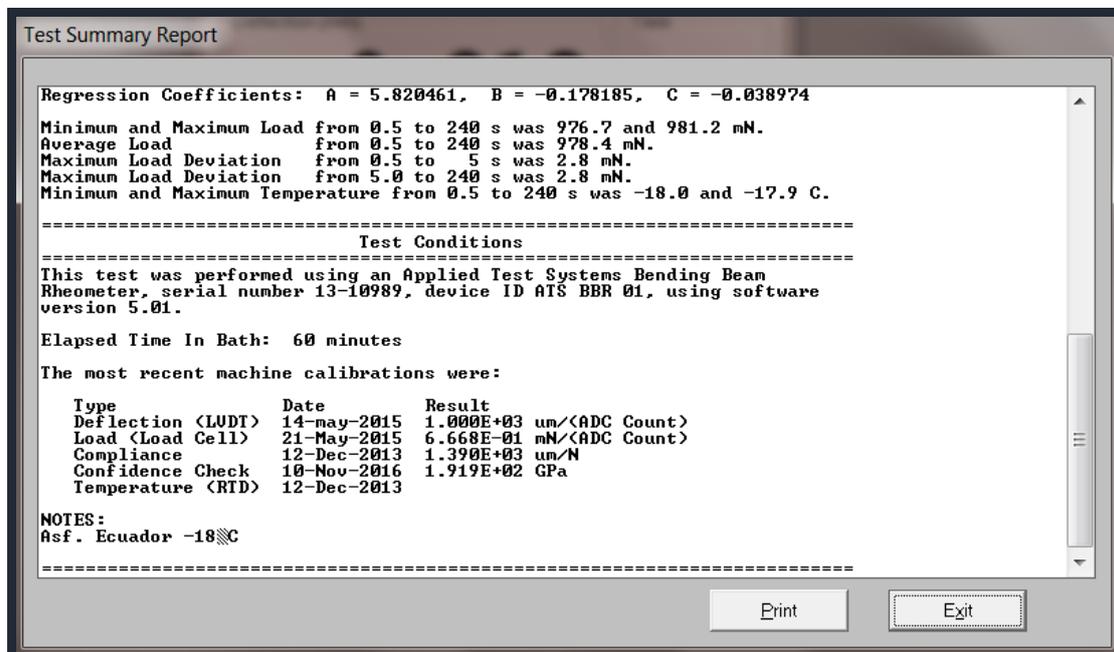
Asfalto de Ecuador (-18°C)



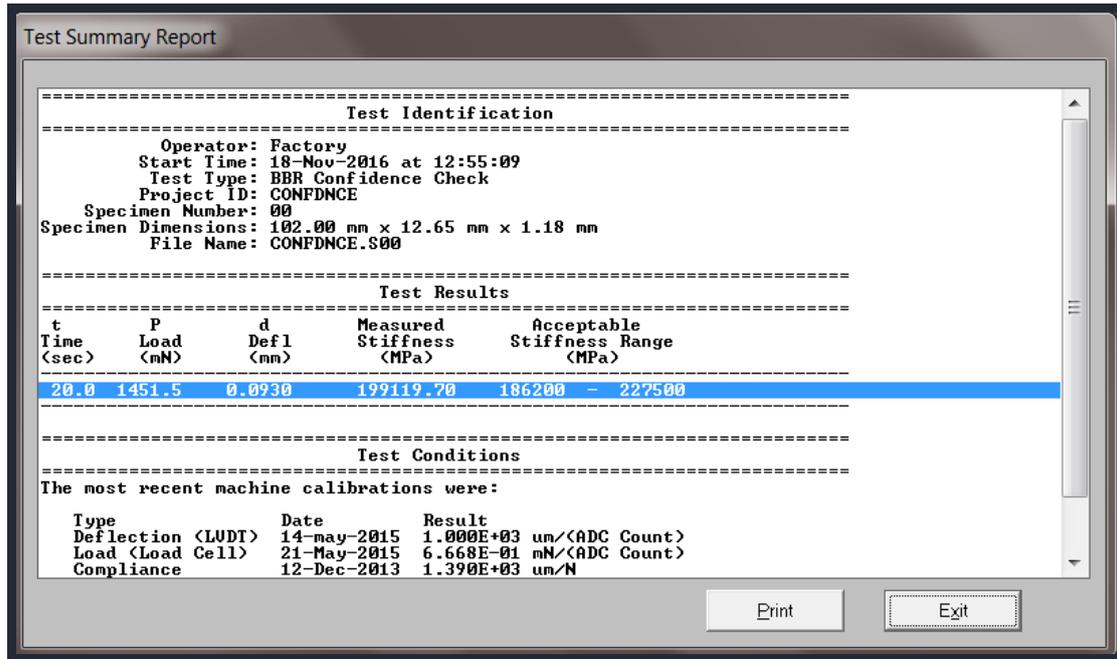
Gráfica del Asfalto de Ecuador (-18°C)



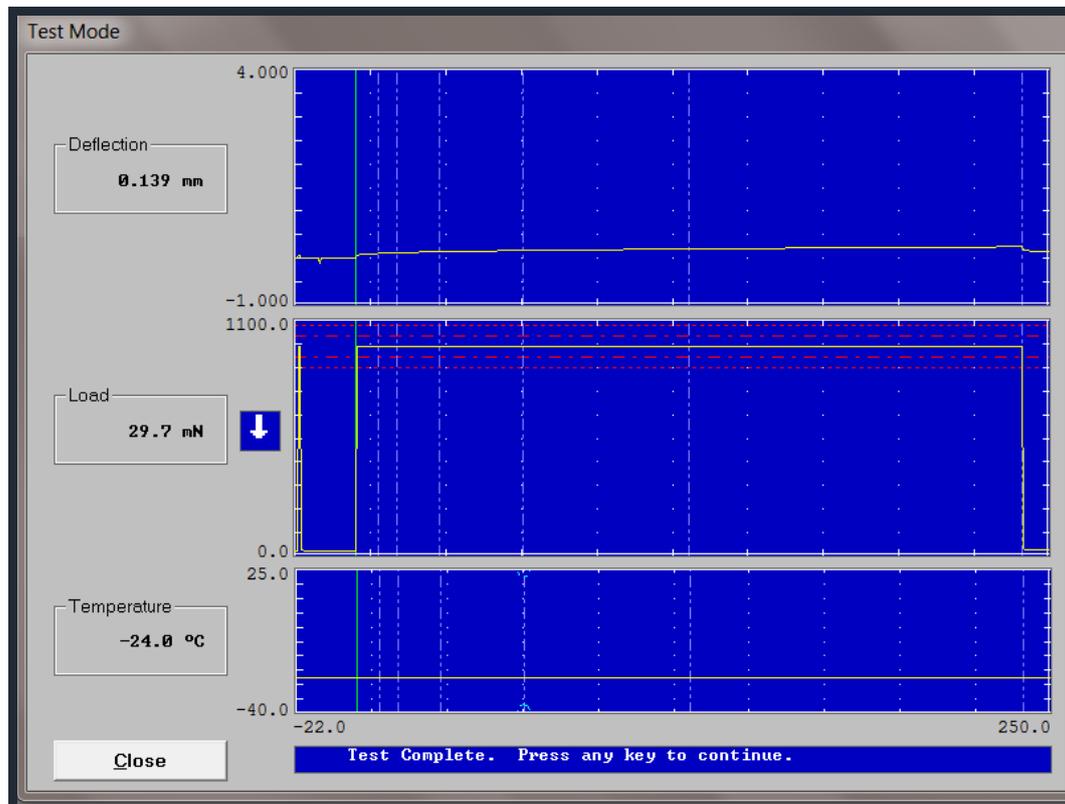
Asfalto de Ecuador (-18°C)



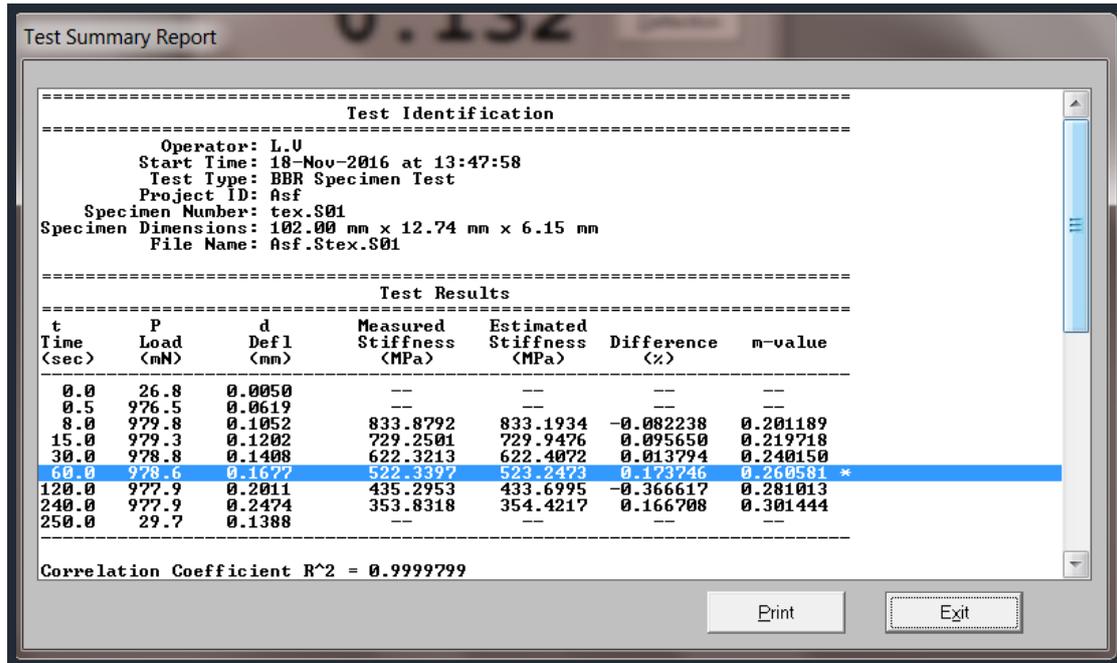
Asfalto de Ecuador (-18°C)



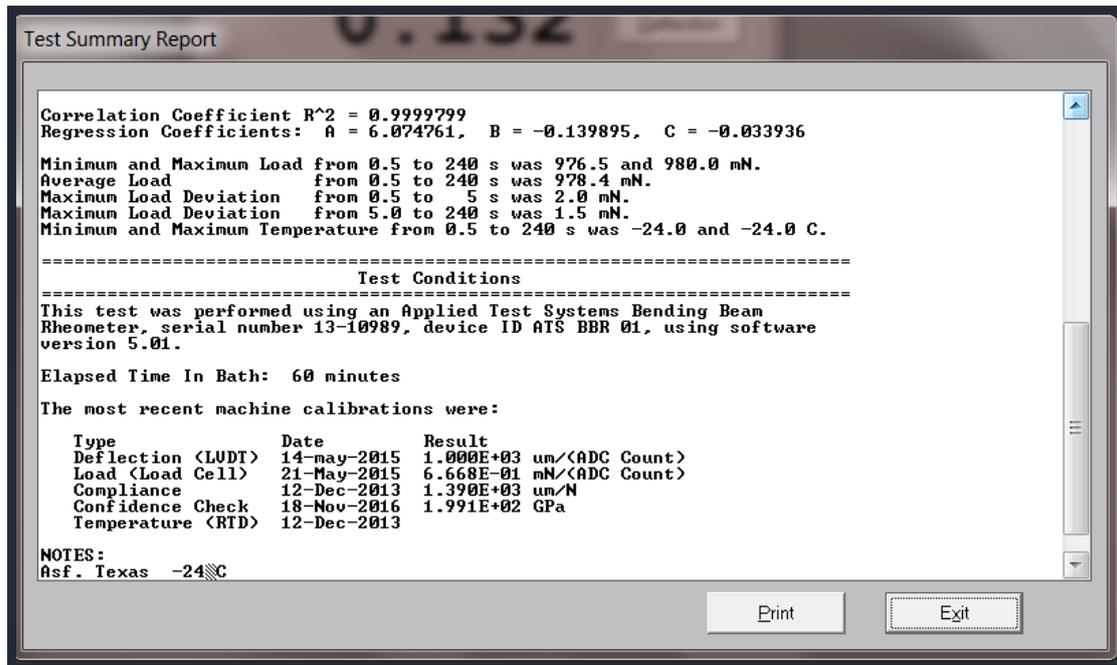
Asfalto de Texas (-24°C)



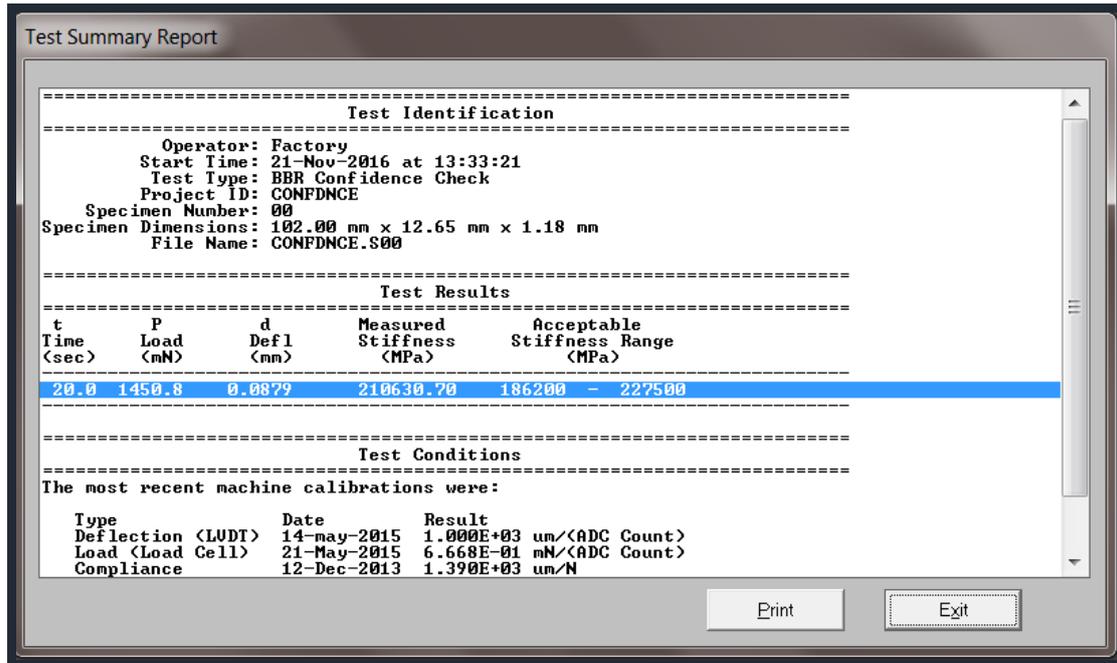
Gráfica del Asfalto de Texas (-24°C)



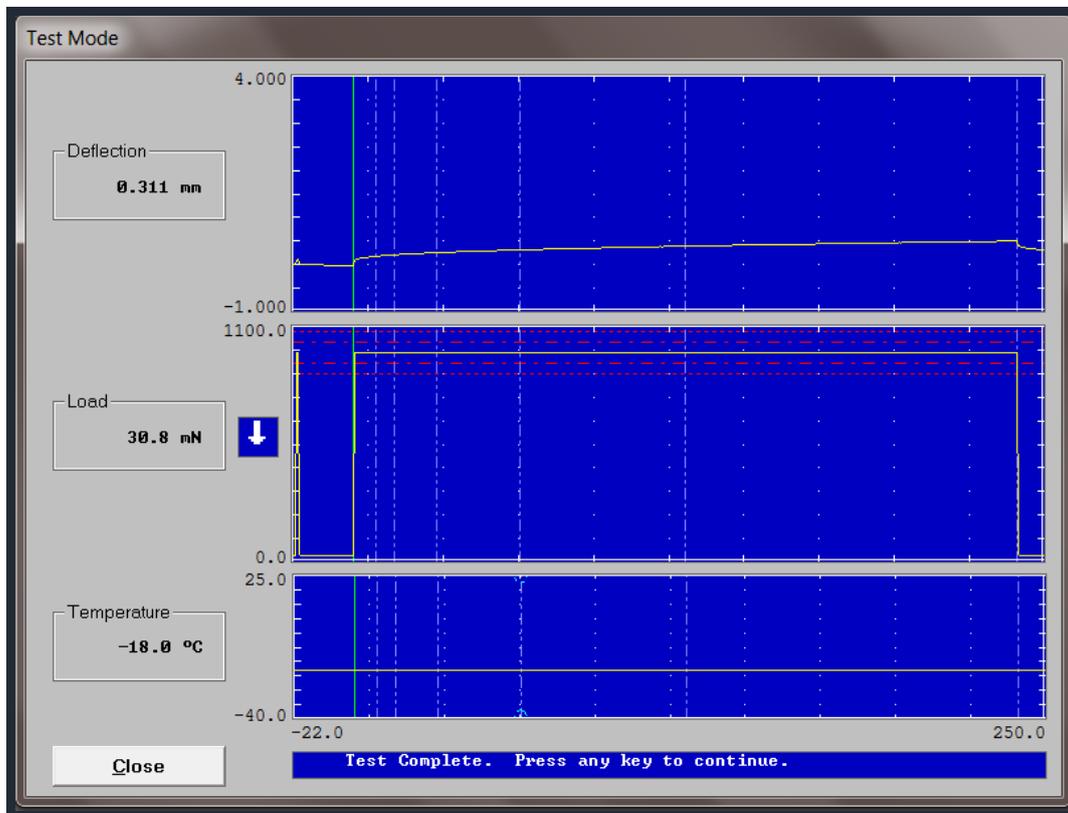
Asfalto de Texas (-24°C)



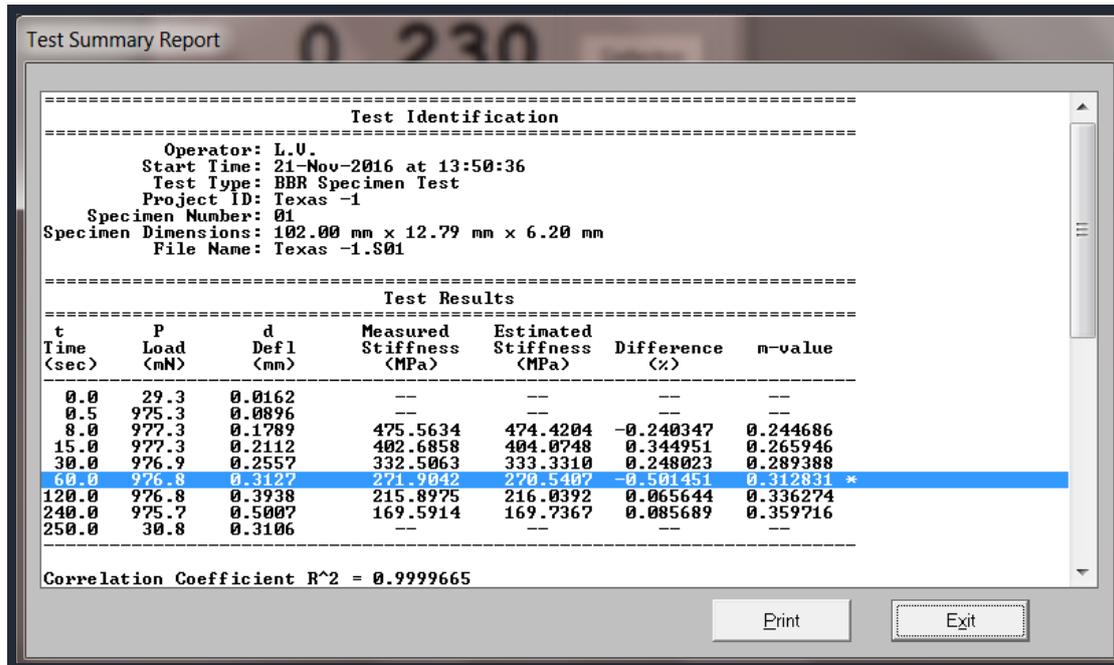
Asfalto de Texas (-24°C)



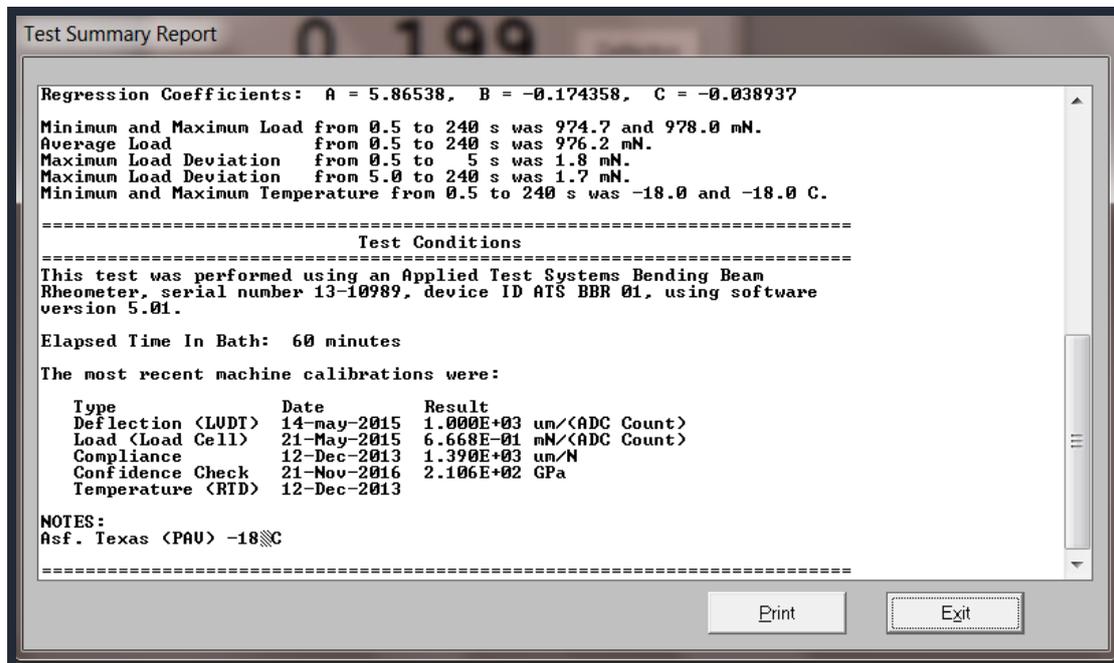
Asfalto de Texas (-24°C)



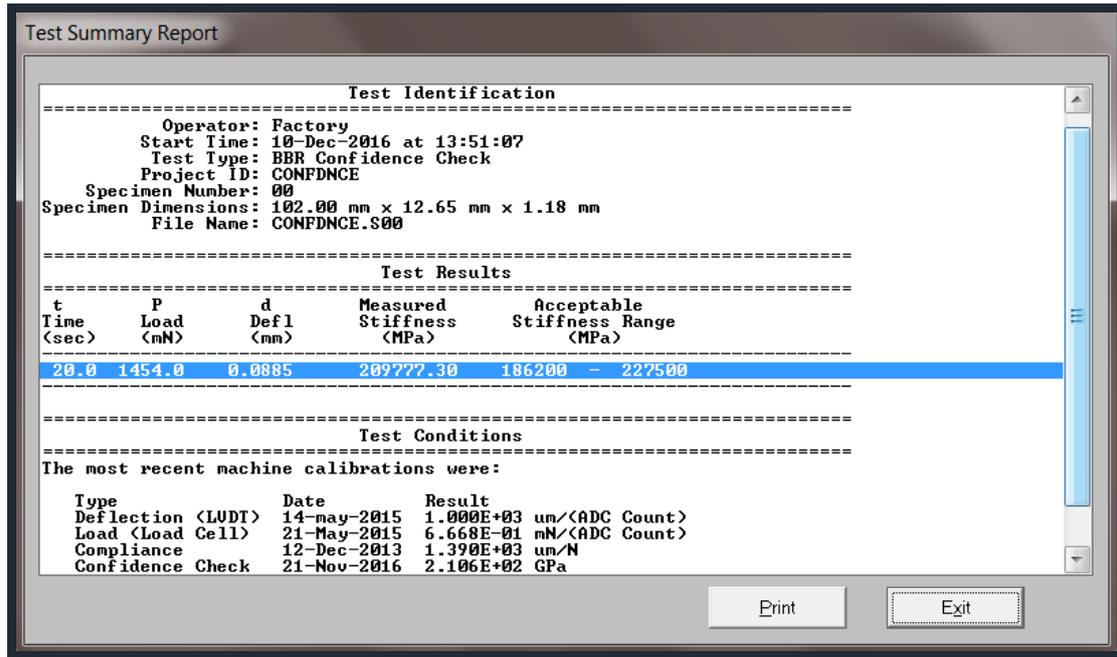
Gráfica del Asfalto de Texas (-18°C)



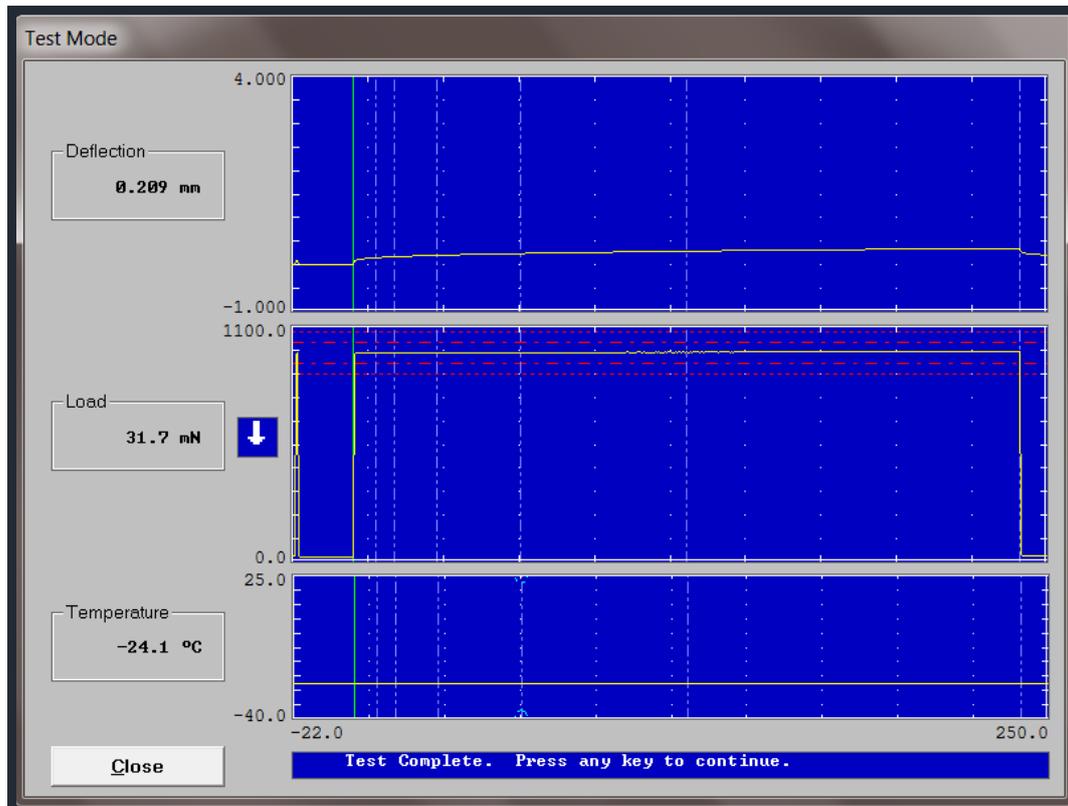
Asfalto de Texas (-18°C)



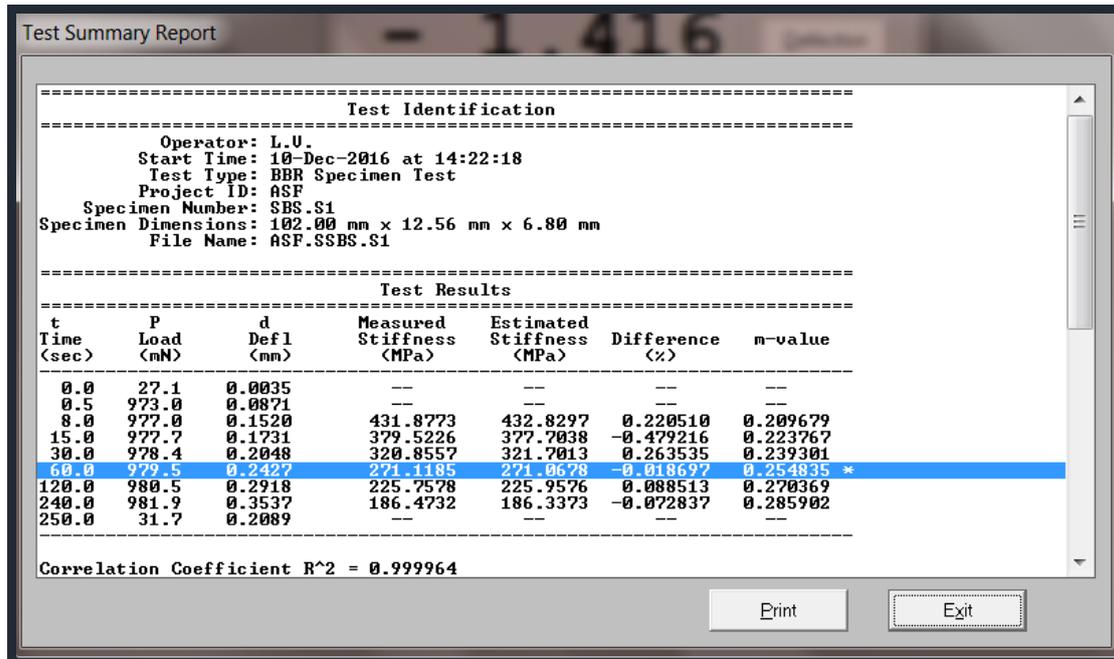
Asfalto de Texas (-18°C)



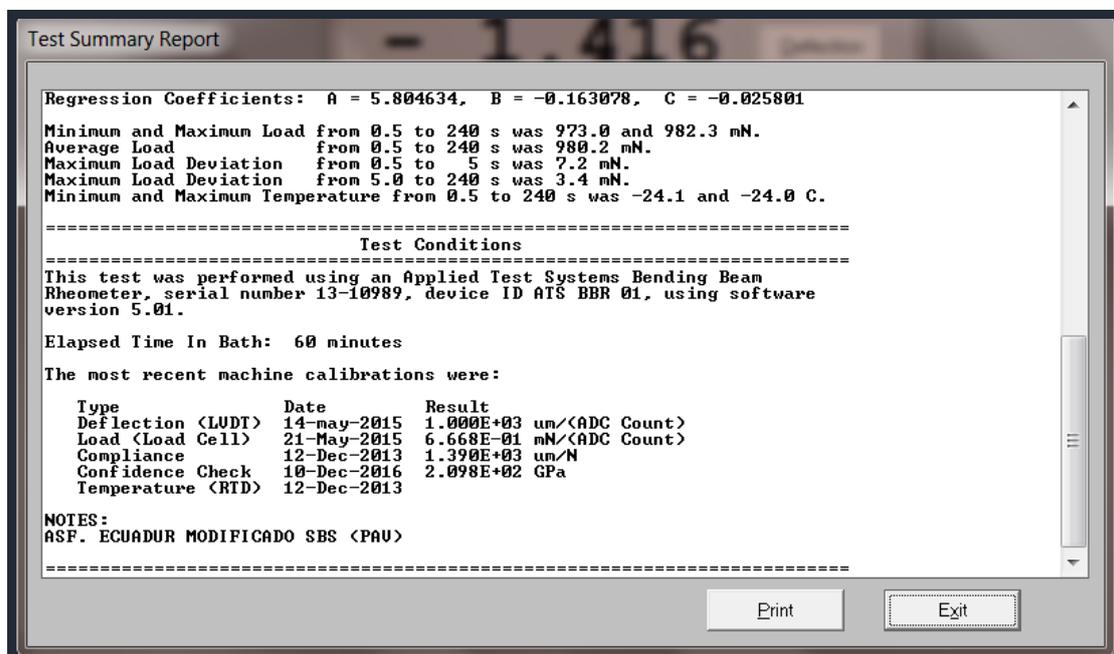
Asfalto de Ecuador con SBS (-24°C)



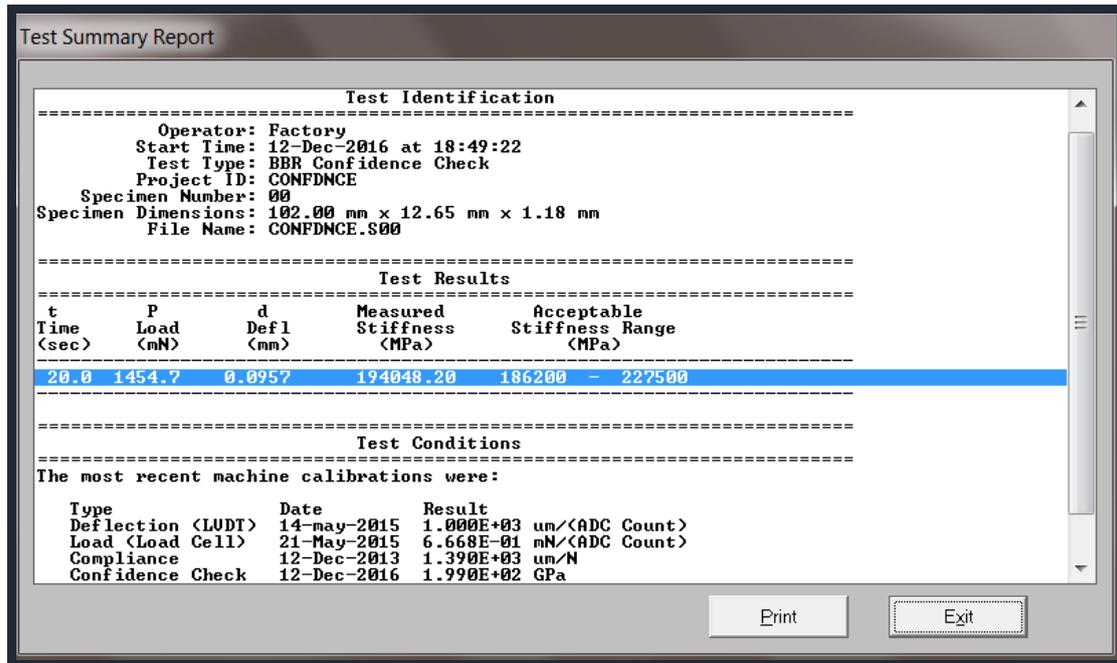
Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (-24°C)



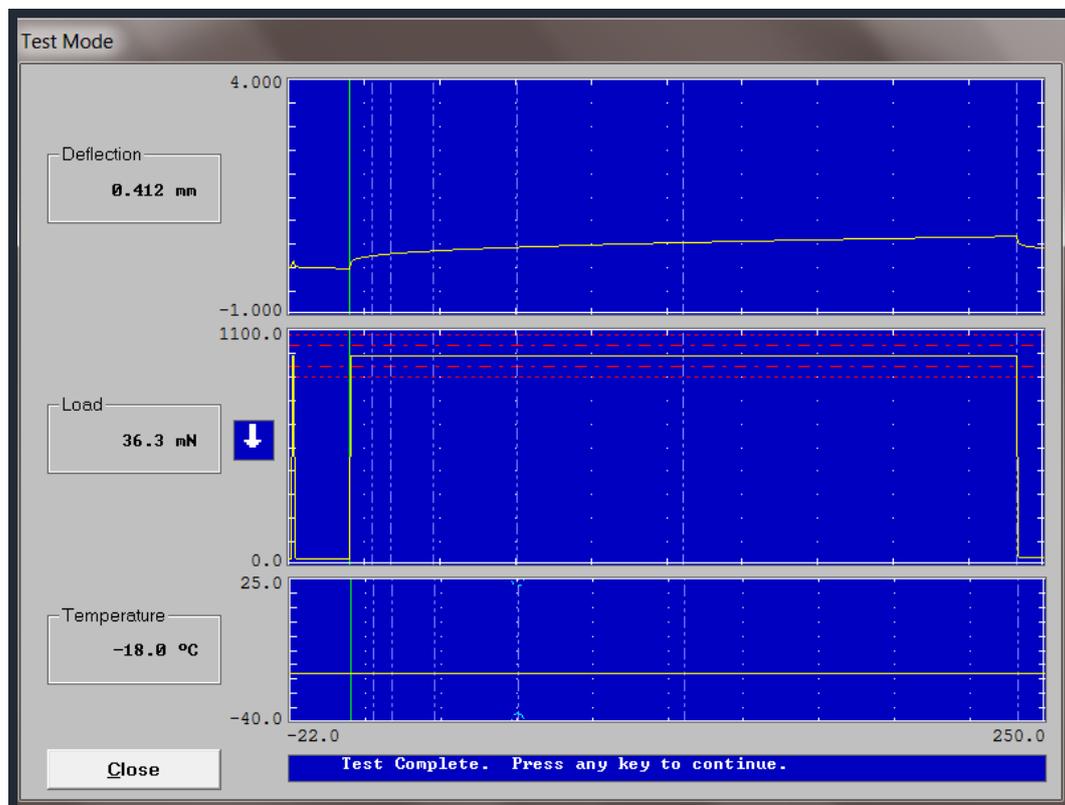
Asfalto de Ecuador con SBS (-24°C)



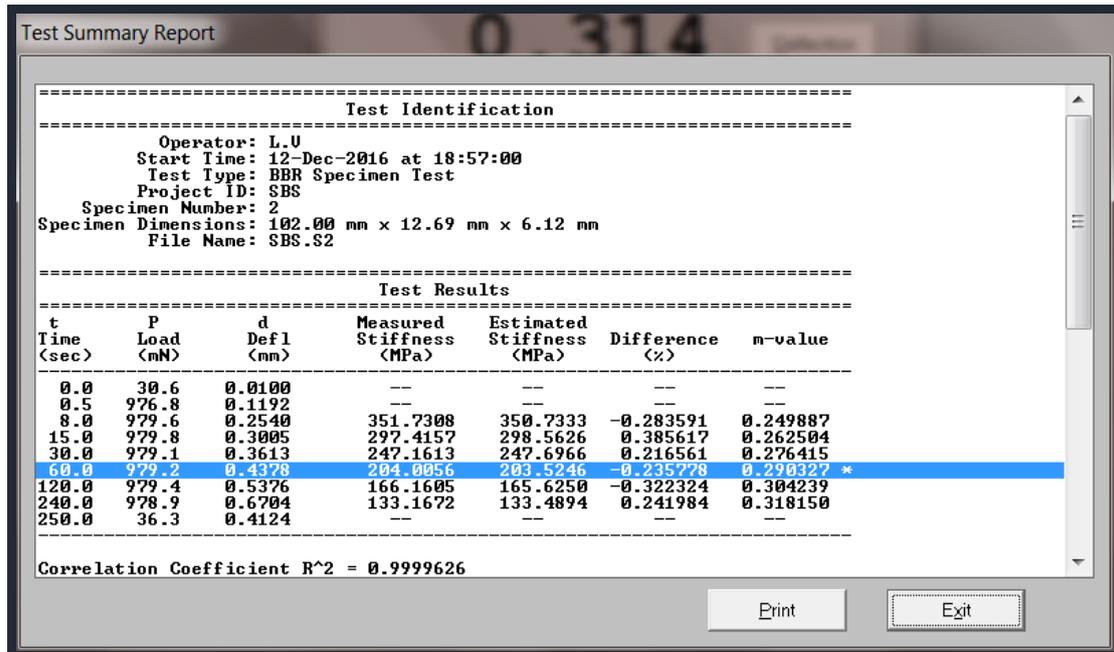
Asfalto de Ecuador con SBS (-24°C)



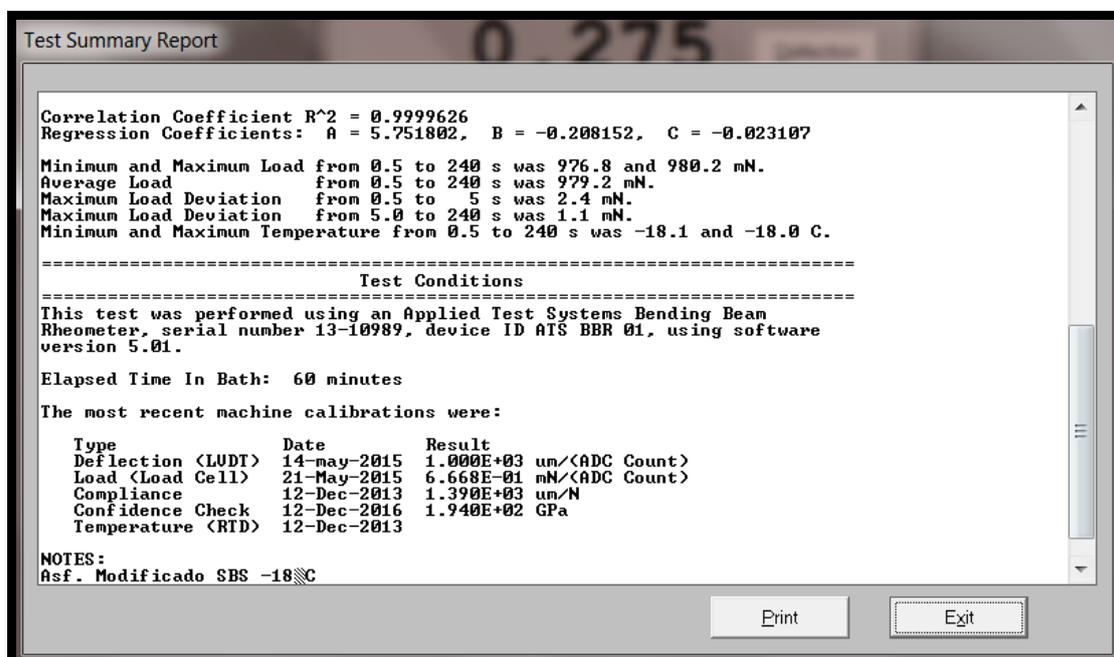
Asfalto de Ecuador con SBS (-18°C)



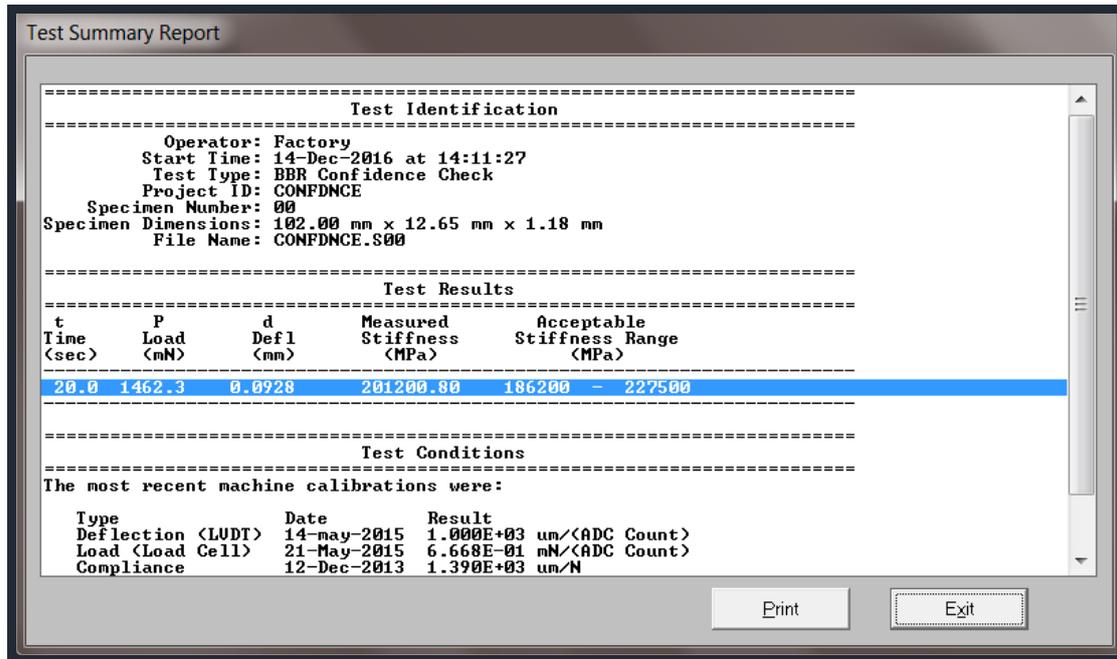
Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (-18°C)



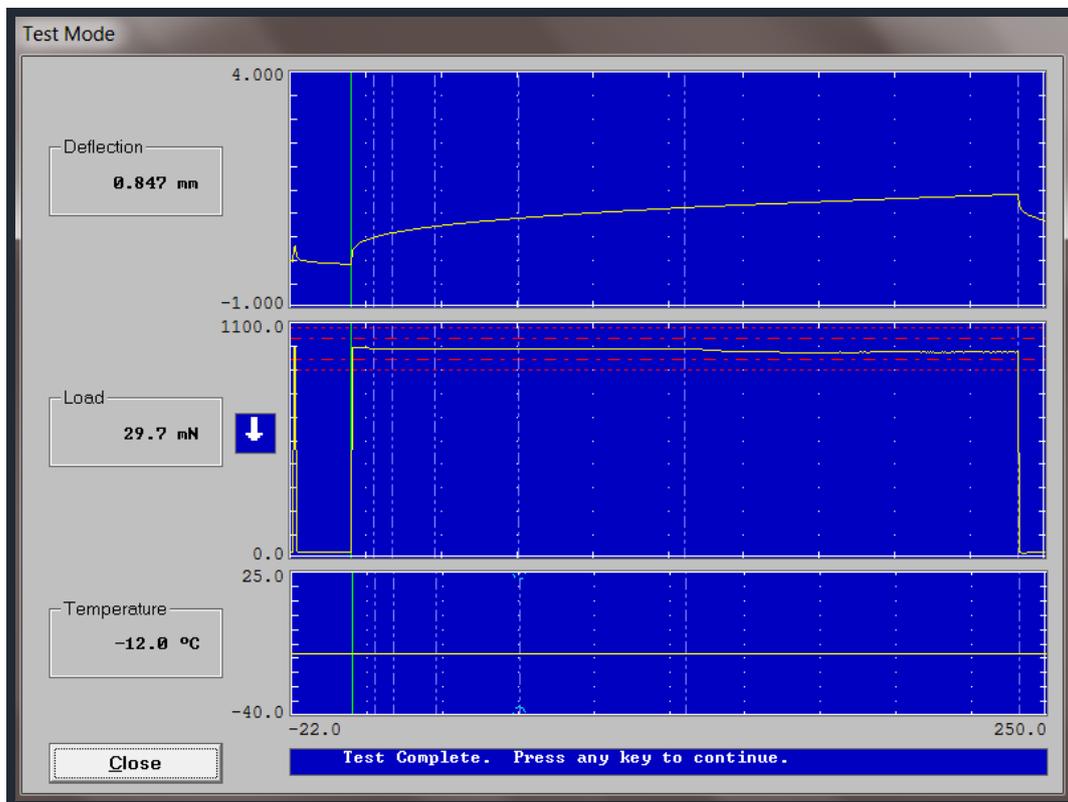
Asfalto de Ecuador con SBS (-18°C)



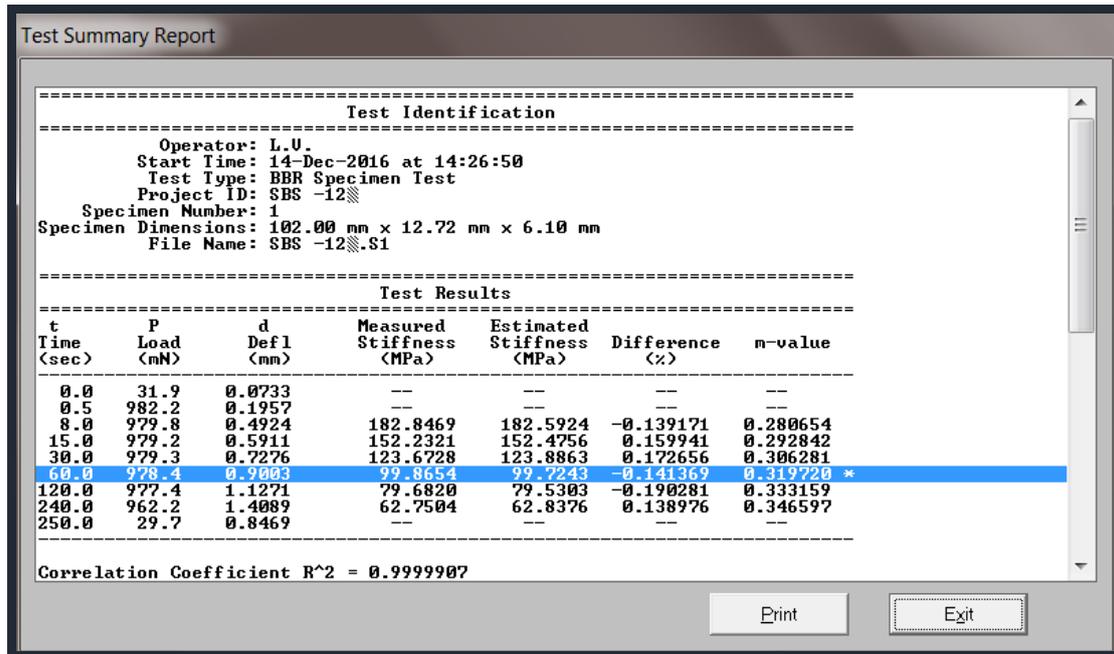
Asfalto de Ecuador con SBS (-18°C)



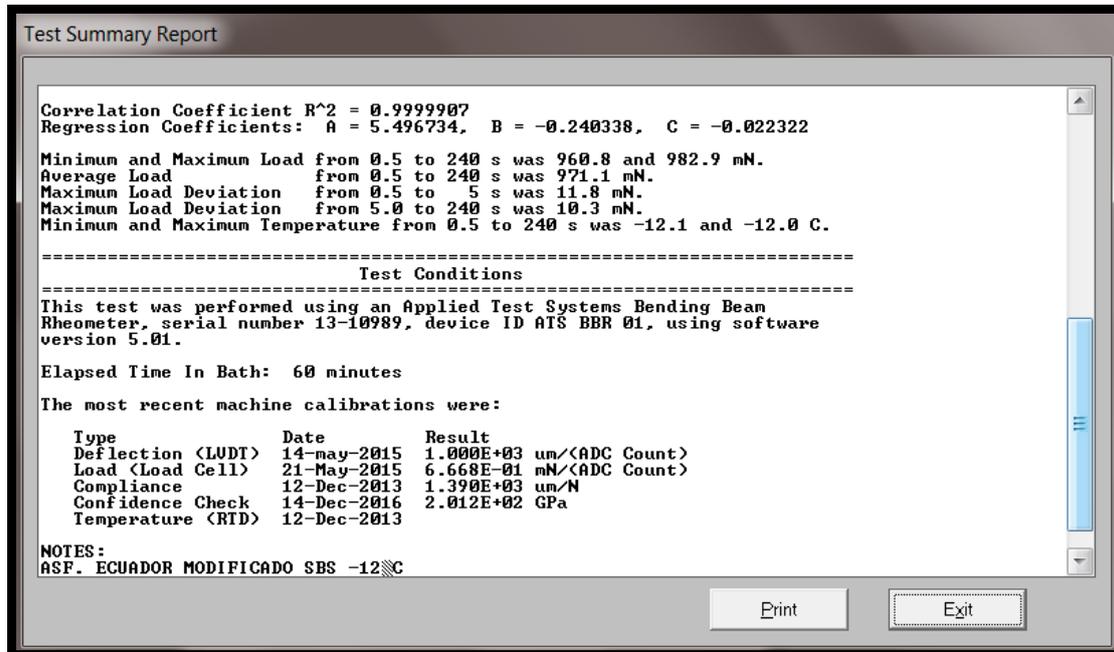
Asfalto de Ecuador con SBS (-12°C)



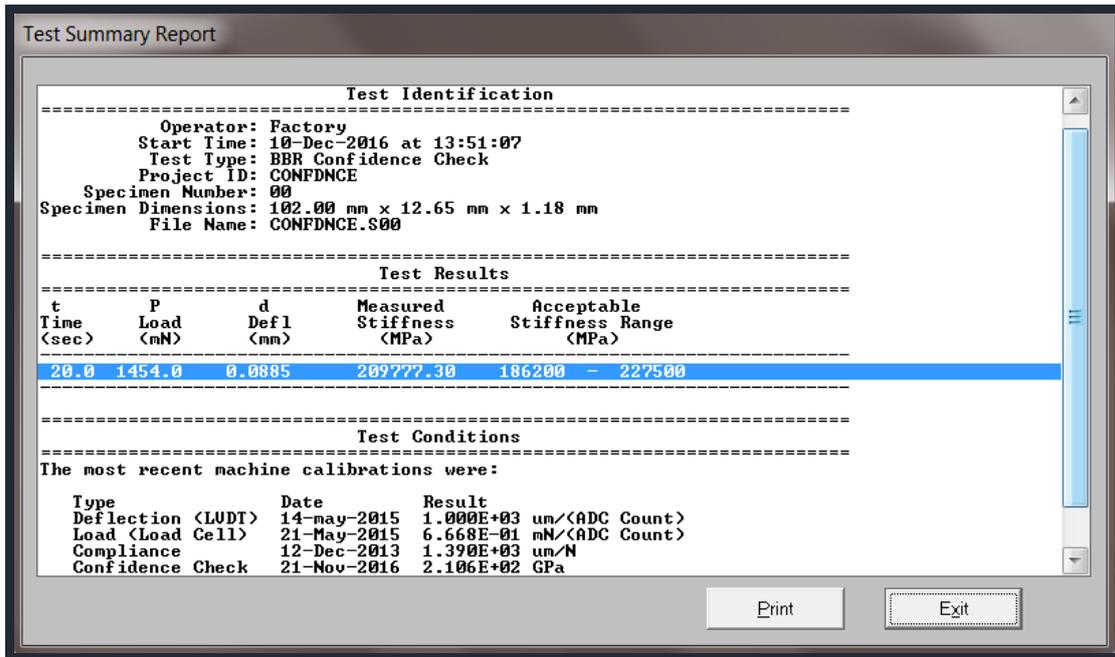
Gráfica del Asfalto de Ecuador con SBS (-12°C)



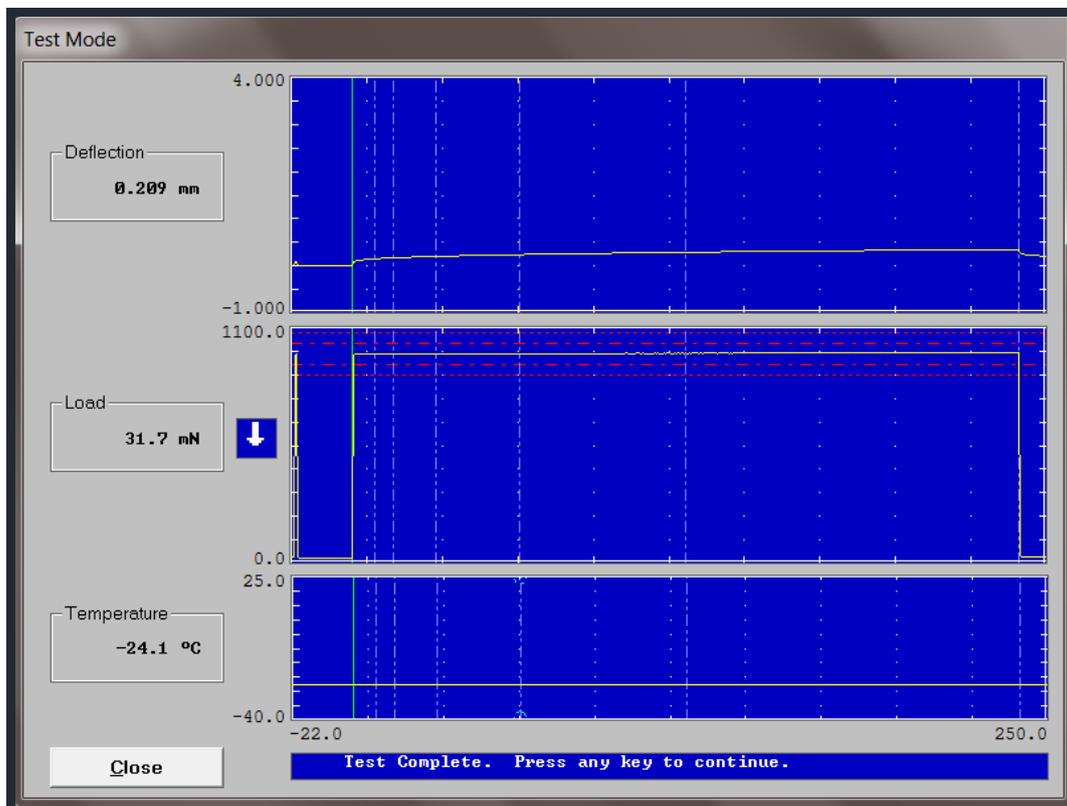
Asfalto de Ecuador con SBS (-12°C)



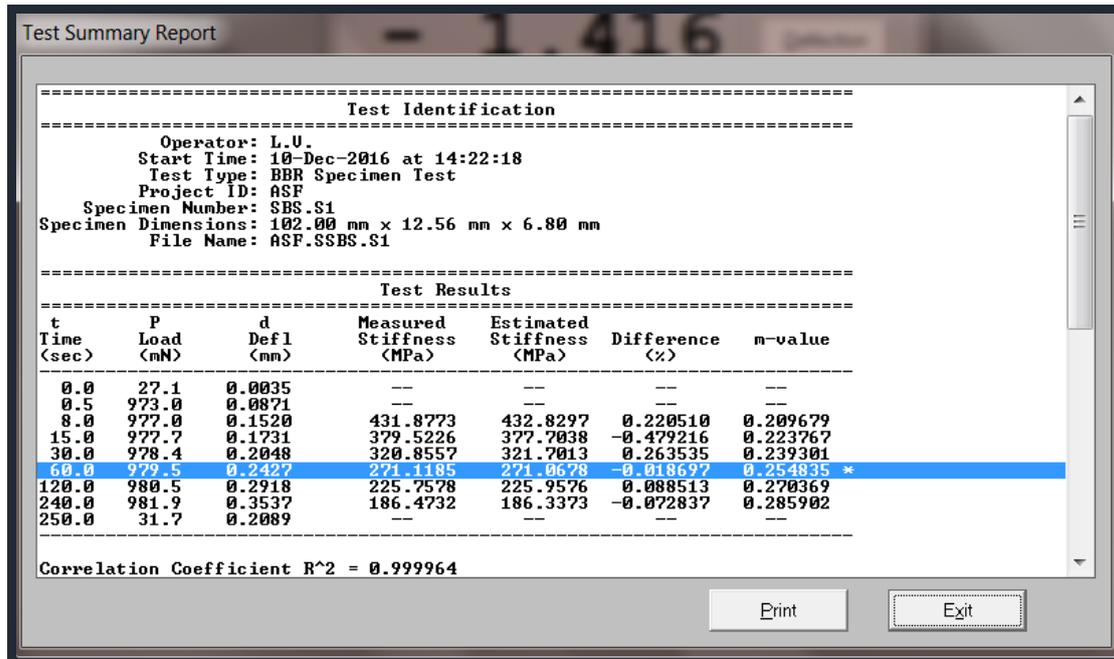
Asfalto de Ecuador con SBS (-12°C)



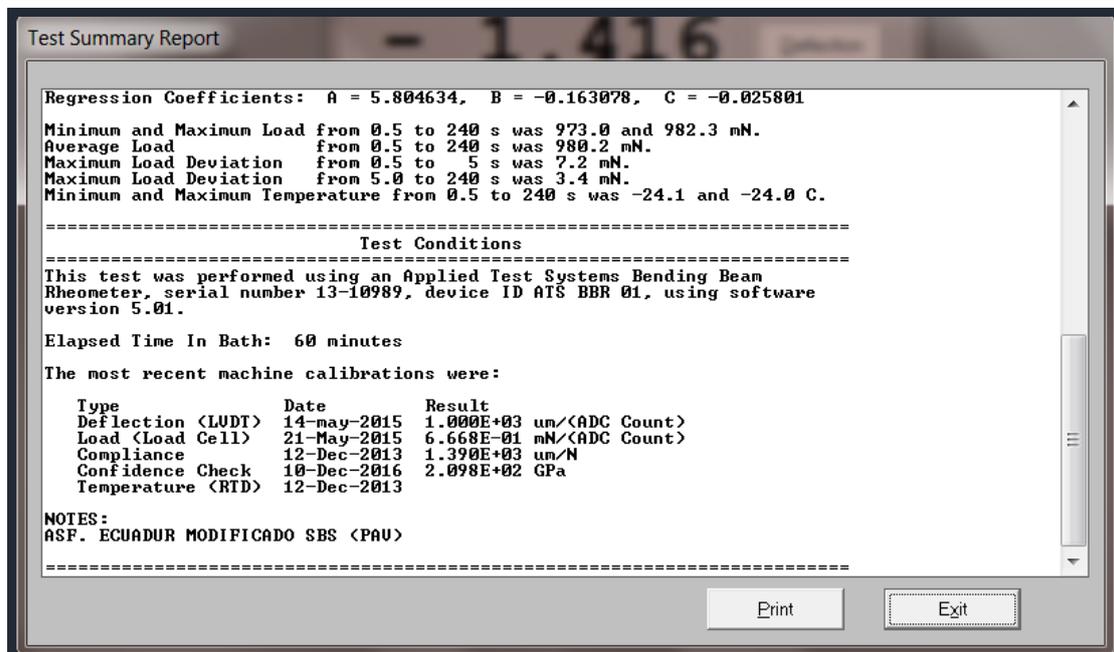
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-24°C)



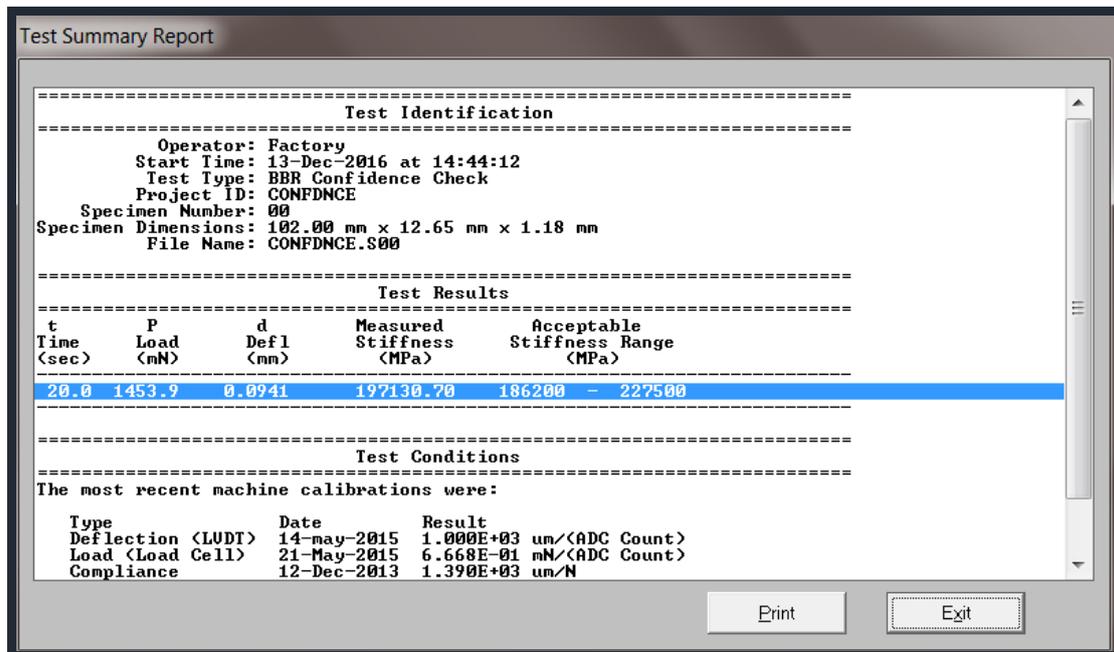
Gráfica del Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-24°C)



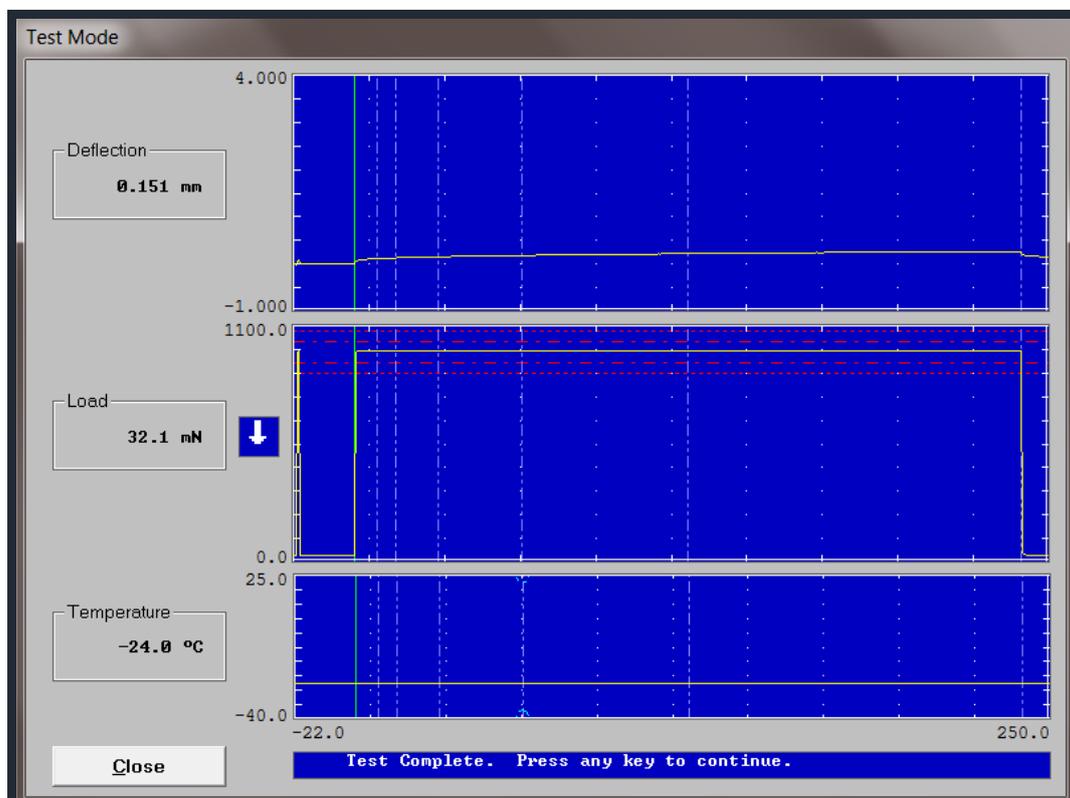
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-24°C)



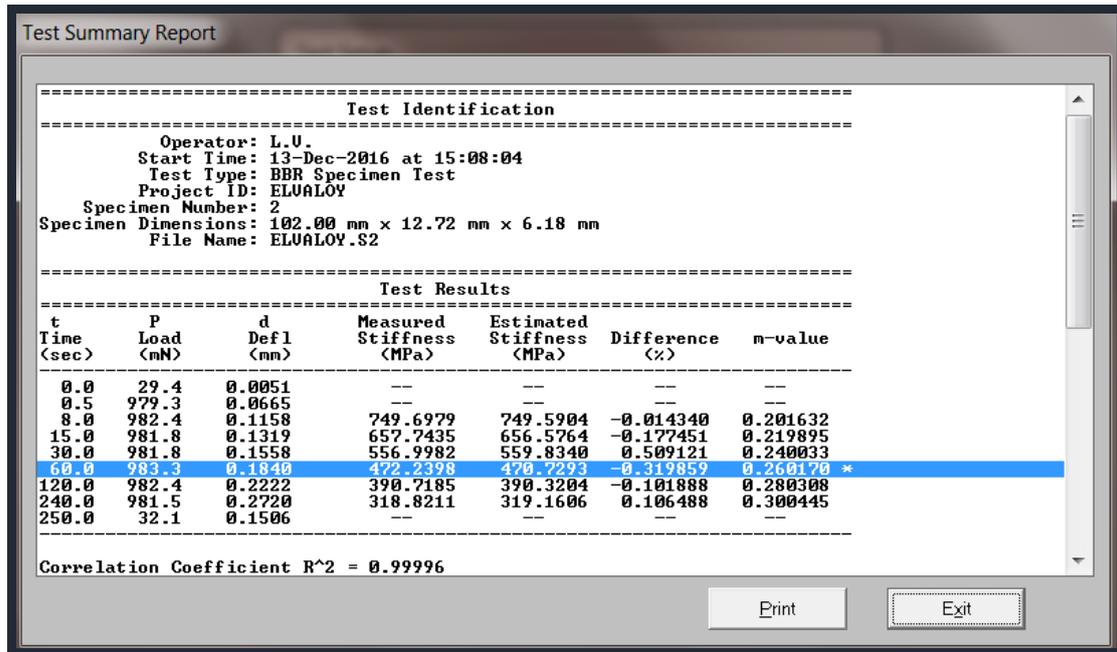
Asfalto de Ecuador con SBS (-24°C)



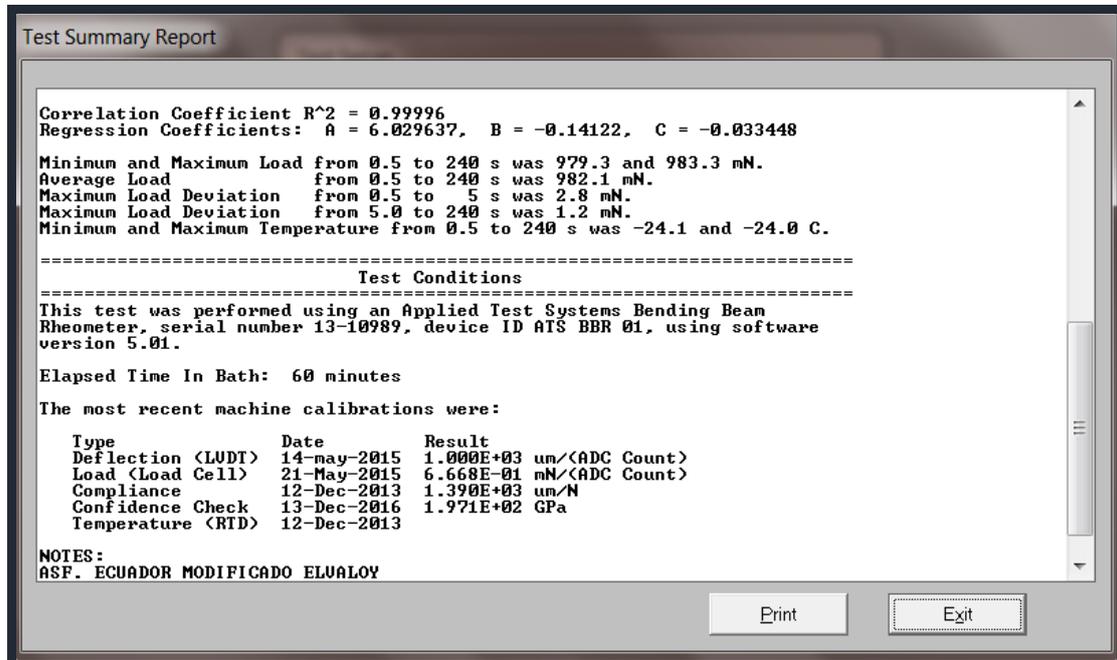
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-18°C)



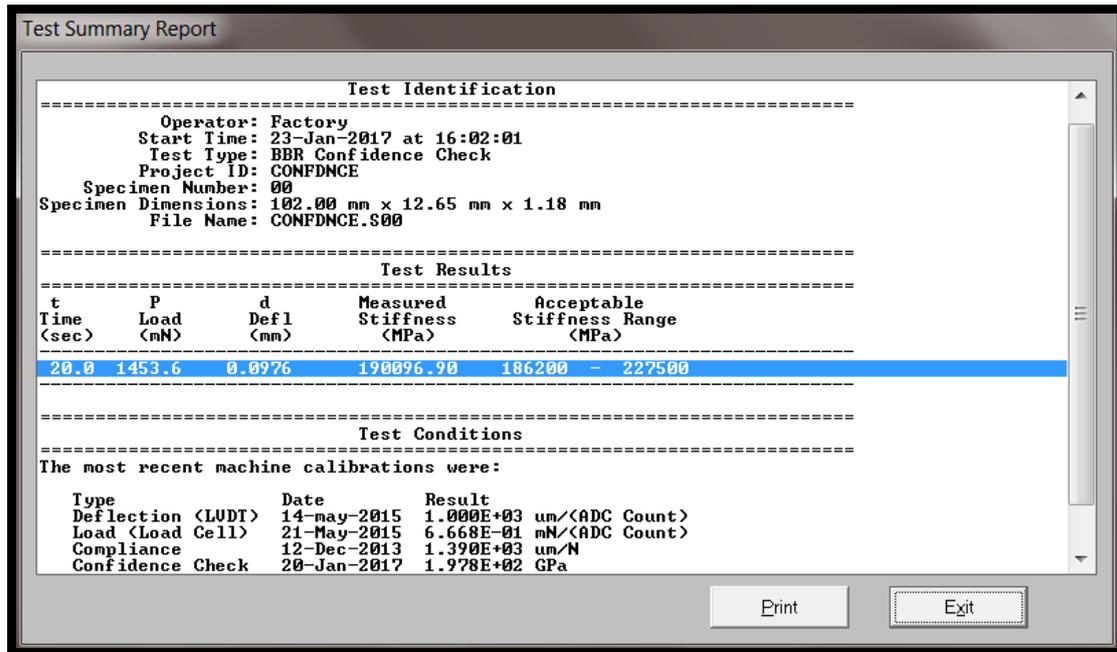
Gráfica del Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-18°C)



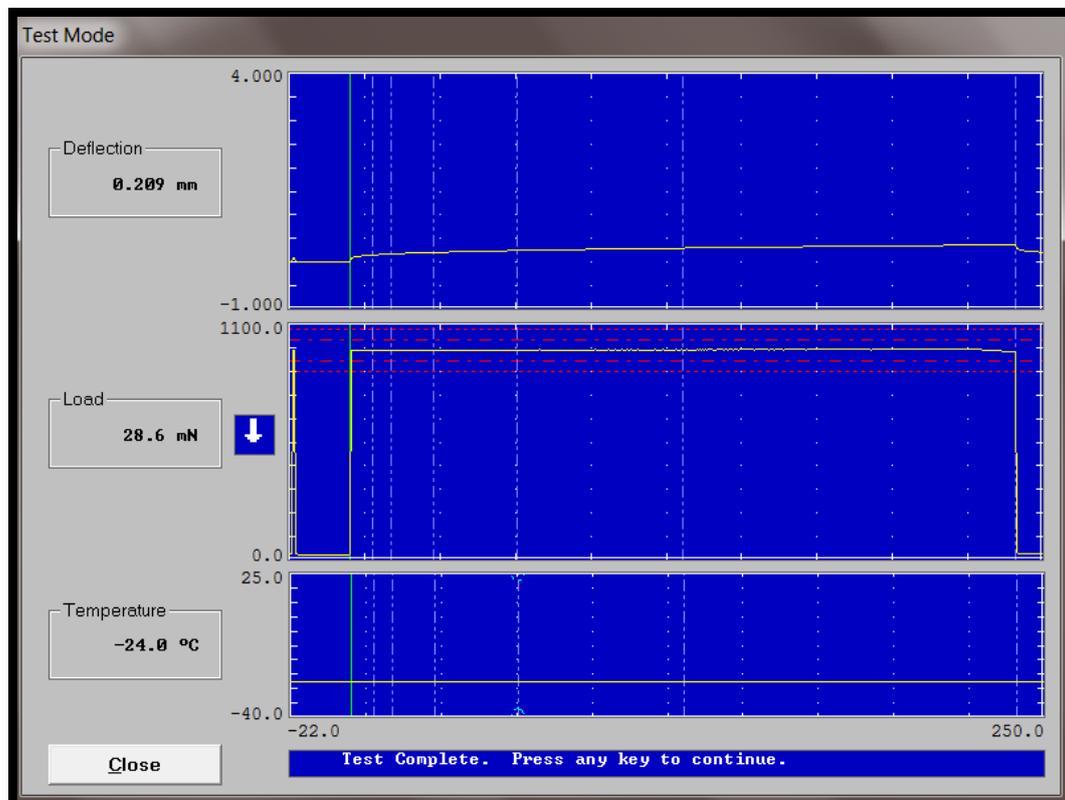
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-18°C)



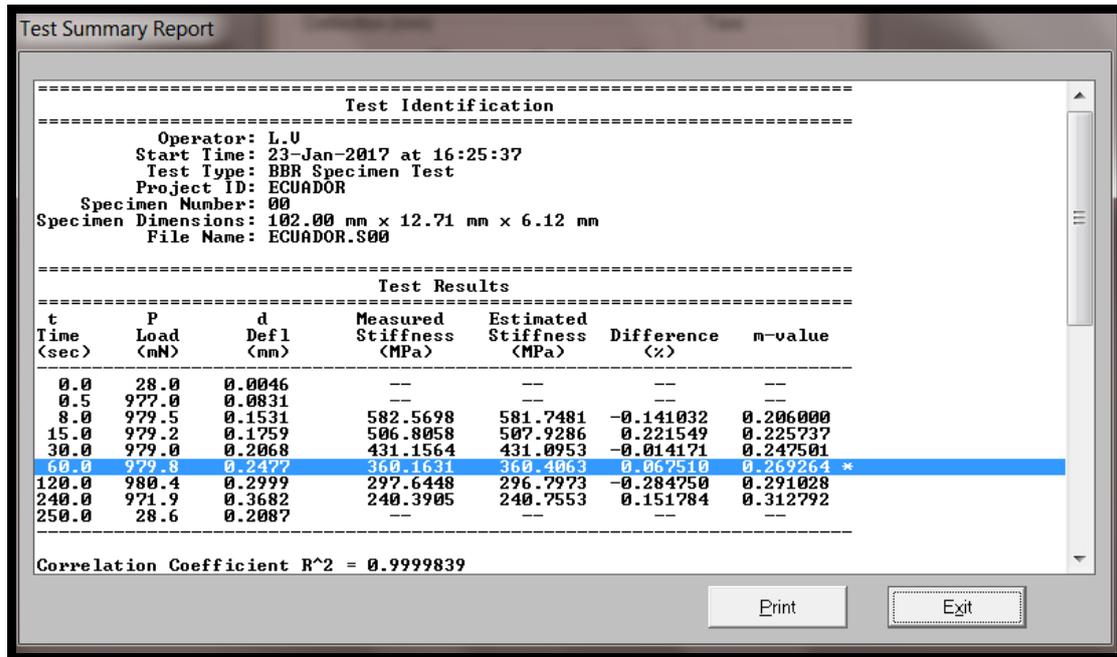
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (-18°C)



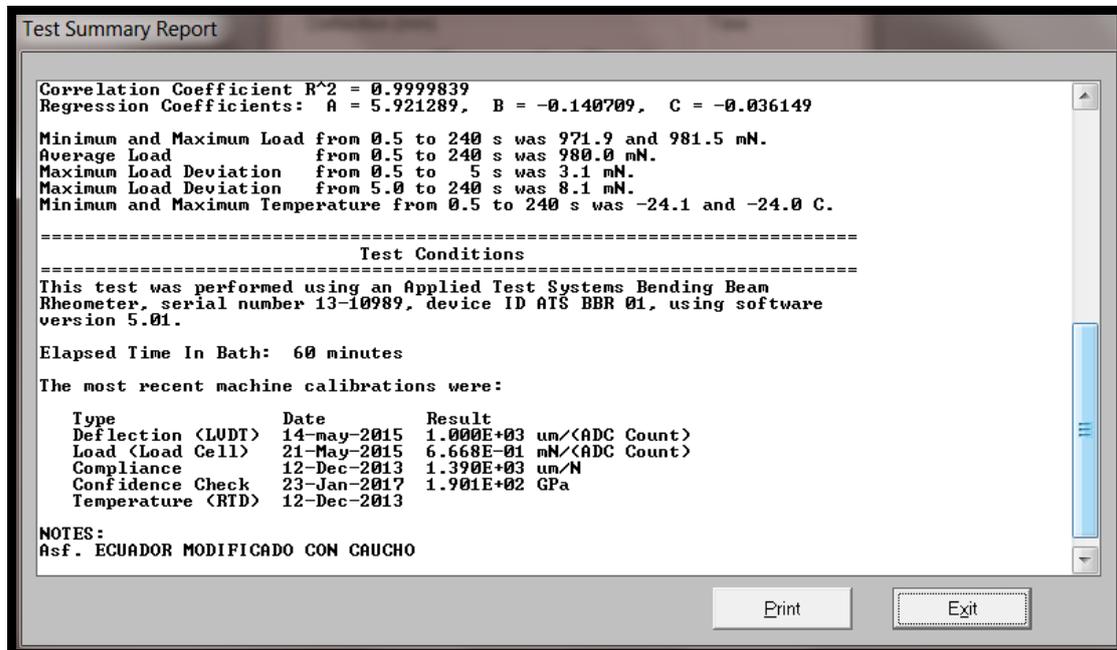
Asfalto de Ecuador con caucho (-24°C)



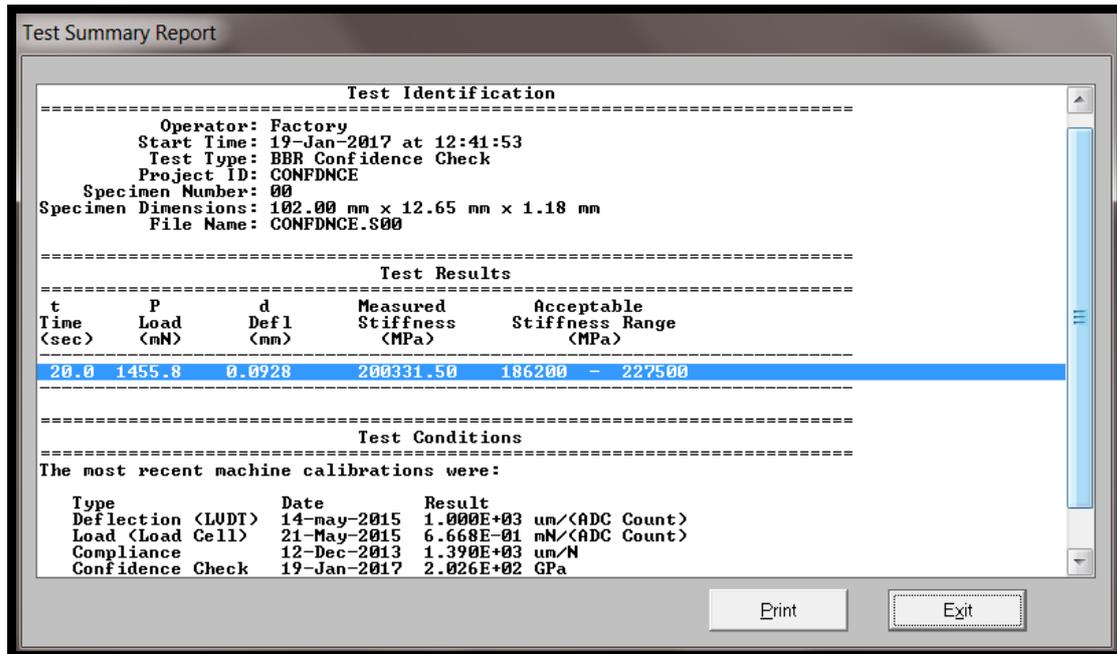
Gráfica del Asfalto de Ecuador con caucho (-24°C)



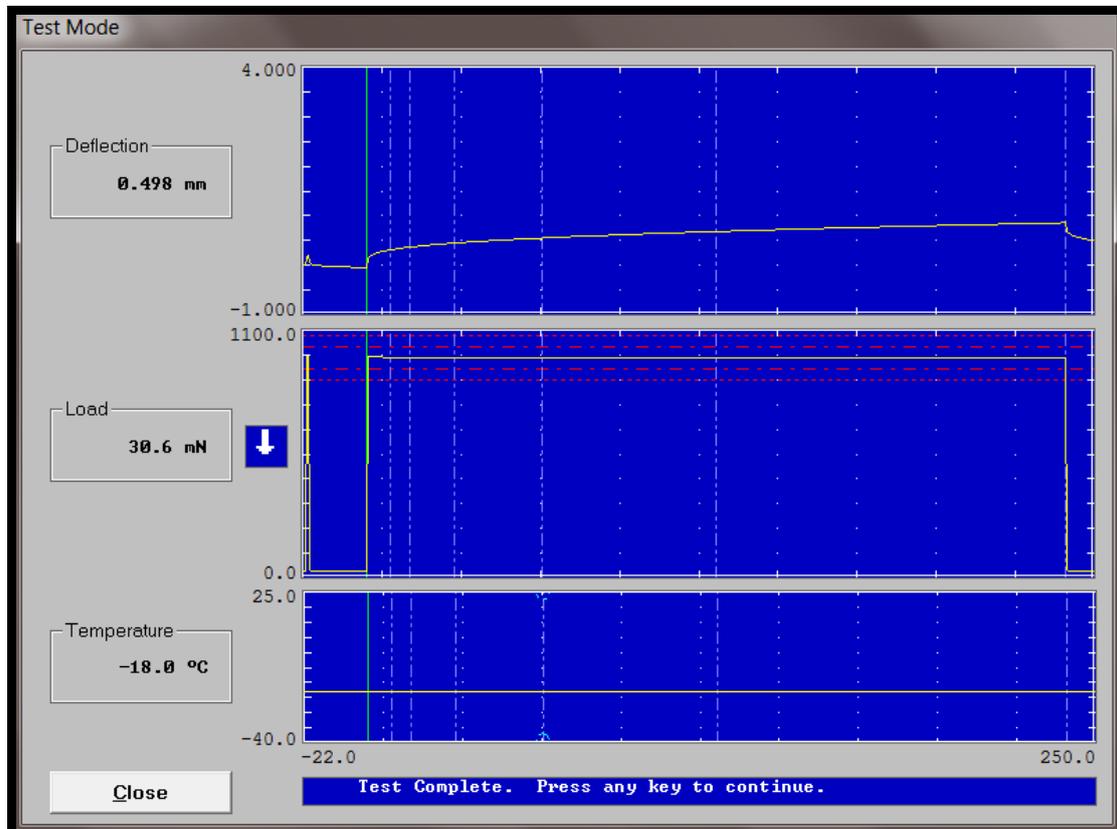
Asfalto de Ecuador con caucho (-24°C)



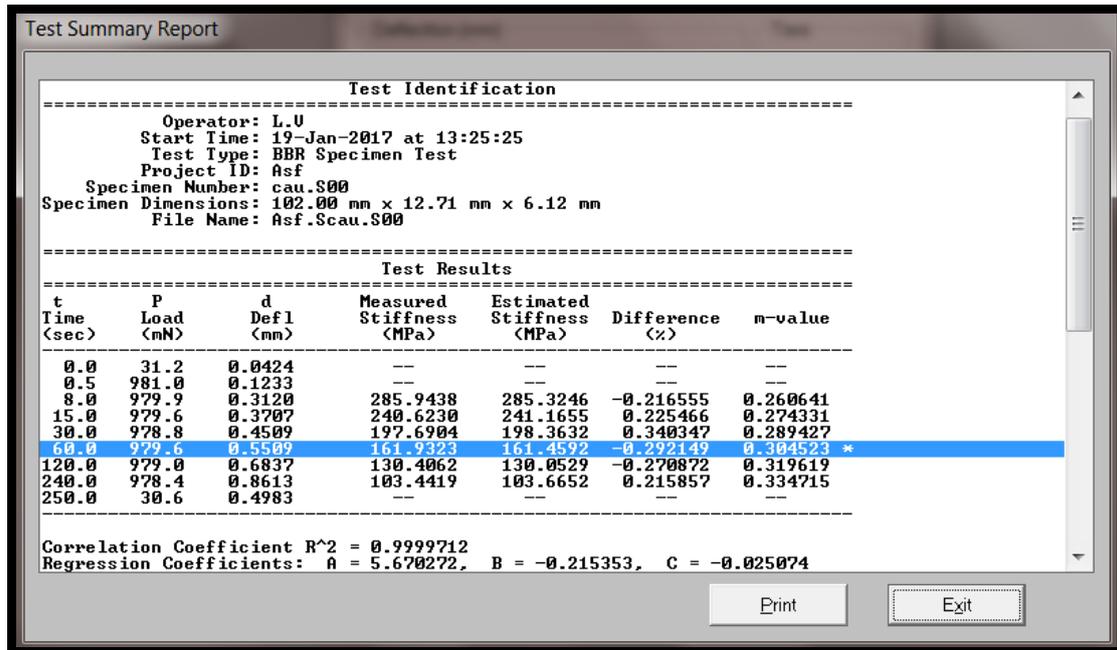
Asfalto de Ecuador con caucho (-24°C)



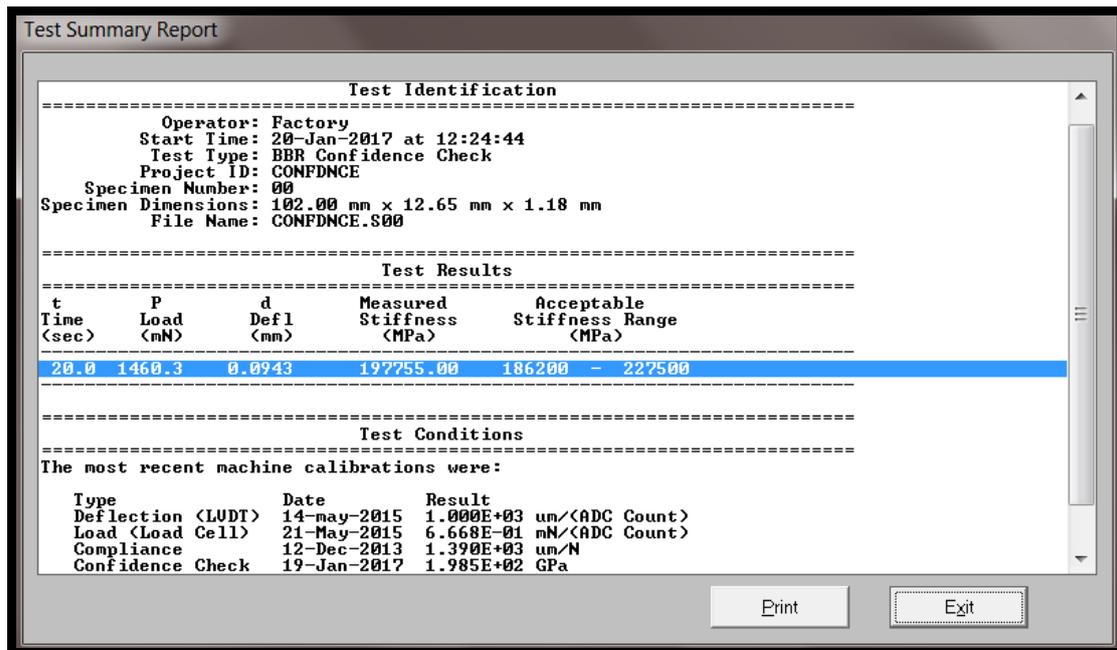
Asfalto de Ecuador con caucho (-18°C)



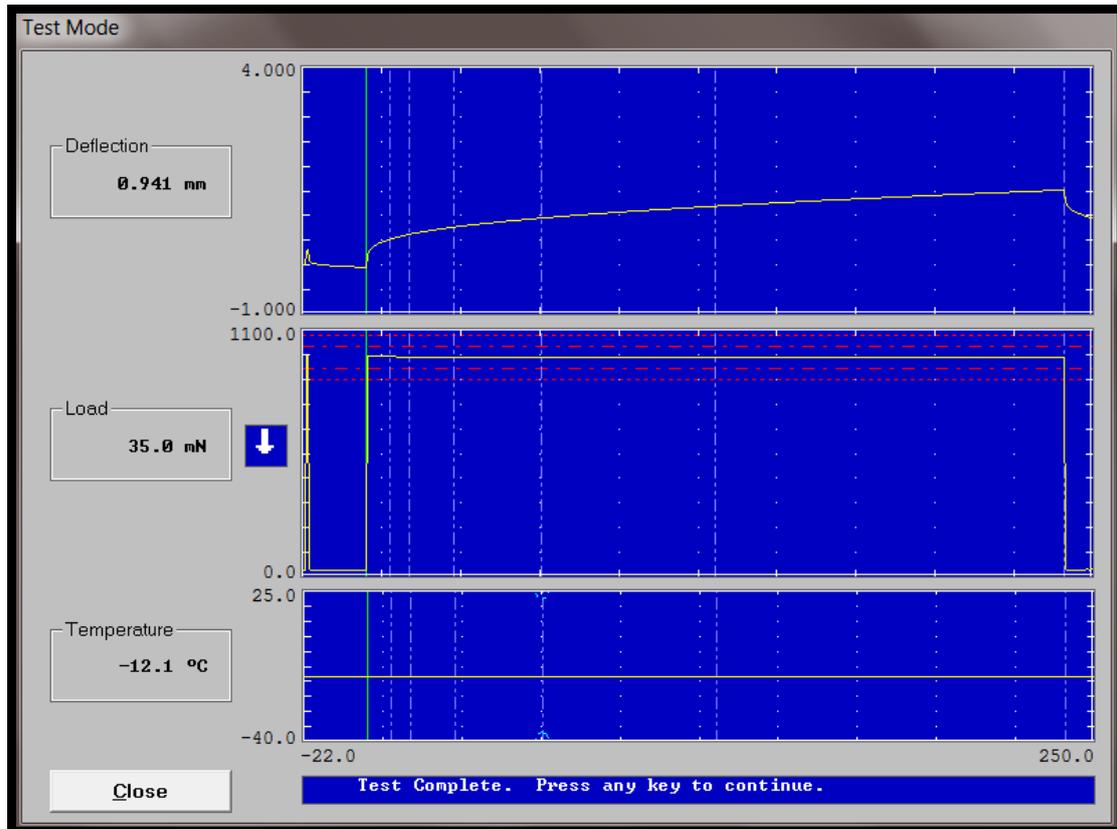
Gráfica del Asfalto de Ecuador con caucho (-18°C)



Asfalto de Ecuador con caucho (-18°C)



Asfalto de Ecuador con caucho (-12°C)



Gráfica del de Ecuador con caucho (-12°C)

Test Summary Report

=====
Test Identification
 =====

Operator: L.U.
 Start Time: 20-Jan-2017 at 12:37:27
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: CAUCHO12
 Specimen Number: 01
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.71 mm x 6.12 mm
 File Name: CAUCHO12.S01

=====
Test Results
 =====

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	33.6	0.0433	--	--	--	--
0.5	981.1	0.2112	--	--	--	--
8.0	980.7	0.5215	171.2531	170.8894	-0.212402	0.275510
15.0	979.6	0.6252	142.6680	143.0683	0.280592	0.289847
30.0	979.8	0.7682	116.1522	116.3889	0.203770	0.305655
60.0	978.6	0.7491	93.8938	93.6526	-0.253456	0.321468 *
120.0	976.9	1.1913	74.6716	74.5369	-0.180429	0.337272
240.0	976.4	1.5178	58.5806	58.6763	0.163368	0.353080
250.0	35.0	0.9412	--	--	--	--

Correlation Coefficient R^2 = 0.9999822

Print Exit

Asfalto de Ecuador con caucho (-12°C)

Test Summary Report

Correlation Coefficient $R^2 = 0.9999822$
 Regression Coefficients: $A = 5.460111$, $B = -0.228085$, $C = -0.026257$

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 975.8 and 982.9 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 977.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 5.3 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 4.9 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -12.1 and -12.0 C.

=====
 Test Conditions
 =====

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

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

The most recent machine calibrations were:

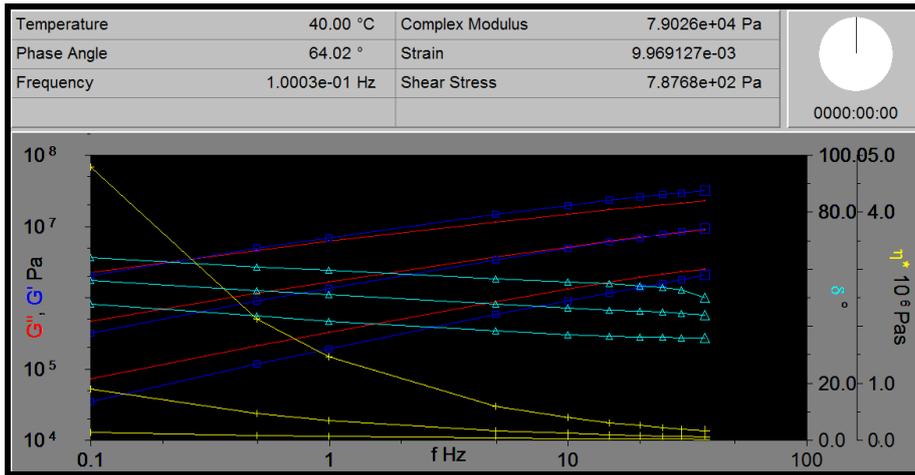
Type	Date	Result
Deflection <LUDT>	14-May-2015	1.000E+03 um/<ADC Count>
Load <Load Cell>	21-May-2015	6.668E-01 mN/<ADC Count>
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	20-Jan-2017	1.978E+02 GPa
Temperature <RTD>	12-Dec-2013	

NOTES:
 ASF. ECUADOR CAUCHO 12°C

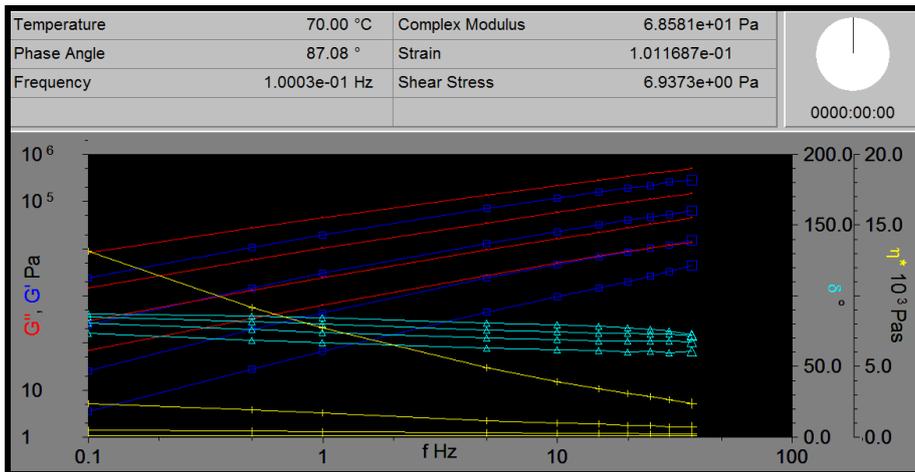
Print Exit

Asfalto de Ecuador con caucho (-12°C)

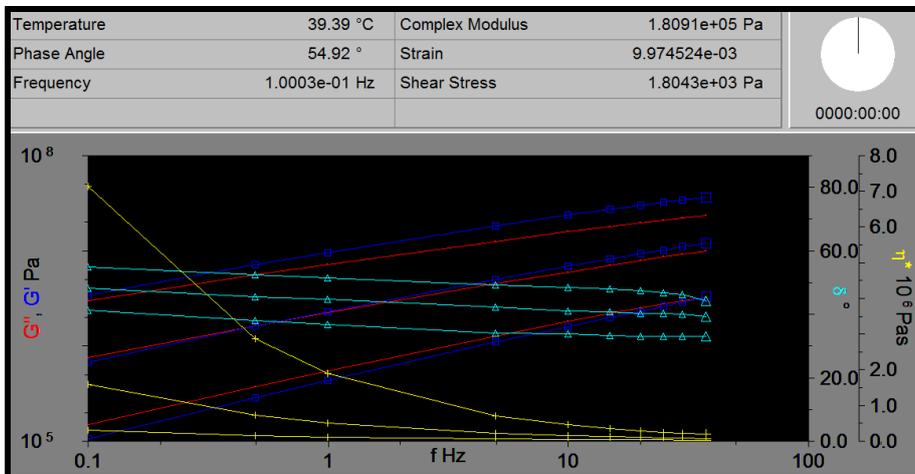
Anexo 3. Gráfica de resultados del programa Bohlin.



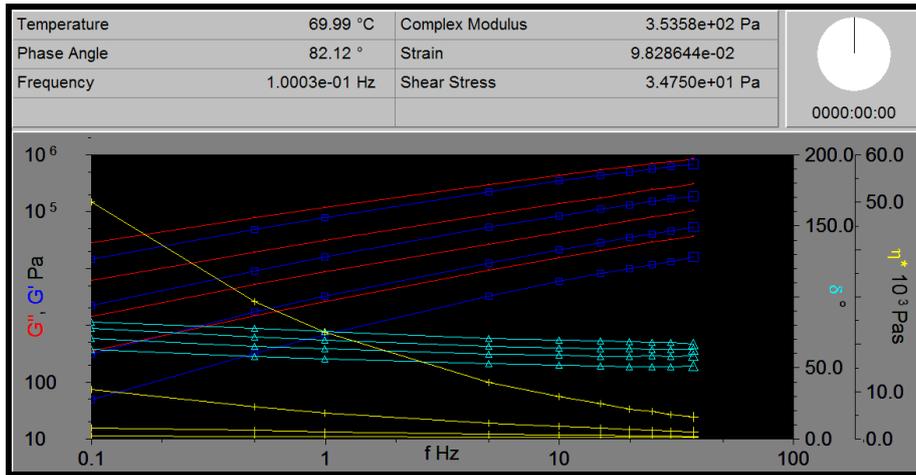
Asfalto Ecuador (Original). Temperaturas: 10-30 °C.



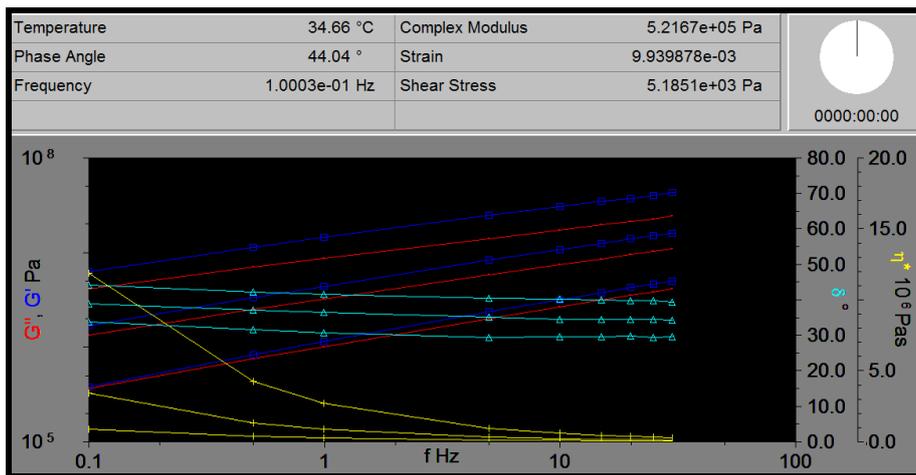
Asfalto Ecuador (Original). Temperaturas: 40-70 °C.



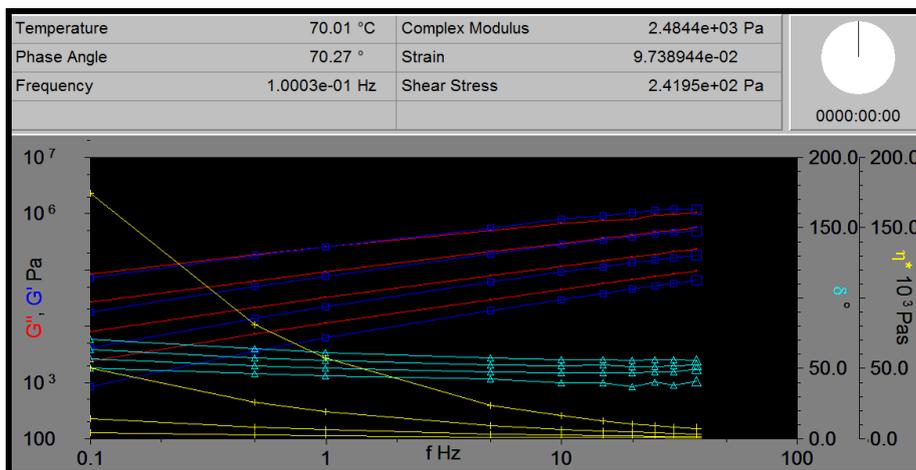
Asfalto Ecuador (RTFOT). Temperaturas: 10-30 °C.



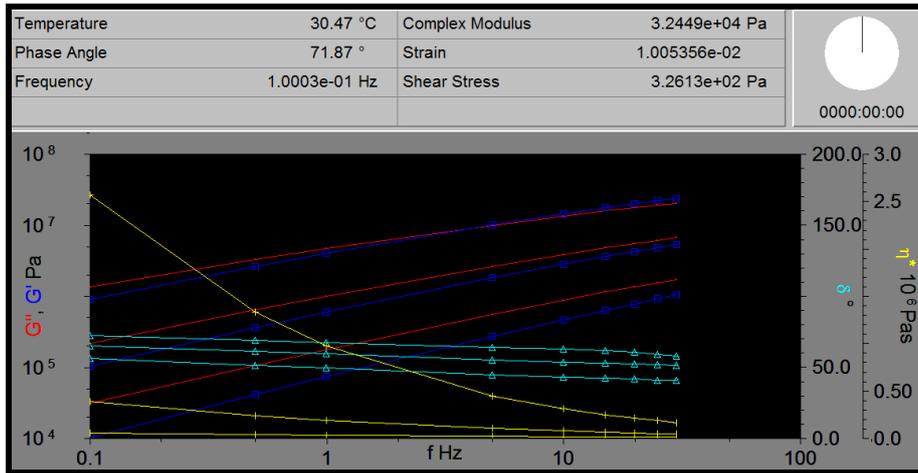
Asfalto Ecuador (RTFOT). Temperaturas: 40-70 °C.



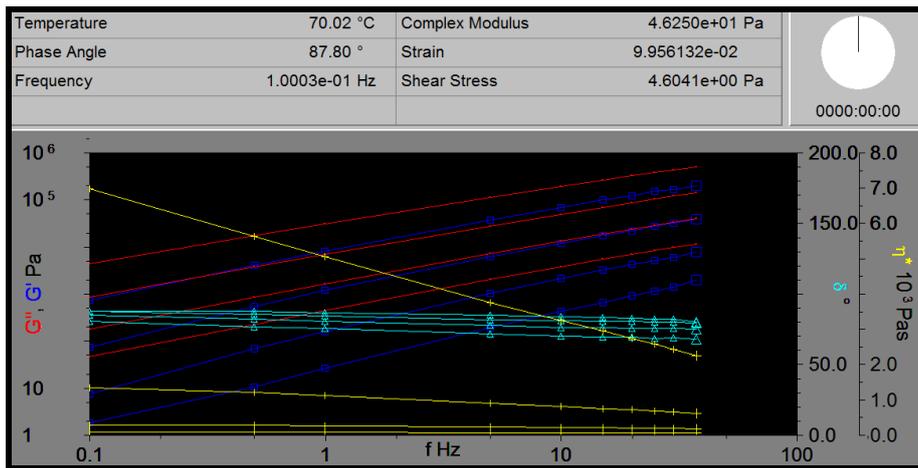
Asfalto Ecuador (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



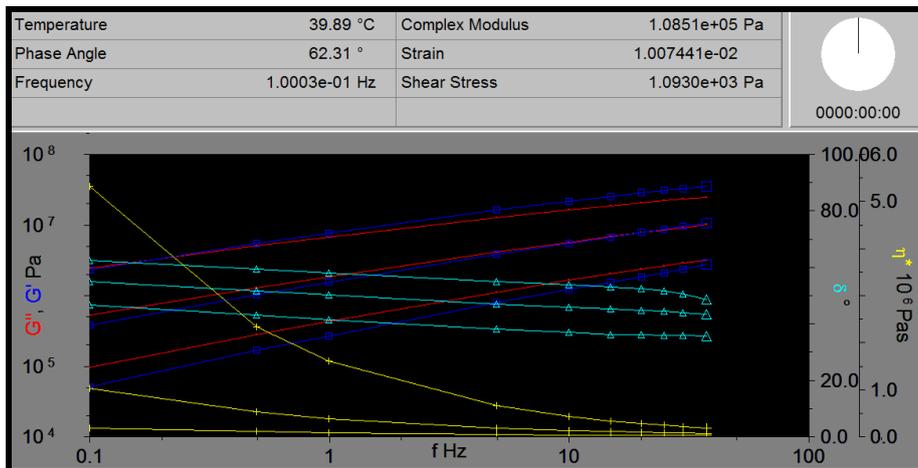
Asfalto Ecuador (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



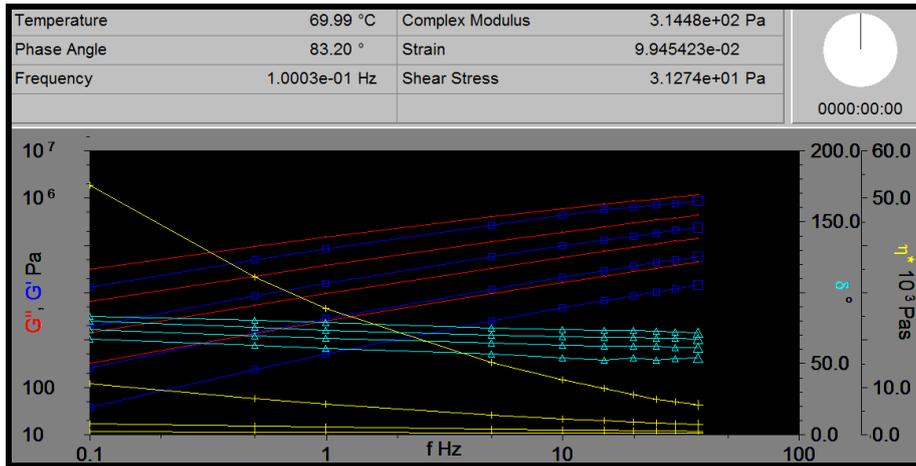
Asfalto Texas (Original). Temperaturas: 10-30 °C.



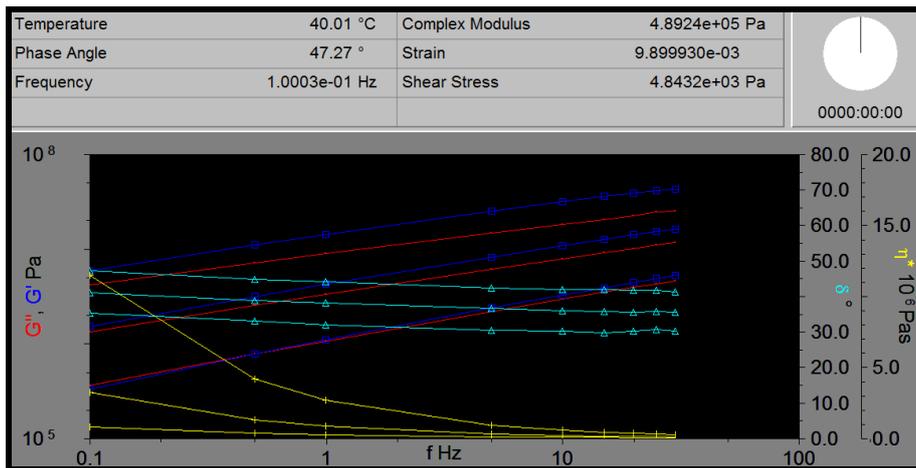
Asfalto Texas (Original). Temperaturas: 40-70 °C.



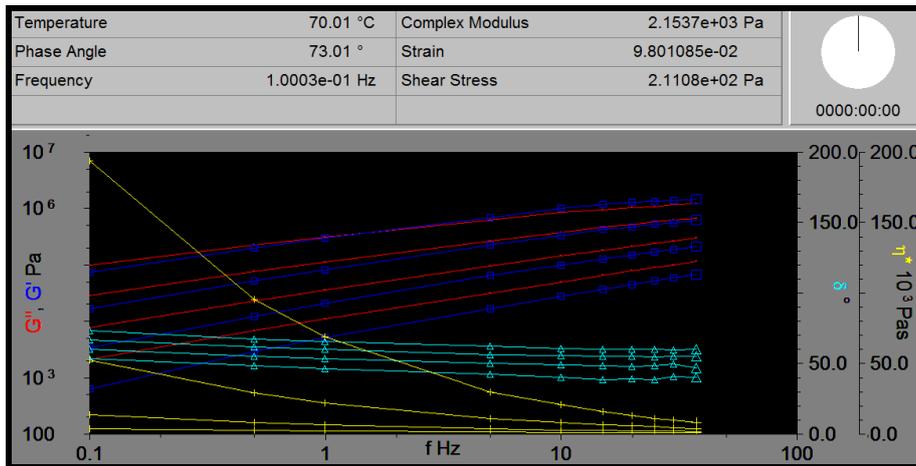
Asfalto Texas (RTFOT). Temperaturas: 10-30 °C.



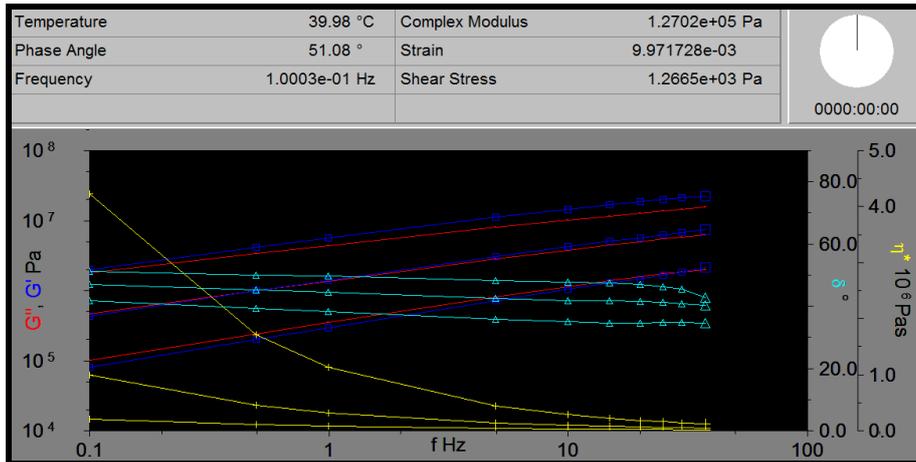
Asfalto Texas (RTFOT). Temperaturas: 40-70 °C.



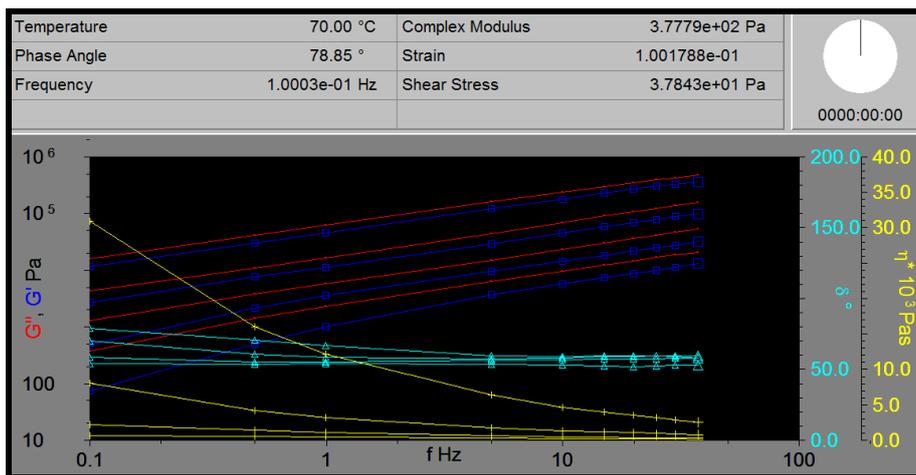
Asfalto Texas (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



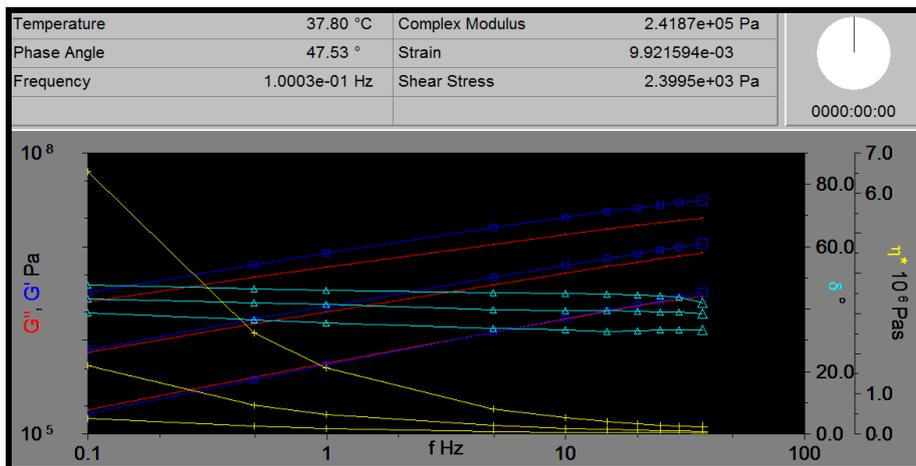
Asfalto Texas (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



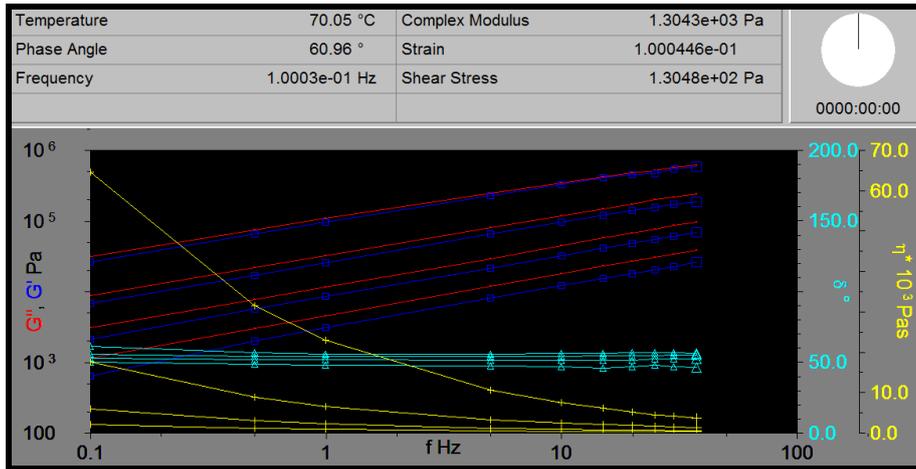
Asfalto Ecuador con SBS (Original). Temperaturas: 10-30 °C.



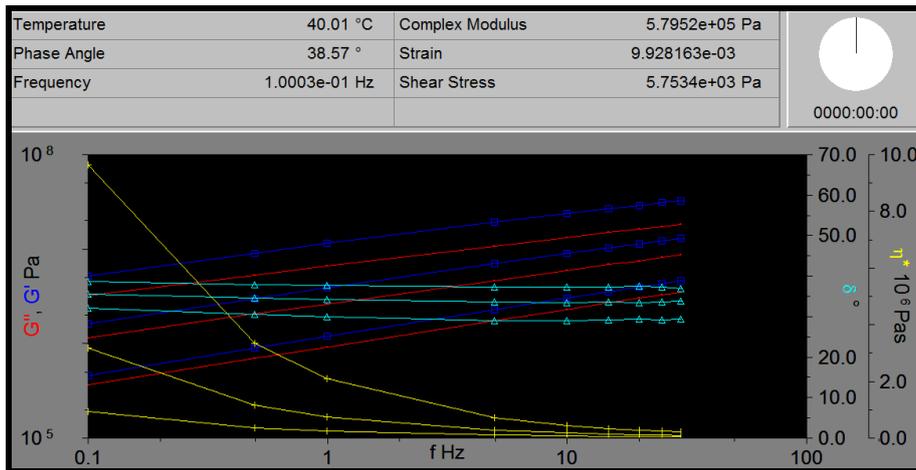
Asfalto Ecuador con SBS (Original). Temperaturas: 40-70 °C.



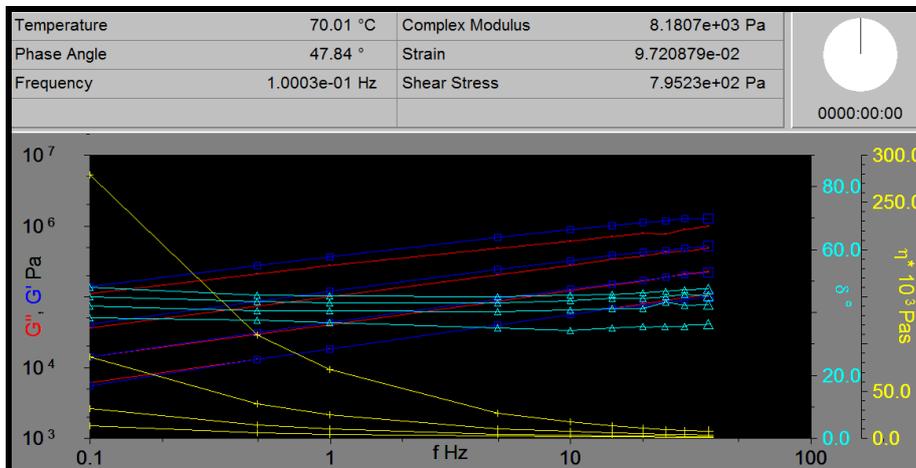
Asfalto Ecuador con SBS (RTFOT). Temperaturas: 10-30 °C.



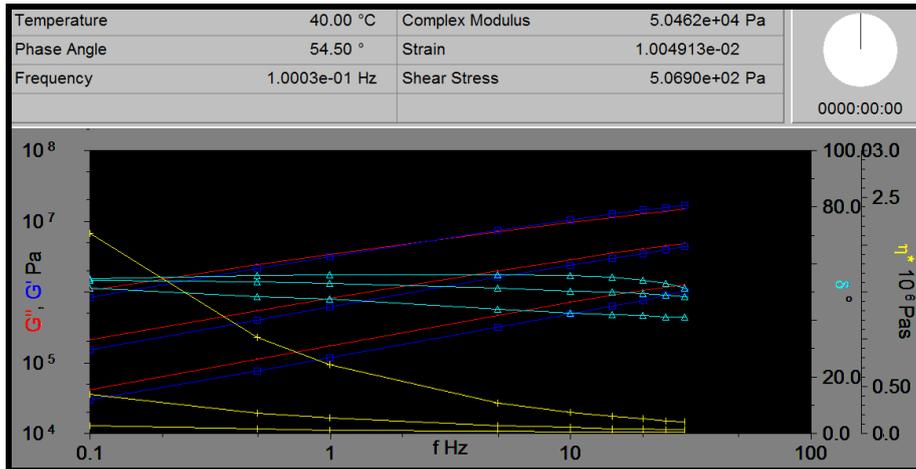
Asfalto Ecuador con SBS (RTFOT). Temperaturas: 40-70 °C.



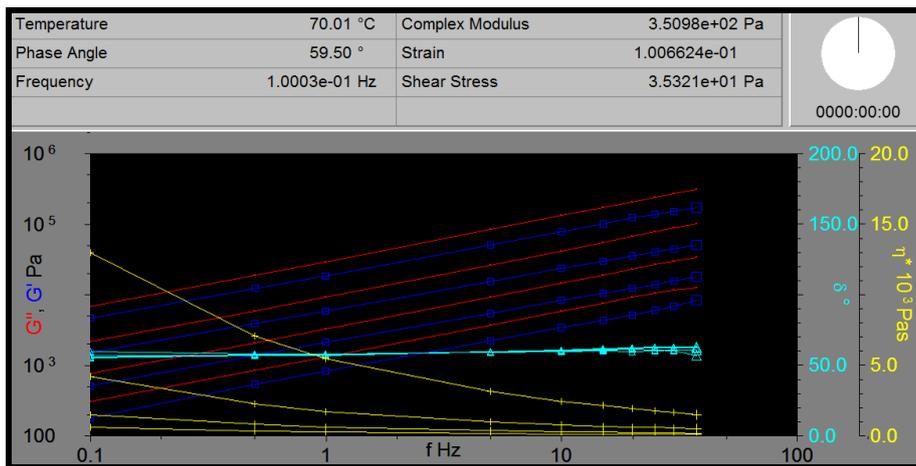
Asfalto Ecuador con SBS (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



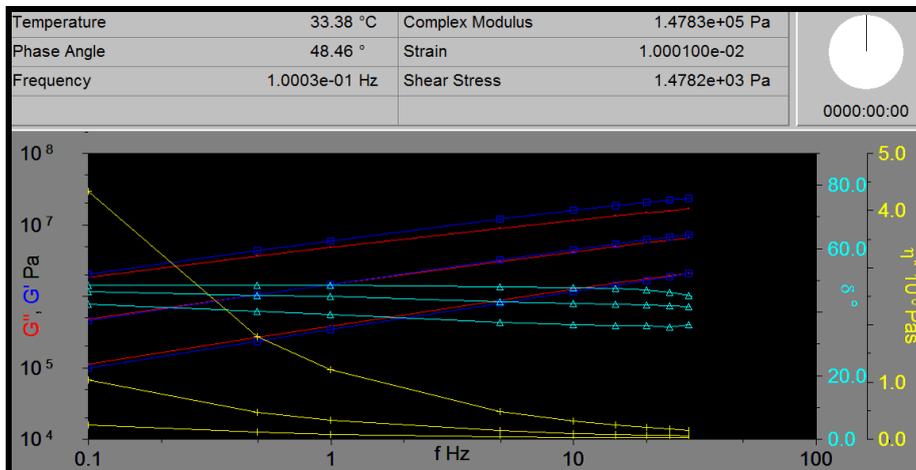
Asfalto Ecuador con SBS (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



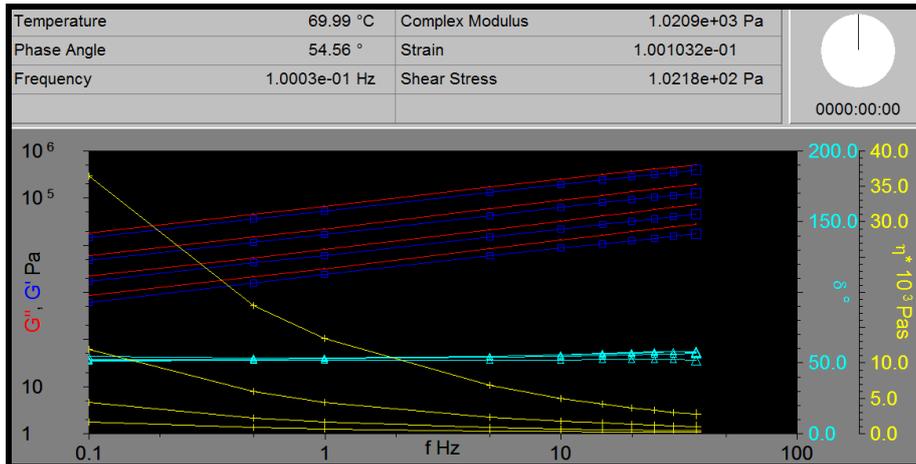
Asfalto Ecuador con ELVALLOY (Original). Temperaturas: 10-30 °C.



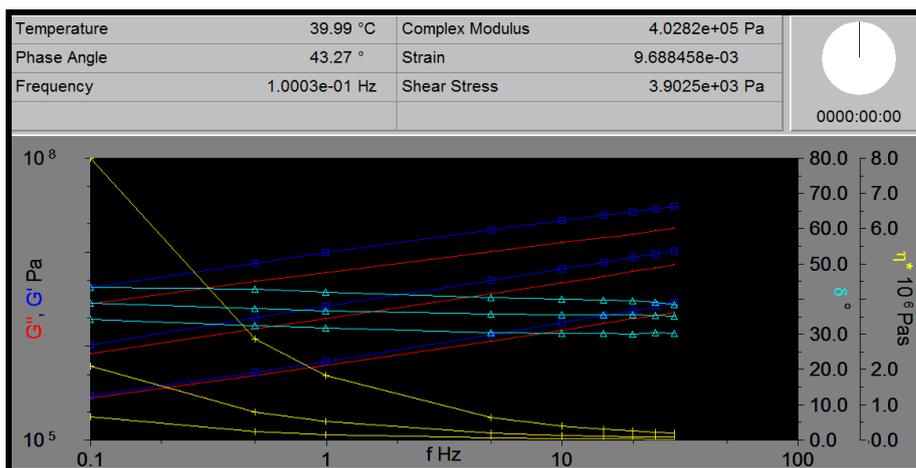
Asfalto Ecuador con ELVALLOY (Original). Temperaturas: 40-70 °C.



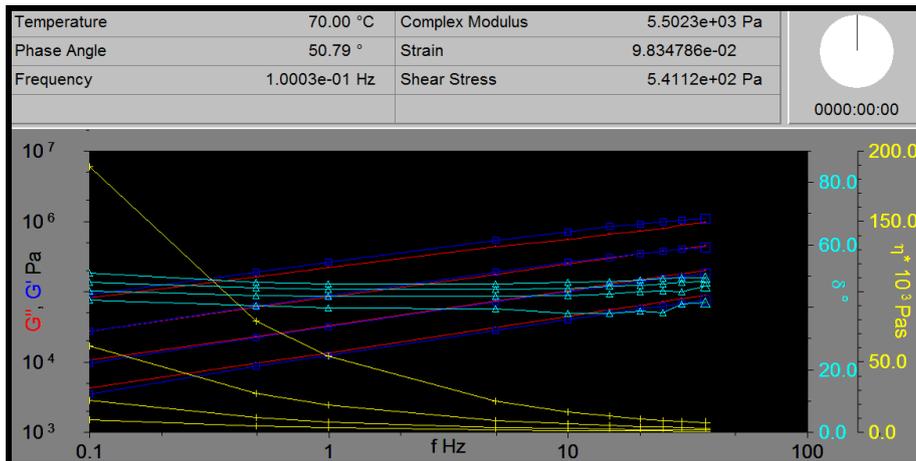
Asfalto Ecuador con ELVALLOY (RTFOT). Temperaturas: 10-30 °C.



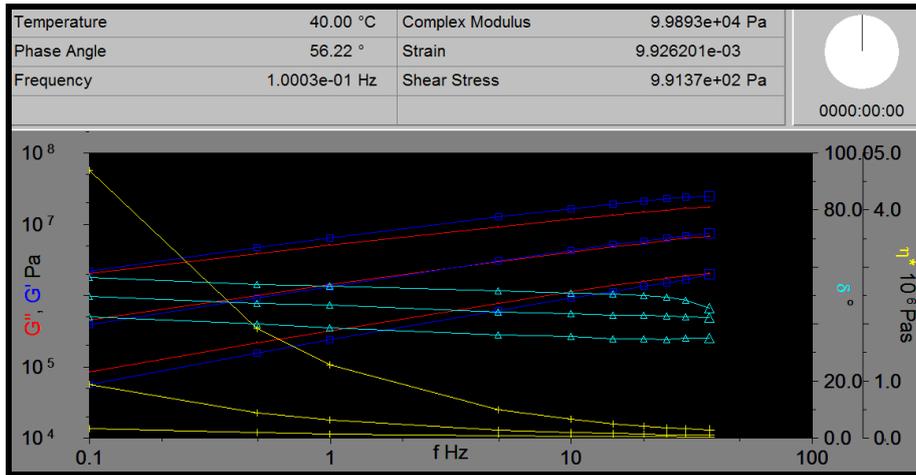
Asfalto Ecuador con ELVALOY (RTFOT). Temperaturas: 40-70 °C.



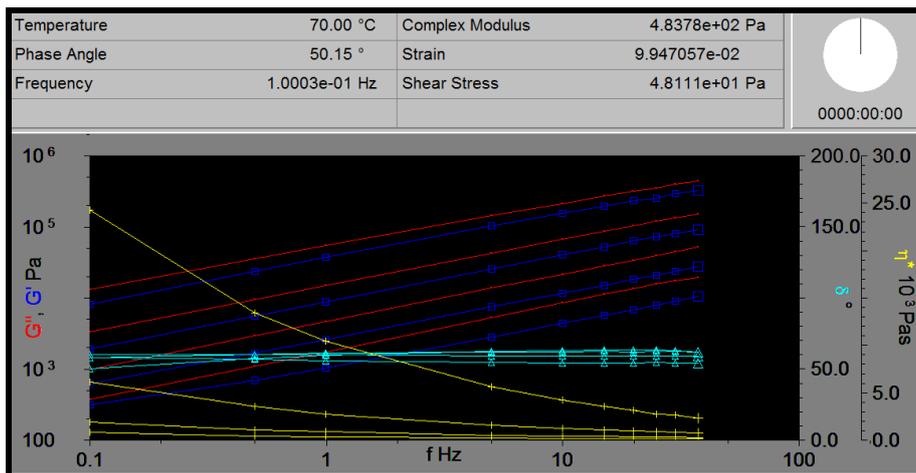
Asfalto Ecuador con ELVALOY (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.



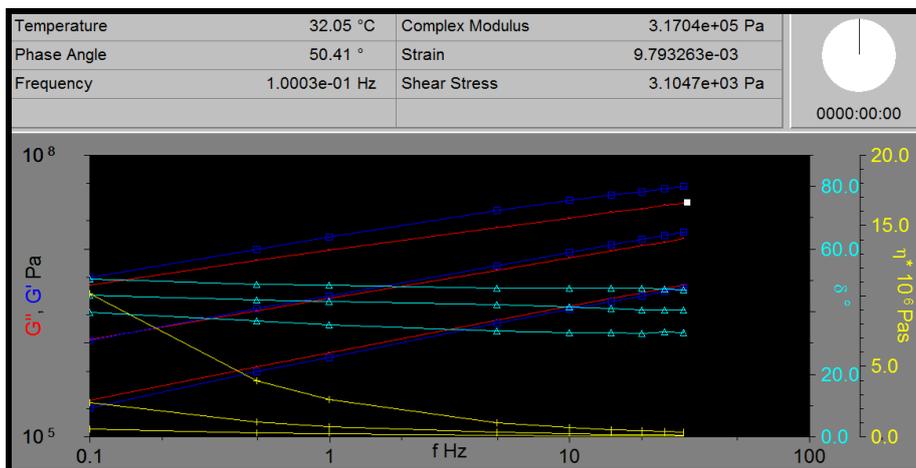
Asfalto Ecuador con ELVALOY (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.



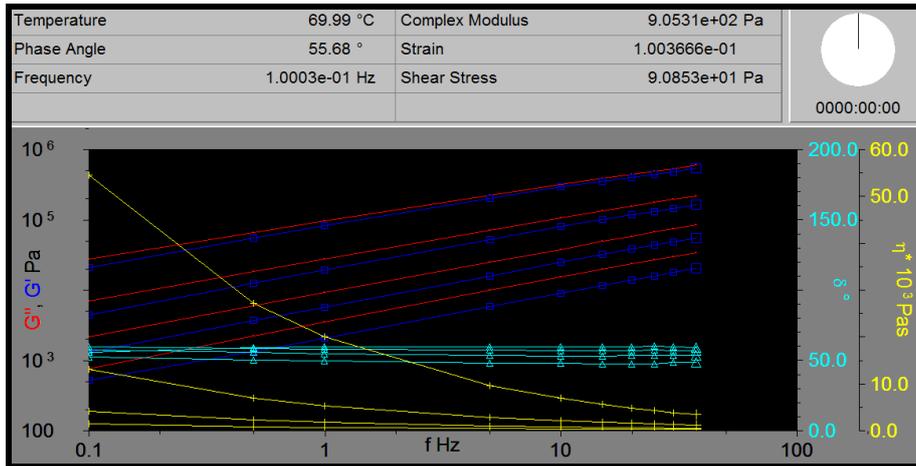
Asfalto Ecuador con caucho (Original). Temperaturas: 10-30 °C.



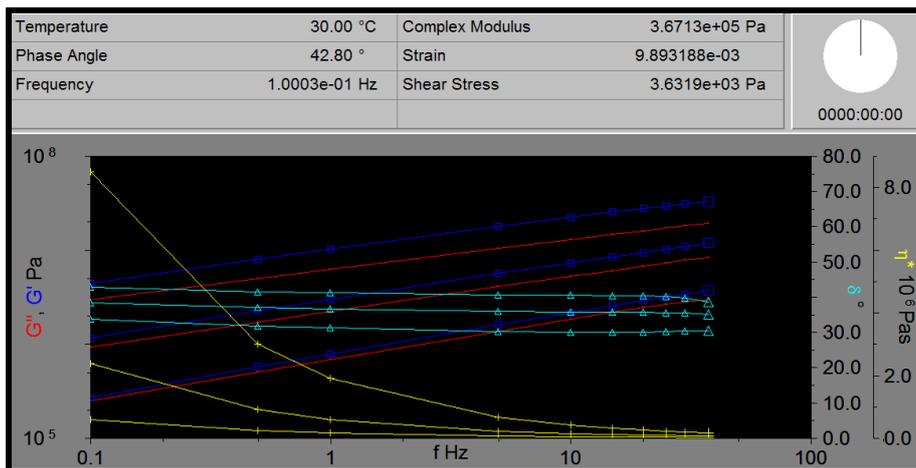
Asfalto Ecuador con caucho (Original). Temperaturas: 40-70 °C.



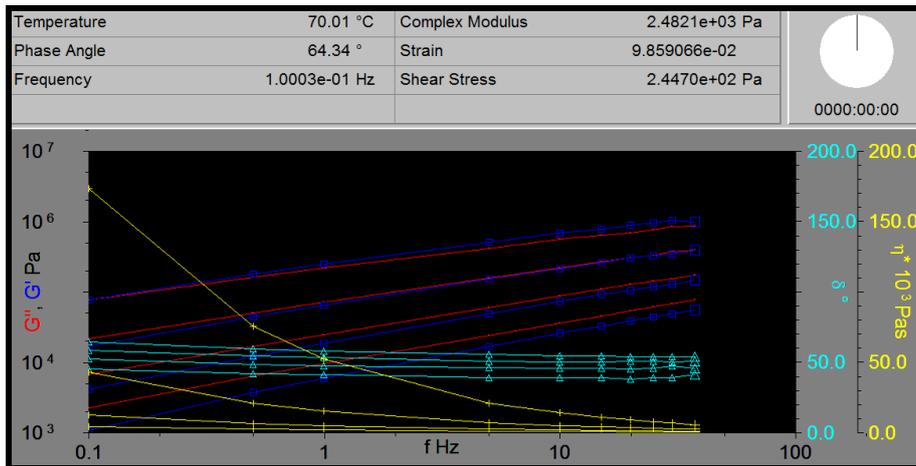
Asfalto Ecuador con caucho (RTFOT). Temperaturas: 10-30 °C.



Asfalto Ecuador con caucho (RTFOT). Temperaturas: 40-70 °C.

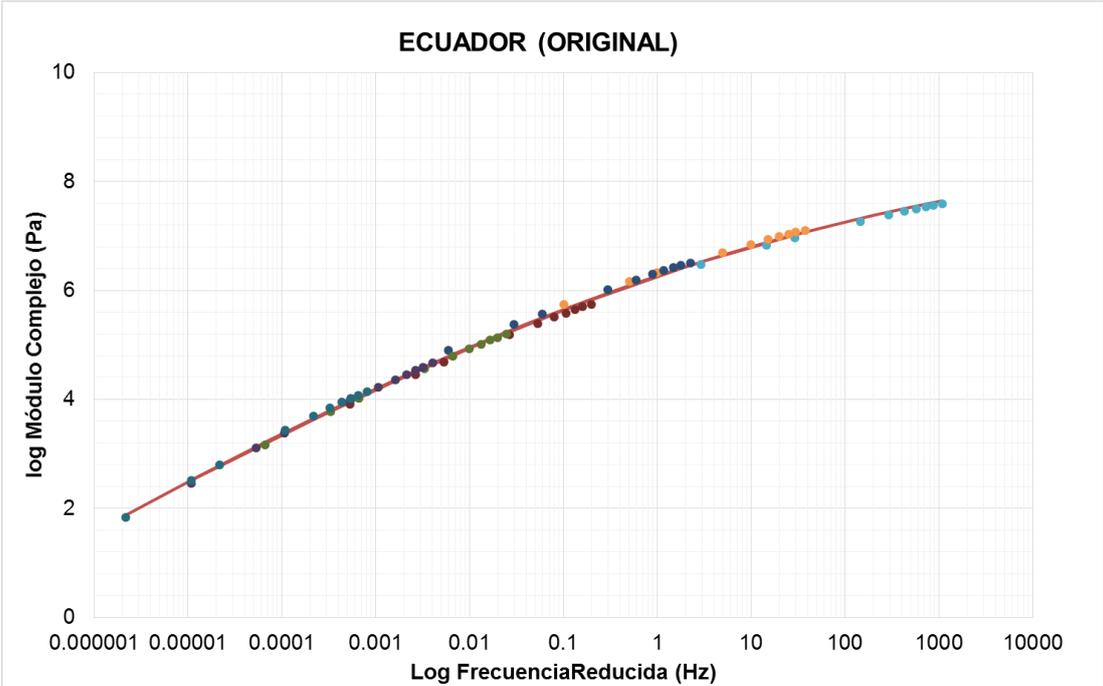


Asfalto Ecuador con caucho (PAV). Temperaturas: 10-30 °C.

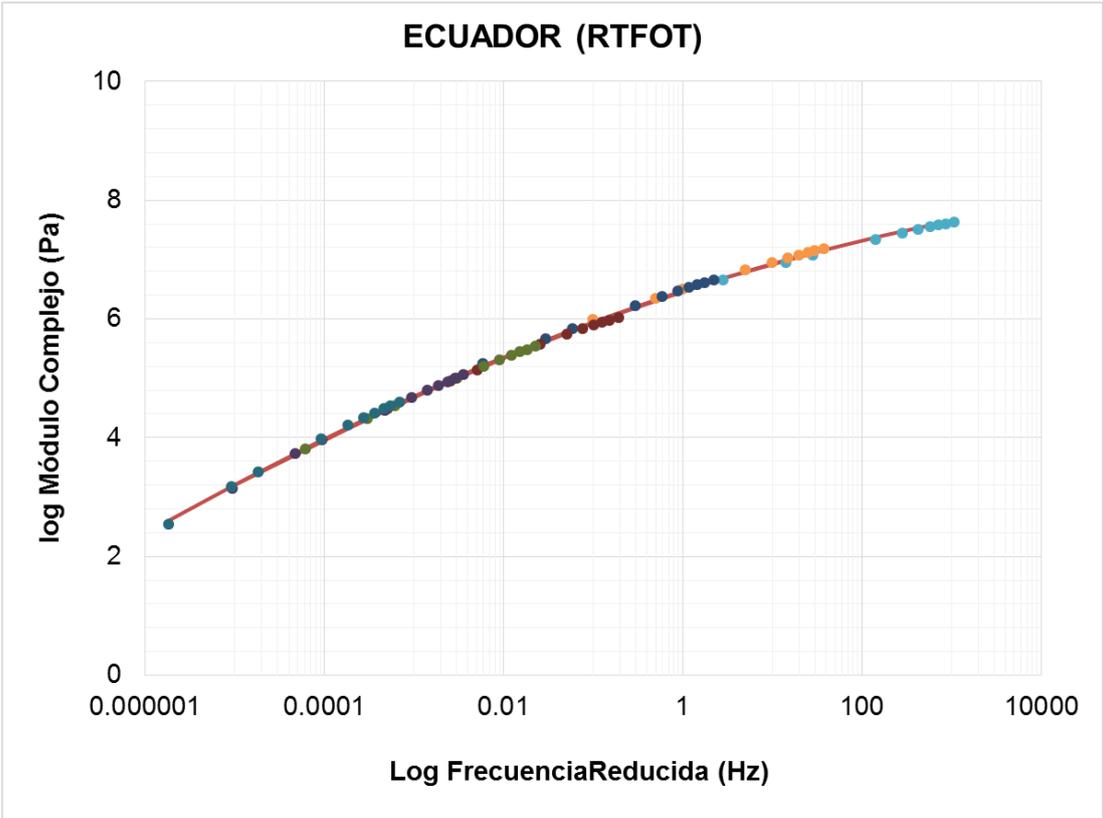


Asfalto Ecuador con caucho (PAV). Temperaturas: 40-70 °C.

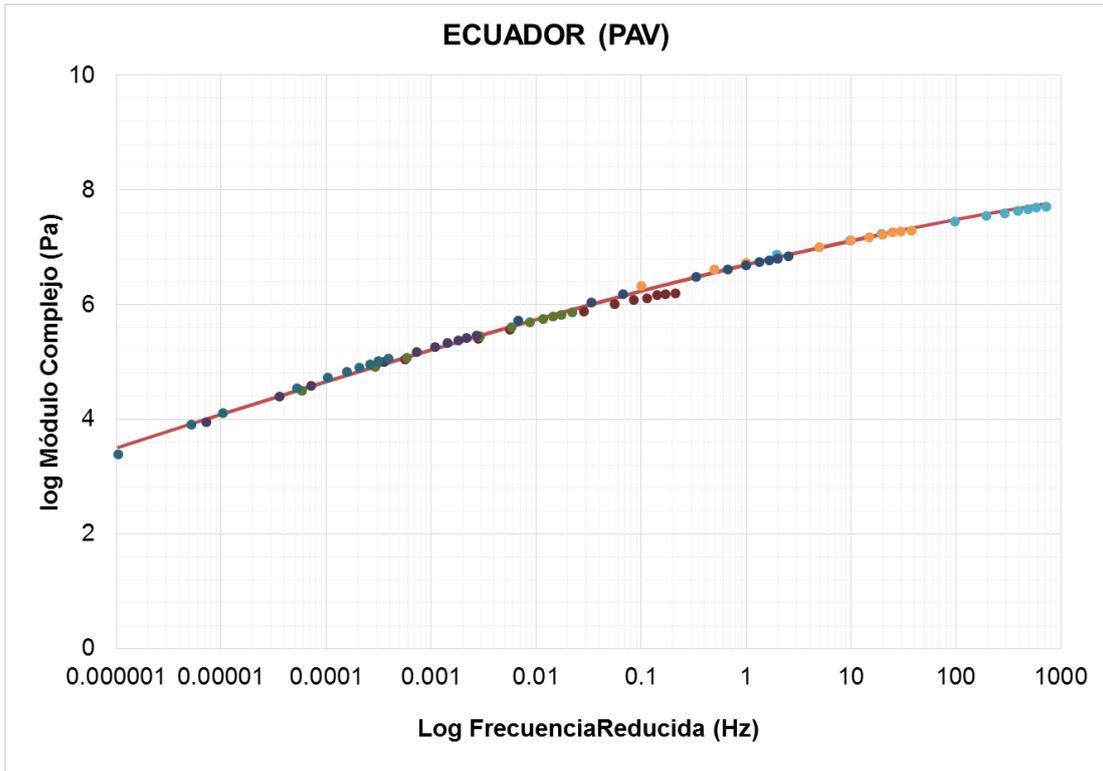
Anexo 4. Graficas de Curvas maestras.



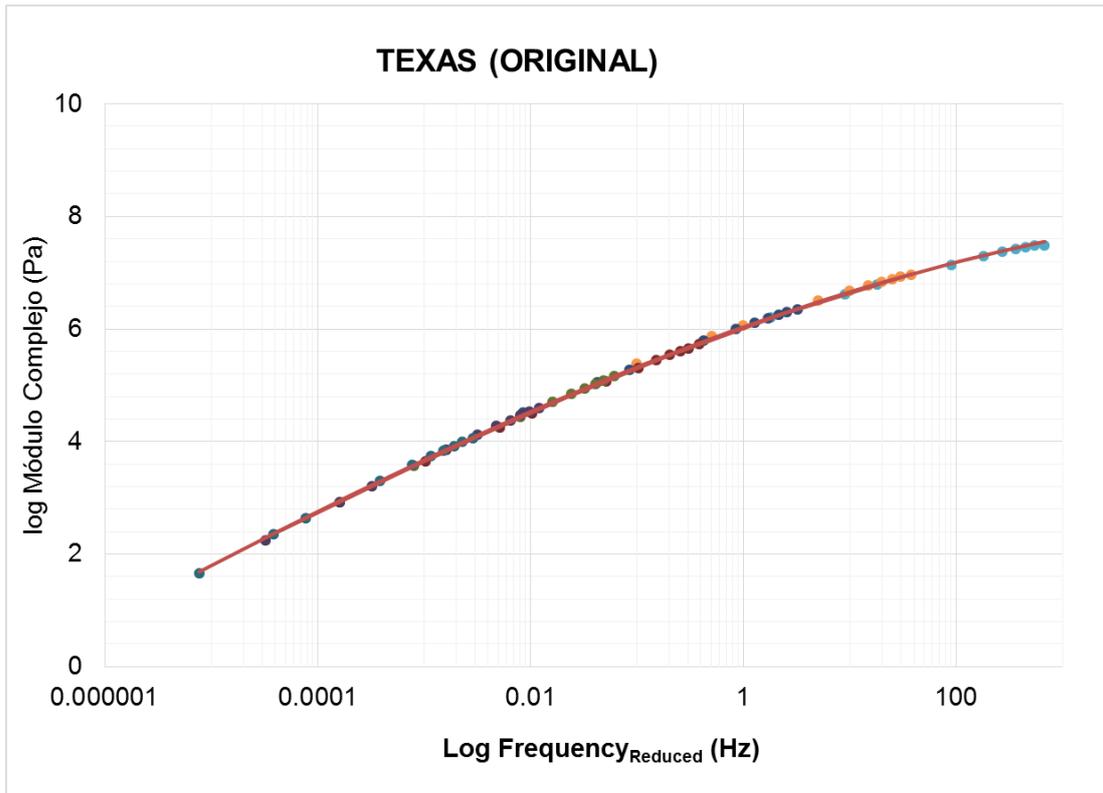
Asfalto de Ecuador (Original)



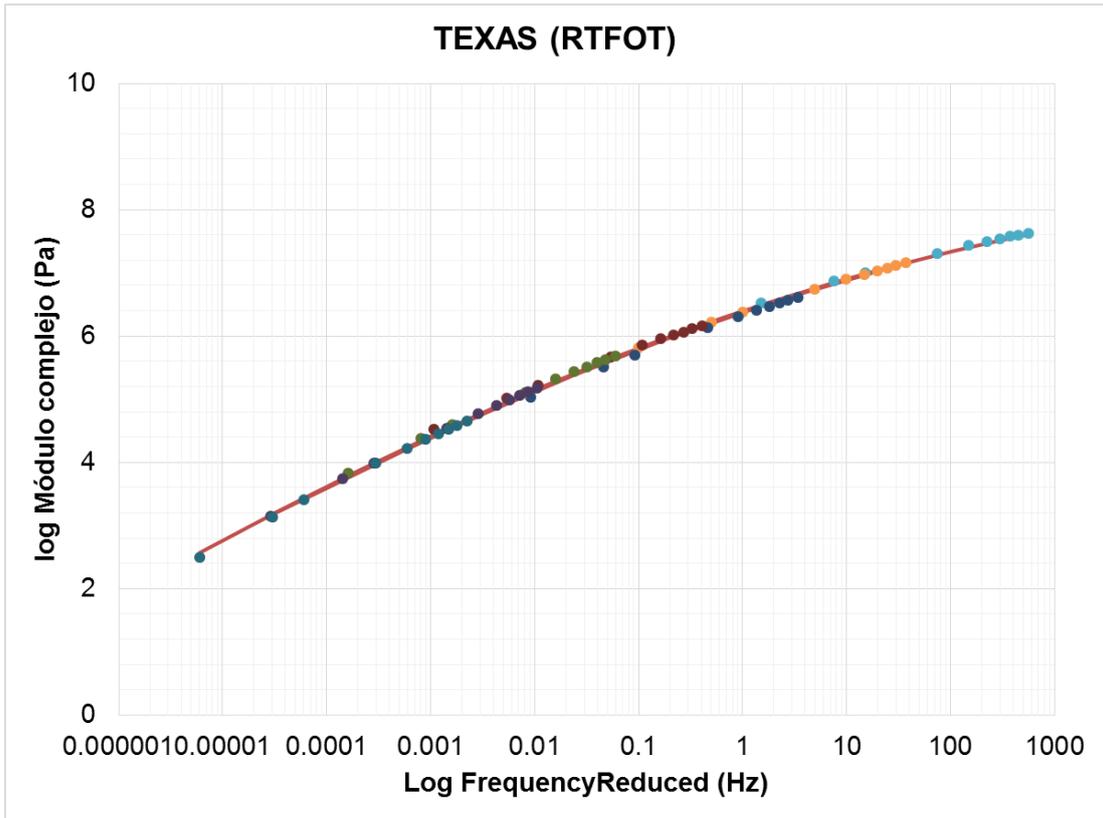
Asfalto de Ecuador (RTFOT)



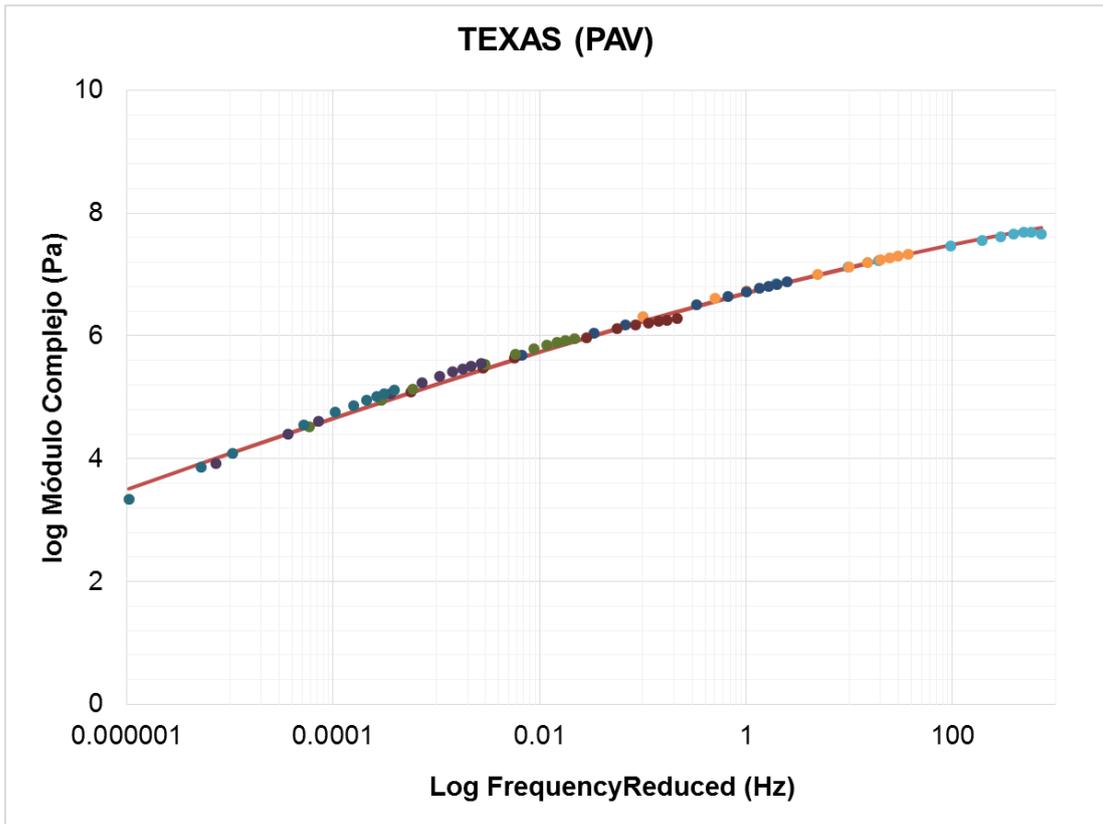
Asfalto de Ecuador (PAV)



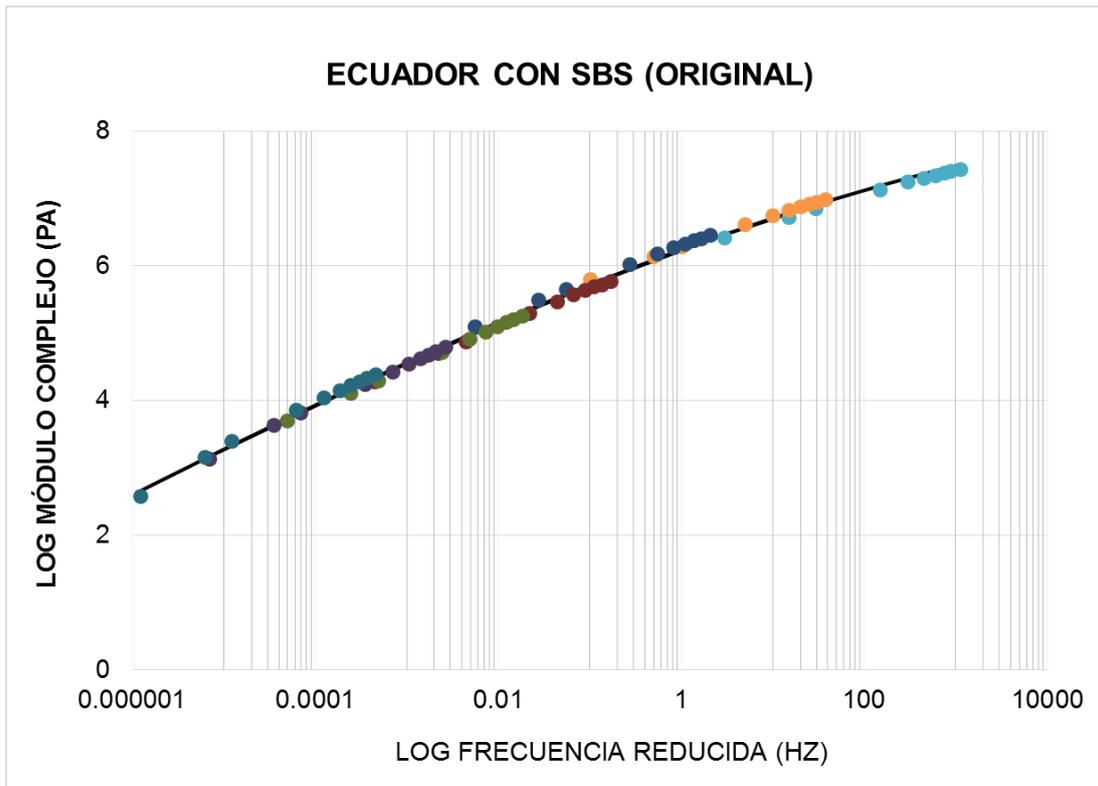
Asfalto de Texas (Original)



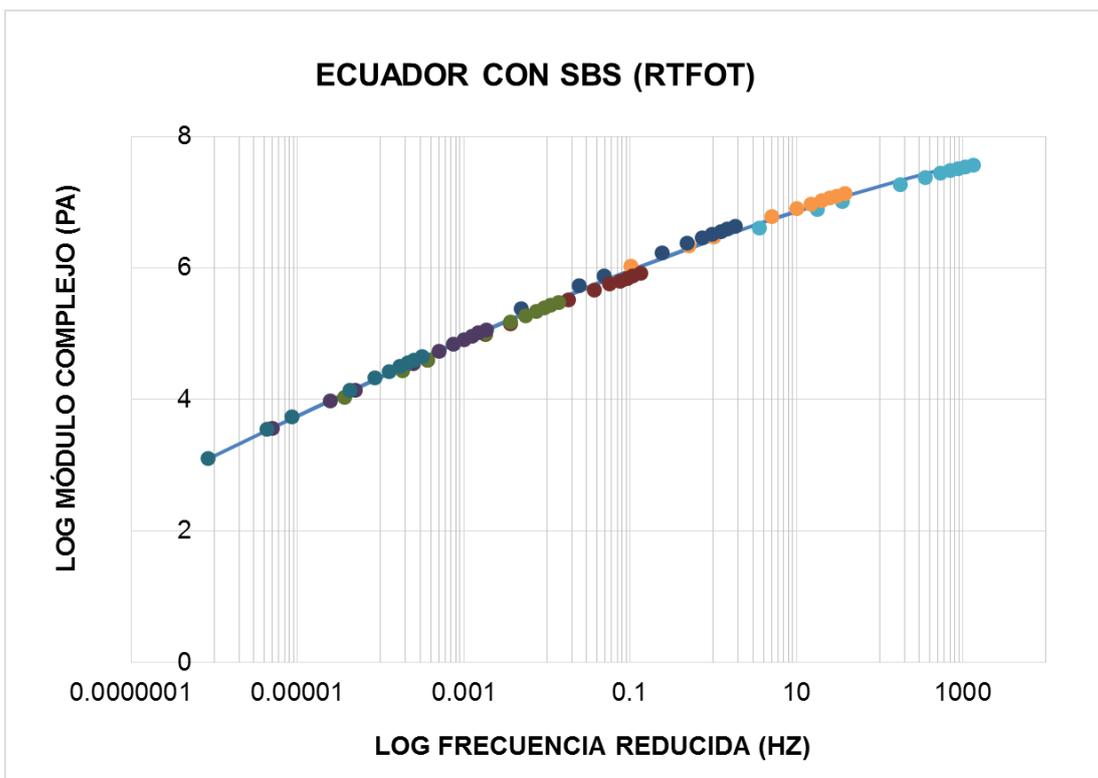
Asfalto de Texas (RTFOT)



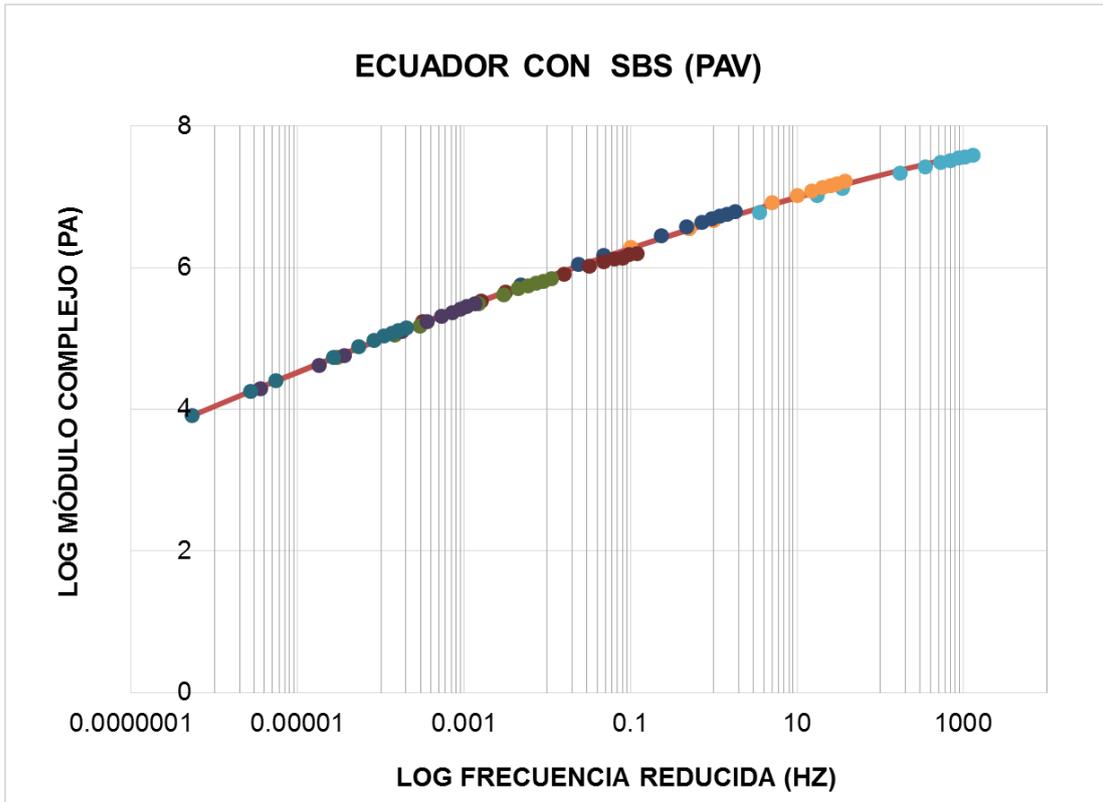
Asfalto de Texas (PAV)



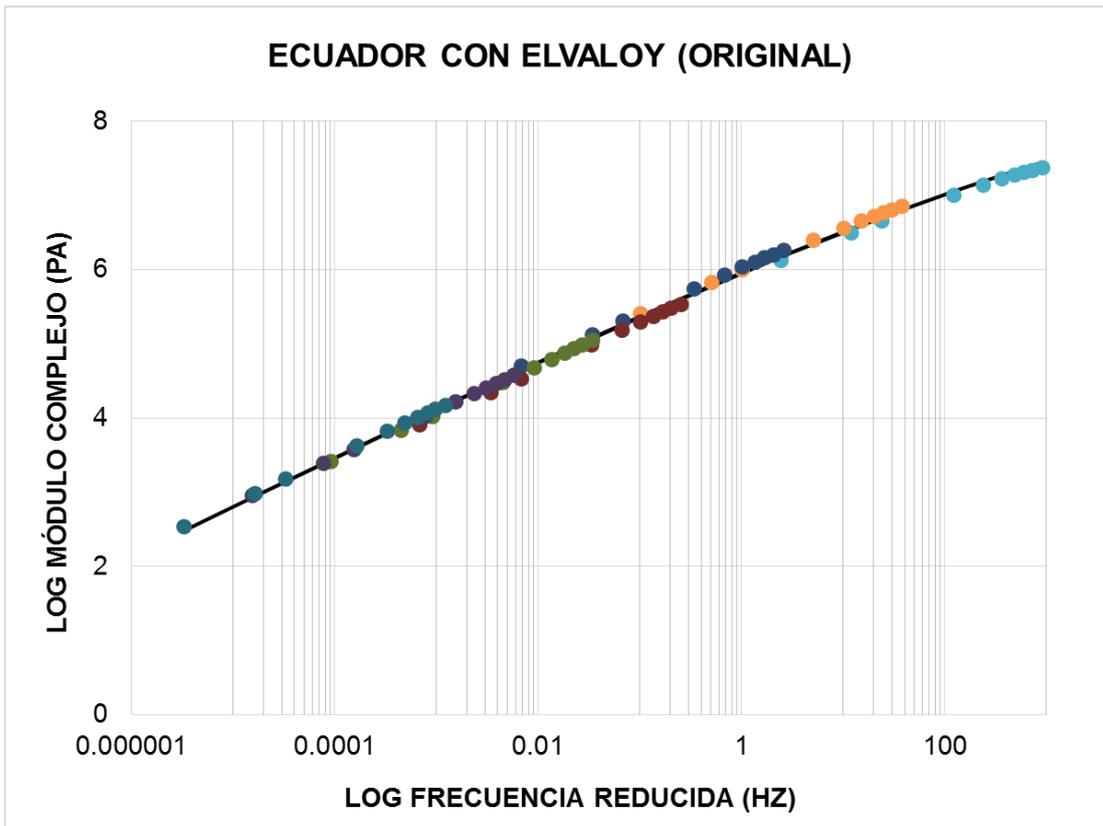
Asfalto de Ecuador con SBS (Original)



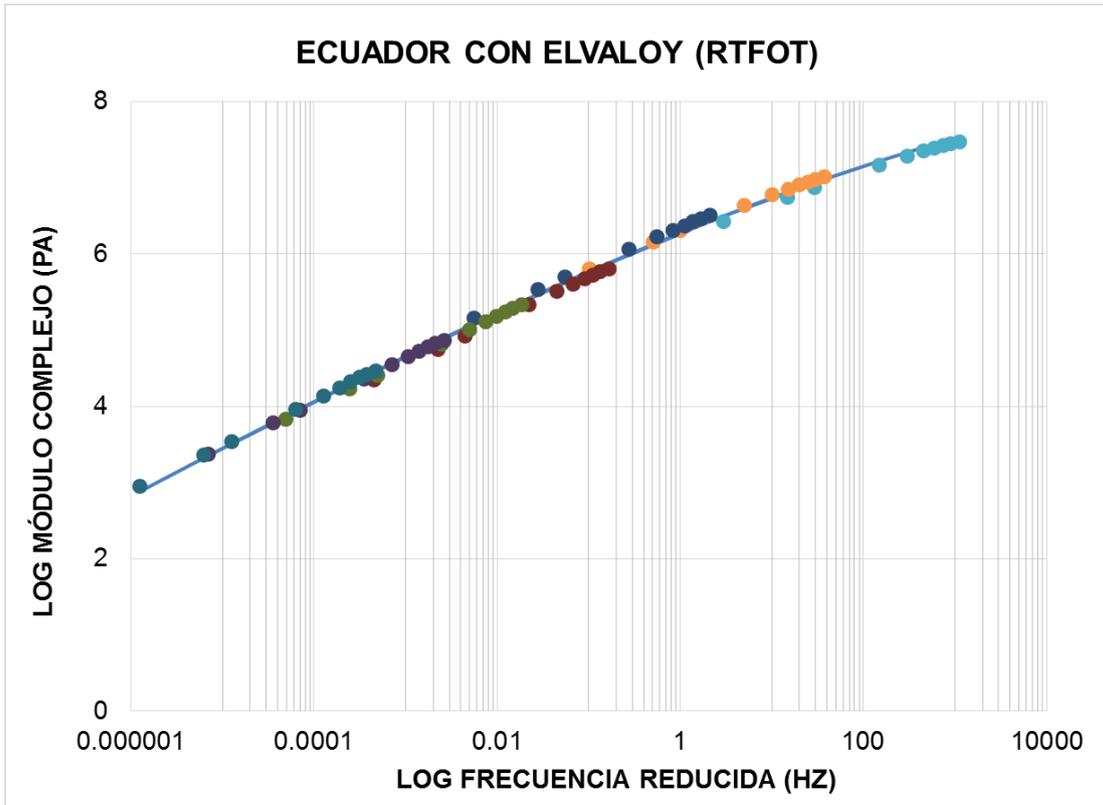
Asfalto de Ecuador con SBS (RTFOT)



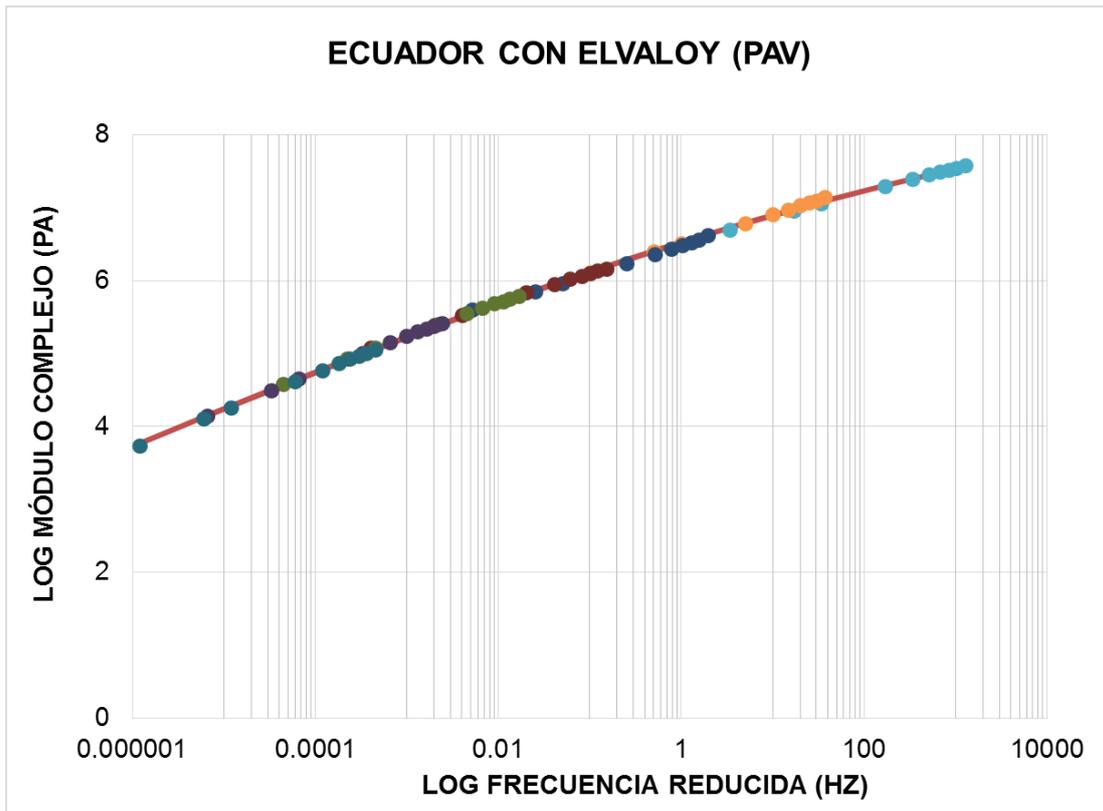
Asfalto de Ecuador con SBS (PAV)



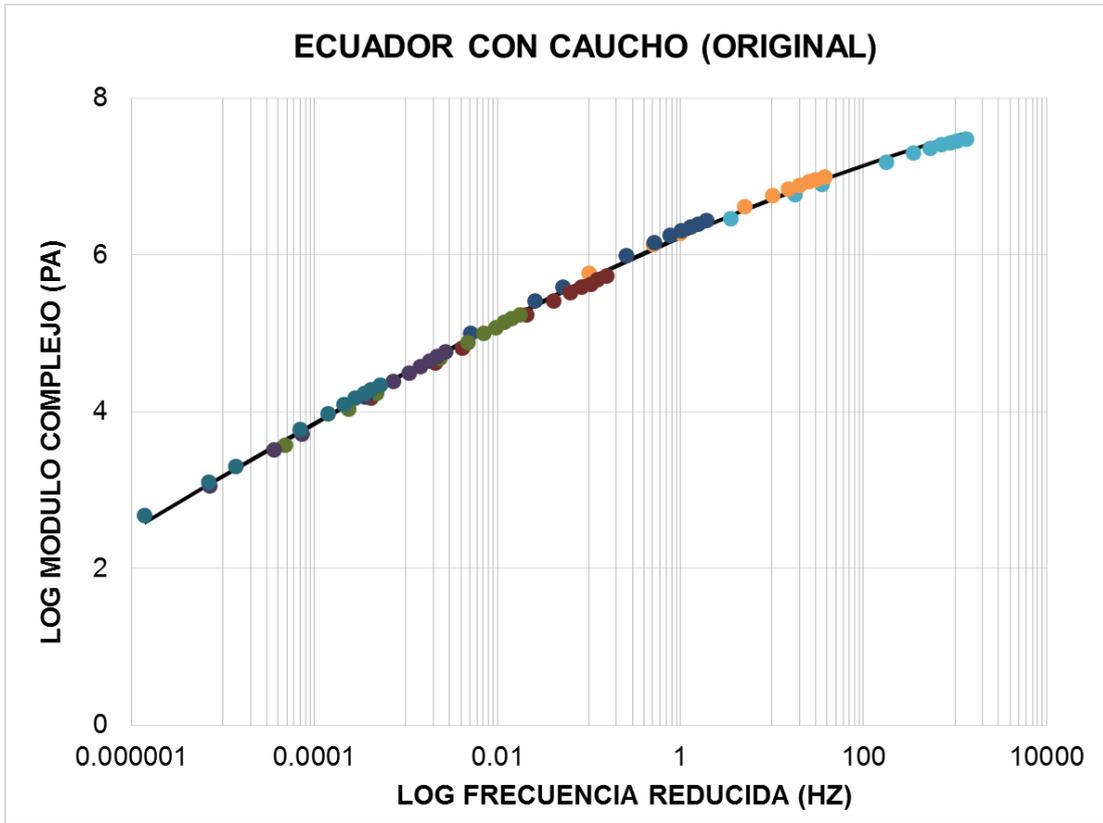
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (Original)



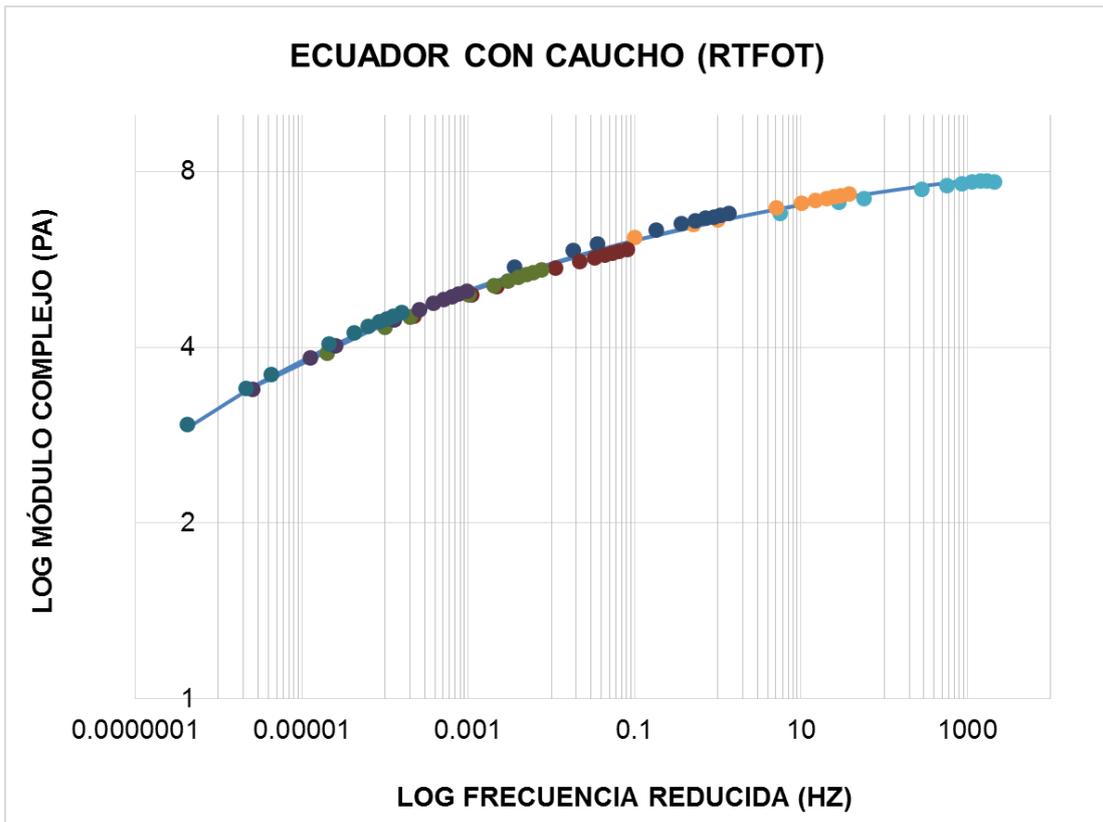
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (RTFOT)



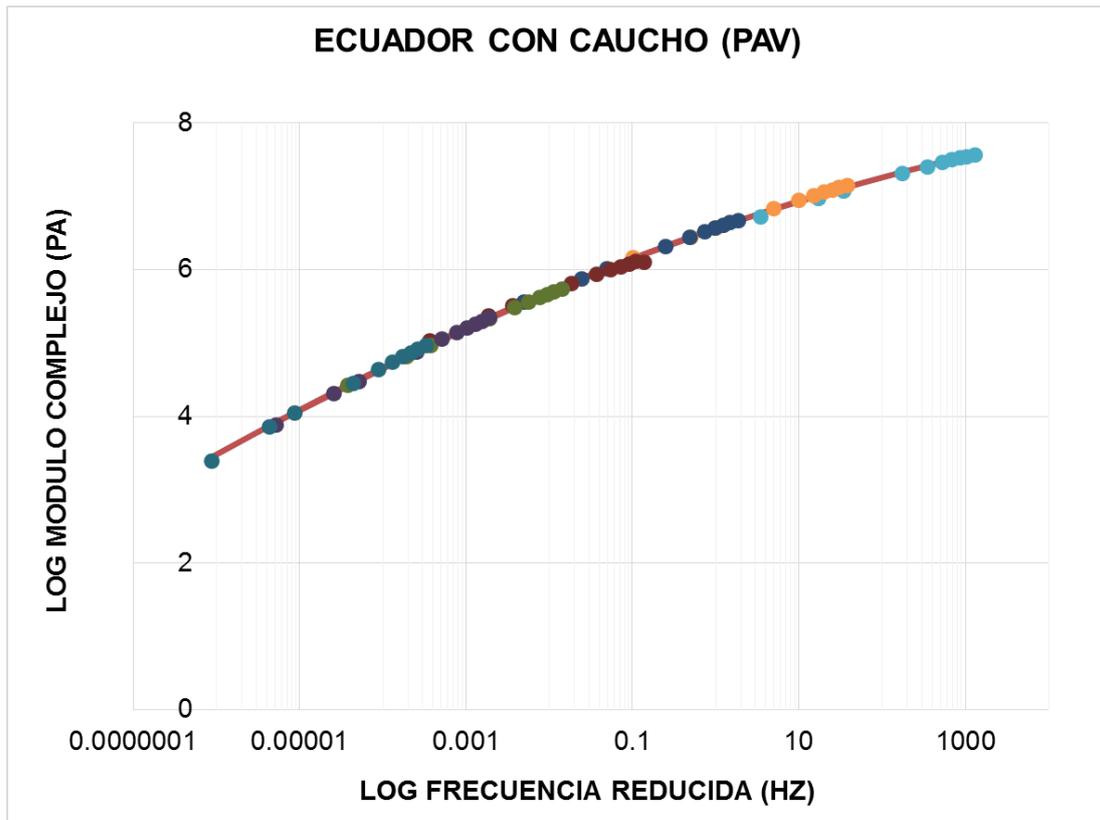
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (PAV)



Asfalto de Ecuador con caucho (Original)

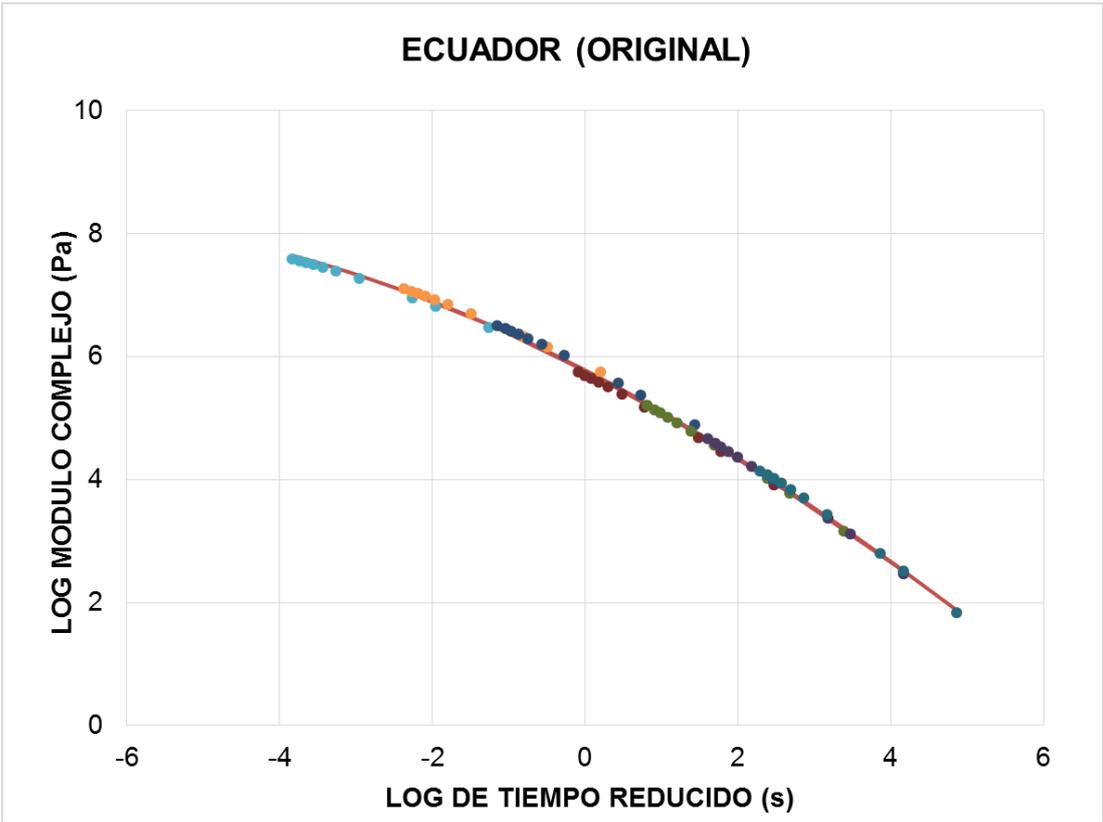


Asfalto de Ecuador con caucho (RTFOT)

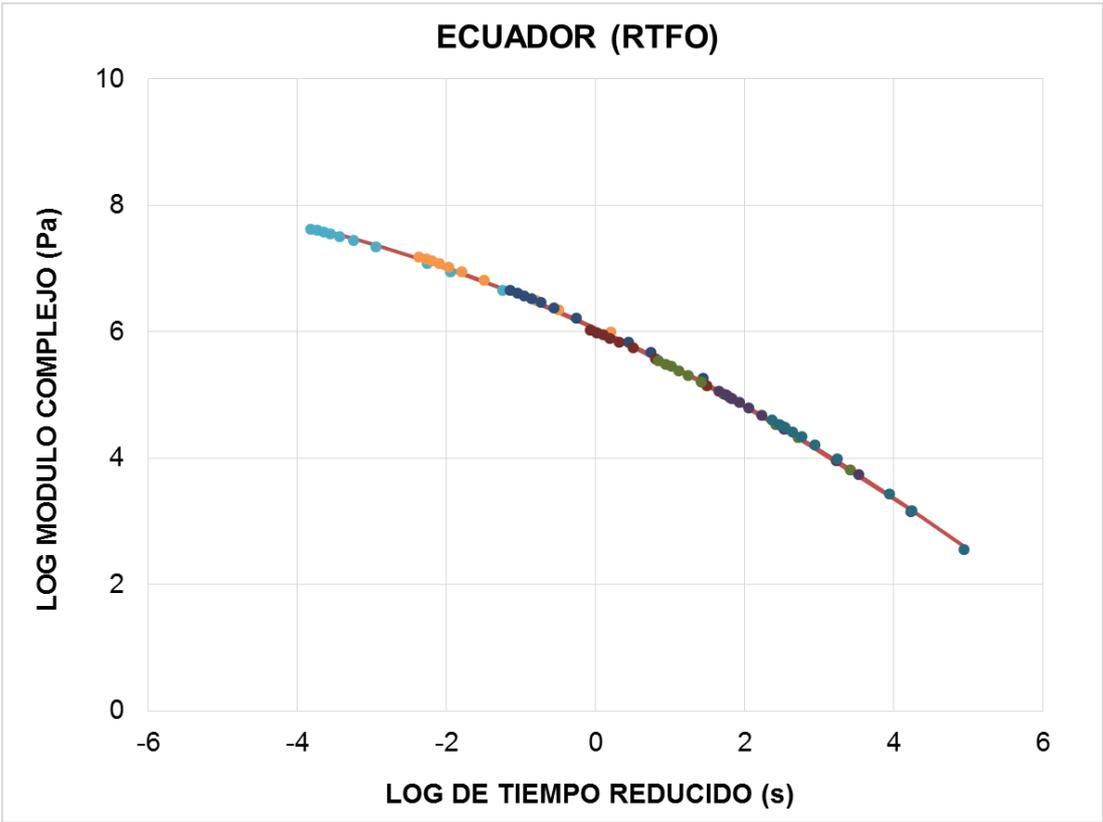


Anexo 5. Curva maestra. Asfalto de Ecuador con caucho (PAV)

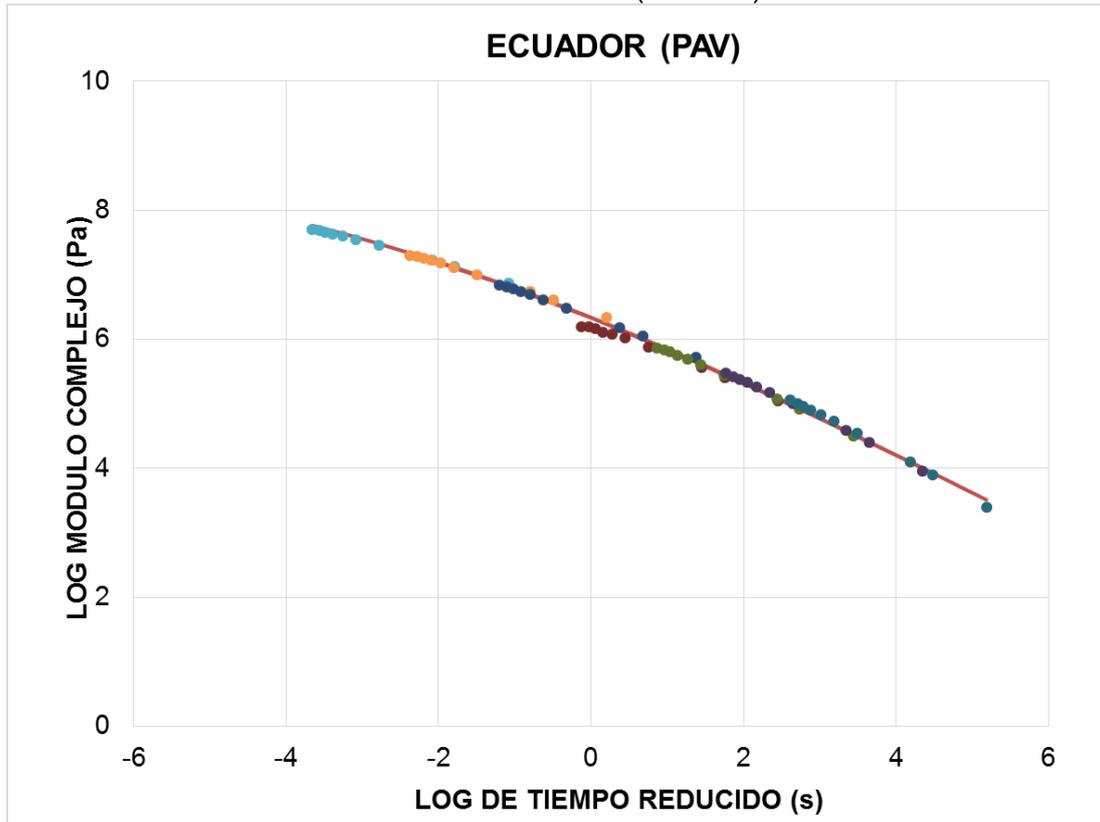
Anexo 5. Curva maestra para análisis de parámetros.



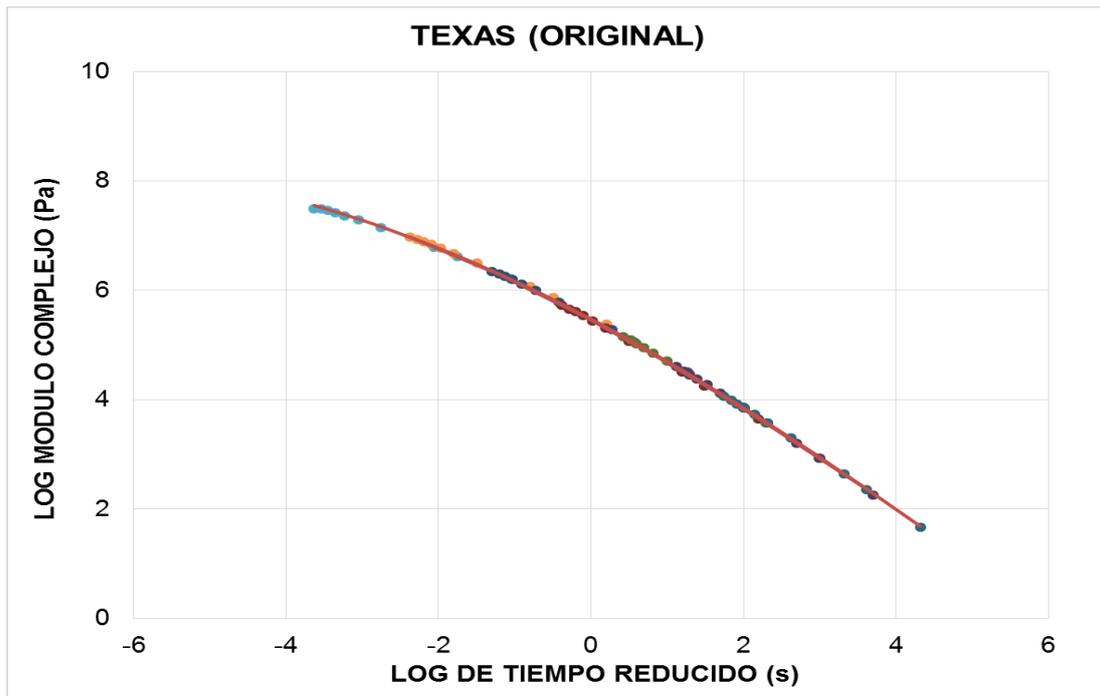
Asfalto de Ecuador (Original)



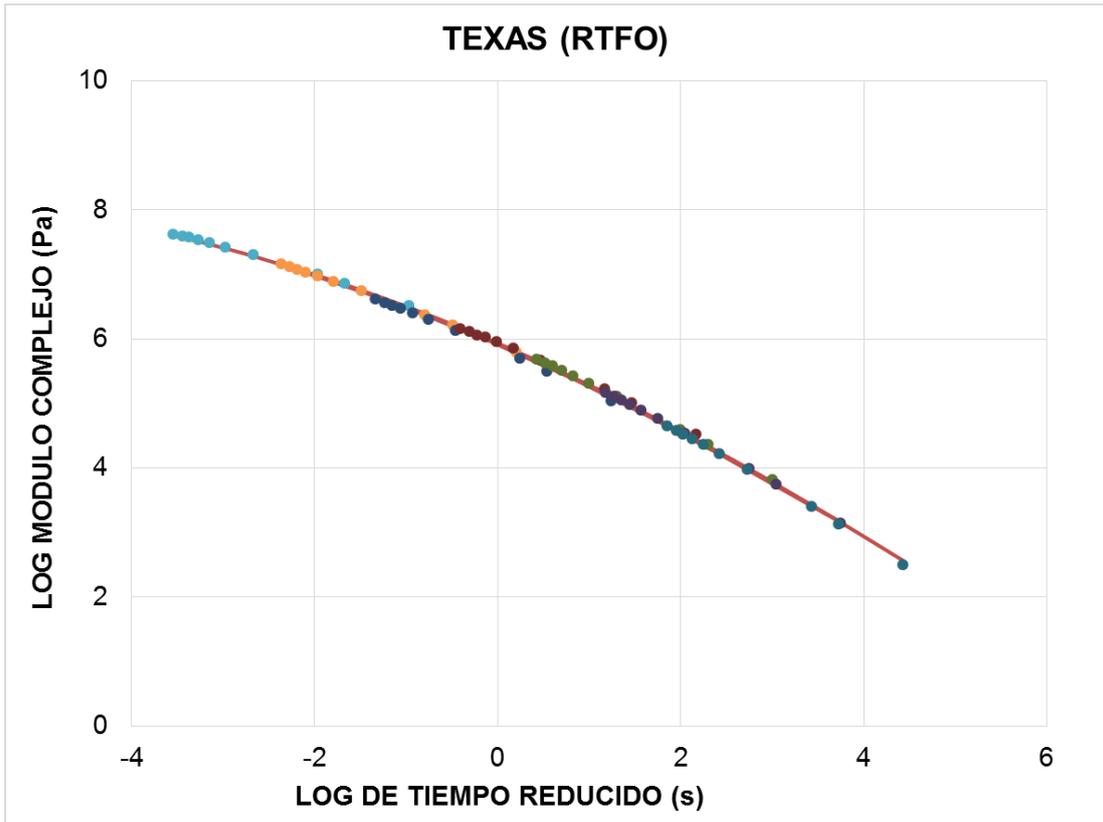
Asfalto de Ecuador (RTFOT)



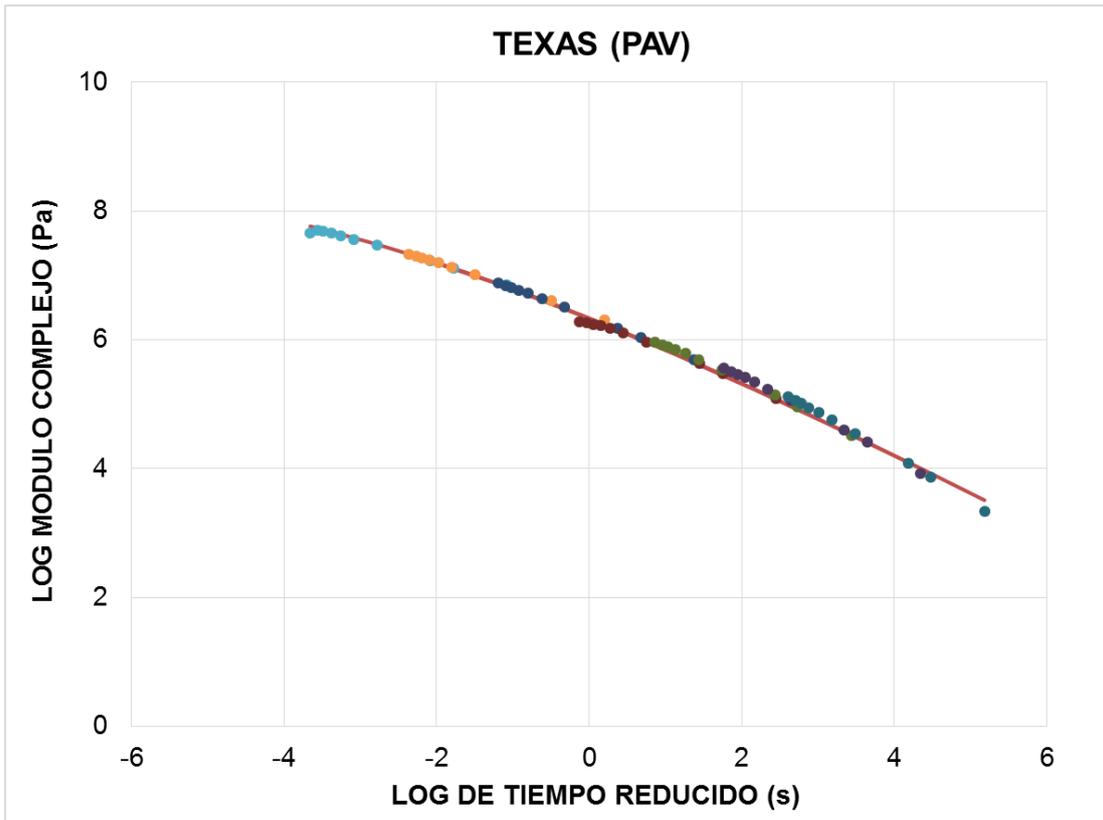
Asfalto de Ecuador (PAV)



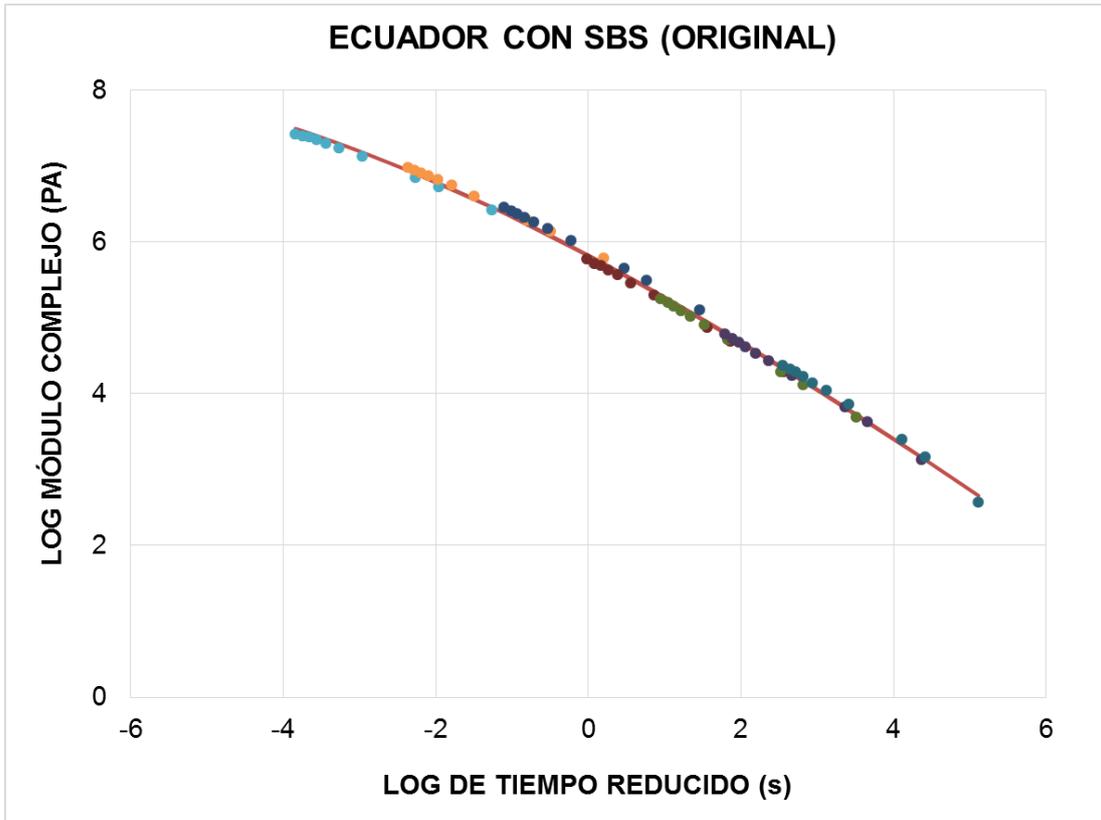
Asfalto de Texas (Original)



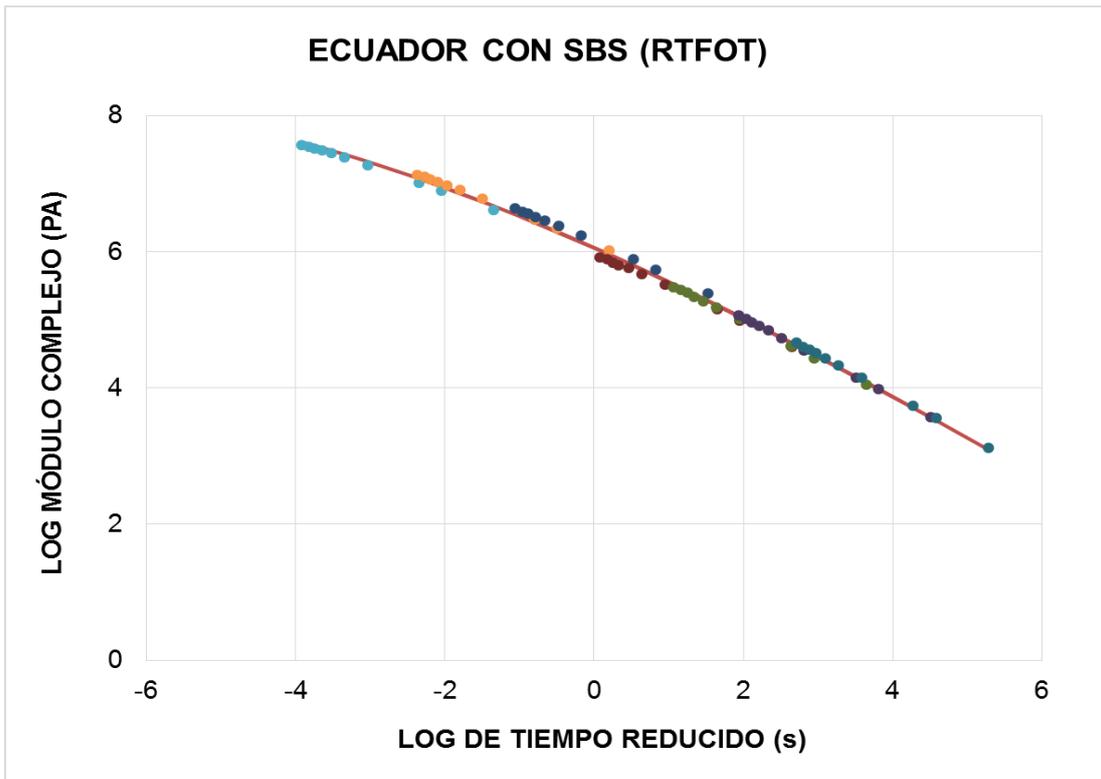
Asfalto de Texas (RTFOT)



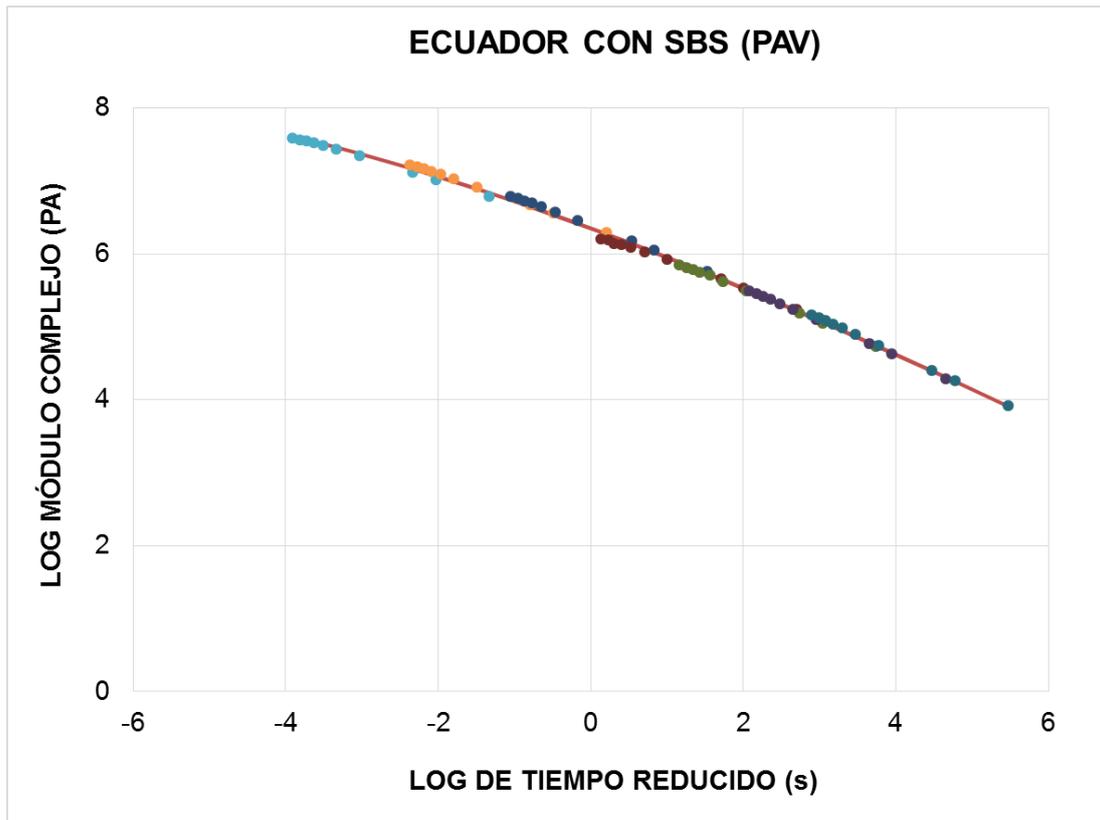
Asfalto de Texas (PAV)



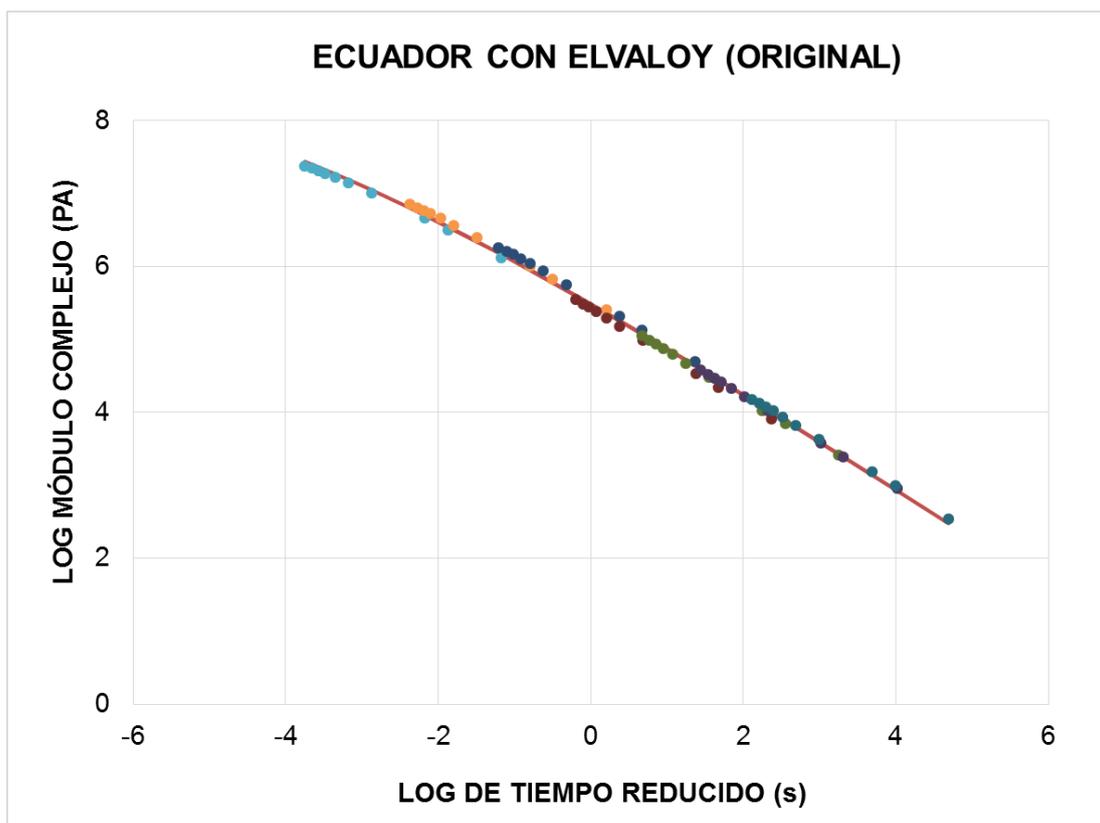
Asfalto de Ecuador con SBS (Original)



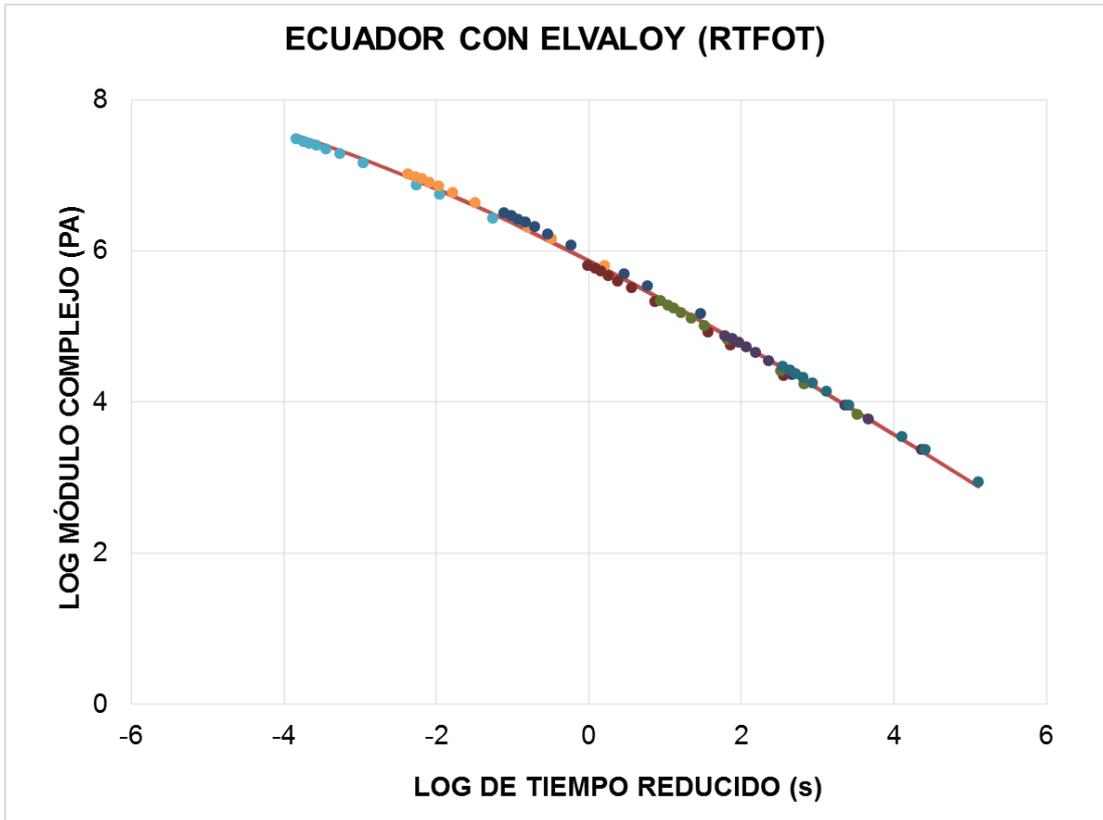
Asfalto de Ecuador con SBS (RTFOT)



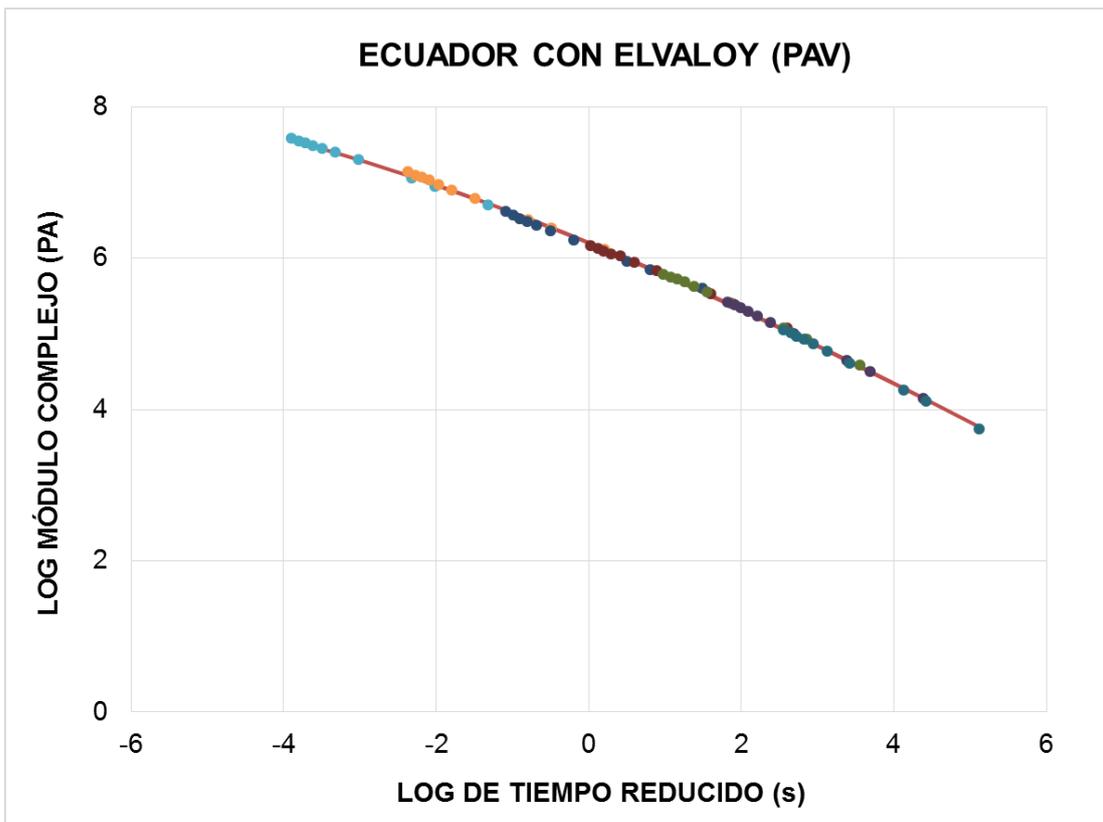
Asfalto de Ecuador con SBS (PAV)



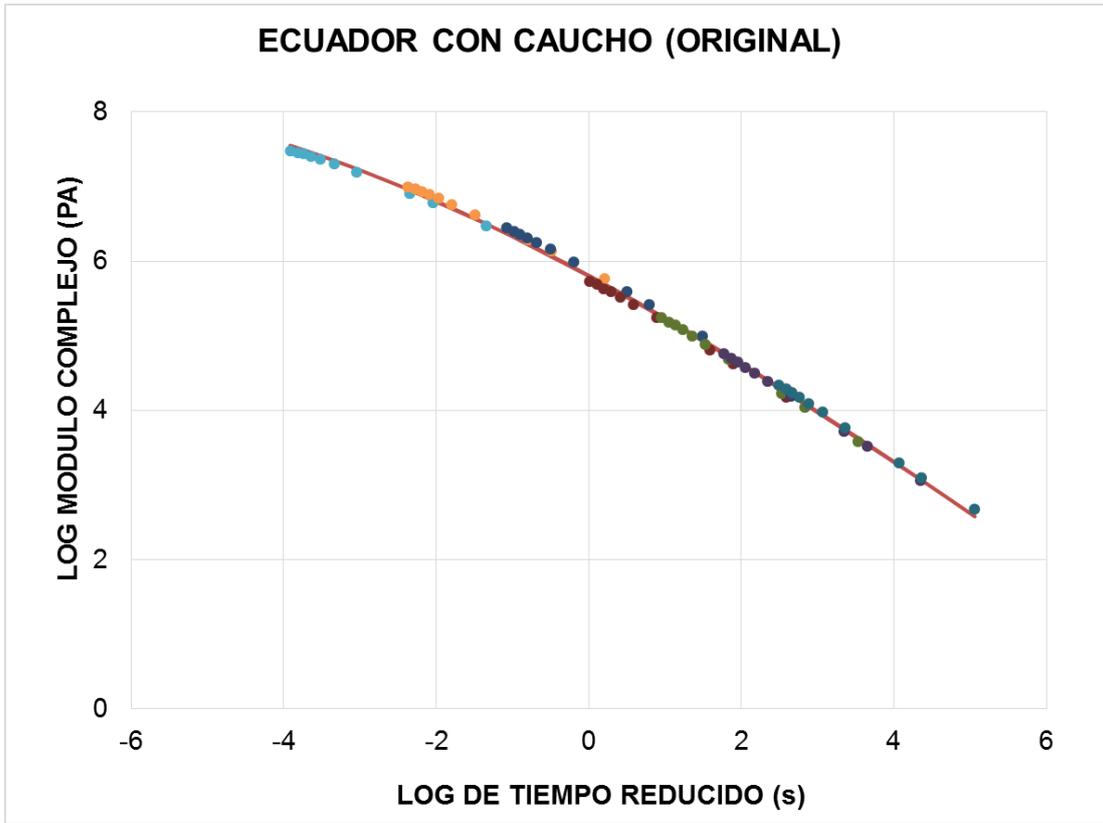
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (Original)



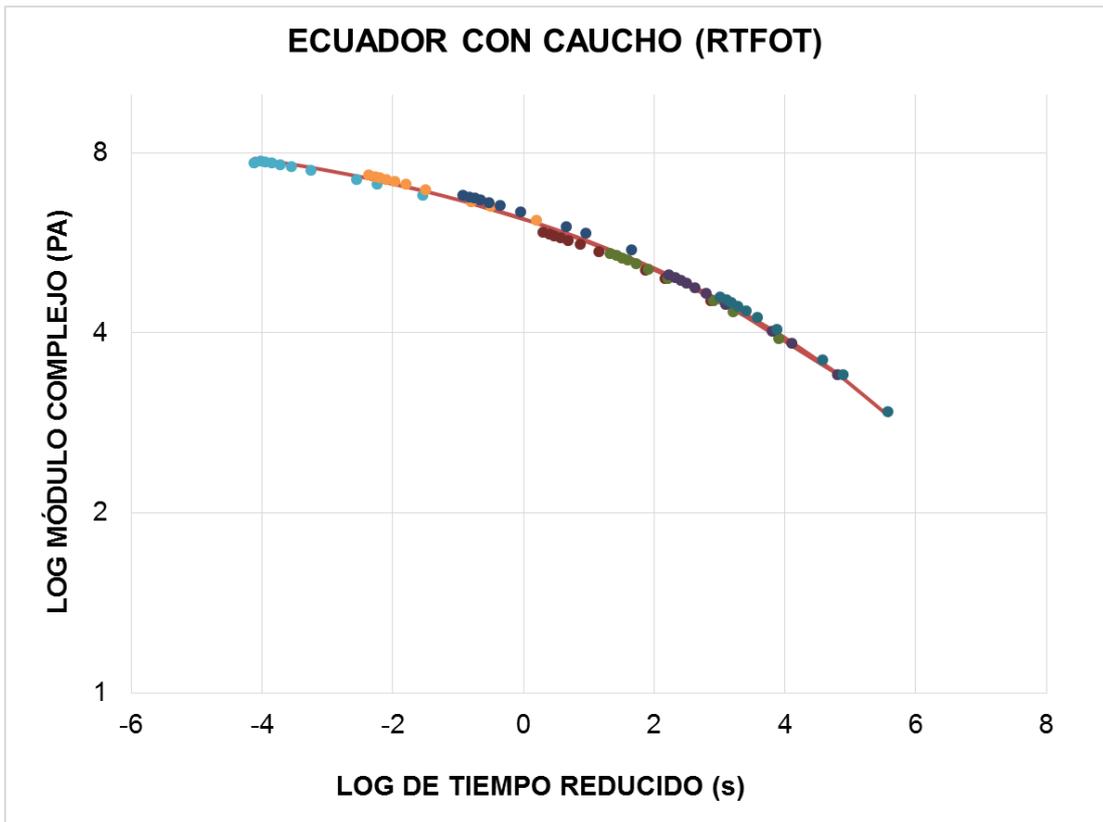
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (RTFOT)



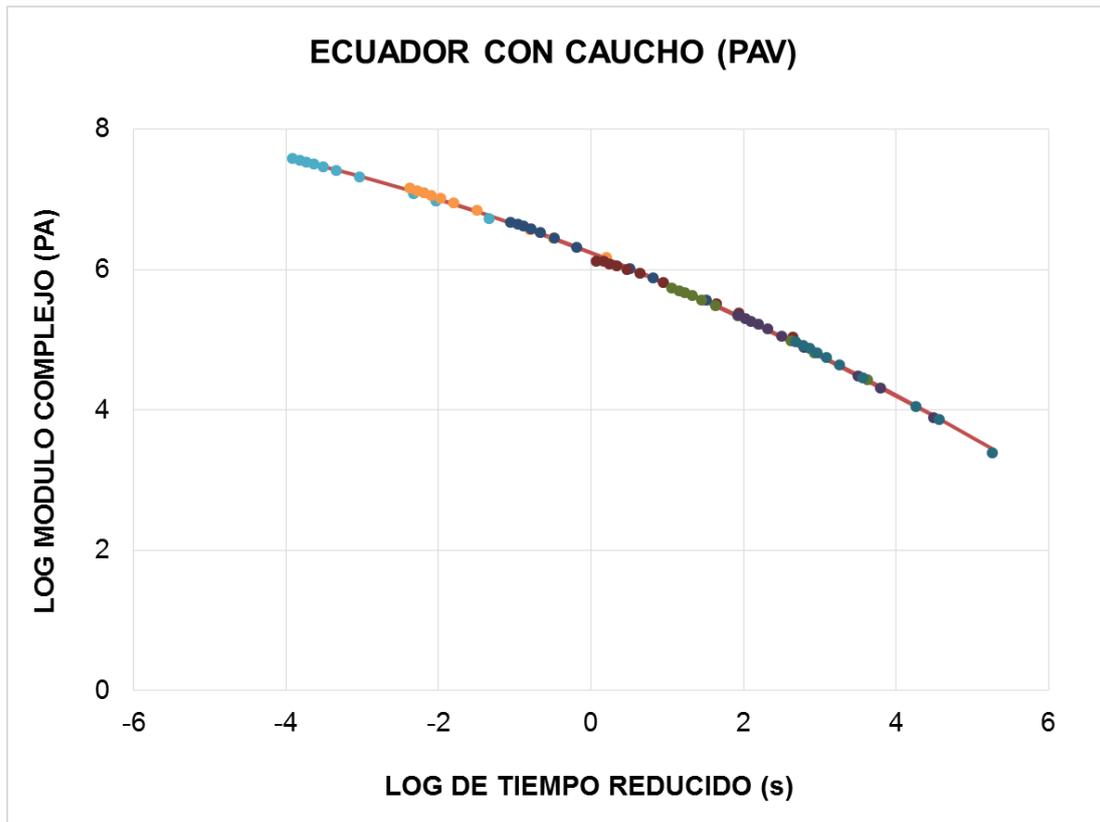
Asfalto de Ecuador con ELVALOY (PAV)



Asfalto de Ecuador con caucho (Original)



Asfalto de Ecuador con caucho (RTFOT)



Asfalto de Ecuador con caucho (PAV)



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotras, **León Arias Angie Andrea y Villao Franco Ariana Katherine**, con C.C: # **0931606602** y # **0940189673** autoras del trabajo de titulación: **Caracterización reológica avanzada de asfaltos** 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, **15 de Marzo de 2017**

f. _____

Nombre: **León Arias Angie Andrea**

C.C: **0931606602**

f. _____

Nombre: **Villao Franco Ariana Katherine**

C.C: **0940189673**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Caracterización reológica avanzada de asfaltos		
AUTOR(ES)	Angie Andrea León Arias- Ariana Katherine Villao Franco		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Rolando Vila Romani		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	15 de Marzo de 2017	No. PÁGINAS:	147
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	<i>Reológica, Elvaloy, SBS, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos, curvas maestras, temperatura, envejecimiento.</i>		
RESUMEN:	<p>En el presente trabajo de titulación se realiza la caracterización reológica por medio de pruebas avanzadas a dos diferentes tipos de ligantes asfálticos procedentes de Ecuador y Texas, además de tres asfaltos modificados con SBS, Elvaloy y Caucho.</p> <p>Para cada tipo de asfalto se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio, que permitieron realizar la clasificación por grado de viscosidad (AC) y la clasificación por grado de desempeño (PG) según la metodología Superpave de acuerdo a las normas correspondientes. Estas clasificaciones realizadas a través de diversas pruebas normalizadas, facilitaron el análisis de las características de los ligantes asfálticos por medio del envejecimiento primario y secundario que simulan el comportamiento en campo.</p> <p>A partir de los resultados de las pruebas en el laboratorio se realizaron comparaciones de los diferentes tipos de asfaltos por medio de tabulaciones y graficas de curvas maestras, las cuales muestran las características de los ligantes al estar expuestos a condiciones de carga y temperatura.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	+593-9-80305916 +593-9-87846038	E-mail: angieandrea23@hotmail.com E-mail: arianavillao@gmail.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):			