



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO ECUATORIANO ANTE EL
ENVEJECIMIENTO”**

AUTORES:

Franco Palma, Jonathan Enrique
García Solarte, Washington Andrés

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

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

18 de septiembre del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Jonathan Enrique Franco Palma y Washington Andrés García Solarte**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Franco Palma Jonathan Enrique y García Solarte Washington Andrés**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, “COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO ECUATORIANO ANTE EL ENVEJECIMIENTO” previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 18 del mes de septiembre del año 2019

EL AUTOR:

EL AUTOR:

f. _____

f. _____

Jonathan Franco Palma

Washington García Solarte



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Franco Palma Jonathan Enrique y García Solarte Washington
Andrés**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, “COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO ECUATORIANO ANTE EL ENVEJECIMIENTO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 del mes de septiembre del año 2019

EL AUTOR:

EL AUTOR:

f. _____

f. _____

Jonathan Franco Palma

Washington García Solarte

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS GARCIA Y FRANCO PARA URKUND.docx (D55243410)
Submitted: 9/3/2019 6:33:00 PM
Submitted By: rolando.vila@cu.ucsg.edu.ec
Significance: 8 %

Sources included in the report:

TESIS - URETA Y MÁRQUEZ.docx (D35654466)
Tesis K y K Correcciones .docx (D48329847)
Formato Tesis 06.pdf (D40317510)
<https://docplayer.es/amp/97970226-Facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-civil-tema-caracterizacion-reologica-avanzada-de-asfaltos.html>
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/621/Estudio%20del%20envejecimiento%20y%20oxidaci%C3%B3n%20de%20asfaltos%20con%20FTIR%20y%20su%20relaci%C3%B3n%20con%20los%20par%C3%A1metros%20reol%C3%B3gicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17724/2019edwinguerrero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt228.pdf>
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/8768/1/Roberto%20Yoshiaki%20Animoto%20Moreno.pdf>
<https://www.slideserve.com/denna/importancia-de-la-quimica-del-asfalto-en-sus-propiedades-fisicas>

Instances where selected sources appear:

41

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecerle a Dios y a la Virgen María por llenarme día a día de sabiduría, esfuerzo y ganas constantes de llevar a cabo mi carrera como estudiante y lograr cumplir con mi objetivo.

Decir gracias son palabras muy cortas para todo lo que se merecen las personas que confiaron plenamente en mí, con su apoyo y motivación constante a lo largo de la carrera como lo son mi madre Gina Palma, mi hermano Dalton Franco, mi tío Nahin Palma y a mi querida abuelita Judith Avellan, sin su ayuda nada de esto hubiese sido posible, mi mayor gratitud siempre será reflejada hacia ustedes.

Agradecimiento especial a mi tutor de tesis. Ing. Rolando Vila, PhD, por abrirme las puertas del laboratorio de asfalto y ser el quien guie el proyecto más importante generado a lo largo del transcurso de la carrera.

Tanto al Ing. José Jaramillo como Ing. Walter Mera agradecerles por esa amistad y apoyo incondicional brindado durante el periodo de tesis.

A mi compañero Andrés García también agradecerle por todo el empeño y dedicación que mantuvo a lo largo del trabajo de titulación.

No se puede dejar por alto a esas amistades con las cuales compartí todo el proceso de vida universitaria, Nicole Gallo, Andrea Valencia, Eduardo Vélez y Pablo Rojas, personas que sin lugar a duda siempre tendré presente.

Jonathan Enrique Franco Palma

AGRADECIMIENTO

Nada de esto sería posible sin las bendiciones y desafíos superados, que Dios me brindo.

Agradezco infinitamente a mi familia abuelas y tíos quienes estuvieron conmigo apoyándome siempre; especialmente a mis padres, Washington y Tatiana ya que ellos fueron mis pilares fundamentales durante todo este proceso, por sus consejos, enseñanzas y sobre todo el ánimo que me dieron para salir adelante y llegar a este punto; estaré eternamente agradecido con ustedes son mi vida entera.

A mi hermana, Samantha por todos los momentos en los que me apoyo y ser mi principal fuente de inspiración quiero demostrar que todo se puede con constancia y disciplina.

Agradecimiento especial a mi tutor del trabajo de titulación Ing. Rolando Vila, PhD. por la oportunidad brindada y ser el principal guía en este trabajo.

Gracias a todo el equipo que hizo posible esto, al Ing. José Jaramillo como al Ing. Walter Mera por los conocimientos compartidos, sobre todo la amistad y paciencia brindada.

A mi compañero de tesis, Jonathan Franco por todo el apoyo brindado, me llevo grandes anécdotas que hicieron de este trabajo un buen recuerdo para mí.

Finalmente, gracias a mis compañeros de universidad Joel y Karla por todas las cosas compartidas y ser el equipo para lograr esta meta, a mis compañeros de vida, de colegio, mi mejor amigo Esteban y a esa persona especial que desde la distancia con su cariño y aprecio me supo apoyar desde los inicios de mi carrera universitaria.

Washington Andrés García Solarte

DEDICATORIA

Este triunfo va dedicado para los dos grandes amores de mi vida, debido a todo ese esfuerzo realizado por parte de ambos para que yo logre tener mi preparación como profesional, querida madre Gina Palma y al ejemplo que tengo de hermano Dalton Franco, por quienes tengo mis más grandes admiraciones. Me siento muy dichoso de tenerlos en mi vida y sin duda alguna este logro hoy alcanzado es de los tres.

Jonathan Enrique Franco Palma

DEDICATORIA

Lleno de orgullo y alegría, este trabajo de titulación lo dedico con todo mi esfuerzo y cariño a mis padres y hermana, porque ellos son la motivación de mi vida, mi orgullo de ser lo que seré; ustedes fueron un pilar fundamental para salir adelante en esta etapa.

Washington Andrés García Solarte



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. _____

Ing. Clara Glas Cevallos, MSc.
DOCENTE DEL ÁREA

f. _____

Ing. Federico von Buchwald de Janon, MSc.
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	2
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Razones que motivaron al estudio	3
1.3. Justificación del tema	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Alcance.....	5
1.6. Metodología.....	6
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Asfalto	8
2.1.1. Antecedentes históricos	8
2.1.2. Definición y Características Generales	9
2.1.3. Cemento asfáltico.....	9
2.1.4. Propiedades químicas.....	10
2.1.5. Propiedades físicas.....	13
2.2. Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad	17
2.2.1. Ensayo de Viscosidad	18
2.2.2. Ensayo de penetración.....	19
2.2.3. Punto de ablandamiento	19
2.2.4. Gravedad específica	20
2.2.5. Punto de inflamación.....	21
2.2.6. Envejecimiento en horno de película delgada (RTFO).....	22
2.2.7. Cambio de masa	23

2.2.8. Ductilidad	24
2.3. Pruebas de clasificación por grado de desempeño según la tecnología SUPERPAVE (PG).....	25
2.3.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)	27
2.3.2. Reómetro de corte dinámico (DSR)	28
2.3.3. Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	30
2.4. Diseño Experimental	32
CAPÍTULO III	33
3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS PRUEBAS CONVENCIONALES	33
3.1. Resultados de la clasificación por grados de viscosidad del asfalto base	33
3.2. Clasificación por grados de desempeño (PG) del asfalto base.	34
3.3. Comparación de los resultados de ambas clasificaciones.	36
3.4. Resultado de las pruebas convencionales según el diseño experimental.....	36
3.4.1. Viscosidad a 60°C	36
3.4.2. Cambio de Masa	37
3.4.3. Ductilidad a 25°C	38
3.4.4. Viscosidad a 135°C	39
3.4.5. Punto de Ablandamiento	41
CAPÍTULO IV.....	43
4. PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADAS DE ASFALTO	43
4.1. Curva maestra.....	43
4.1.1. Parámetros de Curva Maestra	44
4.1.2. Condiciones de ensayo	45
4.1.3. Configuración de las curvas maestras	46

4.1.4. Curvas Maestras obtenidas.....	49
4.2. Parámetro ΔT_c	51
4.2.1. Resultados del parámetro ΔT_c	52
4.3. Ductilidad según Kandhal.....	55
4.3.1. Resultados del criterio de Kandhal.....	56
4.4. Criterio de Glover – Rowe	57
4.4.1. Resultados del criterio de Glover – Rowe	58
CAPITULO V.....	60
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
5.1. Conclusiones.....	60
5.2. Recomendaciones.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Productos bituminosos.....	8
Figura 2. Estructura coloidal de Pfeiffer.....	11
Figura 3. Estructura química del asfalto.....	11
Figura 4. Macroestructura de los asfaltenos.....	12
Figura 5. Ensayo de viscosidad.....	18
Figura 6. Ensayo de penetración.....	19
Figura 7. Ensayo punto de ablandamiento.....	20
Figura 8. Ensayo de gravedad específica.....	21
Figura 9. Ensayo punto de inflamación.....	22
Figura 10. Ensayo de envejecimiento horno de película delgada (RTFO)...	23
Figura 11. Ensayo cambio de masa.....	23
Figura 12. Ensayo de ductilidad.....	24
Figura 13. Cámara de envejecimiento a presión (PAV).....	28
Figura 14. Muestra de asfalto para ensayo en DSR.....	29
Figura 15. Ensayo en reómetro de corte directo (DSR).....	29
Figura 16. Reómetro de viga a flexión.....	31
Figura 17. Variación de las viscosidades con diferentes tiempos RTFO.	37
Figura 18. Variación del cambio de masa con diferentes tiempos RTFO. ...	38
Figura 19. Variación de la Ductilidad con diferentes tiempos RTFO.....	39
Figura 20. Variación de la viscosidad a 135°C con los tiempos en RTFO ...	40
Figura 21. Variación del punto de ablandamiento con los tiempos RTFO ...	41
Figura 22. Ejemplo de desarrollo de una curva maestra.....	43
Figura 23. Parámetros dinámicos de la curva maestra para asfaltos.	45
Figura 24. Representación gráfica de una curva maestra.....	46
Figura 25. Ejemplo de curvas $\log G^*$ vs $\log \omega$ para distintas temperaturas	47
Figura 26. Curva $\text{Log}(t)$ vs Log tiempo reducido.....	48
Figura 27. Curvas maestras con 70 minutos en RTFO para diferentes tiempos en PAV.....	49
Figura 28. Curvas maestras con 85 min en RTFO para diferentes tiempos en PAV.....	50
Figura 29. Curvas maestras con 100 min en RTFO para diferentes tiempos en PAV.....	50

Figura 30. Variación de ΔT_c con RTFO a 70 min y varios tiempos PAV	52
Figura 31. Variación de ΔT_c con RTFO a 85 min y varios tiempos PAV	53
Figura 32. Variación de ΔT_c con RTFO a 100 min y varios tiempos PAV ...	54
Figura 33. Variación de la ductilidad Kandhal en las combinaciones.....	56
Figura 34. Variación del parámetro G - R en las combinaciones.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación por viscosidad de cementos asfálticos.....	17
Tabla 2. Propósitos de los diferentes ensayos SUPERPAVE.....	26
Tabla 3. Clasificación SUPERPAVE mediante AASHTO M-320.....	26
Tabla 4. Clasificación SUPERPAVE mediante AASHTO M-320 (Continuación)	27
Tabla 5. Diseño experimental	32
Tabla 6. Tabla de resultados de clasificación por grado de viscosidad	33
Tabla 7. Clasificación por grado de desempeño PG.....	35
Tabla 8. Viscosidades absolutas obtenidas a 60°C	37
Tabla 9. Resultados en el cambio de masa	38
Tabla 10. Resultados de ensayo Ductilidad a 25°C y 5 cm/min.....	39
Tabla 11. Viscosidades absolutas obtenidas a 135°C	40
Tabla 12. Resultados del punto de ablandamiento.....	41
Tabla 13. Ejemplo de resultados obtenidos para 10°C.....	46
Tabla 14. ΔT_c en residuos RTFO a 70 min y diferentes tiempos en PAV....	52
Tabla 15. ΔT_c en residuos RTFO a 85 min y diferentes tiempos en PAV....	53
Tabla 16. Resultados ΔT_c para RTFO 100 min y todos sus tiempos PAV. .	54
Tabla 17. Resultados de la ductilidad según Kandhal en las combinaciones del diseño experimental	56
Tabla 18. Resultados del criterio Glover – Rowe en las combinaciones del diseño experimental.....	58

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la clasificación por grado de desempeño PG del programa Bohlin TruGrade en DSR.....	67
Anexo 2. Resultados para determinar parámetro ΔT_c del programa Bohlin TruGrade en BBR	70
Anexo 3. Resultados para determinar curvas maestras del programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR.....	131

RESUMEN

El objetivo del trabajo es caracterizar el comportamiento del asfalto ecuatoriano mediante pruebas reológicas luego de envejecerse a nivel de laboratorio en el horno de película delgada rotatoria (RTFO) y la cámara de envejecimiento a presión (PAV) con diferentes tiempos de ensayo, para formular recomendaciones de orden teórico-práctico que permitan su mejor control. Los tiempos empleados para el RTFO fueron 70, 85 y 100 minutos y para el PAV de 0, 10, 20, 40 y 60 horas, creándose una matriz experimental de 15 combinaciones. El asfalto procedió de la Refinería de Esmeraldas y clasificó como PG 64-22. A las combinaciones se les realizaron pruebas reológicas convencionales y avanzadas, que fueron: viscosidad a 135°C, punto de ablandamiento, curvas maestras, parámetro ΔT_c , ductilidad según Kandhal y criterio de Glover-Rowe. Para todos los tiempos en el RTFO y PAV de 20 o 40 horas el asfalto se encuentra en la zona de falla o muy cercana a esta. Para 60 horas en el PAV, las tres combinaciones correspondientes se encuentran en zona de agrietamiento total. Las pruebas reológicas avanzadas permiten concluir que empleando los tiempos de 85 min en RTFO y 20 h en PAV, nuestro asfalto se encuentra en zona de falla por agrietamiento y durabilidad, destacándose que dicho tiempo en el PAV provocaría una calidad en el asfalto similar a un tiempo de colocación en obra entre 7 y 10 años. Se recomienda emplear aditivos para contrarrestar elevado envejecimiento del asfalto en el proceso de fabricación de mezclas en caliente.

Palabras Claves: *Asfaltos, envejecimiento, curvas maestras, ΔT_c , ductilidad, Glover-Rowe*

ABSTRACT

This work's objective is to characterize the behavior of Ecuadorian asphalt by rheological tests after laboratory aging in the rotary thin film oven (RTFO) and the pressure aging vessel (PAV) with different test times, to make recommendations of theoretical and practical order that allow a better control. The different times used for the RTFO were 70, 85 and 100 minutes and for the PAV of 0, 10, 20, 40 and 60 hours, creating an experimental matrix out of 15 combinations. The asphalt was produced in the Esmeraldas Refinery and classified as PG 64-22. Conventional and advanced rheological tests were performed to the combinations, which were: viscosity at 135 ° C, softening point, master curves, parameter ΔT_c , ductility according to Kandhal and Glover-Rowe criteria. For all times in the RTFO and PAV of 20 or 40 hours the asphalt is in the fault zone or very close to it. For 60 hours in the PAV, the three combinations are in the area of total cracking. Advanced rheological tests allow us to conclude that using the 85 min times in RTFO and 20 h in PAV, our asphalt is in the area of failure due to cracking and durability, highlighting that this time in the PAV would cause a 7 to 10 years quality asphalt. It is recommended to use additives to counteract high asphalt aging in the hot mix manufacturing process.

Keywords: *Asphalts, aging, master curves, ΔT_c , ductility, Glover-Rowe*

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El estudio del envejecimiento de ligantes asfálticos, ha sido materia de investigación desde hace más de cinco décadas (Vallerga, Monismith, & Granthem , 1957); (Hveem, Zube, & Skog, 1963). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos altera las propiedades fisicoquímicas del material y por ende durabilidad de los pavimentos asfálticos, ocasionado pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas. Aunque los esfuerzos producidos por el tráfico incrementan las destrucciones, la evolución de las propiedades reológicas del asfalto envejecido puede ser lo suficientemente dañina por si sola, ya que es uno de los daños superficiales que contribuyen al deterioro en el tiempo de las mezclas asfálticas (King & et al, 2012). En nuestro medio es muy común encontrar varias carreteras de pavimento asfáltico que, al corto tiempo de ser construidas o rehabilitadas, muestran numerosas fallas tales como fisuras en bloques, frecuentes en la región Sierra, debido a los esfuerzos provocados por los gradientes térmicos y a un endurecimiento excesivo del asfalto. Por otra parte, es conocida la incidencia del envejecimiento en las fisuras por fatiga tipo “top-down” frecuentes en las principales carreteras de todo el país, lo cual origina malestar en los usuarios y grandes inversiones para su corrección.

La problemática del envejecimiento prematuro del asfalto ecuatoriano se comenzó a detectar hace unos 20 años y las investigaciones más serias comenzaron a partir del 2010 aproximadamente. En este sentido incidió favorablemente que desde el año 2014 la metodología Superpave se ha venido introduciendo en el Ecuador a partir de la disponibilidad de los equipos pertinentes en algunas universidades e instituciones, aunque el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) desde el 2002 aceptaba su empleo. Tal vez, el detonante al respecto fue el desarrollo del mapa de la zonificación

climática para grados de desempeño en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en el 2014.

Para la clasificación por grados de desempeño (PG) del Superpave se introdujo además de la prueba de envejecimiento primario RTFO, una prueba adicional de envejecimiento secundario, conocida como PAV. Con esta tecnología se comenzaron a desarrollar nuevas pruebas reológicas, impulsadas principalmente por los trabajos en la Universidad de Texas A&M. (Menapace, Yiming Wubulikasimu, & Eyed, 2017); (Jin, 2012)

Con esos nuevos enfoques el Laboratorio de Carreteras de la UCSG realizó un primer trabajo importante en coordinación con Petroecuador, analizando la calidad de muestras tomadas quincenalmente durante un año en la Refinería de Esmeraldas, entre julio de 2015 y junio de 2016. Parte de esta información se reflejó en un trabajo publicado en el XIX CILA (Vila, García, Jaramillo, & Troya, 2017). Otros trabajos se han realizado en dicho laboratorio para tratar de monitorear y de mejorar los problemas detectados en el asfalto, bien sea con el empleo de polímeros o de rejuvenecedores (Villao & León , 2017); (Márquez & Ureta, 2018); (Mera & Icaza, 2018).

1.2. Razones que motivaron al estudio

Actualmente al realizar controles de calidad al cemento asfáltico proveniente de la Refinería de Esmeraldas , se obtiene que el ligante asfáltico en estado original presenta propiedades satisfactorias, pero al entrar en contacto con agentes oxidantes mediante el horno de envejecimiento (RTFO) este presenta un excesivo envejecimiento incumpliendo así con las especificaciones vigentes en el país, esto origina un asfalto demasiado rígido que finalmente tendría poca durabilidad y con altas posibilidades de presentar agrietamientos.

El envejecimiento del asfalto como tal es atribuible a diferentes causas como: volatilización, formación de sulfóxidos, oxidación, temperaturas elevadas, rayos ultravioletas y acción del agua. El mecanismo del envejecimiento ocurre en dos etapas: el envejecimiento a corto plazo y a largo plazo. La primera etapa se debe a la pérdida de componentes volátiles durante el mezclado en caliente, transportación y compactación. La segunda se produce durante el

tiempo de servicio por efectos del clima los cuales generan una oxidación progresiva (Fernández Gómez, Rondón Quintana, & Reyes Lizcano, 2011). De tal manera a nivel de laboratorio el horno de envejecimiento RTFO simula la primera etapa y la cámara de presión PAV la segunda etapa.

A pesar del gran avance que existe hoy en día en el área de simulación acelerada de envejecimiento en laboratorio, estas técnicas no consideran todos los factores que influyen en el envejecimiento en campo y tampoco hay certeza de que realmente se está simulando con las mismas, aplicando los procedimientos estandarizados y el efecto supuesto en nuestro asfalto en particular, con sus insuficiencias. En este sentido y como parte de una investigación más extensa que se desarrollará en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG se realizará, estas pruebas a diferentes tiempos de lo que establece la norma de envejecimiento en RTFO y PAV, además complementando el estudio con pruebas adicionales según los criterios de ductilidad Kandhal, Curvas Maestras, parámetro Glover-Rowe y el parámetro ΔT_c .

1.3. Justificación del tema

Uno de los factores más importantes que incide en las carreteras de las diferentes regiones es la poca durabilidad de los pavimentos asfálticos, siendo una de las razones significativas el envejecimiento del asfalto. Dado que las pruebas clásicas de envejecimiento en RTFO y PAV establecen ciertas temperaturas y tiempos de ensayo, con los cuales se supone llegar a ciertas condiciones de envejecimiento, no corroboradas para el caso del asfalto ecuatoriano, se entiende que es necesario investigar al respecto, realizando evaluaciones con distintas condiciones (tiempo y temperatura) de dichos ensayos, para posteriormente, con otros estudios que conlleven la extracción de asfaltos en núcleos de capas de rodadura con diferentes tiempos de colocación en obra, poder hacer las comparaciones pertinentes.

Por esta razón, en Ecuador es de suma importancia implementar las nuevas tecnologías y nuevos parámetros que se desarrollan internacionalmente, que proporcionen una mayor información del comportamiento del asfalto y su

mejor control de calidad de acuerdo a nuestras condiciones y de esta manera aportar para el desarrollo de las carreteras del país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El objetivo de esta investigación es caracterizar el comportamiento del asfalto ecuatoriano mediante diferentes pruebas reológicas y clasificación avanzada, luego de envejecerse a nivel de laboratorio empleando equipos RTFO y PAV, para formular recomendaciones de orden teórico – práctico que permitan su mejor control.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar los basamentos teóricos del fenómeno de envejecimiento y los procedimientos de ensayo empleados para su evaluación.
- Analizar una muestra de asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas que servirá como base a toda la investigación, mediante la clasificación tradicional por grado de viscosidad y por grado de desempeño (PG) según la tecnología Superpave.
- Realizar un diseño experimental con una muestra de cemento asfáltico representativa que será ensayada de acuerdo a una matriz en función de los tiempos de envejecimiento en RTFO y PAV.
- Ejecutar en las diferentes muestras envejecidas pruebas de caracterización reológica avanzada según los criterios de ductilidad Kandhal, Curvas Maestras, parámetro Glover-Rowe y el parámetro ΔT_c , que complementen el estudio y la comprensión del comportamiento de las diferentes muestras.
- Comparar los resultados obtenidos con criterios internacionales y llegar a las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

1.5. Alcance

En el presente trabajo se estudiará una muestra de asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas con las características referenciadas. Al mismo se le deberá realizar estudios pertinentes tanto para la clasificación por grado de

viscosidad, que incluye: ensayos de viscosidad a 60°C y 135°C, punto de ablandamiento, punto de inflamación, gravedad específica, penetración y ductilidad; como por grado de desempeño (PG) utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR) y reómetro de viga a flexión (BBR). Además, ensayos adicionales como son: ductilidad según Kandhal, Curvas maestras, criterio Glover–Rowe y el parámetro ΔT_c .

Posteriormente se investigará a partir de una matriz experimental empleando horno de película delgada (RTFO) y la cámara de presión (PAV) con diferentes tiempos de envejecimiento y temperatura, sus efectos en el proceso de envejecimiento, lo que permitirá a futuro correlacionarlo con el comportamiento real evaluado en vías de las diferentes regiones del Ecuador.

Los resultados obtenidos en el trabajo de titulación permitirán realizar posteriormente comparaciones respecto al envejecimiento que se obtenga en el asfalto formando parte de capas de rodadura en obras de la sierra y la costa ecuatoriana, con diferentes tiempos de colocación, lo que permitirá realizar las recomendaciones y ajustes pertinentes para la evaluación de este fenómeno en el asfalto producido en Esmeraldas.

1.6. Metodología

La matriz experimental estará constituida por 3 diferentes tiempos de envejecimiento en horno RTFO (70, 85 y 100 minutos) y 5 diferentes tiempos en cámara PAV (0,10, 20, 40 y 60 horas) es decir, 15 combinaciones. A las muestras envejecidas de las diferentes combinaciones se les realizarán las siguientes pruebas de caracterización reológica: ductilidad según Kandhal, viscosidad a 135°C, punto de ablandamiento, curvas maestras, temperaturas de transición (ΔT_c) y el parámetro Glover-Rowe.

El trabajo que se llevará a continuación es de tipo experimental, mediante el cual se evaluará una muestra representativa de asfalto procedente de la refinería de Esmeraldas a través de ensayos de diferentes tipos de clasificaciones tanto por viscosidad como por grados de desempeño.

Esta investigación estará en función de 3 diversas etapas como son:

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

A su vez estas se encontrarán divididas de la siguiente manera:

Marco teórico:

- Estudio bibliográfico en base al tema.
- Descripción de cada uno de los ensayos a realizar

Diseño experimental:

- Construir una matriz experimental con los diversos tiempos en hornos RTFO y cámara de presión PAV.
- Clasificar el asfalto tanto por grado de viscosidad como por grado de desempeño PG mediante la tecnología Superpave.
- Realizar una caracterización reológica avanzada que incluye: ductilidad según Kandhal, curvas Maestras, criterio Glover-Rowe y el parámetro ΔT_c .

Análisis de resultados:

- Comparación de los resultados obtenidos para las diferentes muestras.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Asfalto

2.1.1. Antecedentes históricos

Dentro de los materiales de construcción los llamados materiales bituminosos (alquitranes y asfaltos) han sido de gran importancia. Ver figura 1. Estos son sustancias de color negro, sólidas que se ablandan ante la presencia de calor. El asfalto es uno de los materiales aglomerantes más antiguos que existen, siendo empleado principalmente en la construcción de caminos, así como albañilería. En primera instancia el asfalto fue utilizado de manera natural, con el paso del tiempo y el avance tecnológico estos se produjeron a escala industrial transformándose en asfaltos destilados del petróleo.

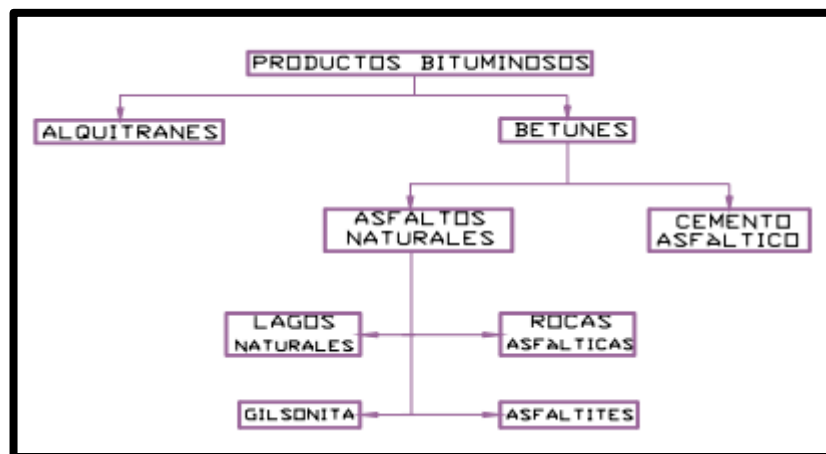


Figura 1. Productos bituminosos

Fuente: Instituto del Asfalto. Manual del Asfalto

Los asfaltos naturales tienen origen a partir del petróleo, que mediante un proceso natural queda fracciones asfálticas solamente, ya que se han evaporado las partes volátiles. Una forma de encontrar estos, es en almacenamientos superficiales en depresiones terrestres lo que dan origen a los lagos de asfalto como es el caso de las islas Trinidad y Bermudas. Otra forma de presentarse es en rocas asfálticas donde el asfalto esta impregnando en los poros de dichas rocas. En algunas partes se encuentran

mezclados con elementos minerales, como las arcillas y arenas. Los asfaltos naturales no son utilizados actualmente ya que carecen de pureza y uniformidad.

El empleo moderno del asfalto para la elaboración de pavimentos en carreteras se originó a finales del siglo pasado, teniendo un amplio crecimiento con la aparición de la industria automotriz. Por esta razón, la tecnología del cemento asfáltico se ha desarrollado de una manera sofisticada, en la actualidad, las herramientas y equipos para analizar el asfalto son bastante avanzados (Wulf , 2008).

2.1.2. Definición y Características Generales

De acuerdo a la American Society for Testing and Materials (ASTM) se define al asfalto como un material bituminoso con coloración marrón oscuro a negro, constituido por elementos y compuestos muy complejos en los que destacan los hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono cuyos componentes principales son: los asfáltenos, resinas y aceites. Estos elementos aportan características de consistencia, aglutinación y ductilidad (Arenas, 2000).

La mayoría del asfalto que se produce y utiliza en todo el mundo actualmente procede de la refinación del petróleo, este puede encontrarse en estado sólido o semisólido en temperaturas ambientes normales el cual presenta propiedades cementantes. El asfalto al calentarse se ablanda progresivamente llegando a un punto en que se presenta como una consistencia líquida. Esta última propiedad ha permitido adecuarlo al uso en la construcción de carreteras en obras civiles. (Fernandez, 1983)

2.1.3. Cemento asfáltico

El tipo más frecuente de asfalto para la fabricación de mezclas asfálticas calientes es el cemento asfáltico. El mismo es un excelente ligante ya que, entre sus componentes, las resinas proporcionan adherencia con los materiales pétreos, pues al ser calentado se licua lo que facilita cubrir íntegramente las partículas del material pétreo en las mezclas asfálticas. (Norma-CMT-4-05-001, 2005).

Este material posee la propiedad de resistir a algunos agentes externos como son los ácidos, álcalis y sales. Por esta razón es que se lo considera como un material impermeable y duradero (Cardenas & Fonseca, 2009). Los cementos asfálticos son distintos entre una refinería y otra debido al tipo de crudo que se refina y al proceso de obtención del mismo, donde adquiere ciertas propiedades que se verán reflejadas en el comportamiento del pavimento (Villao A. , León, Jaramillo, & Vila, 2017).

Al cemento asfáltico se lo puede catalogar de forma general de acuerdo con su consistencia, inicialmente por su penetración y luego por viscosidad. Otra forma de clasificación más moderna es de acuerdo al grado de desempeño, acreditada por las siglas PG (Performance Grade) que fue desarrollado por el Strategic Highway Research Program de los EE.UU., donde se desarrolló la metodología Superpave para ligantes asfálticos.

2.1.4. Propiedades químicas

El asfalto posee una composición química muy compleja el cual se basa en una mezcla de hidrocarburos donde intervienen compuestos orgánicos de alto peso molecular en proporciones muy diferentes que a su vez durante el proceso de refinación también da lugar a cambios en su estructura molecular ya que los hidrocarburos livianos se eliminan durante este proceso (Arenas, 2000).

Esta composición incluye moléculas de carbono (80–88%) y de hidrógeno (8–12%), además tres componentes en menor porcentaje que son: el oxígeno (0-2%), azufre (0-9%) y nitrógeno (0-2%). Adicionalmente existe también un aporte de metales como níquel, magnesio y vanadio. En base al origen del asfalto está determinado el aporte de cada uno de los componentes antes mencionados (Vila R. , 2018).

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa. En primera instancia una descripción de su estructura molecular fue desarrollada por Nellensteyn en 1924, la que fue mejorada en 1949 por el científico Pfeiffer Saal en base a procesos analíticos. Ver figura 2.

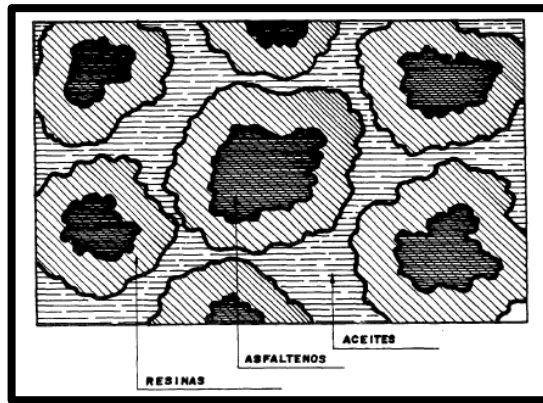


Figura 2. Estructura coloidal de Pfeiffer

Fuente: Tecnología del cemento asfáltico (Arenas Lozano, 2006)

Posteriormente para conocer mejor la estructura química de los asfaltos se emplearon técnicas de fraccionamiento con solventes de polaridad creciente. Tal vez el más conocido es el fraccionamiento de Corbett, que se utiliza en la normativa ASTM D4124 (Composición SARA). Ver figura 3.

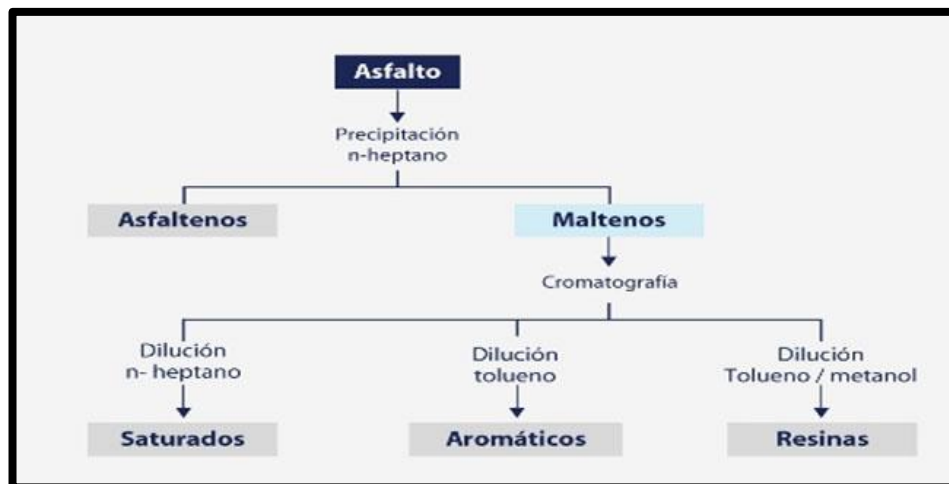


Figura 3. Estructura química del asfalto

Fuente. Estructura química del asfalto (Repsol,2009)

El fraccionamiento SARA determina los hidrocarburos típicos como son: saturados (S), aromáticos (A), resinas (R), asfaltenos (A). El fraccionamiento SARA consiste en la separación de los asfaltenos y maltenos en base a una digestión por la aplicación de n-heptano y después el fraccionamiento de

maltenos en resinas y aceites (aromáticos y saturados) con el uso de cromatografía en columna.

Asfaltenos

Se definen como los compuestos insolubles que se precipitan del petróleo crudo, son de coloración negra y contienen partículas sólidas de un alto peso molecular, diversos estudios analíticos muestran que los asfaltenos principalmente son de naturaleza aromática con pocas ramificaciones compuesto de elementos como: el oxígeno, azufre y nitrógeno (Arenas, 2000).

Los asfaltenos se encuentran disueltos en los máltenos y son los que permiten darle dureza y estabilidad al asfalto. Además, proveen elasticidad y adhesión, el porcentaje de contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico varía entre un 15 % y un 20%.

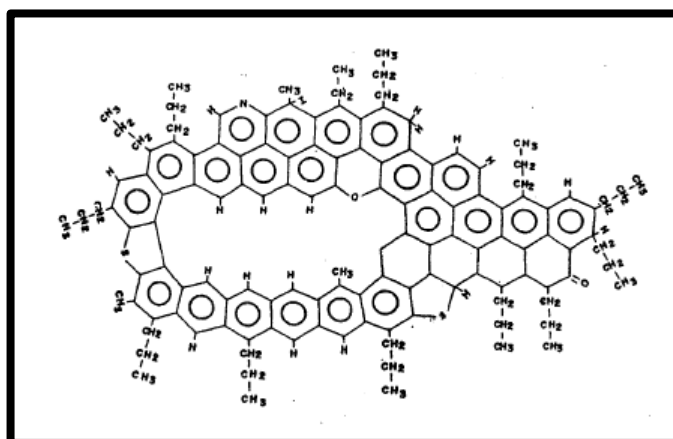


Figura 4. Macroestructura de los asfaltenos
Fuente: Tecnología del cemento asfáltico (Arenas,2000)

Maltenos

Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición, es un dispersante coloidal de partículas de asfaltina las cuales se encuentran disueltas en un material que tiene consistencia parecida a la del aceite pesado. Generalmente los maltenos existen en mayor proporción que los asfaltenos y son los que proporcionan las propiedades elásticas con las que cuenta el asfalto, así como la calidad. Es decir que los maltenos regulan gran

parte de las propiedades químicas de los asfaltos. Los maltenos se encuentran divididos de la siguiente manera:

- a) **Resinas:** Son más pesadas que los aceites y están compuestas por azufre y nitrógeno, son moléculas de poco peso molecular las cuales cuentan con un elevado número de ramificaciones en sus cadenas de composición. Estas presentan propiedades como un mayor punto de ebullición y capacidad de adsorción (Wulf , 2008). Además, que actúan como un agente estabilizador de los asfaltos, por otro parte las resinas son compuestos muy polares fuertemente adhesivos y se presentan en color marrón claro, solidos o semisólidos (Vila R. , 2018).

- b) **Aromáticos:** Estos compuestos son las fracciones de menor peso molecular en la estructura de los asfaltos, predominan las moléculas insaturadas no polares y poseen alta capacidad para disolver otros compuestos de alto peso molecular. Los aromáticos constituyen entre el 40% y 65% de la composición total de los asfaltos con un peso molecular de 300 a 2000.

- c) **Saturados:** Son compuestos de cadenas lineales o contienen ramificaciones de hidrocarburos, son llamados aceites viscosos no polares además tienen muy baja reactividad.

Al pasar de los asfáltenos a los aceites, existe una disminución gradual de componentes aromáticos y un aumento en el carácter parafínico. En forma general, la presencia de parafina influye en las propiedades reológicas del asfalto.

2.1.5. Propiedades físicas

SUSCEPTIBILIDAD A LA TEMPERATURA

El cemento asfáltico es catalogado como un material visco-elástico ya que según la temperatura se puede comportar con propiedades viscosas o elásticas, por lo tanto, es un material que se comportaría entre el sólido de

Hooke y el líquido de Newton. A temperaturas altas mayores a 100 °C, el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso muy parecido al aceite que se utiliza en los motores, por otro lado, a temperaturas menores a 0 °C se comporta casi como una banda de caucho o goma es decir como un sólido elástico. Al aplicar una carga el betún puede adquirir varias formas ya que se puede estirar o comprimir, cuando se retira la carga el ligante adquiere su forma original. En los pavimentos asfálticos la condición prevista a la que se encuentra el asfalto es a temperaturas intermedias, el betún presenta características de fluido viscoso y sólido elástico (Asphalt Institute, 1995).

La temperatura es entonces un parámetro de control importante en el asfalto debido a que es muy variable en base al clima en el que se encuentre. En las mezclas asfálticas, al momento de mezclarse con el agregado debe ser muy precisa la temperatura del asfalto, ya que si este es muy líquido dada una alta temperatura no podrá quedarse adherido con el agregado y a su vez con temperaturas bajas tampoco permitirá la debida cantidad que necesita el árido para poder realizar la mezcla correctamente debido a que se comportará como una masa. También es importante saber que, si no se tiene una adecuada temperatura al momento de colocarlo en obra, este no podrá alcanzar la compactación que se desea según el diseño.

ADHESIÓN Y COHESIÓN

El término conocido como adhesión es una propiedad que tiene el cemento asfáltico para poder unirse o ligarse con el agregado en el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica. A su vez, la cohesión está ligada a la capacidad que tiene el asfalto para lograr que los agregados queden firmemente entre sí y así lograr una mezcla asfáltica de buen comportamiento una vez que se haya culminado el proceso de pavimentación.

Al entrar en contacto el cemento asfáltico y el agregado pétreo en el proceso de mezclado se procura una buena condición de adhesión para que cada partícula del agregado sea cubierta por el betún con la finalidad de que no exista posibilidad alguna de presencia de agua y de esta manera evitar daños por humedad, debido a que con la presencia de agua el asfalto puede

disminuir su capacidad de adherencia frente al agregado. El asfalto envejecido será más susceptible a presentar daño por humedad ya que el ligante oxidado presentaría material ácido.

A su vez es de gran importancia la clase de agregado que se utilice ya que de este depende si aumenta o no la cantidad de asfalto que se coloque al momento de la mezcla. Como se conoce existen agregados de distintas absorciones y texturas, entonces este sería también un factor a muy importante en el diseño de mezcla asfáltica.

ENDURECIMIENTO Y ENVEJECIMIENTO

Una de las causas que aporta en mayor medida al deterioro de las mezclas asfálticas es el envejecimiento del asfalto, este fenómeno afecta directamente la composición ya que altera sus propiedades fisicoquímicas y a su vez el comportamiento reológico del mismo. Este proceso se caracteriza por el endurecimiento que presenta el asfalto, motivo por el cual tiende a rigidizarse disminuyendo la flexibilidad de la capa asfáltica (Vila R. , 2018). Sin embargo, al endurecerse el betún la capacidad de soporte de cargas tiende a incrementarse y, a su vez, aumenta la resistencia que tiene la mezcla a la deformación permanente.

El aumento de la rigidez en el asfalto envejecido hace que las deformaciones permanentes (rutting) sean mucho menores bajo cargas de tráfico, pero la pérdida de ductilidad por la misma rigidización de la mezcla producirá que esta sea susceptible a los daños por fatiga ya que pierde la propiedad de recuperarse una vez que esté sometido a grandes repeticiones de cargas (López & Miró, 2015).

Desde la percepción temporal el envejecimiento ocurre en dos fases o etapas: el envejecimiento a corto plazo y a largo plazo. En primera instancia a corto plazo se producirá por motivos de producción, mezclado, transportación y puesta en obra y es en donde el betún será más rápidamente envejecido. Este inicia tan rápido como se prepare la mezcla ya que es sometido a grandes temperaturas y con presencia de oxígeno el cual reacciona con el betún, este proceso hace que aumente la viscosidad de la mezcla. Una vez colocado en

obra el gradiente de envejecimiento disminuye (Fernández Gómez, Rondón Quintana, & Reyes Lizcano, 2011) A nivel de laboratorio en el área de simulación acelerada de envejecimiento esta primera etapa se lo hace mediante el horno (RTFO) con el que cuenta el Laboratorio de Carretas de la UCSG. Algunos autores prefieren llamar como endurecimiento al envejecimiento de corto plazo.

En la segunda etapa a largo plazo el proceso de envejecimiento se dará con el pasar de los años y su vida en servicio, en este proceso se involucra variables como: el clima, el oxígeno de la atmósfera, los rayos UV y la humedad después de la elaboración del pavimento, así como sus cargas en servicio, en esta etapa la oxidación es baja a diferencia de la de corto plazo. El efecto del envejecimiento a largo plazo se asocia con un incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica (López & Miró, 2015). Tratándose a nivel de laboratorio la cámara de presión (PAV) simulará la etapa de largo plazo.

A continuación, se presentarán los mecanismos que influyen en el envejecimiento del asfalto antes mencionados tanto para la fase de corto plazo como de largo plazo:

- Pérdida de volátiles: El cemento asfáltico reduce componentes volátiles con el paso del tiempo debido a que está expuesto a la atmósfera y las elevadas temperaturas, esta reducción de volátiles hace que el asfalto se rigidice.
- Formación de sulfóxidos: Durante el proceso de mezclado a nivel de planta se forman los sulfóxidos, que a la vez aumentan la rigidez del cemento asfáltico.
- Oxidación: Este es uno de los mecanismos más importantes ya que el asfalto como tal reacciona con el oxígeno y ocurre por la vida del pavimento asfáltico, esta es una reacción que se puede modelar. Además, es en función del grado de aromaticidad, de la permeabilidad de la mezcla, así como de la temperatura. La oxidación incrementa el tamaño y complejidad de las moléculas de los cementos asfálticos, haciendo que disminuya los aromáticos como las resinas que les dan

flexibilidad a los asfaltos y aumente los saturados y asfaltenos, por ende, el asfalto tiende a endurecerse.

- Acción de rayos ultravioletas: Este proceso destroza los lazos químicos del cemento asfáltico.
- Acción de microorganismo: Este proceso digieren compuestos.
- Acción del agua: Esta acción influye en la estructura química ya que el agua rompe mecánicamente dicha estructura.

2.2. Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad

Tabla 1. Clasificación por viscosidad de cementos asfálticos.

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 ^A , 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 ^D , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 2515.
Enmienda1 (INEN,2014)

Los controles de calidad que se hacen al cemento asfáltico en el país se basan en las pruebas de viscosidad, la cual consta de una serie de ensayos con sus respectivas normas tanto en estado original como envejecido en horno RTFO. Al ligante asfáltico se lo clasifica según las exigencias (ver Tabla 1) de tal manera que permita reconocerlo por el grado de viscosidad AC, este control de calidad se encuentra vigente en el país.

A continuación, se realizará una descripción de cada uno de los ensayos que conforma esta clasificación por grado de viscosidad.

2.2.1. Ensayo de Viscosidad

La viscosidad se puede definir como la capacidad que tiene un líquido para fluir, existiendo una relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la correspondiente velocidad de deformación. Este ensayo aporta información sobre el comportamiento a altas temperaturas y se realiza bajo dos condiciones. La primera determina la viscosidad a una temperatura de 60°C conforme a la norma ASTM D2171. Esta condición se asemeja con la máxima temperatura a la que estará sometido un pavimento asfáltico en climas calientes. La segunda condición determina la viscosidad a una temperatura de 135°C conforme a la norma ASTM D2170. Este ensayo se enfoca en que el cemento asfáltico tenga suficiente capacidad para fluir y a su vez pueda ser manejable al momento de realizar el bombeo, transporte y manipulación.

El Laboratorio de Carreteras de la UCSG está equipado con un viscosímetro Brookfield el cual permite determinar la viscosidad del cemento asfáltico. Ver Figura 5. El ensayo consiste en verter aproximadamente 10 gramos de nuestro asfalto en un recipiente cilíndrico y utilizando el spindle No. 27 para asfalto en estado original y No. 28 en estado envejecido se realiza la prueba de viscosidad a las temperaturas especificadas. Al spindle se le da una fuerza de torsión con velocidad constante el cual permite determinar el grado de viscosidad que refleja el cemento asfáltico.



Figura 5. Ensayo de viscosidad
Fuente: Autores

2.2.2. Ensayo de penetración

Este ensayo se realiza acorde con lo especificado en la norma ASTM D5, la prueba consiste en preparar una muestra de asfalto en un recipiente estandarizado para luego sumergirlo en agua a 25°C durante un tiempo, para posteriormente medir la penetración que va a ocurrir mediante una aguja con dimensiones estandarizadas aplicando una carga de 100 gramos durante 5 segundos con ayuda del equipo penetrómetro. Esta penetración será medida en decima de milímetros y el resultado del ensayo será el promedio de las 3 mediciones de penetración consecutivas en la misma muestra. Ver figura 6.



Figura 6. Ensayo de penetración
Fuente: Autores

2.2.3. Punto de ablandamiento

Este ensayo consiste en determinar la temperatura a la cual el asfalto fluye basado en la norma ASTM D-36, mediante el procedimiento denominado anillo y bola. Para este ensayo se debe colocar una muestra de asfalto en un anillo de latón el cual estará por unos 30 minutos a temperatura ambiente, luego de eso se enrasará la muestra y posteriormente será colocada en un recipiente con agua a una temperatura de 5°C. Luego de 10 minutos a la temperatura con la que se colocó la muestra en el recipiente, ya podrá realizarse el ensayo respectivamente. Ver figura 7.

Una vez que se inicia con el ensayo empleando un mechero que calienta el agua del recipiente se debe controlar el incremento de la temperatura con la

ayuda de un termómetro a razón de 5°C por minuto. La temperatura a la cual la bola toca la placa de fondo, se identifica como el punto de ablandamiento del cemento asfáltico.



Figura 7. Ensayo punto de ablandamiento.
Fuente: Autores

2.2.4. Gravedad específica

Basado en la norma ASTM D70-03, el ensayo de gravedad específica permite obtener una relación del peso que se tenga de una muestra de asfalto y a su vez una muestra de agua a una temperatura determinada, tomando en cuenta que ambas muestras deben tener el mismo volumen.

Para realizar este ensayo se utiliza el método del picnómetro el cual debe estar correctamente calibrado para medición de los siguientes pesos. El primero será el picnómetro con su peso propio, posterior a este se lo llena de agua y se toma el siguiente peso. Una vez que se realizó ese proceso y se colocó asfalto en el picnómetro a $\frac{3}{4}$ del volumen total, se calcula el peso y se procede a completar el $\frac{1}{4}$ faltante con agua y así mismo se toma el peso final. Ver figura 8.

Una vez que se obtienen los resultados de los distintos pesos se calcula la gravedad específica. Este ensayo se emplea para determinar los parámetros volumétricos necesarios en el diseño una mezcla asfáltica.

La ecuación para calcular la gravedad específica es la que se presentara a continuación:

$$G.E = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

- A = Peso del picnómetro (incluyendo el tapón),
- B = Peso del picnómetro con agua,
- C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto, y
- D = Peso del picnómetro con asfalto y con agua.



Figura 8. Ensayo de gravedad específica.

Fuente: Autores

2.2.5. Punto de inflamación

Este ensayo es utilizado para poder determinar la temperatura máxima a la cual el asfalto se puede manipular y almacenar sin peligro a que se inflame. Es muy importante tener en cuenta este punto de inflamación debido a que el asfalto trabaja a altas temperaturas en el proceso de fabricación de mezclas en planta.

Basándose en la norma ASTM D92 el procedimiento que se debe realizar para este ensayo consiste en colocar una muestra de asfalto en la denominada copa Cleveland y mediante un dispositivo calentarla gradualmente. Empleando una llama con un movimiento horizontal sobre la superficie caliente del asfalto en la copa se anotará la temperatura a la cual se inflaman los gases sobre la superficie de la muestra, la temperatura a la que ocurre este fenómeno es el punto de inflamación. Ver figura 9.



Figura 9. Ensayo punto de inflamación.
Fuente: Autores

2.2.6. Envejecimiento en horno de película delgada (RTFO)

El ensayo según la norma ASTM D-2872, permite representar el envejecimiento que obtiene el betún al estar expuesto a una temperatura determinada con presencia de oxígeno en un tiempo específico, de forma que este proceso simula el envejecimiento relacionado con la producción de la mezcla, su transporte, colocación y compactación.

El proceso de envejecimiento en RTFO se lo realiza vertiendo 35 gramos de asfalto líquido en unas botellas de cristal específicas para dicho horno, a su vez formando una capa delgada la cual cubra alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes de la botella y procedente a esto colocándolas en el horno a una temperatura de 163°C con un flujo de 4 litros por minuto en un tiempo determinado de 85 minutos según lo especificado en la norma. Realizado este proceso de envejecimiento se obtiene un residuo al cual se le podrá realizar las pruebas indicadas tanto en la clasificación por viscosidad como por grado de desempeño. Ver figura 10.



Figura 10. Ensayo de envejecimiento horno de película delgada (RTFO).
Fuente: Autores

2.2.7. Cambio de masa

El proceso según la norma ASTM D 2872, consiste en determinar la cantidad de masa que pierde el asfalto luego de pasar por el proceso de envejecimiento RTFO. Relacionando los pesos en estado original y luego de envejecido por este procedimiento podrá ser determinado el porcentaje del cambio de masa. En este sentido el ensayo se emplea para determinar el comportamiento frente al envejecimiento que tendrá el asfalto durante las operaciones de mezclado. El resultado puede ser expresado con signo positivo (ganancia de masa) o signo negativo (pérdida de masa).



Figura 11. Ensayo cambio de masa
Fuente: Autores

2.2.8. Ductilidad

Este ensayo para cemento asfáltico está basado en la norma ASTM D-113 y parte de colocar el asfalto en tres moldes estandarizados. El asfalto antes de ser ensayado debe estar sumergido en agua a una temperatura promedio de 25°C en un tiempo específico. Se colocan las muestras en el ductilímetro y se ensaya a una velocidad de 5 cm/min aplicando tracción. El asfalto se va estirando gradualmente y al momento que la muestra falla se toma la lectura de la longitud máxima alcanzada en centímetros. Al final se deberá realizar un promedio de los resultados de las tres muestras y así poder determinar la ductilidad representativa del ligante. Ver figura 12.

Es muy importante determinar la ductilidad del cemento asfáltico debido a que este se asocia al comportamiento del material, ya sea frágil (menores longitudes) o a su vez dúctil (mayores longitudes). Si el cemento asfáltico es muy frágil la fatiga será el problema principal mientras que si el material se comporta de forma contraria este presentará problemas de adherencia o ahuellamiento.



Figura 12. Ensayo de ductilidad.
Fuente: Autores

2.3. Pruebas de clasificación por grado de desempeño según la tecnología SUPERPAVE (PG)

La clasificación por grado de desempeño forma parte de un sistema compuesto llamado SUPERPAVE (SUPERIOR PERFORMANCE PAVEMENTS) mismo que es proveniente del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) el cual fue desarrollado en los Estados Unidos los años 1987-1993. Esta metodología trata de incorporar nuevas especificaciones tanto para el cemento asfáltico, agregado a utilizar, un modelo nuevo de mezclas asfálticas calientes y realizar una predicción del comportamiento del pavimento asfáltico.

La metodología SUPERPAVE está desarrollada para poder determinar el comportamiento del material ante las características del sitio. El tema central de las especificaciones SUPERPAVE es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. Las pruebas realizadas en el asfalto original, representan la primera etapa: transportación, almacenamiento, y manejo.

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO). Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando el cemento asfáltico es envejecido desde que se coloca la carpeta asfáltica, hasta el periodo de vida útil para el cual fue diseñado. Esta etapa es simulada en la cámara de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, y así poder representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

Tabla 2. Propósitos de los diferentes ensayos SUPERPAVE

Equipo	Propósito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO) Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR) Ensayo de tensión directa (DTT)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas.

Fuente: Instituto mexicano del transporte

La metodología SUPERPAVE brinda una clasificación de los asfaltos mejorando las especificaciones que se tienen a través de diversos ensayos que se le realiza al betún, como son, ensayo DSR, ensayo BBR, viscosidad a temperatura de 135°C, y a su vez punto de ablandamiento.

La norma AASHTO M-320 nos proporciona una tabla la cual clasifica al asfalto según el grado de desempeño que tenga, tanto para altas y bajas temperaturas.

Tabla 3. Clasificación SUPERPAVE mediante AASHTO M-320

GRADO LIGANTE	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
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	< 46			< 52						< 58				< 64							
Temperatura mínima 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
ASFALTO ORIGINAL																					
Temperatura Flash Point, T48; Mínima °C	230																				
Viscosidad, ASTM D4402; (b) Máximo 1 Pa*s, Temperatura de ensayo, °C	135																				
Corte Dinámico, TP5; (c) G*/sen (3) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																					
Pérdida de masa, Máxima, %	1.00																				
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (3) Mínimo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																					
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	90			100						100				100							
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (3) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
ENFORMAR																					
Endurecimiento Físico (e) Módulo de Rigidez, TP1; (f) S máximo: 300 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: Libros de asfalto y mezclas Dr. Rolando Vila

**Tabla 4. Clasificación SUPERPAVE mediante AASHTO M-320
(Continuación)**

GRADO LIGANTE	PG 70						PG 76						PG 82					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34		
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	< 70						< 76						< 82					
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34		
ASFALTO ORIGINAL																		
Temperatura Flesh Point, T48; Mínima °C	230																	
Viscosidad, ASTM D4402; (b) Máximo 3 Pa*s, Temperatura de ensayo, °C	135																	
Corte Dinámico, TP5; (c) G*/sen (δ) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76						82					
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																		
Pérdida de masa, Máxima, %	1.00																	
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Mínimo: 2.20 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	70						76						82					
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																		
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	100 (110)						100 (110)						100 (110)					
Corte Dinámico, TP5; G*/sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	34	31	28	28	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28		
INFORMAR																		
Endurecimiento Físico (e) Módulo de Rigidez, TP1; (f) S máximo: 300 MPa; valor mínimo de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		
Tracción directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		

Fuente: Libros de asfalto y mezclas Dr. Rolando Vila

2.3.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

El ensayo de envejecimiento en cámara de presión (PAV) se centra en utilizar tanto la presión como la temperatura, el cual simula el envejecimiento que tendrá el asfalto en un periodo de tiempo corto (20 horas) según la norma, a comparación con su periodo de vida útil una vez colocado en obra el cual será al redor de 7-10 años en promedio.

Este ensayo esta referenciado por la norma ASTM 6521, mismo que es realizado una vez que el asfalto pasa por el horno RTFO, se procede a colocar en un plato de latón aproximadamente 50 gramos de cemento asfáltico envejecido, el cual estará expuesto a una temperatura entre 90°C y 100°C, esta temperatura estará en función del clima en el cual se vaya a colocar la mezcla asfáltica. Se deberá tener en cuenta que la presión a la cual estará

sometido el asfalto dentro del PAV será de 1MPa, en un periodo de estandarizado de 20 horas.

Culminado el proceso de envejecimiento en PAV se procederá a realizarle los ensayos que sean pertinentes para poder obtener el grado de desempeño de la muestra.



Figura 13. Cámara de envejecimiento a presión (PAV).

Fuente: Autores

2.3.2. Reómetro de corte dinámico (DSR)

Este ensayo de corte dinámico permite caracterizar el comportamiento que tiene el cemento asfáltico tanto viscoso como elástico, el mismo que depende fundamentalmente de la temperatura y frecuencia de carga que se tenga. Por medio del equipo DSR se puede lograr determinar el módulo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ).

El procedimiento del ensayo según AASHTO T-315, se basa en colocar una reducida cantidad de cemento asfáltico en un molde de silicona seleccionado previamente (ver Figura 14) en función de dos condiciones:

- a) Si el asfalto se encuentra en estado original o envejecido en horno de película delgada RTFO, se utilizan platillos de 25 mm de diámetro y 1mm de separación con temperaturas de 46°C o más.

- b) Si el asfalto es un residuo envejecido en RTFO y en la cámara de presión PAV, se utilizan los platillos de 8 mm de diámetro y 2 mm de separación para temperaturas entre 4°C y 40°C.

El equipo de ensayo de corte (DSR) trabaja con movimientos oscilatorios, donde la frecuencia que se debe utilizar será de 10 rad/seg, todo esto especificado en función de la norma. Esta frecuencia corresponde a una velocidad vehicular de 90 km/h. Ver figura 15.



Figura 14. Muestra de asfalto para ensayo en DSR
Fuente: Autores



Figura 15. Ensayo en reómetro de corte directo (DSR)
Fuente: Autores

Las fallas asociadas a los resultados obtenidos mediante el equipo DSR son:

Ahuellamiento o Deformación Permanente

Este tipo de falla ocurre cuando el asfalto se encuentra expuesto a temperaturas altas, es ahí donde se comporta más como un líquido que de

forma viscosa. Estos problemas aparecen durante los primeros años de haber sido colocada la mezcla en obra y es debido mayormente a los altos ciclos de cargas a los cuales se encuentra sometido el pavimento.

Existen requisitos para poder determinar el factor de ahuellamiento que tendrá el asfalto en base a la norma AASHTO M-320, que se representa mediante el parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$. Tanto G^* como (δ) son determinados utilizando el reómetro de corte dinámico. Se debe tener en cuenta que existen dos diferentes condiciones a cumplir:

- a) Para asfalto en estado original sin envejecerse, $G^*/\text{sen}(\delta)$ debe ser como mínimo 1 kPa.
- b) Para asfalto envejecido en horno de película delgada RTFO el valor mínimo de $G^*/\text{sen}(\delta)$ debe ser de 2.2 kPa.

Fisuración por Fatiga

El daño por fatiga se produce cuando el asfalto se encuentra a temperaturas bajas o moderadas, el ligante presenta características elásticas. Para poder medir las propiedades, el betún debe pasar por los dos tipos de envejecimiento, tanto en horno RTFO como en cámara de presión PAV.

SUPERPAVE establece que el parámetro $G^* \times \text{sen}(\delta)$ no debe ser mayor a 5000 kPa debido a que si el valor se encuentra por encima de ese rango el cemento asfáltico será extremadamente rígido, teniendo en cuenta que si las cargas son constantes la fatiga se dará de una forma inmediata.

2.3.3. Reómetro de Viga a Flexión (BBR)

Mediante este ensayo se logra medir la rigidez que tiene el cemento asfáltico al estar expuesto a temperaturas bajas. El procedimiento se realiza mediante una viga de asfalto simplemente apoyada a la cual se le aplicará una carga en el centro de su sección para posteriormente medir las deflexiones que sufre el asfalto. Dicha carga simula los esfuerzos a los cuales el pavimento está sometido cuando se encuentra en temperaturas bajas.

En base a la norma AASHTO T-313, el ensayo consiste en colocar asfalto dentro de un molde estandarizado, que se encuentra perfectamente lubricado con la finalidad de que al momento de retirar la muestra esta no se quede adherida. Una vez colocado el asfalto se deja enfriar aproximadamente por una hora para luego ser enrasada y ser sumergida en el equipo BBR a una temperatura determinada. Una vez transcurrido este proceso de enfriamiento por una hora se procede a ensayar la viga.

A partir de una ecuación básica de resistencia de materiales se puede obtener la rigidez con la que tiene fluencia el asfalto:

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}$$

Donde:

- $S(t)$ = Rigidez a la fluencia,
- P = Carga constante aplicada,
- L = Distancia entre los apoyos de la viga,
- b = Ancho de viga,
- $\delta(t)$ = deflexión para $t= 60$ seg.

Otro valor que se obtiene mediante este ensayo es el cálculo de la pendiente m , mismo que representa la tasa de cambio de la rigidez en intervalos de diferentes tiempos.

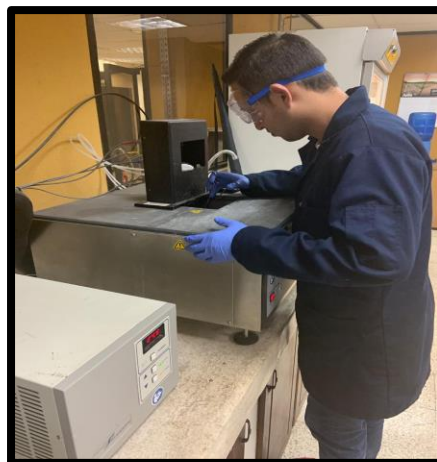


Figura 16. Reómetro de viga a flexión.
Fuente: Autores.

2.4. Diseño Experimental

En la actualidad se realizan controles de calidad al cemento asfáltico mediante clasificación por viscosidad y grado de desempeño PG, estos procedimientos se ejecutan en condiciones de tiempo estandarizados según sus respectivas normas, por lo cual en esta investigación se ampliará estos tiempos de ensayo.

El procedimiento es analizar una muestra representativa de asfalto que servirá como base a toda la investigación en función de una matriz experimental que estará constituida por 3 diferentes tiempos de envejecimiento en horno RTFO:

1. 70 minutos
2. 85 minutos
3. 100 minutos

Y 5 diferentes tiempos en cámara de presión PAV:

1. 0 horas
2. 10 horas
3. 20 horas
4. 40 horas
5. 60 horas

Es decir, 15 combinaciones en total. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Diseño experimental

RTFO \ PAV	0 h	10 h	20 h	40 h	60 h
70 min	1	2	3	4	5
85 min	6	7	8	9	10
100 min	11	12	13	14	15

Fuente: Autores

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS PRUEBAS CONVENCIONALES

3.1. Resultados de la clasificación por grados de viscosidad del asfalto base

En la Tabla 6, se pueden observar los diferentes resultados que fueron obtenidos al analizar el asfalto base. Todos los ensayos realizados son los establecidos en la norma nacional INEN 2515 - 2010 que se corresponde con la ASTM D3381-92.

Tabla 6. Tabla de resultados de clasificación por grado de viscosidad

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS INEN		RESULTADOS
			AC-20	AC-30	
LIGANTE ORIGINAL					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	288
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	385
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	292
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1.010
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	ASTM D-5			66
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D-36			52.0
Índice de penetración		ASTM D 5/D5M	-1.5 a	-1.5 a	-0.03
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1360
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	-0.06
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	27

Fuente: Autores

En base a los resultados obtenidos del asfalto en estado original, puede notarse que el ligante cumple las exigencias correspondientes a asfaltos clasificados como AC-30, como se puede observar en el resultado del ensayo de viscosidad dinámica a 60°C con una exigencia mínima de (300 ± 60 Pa.s).

Luego de pasar por el proceso de envejecimiento, los cuales son dictados por la norma ASTM D2171, el asfalto deja de comportarse como un AC-30, se torna más rígido y en función de los ensayos que se le realiza en estado

envejecido este no cumple con lo especificado en la norma. Esto puede deberse a que el ligante podría sufrir un proceso de envejecimiento excesivo, por el cual sus propiedades tanto químicas como físicas se ven afectadas, perdiendo capacidades de durabilidad, adhesividad con el árido y entre otras cualidades. La susceptibilidad del ligante a presentar problemas de agrietamiento se verá incrementada a medida que se torne más rígido.

3.2. Clasificación por grados de desempeño (PG) del asfalto base.

Esta clasificación se realiza mediante la tecnología SUPERPAVE, la cual está basada en función de las diferentes condiciones climáticas que puede experimentar el asfalto tanto como para altas y bajas temperaturas, y mediante ello poder determinar el grado de desempeño que presenta el ligante. Para esto el asfalto debe ser evaluado tanto en estado original como después de su proceso de envejecimiento en horno rotatorio de película delgada (RTFO) y en cámara de presión (PAV). Esta clasificación por grado de desempeño exige realizar una serie de ensayos con los siguientes equipos: reómetro de corte directo (DSR), viscosímetro rotativo (RV), para temperaturas altas, mientras que para temperaturas bajas se utiliza el reómetro de viga a flexión (BBR).

En la tabla 7, se muestran los resultados obtenidos mediante la clasificación PG del cemento asfáltico a analizar.

Tabla 7. Clasificación por grado de desempeño PG

PROPIEDAD		MÉTODO	EXIGIDO	RESULTADOS
LIGANTE ORIGINAL				
Punto de inflamación, °C		AASHTO T 48	230 mín	292
Viscosidad, Pa.s		AASHTO T 316	3,0 máx	0.745
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	135°C	AASHTO T 315	1,0 mín	19.80
	46°C			8.20
	52°C			3.44
	58°C			1.50
	64°C			0.65
70°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	47.70
	52°C			19.30
	58°C			9.22
	64°C			3.89
	70°C			1.87
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	1100
	28°C			1520
	25°C			2140
	22°C			2930
	19°C			3970
	16°C			5320
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C	AASHTO T 313	300 máx	393.377
Valor m			0,300 mín	0.266
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C	AASHTO T 313	300 máx	204.676
Valor m			0,300 mín	0.299
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-12°C	AASHTO T 313	300 máx	104.721
Valor m			0,300 mín	0.316
GRADO PG SUPERPAVE		AASHTO M 320	--	PG 64 - 22

Fuente: Autores

En base a esta tecnología se puede entender que el asfalto analizado es de buena calidad para las condiciones climáticas que presenta el Ecuador, debido a que como resultado se obtiene un rango bastante amplio englobando las temperaturas típicas del país.

El grado de temperatura alta para el asfalto en estado original y envejecido en horno RTFO dio como resultado 64°C. A mayor temperatura el fenómeno que suele predominar es el ahuellamiento, por lo que según esta clasificación el asfalto no debería presentar dicho problema debido a que las posibilidades de que estas temperaturas sean experimentadas son nulas para el medio climático al cual estará expuesto dicho ligante.

De igual manera, el análisis al residuo del PAV a temperatura baja dio como resultado -22°C . A menor temperatura el mecanismo de falla predominante es el agrietamiento, por lo que según esta clasificación el ligante analizado no se encuentra en riesgo de sufrir dicho fenómeno, en vista de que -22°C es una temperatura demasiado extrema para las condiciones climáticas del Ecuador.

3.3. Comparación de los resultados de ambas clasificaciones.

Al examinar la clasificación por viscosidad, el asfalto ecuatoriano podría presentar problemas de rigidez, debido a que en estado original cumple como un AC-30, pero una vez envejecido este incumple los valores establecidos, determinando que su envejecimiento es excesivo y que mediante esta clasificación no se puede establecer con exactitud a que se debe la pérdida de sus propiedades.

Por otro lado, al analizar por grado de desempeño el asfalto cumple como un PG 64-22, el cual sería adecuado para nuestras condiciones climáticas. Como se observa existen discrepancias muy llamativas respecto a la calidad de nuestro asfalto evaluado para ambas clasificaciones. Para profundizar este problema deben ser realizados estudios reológicos adicionales que permitan analizar de una forma especial el estado y propiedades de nuestro cemento asfáltico.

3.4. Resultado de las pruebas convencionales según el diseño experimental.

3.4.1. Viscosidad a 60°C

En la Tabla 8 y la Figura 17 se presentan los resultados obtenidos en este ensayo para las combinaciones 1, 6 y 11 del diseño experimental con diferentes tiempos de envejecimiento en RTFO y PAV de cero horas.

Tabla 8. Viscosidades absolutas obtenidas a 60°C

Viscosidad 60°C (Pa.s)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	1140	-	-	-	-
	85	1360	-	-	-	-
	100	1710	-	-	-	-

Fuente: Autores

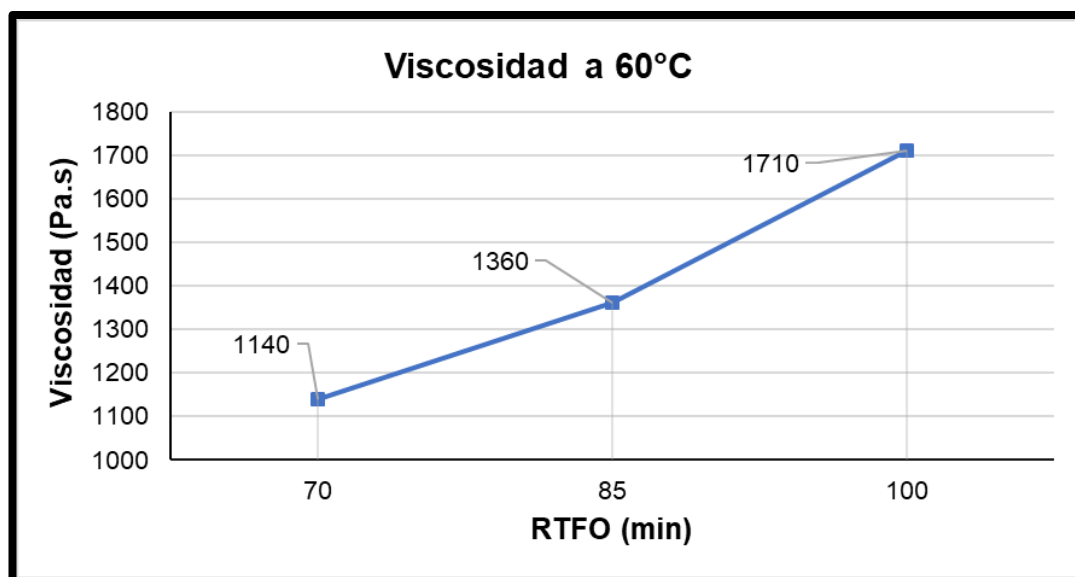


Figura 17. Variación de las viscosidades con diferentes tiempos RTFO.
Fuente: Autores.

En la Figura 17 se puede observar el incremento que existe en la viscosidad a medida que aumenta el envejecimiento primario, en rangos de 300 Pa.s aproximadamente. Si se comparan cada uno de estos valores con el valor establecido en la norma para viscosidad a 60°C con residuos de ensayo en RTFO, solo con 70 minutos RTFO cumple (Combinación 1), dejando por fuera del límite permitido el resultado de las combinaciones 6 y 11.

3.4.2. Cambio de Masa

A continuación, se presentan en la Tabla 9 y en la Figura 18 los resultados de las muestras 1, 6 y 11 que se obtuvieron para este ensayo.

Tabla 9. Resultados en el cambio de masa

Cambio de masa (%)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	-0.0590	-	-	-	-
	85	-0.0635	-	-	-	-
	100	-0.0669	-	-	-	-

Fuente: Autores

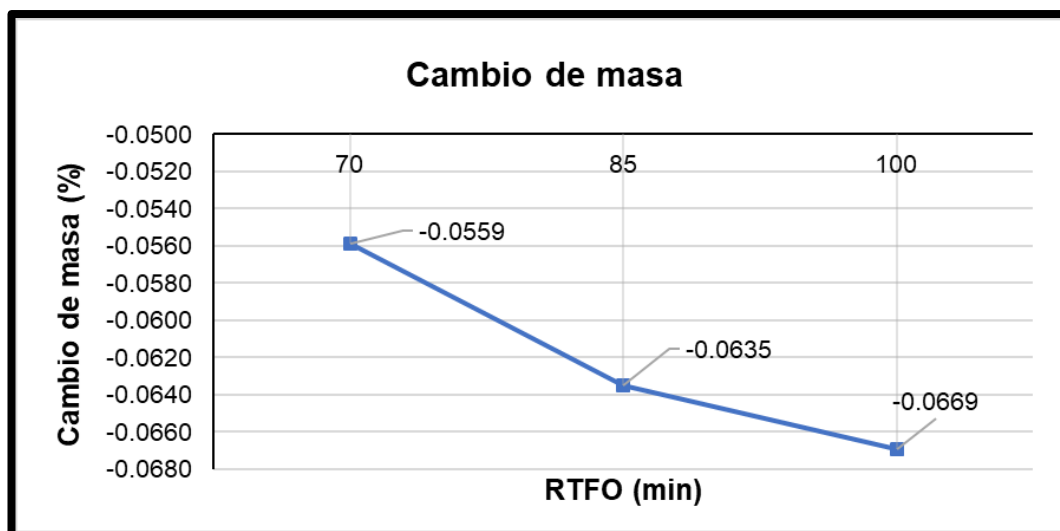


Figura 18. Variación del cambio de masa con diferentes tiempos RTFO.

Fuente: Autores.

Se puede observar que acorde más se envejece la muestra en RTFO, por tiempos más prolongados, se produce más volatilización en el ligante, notándose que existen pérdidas en su masa de signo negativo, dado que el peso final es menor que el inicial.

3.4.3. Ductilidad a 25°C

Los resultados obtenidos de aplicar este ensayo a muestras de las combinaciones 1, 6 y 11 se presentan a continuación en la Tabla 10 y la Figura 19.

Tabla 10. Resultados de ensayo Ductilidad a 25°C y 5 cm/min.

Ductilidad 25°C (cm)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	38	-	-	-	-
	85	27	-	-	-	-
	100	20	-	-	-	-

Fuente: Autores.

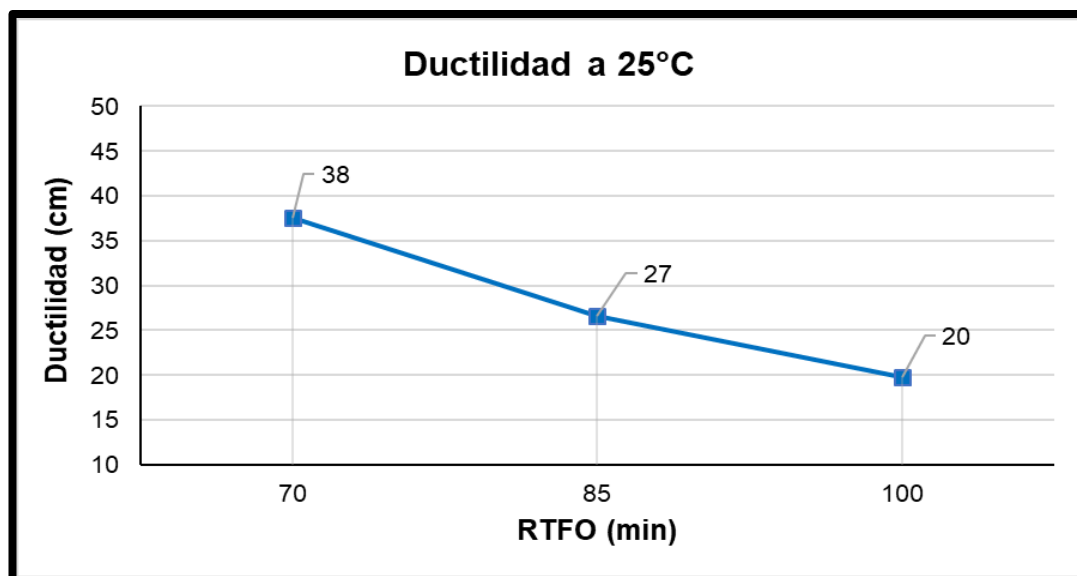


Figura 19. Variación de la Ductilidad con diferentes tiempos RTFO.

Fuente: Autores.

En la Figura 19 se puede observar que en la medida que es mayor el tiempo aplicado en el equipo RTFO disminuye la ductilidad. Por otra parte, la ductilidad determinada con cada uno de los tres tiempos de envejecimiento RTFO empleados, no cumplen lo especificado en la norma vigente de clasificación por grado de viscosidad para el AC-20 o el AC-30, es decir, valores de 50 y 40 centímetros respectivamente.

3.4.4. Viscosidad a 135°C

En la Tabla 11 y en la Figura 20 se presentan los resultados de viscosidad absoluta a 135°C obtenidos para los diferentes tiempos de envejecimientos en RTFO y PAV.

Tabla 11. Viscosidades absolutas obtenidas a 135°C

Viscosidad 135°C (Pa.s)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	0.66	1.06	1.84	3.02	8.87
	85	0.75	1.22	2.24	3.82	10.15
	100	0.83	1.43	2.60	4.45	13.40

Fuente: Autores

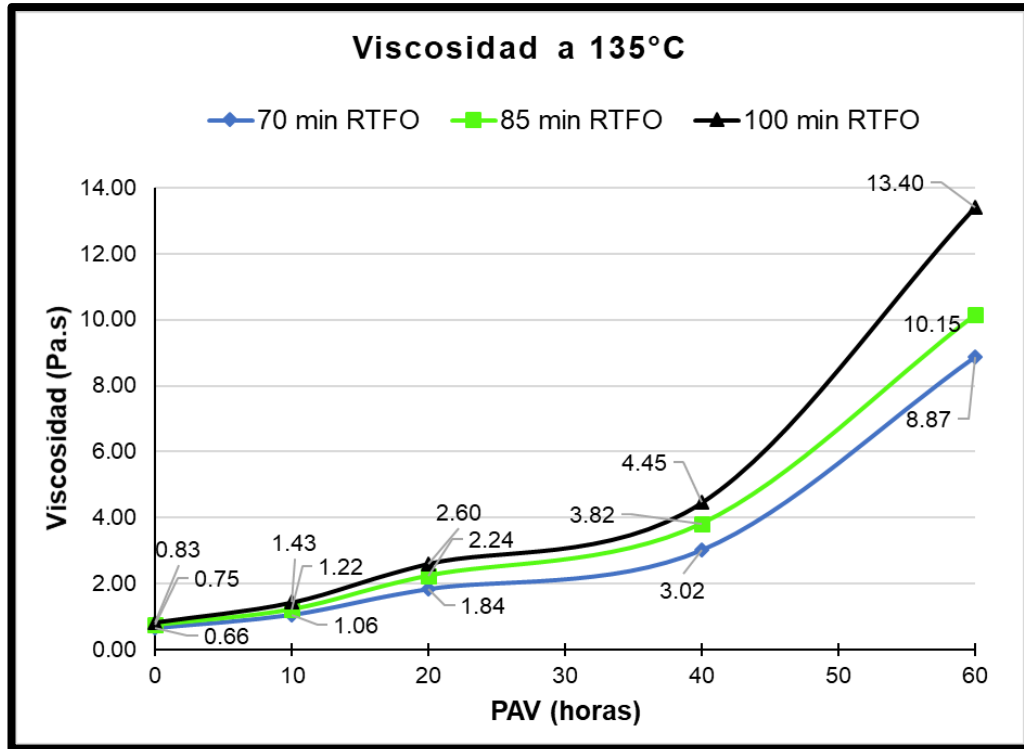


Figura 20. Variación de la viscosidad a 135°C con los tiempos en RTFO
Fuente: Autores

Se puede observar en la Figura 20 que a medida que el asfalto envejece en el laboratorio a partir de un mayor tiempo tanto en el RTFO como en el PAV, este se vuelve mucho más rígido aumentando sus valores de viscosidad. A su vez, se puede evidenciar que al analizar los resultados para 60 horas en PAV en los tres tiempos de RTFO (combinaciones 5, 10 y 15) el asfalto se ha endurecido considerablemente respecto a las demás muestras, lo cual se ve reflejado en el incremento significativo de la viscosidad.

3.4.5. Punto de Ablandamiento

A continuación, en la Tabla 12 y Figura 21 se expondrán los resultados que fueron obtenidos a partir del ensayo de punto de ablandamiento con diferentes tiempos de envejecimiento en RTFO y PAV para todas las combinaciones. Estos resultados permiten determinar la temperatura a la cual el asfalto tendrá fluidez.

Tabla 12. Resultados del punto de ablandamiento

PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	57.50	63.1	70.1	73.0	85
	85	58.6	64.0	70.6	75.0	85
	100	61.0	66.5	71.5	76.5	86

Fuente: Autores

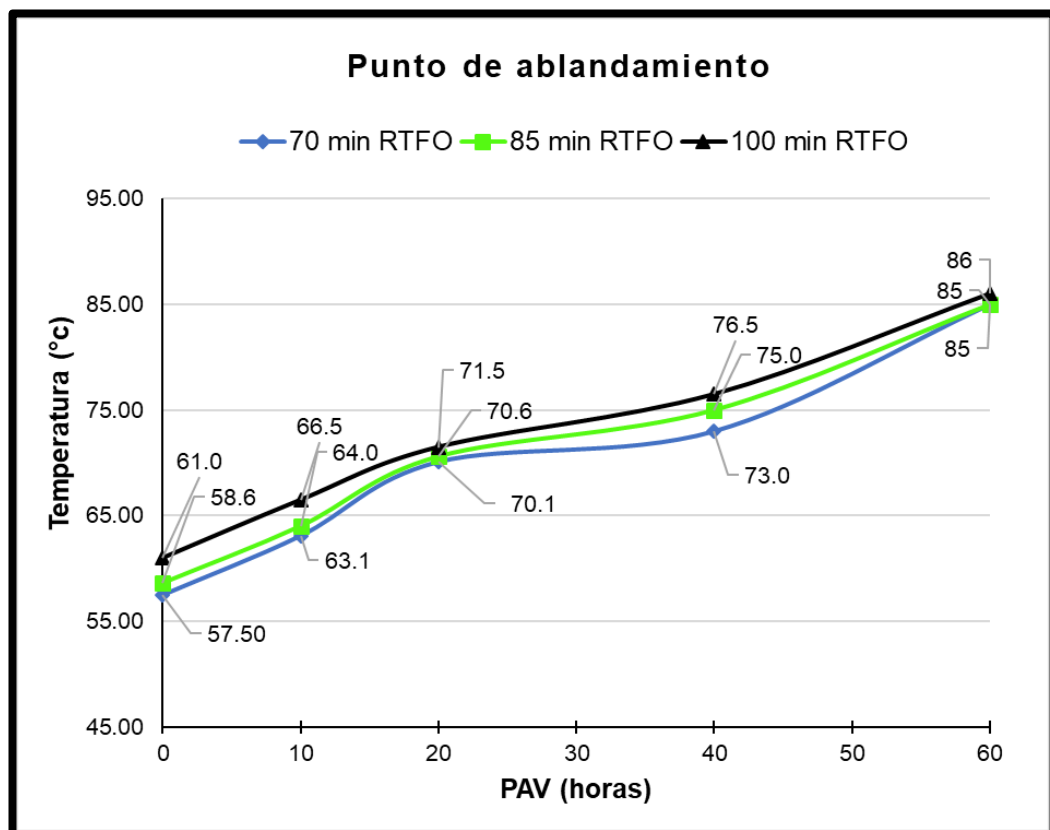


Figura 21. Variación del punto de ablandamiento con los tiempos RTFO

Fuente: Autores

Al observar la Figura 21 se puede determinar que la temperatura con la que el asfalto llega a fluir aumenta de forma gradual a medida que el envejecimiento se torna más severo. Para el asfalto residuo de PAV con 10, 20 y 40 horas, la variación de temperatura en los tres tiempos de envejecimiento en RTFO es representativa. Sin embargo, las muestras a 60 horas PAV se pueden evidenciar que el envejecimiento es igual para cualquier tipo de envejecimiento en RTFO, es decir que la temperatura a la que fluye el asfalto es prácticamente similar.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA AVANZADAS DE ASFALTO

4.1. Curva maestra

La clasificación por grado de desempeño PG del asfalto, basado en la norma AASHTO M320, permite determinar las características reológicas que contienen los ligantes para temperaturas altas, intermedias y bajas en el pavimento. Para completar la caracterización como flujo de los ligantes asfálticos los investigadores llegaron al criterio de desarrollar las curvas maestras (Anderson, Christensen, & Bahia , 1991) (Christensen & & Anderson, 1992).

La curva maestra caracteriza la rigidez del asfalto en un amplio rango de tiempos de carga (frecuencias) y temperaturas. De esta forma, la rigidez podrá ser medida a varias temperaturas y entonces combinada en una sola curva maestra de la manera que se muestra en la Figura 22 aplicando el principio de superposición tiempo- temperatura.

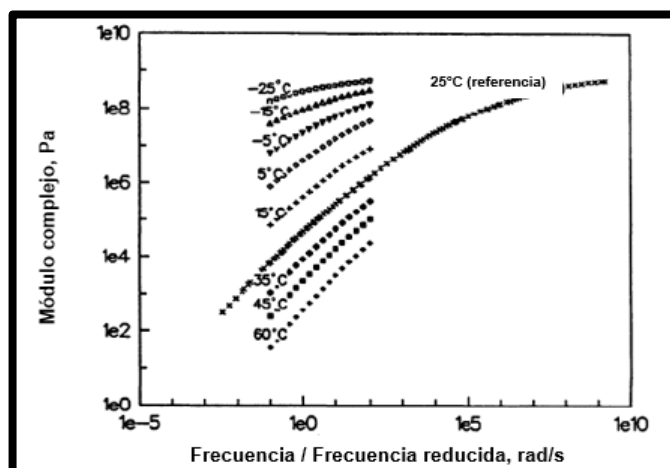


Figura 22. Ejemplo de desarrollo de una curva maestra
Fuente: Caracterización física de asfaltos SHRP-A-369

4.1.1. Parámetros de Curva Maestra

El modelo que presenta Christensen-Anderson para realizar la curva maestra corresponde a varios parámetros con significados físicos específicos (Boosherian, Mogawer , & Bonaquist, 2013). Los mismos se representan en la Figura 23 y son:

- **Módulo Vítreo, G^* :** Es el módulo complejo al que un ligante asfáltico se acerca, pero no excede, a bajas temperaturas y altas frecuencias. El módulo vítreo es normalmente muy cercano a 1 GPa en cargas de corte para la mayoría de los cementos asfálticos. Por lo general, se asume dicho valor para la mayoría de los casos. (Jaramillo, J., León, A., Vila, R., & Villao, A., 2017).
- **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_c :** Este parámetro permite determinar la dureza que tiene el asfalto. La representación está determinada a partir de la componente viscosa (G'') y la elástica (G'), cuando las mismas se igualan. Puede ser determinada a partir de la intersección entre la asíntota viscosa y el módulo vítreo.
- **Índice Reológico, R :** Se define como la diferencia que existe entre el módulo vítreo y el módulo correspondiente a la frecuencia de cruce. A medida que el valor de R se incrementa, la curva maestra se vuelve más plana indicando una transición gradual de un comportamiento elástico a un estado estacionario. En otras palabras, el comportamiento del asfalto a cargas y temperaturas

intermedias va a tender a ser más elástico y menos quebradizo. Comúnmente el valor de R es mayor en asfaltos más envejecidos.

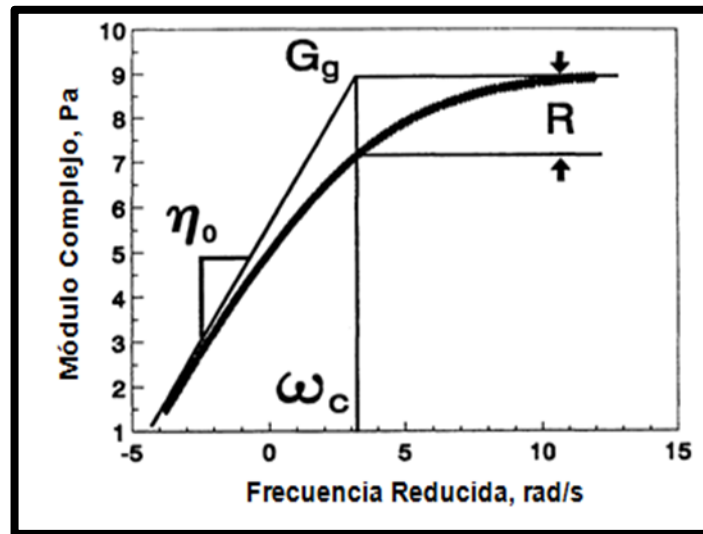


Figura 23. Parámetros dinámicos de la curva maestra para asfaltos.
Fuente: Caracterización física de asfaltos SHRP-A-369

4.1.2. Condiciones de ensayo

Para construir la curva maestra, se utilizan los resultados obtenidos mediante la corrida en el software, misma que fue realizada en el programa Bohlin Software Integrated, misma que es evaluado en equipo DSR. Ver figura 24. Para realizar las curvas mencionadas se tomaron en cuenta varias consideraciones las cuales serán presentadas a continuación:

- Las muestras de asfalto que fueron ensayadas se encuentran tanto en estado original como envejecido en RTFO y PAV.
- La frecuencia con la cual se traba estará en el rango de 0,1 hasta 37,5 Hz.
- El barrido de curvas se realizó con temperaturas que van desde 10°C hasta 70°C, con intervalos de 10°C.

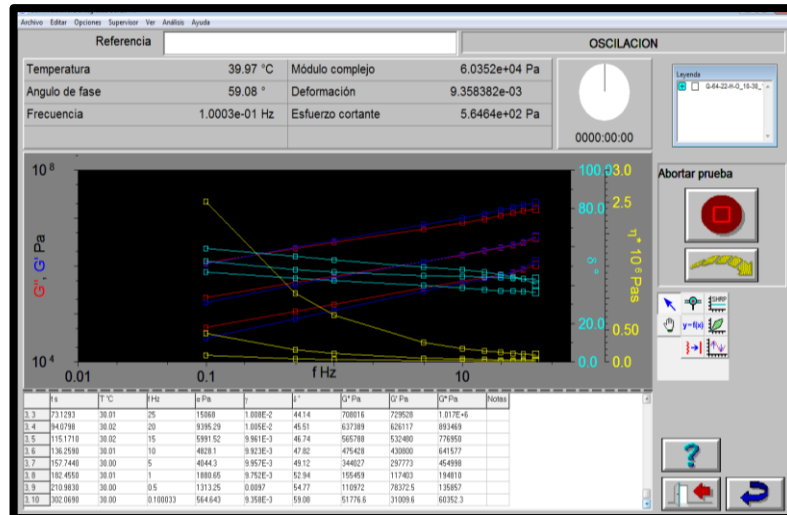


Figura 24. Representación gráfica de una curva maestra
Fuente: Autores

4.1.3. Configuración de las curvas maestras

El equipo DSR mediante el software utilizado brinda una serie de parámetros los cuales son: tiempo (s), temperatura (°C), frecuencia (Hz), módulo elástico (Pa), módulo viscoso (Pa), Viscosidad compleja (Pa.s), esfuerzo cortante (Pa) y la tensión, mismas que aportan una fracción de lo que comprende la realización de las curvas. En la tabla que se presentara a continuación se muestran los resultados, los cuales se obtienen mediante el programa.

Tabla 13. Ejemplo de resultados obtenidos para 10°C

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Angulo de fase (°)	Modulo Complejo (Pa)	Modulo Elastico (Pa)	Modulo Viscoso (Pa)	Viscosidad Compleja (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Tension
31.0263	10	3.75E+01	36.24	2.55E+07	2.06E+07	1.51E+07	1.08E+05	9.94E+04	4.52E-03
62.5101	10	3.00E+01	36.61	2.32E+07	1.86E+07	1.39E+07	1.23E+05	9.96E+04	4.75E-03
93.9967	10	2.50E+01	36.79	2.09E+07	1.67E+07	1.25E+07	1.33E+05	9.96E+04	5.17E-03
125.496	10	2.00E+01	37	1.81E+07	1.45E+07	1.09E+07	1.44E+05	9.95E+04	5.81E-03
157.128	10	1.50E+01	37.58	1.53E+07	1.21E+07	9.32E+06	1.62E+05	9.94E+04	6.77E-03
188.8017	9.99	1.00E+01	38.33	1.26E+07	9.85E+06	7.79E+06	2.00E+05	9.95E+04	8.09E-03
210.2875	10	5.00E+00	39.59	9.27E+06	7.15E+06	5.91E+06	2.95E+05	9.26E+04	1.01E-02
235.0014	10	1.00E+00	42.4	4.56E+06	3.37E+06	3.08E+06	7.26E+05	4.43E+04	9.72E-03
263.5402	10	5.00E-01	43.54	3.36E+06	2.43E+06	2.31E+06	1.07E+06	3.31E+04	9.87E-03
324.2778	10	1.00E-01	46.69	1.57E+06	1.08E+06	1.14E+06	2.50E+06	1.53E+04	9.76E-03

Fuente: Autores

Los resultados presentados en la Tabla 13 permiten realizar graficas la cual relacionan directamente el $\log G^*$ contra el $\log \omega$, esto en función de las siete temperaturas de ensayo.

Realizado el trabajo y a su vez justificado gracias al modelo de Christensen-Anderson-Marasteanu, mediante una hoja de cálculo puede ser elaborada la curva maestra. El desarrollo es sencillo debido a que se logra alcanzar una relación entre las curvas anteriormente calculadas (ver Figura 25) y una curva maestra que corresponde a la temperatura que se toma como referencia.

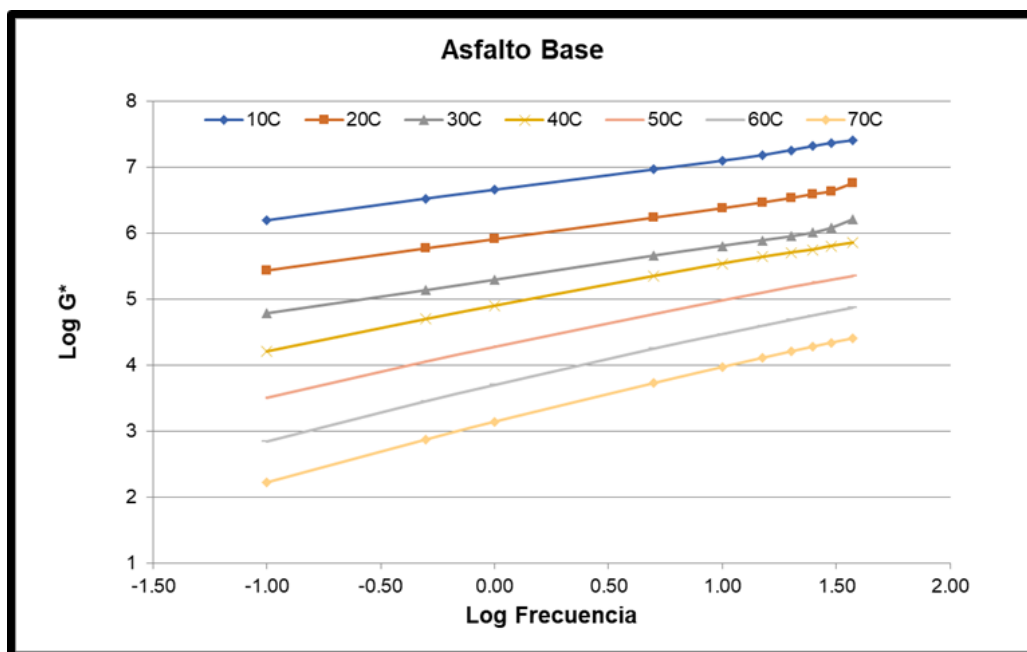


Figura 25. Ejemplo de curvas $\log G^*$ vs $\log \omega$ para distintas temperaturas

Fuente: Autores

Mediante la curva maestra del ligante, pueden ser identificados tres condiciones de bordes (Anderson, Christensen, & Bahia , 1991), las mismas que responden a diferentes comportamientos como son:

- **Asfalto a temperaturas bajas o cortos tiempos de carga:** El asfalto se comporta como un sólido vítreo. El módulo depende del tiempo o de la rigidez, acercándose a valores aproximados a 10Pa en corte, o de 3x10 Pa en tensión-compresión o flexión uniaxial. En esta región, la

rigidez es solo ligeramente dependiente de la temperatura y/o tiempo de carga.

- **A temperaturas o tiempos de carga intermedios:** El asfalto se somete a una transición muy gradual de comportamiento vítreo a fluido. Esta región de transición se caracteriza por un gran retardo o disminución en la elasticidad, significado 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.
- **A temperaturas altas o tiempos de carga prolongados:** el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso. La deformación, en condiciones de bajos o moderados esfuerzos y tasas de deformación puede ser descrita por la ley de fluido newtoniano. La velocidad de deformación cortante es proporcional al esfuerzo cortante.

La Figura 26 que se presenta a continuación, muestra las zonas acordes con el comportamiento viscoelástico que tenga el ligante y los parámetros a los cuales están directamente asociados.

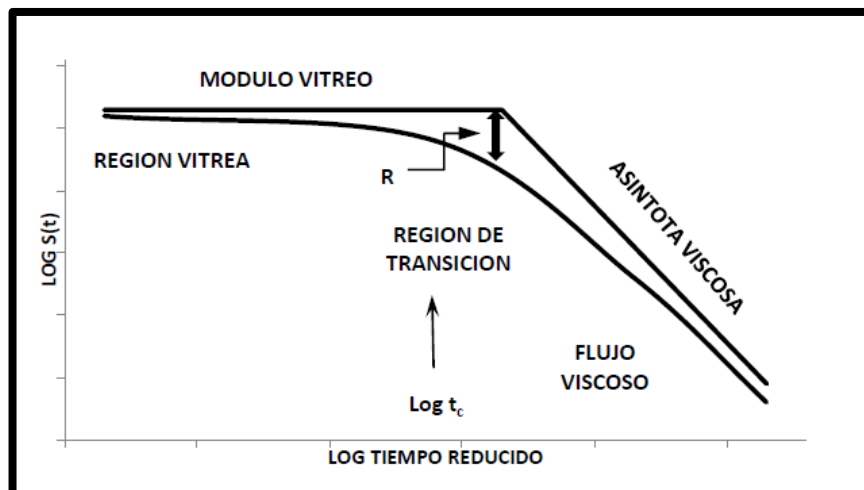


Figura 26. Curva $\text{Log}(t)$ vs Log tiempo reducido

Fuente: Construcción de las curvas maestras del Mástic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y de muestras recuperadas de mezclas en servicio (Cuadro Causil & Osorio Esquivel, 2012)

4.1.4. Curvas Maestras obtenidas

En las Figuras 27, 28 y 29 se muestran las curvas maestras obtenidas para el asfalto base de la refinería de Esmeraldas para las combinaciones de 70, 85 y 100 min en el RTFO respectivamente, con diferentes tiempos de envejecimiento secundario (PAV) y considerando una temperatura de referencia de 30°C.

Nótese que la tendencia que muestra cualquier curva es que a una misma temperatura en la medida que aumenta la frecuencia, es decir, el tiempo de carga disminuye, el módulo complejo va a aumentar.

Como se observa, en la medida que aumenta el tiempo de envejecimiento las curvas se desplazan hacia arriba en el gráfico, dado el incremento del módulo complejo, lo que es consecuente con la rigidización que provoca el envejecimiento en el asfalto y el incremento de su fragilidad.

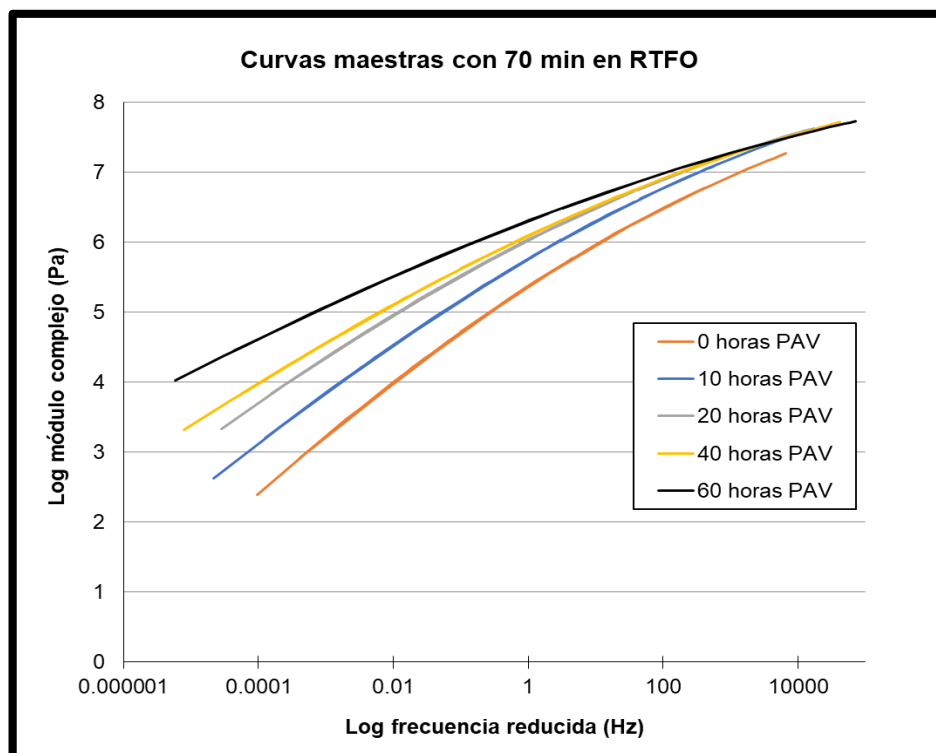


Figura 27. Curvas maestras con 70 minutos en RTFO para diferentes tiempos en PAV
Fuente: Autores

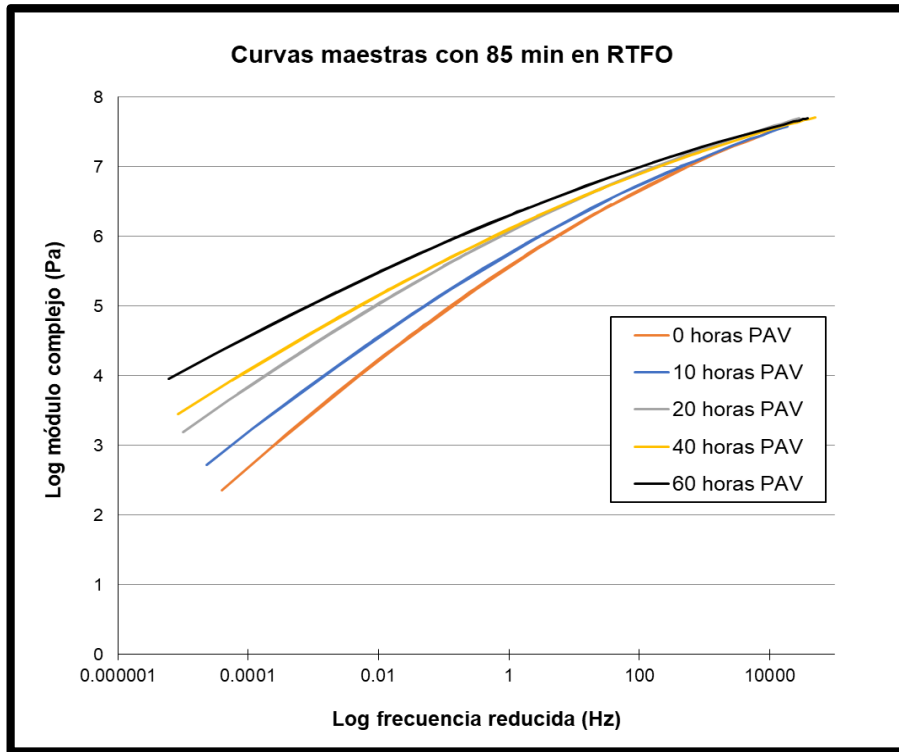


Figura 28. Curvas maestras con 85 min en RTFO para diferentes tiempos en PAV
Fuente: Autores

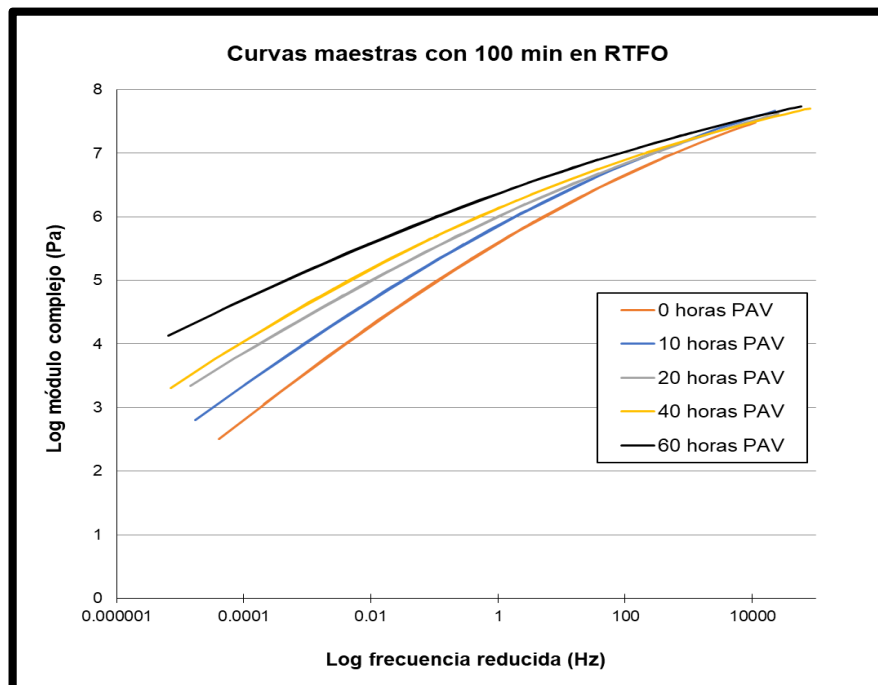


Figura 29. Curvas maestras con 100 min en RTFO para diferentes tiempos en PAV
Fuente: Autores

Las curvas maestras de los tres tiempos de envejecimiento en el RTFO tienen un comportamiento similar ya que aumentan el módulo complejo a medida que incrementan su rigidez (líneas naranjas), además se evidencia que el aumento de los valores de G^* a medida que aumento las horas en el PAV es más notorio. Esta situación se presenta desde las tres curvas iniciales (0 horas PAV), lo cual demuestra la influencia del tiempo que el asfalto se expone durante el proceso de mezcla y transporte a obra. Por consiguiente, es lógico pensar que los asfaltos con menor tiempo de exposición al envejecimiento presentan un menor valor de G^* y por ende estos serán menos propensos a posibles fisuras. Por otra parte, en todas las combinaciones a medida que aumenta la frecuencia, los valores de rigidez tienden a igualarse, acercándose al módulo vitreo.

4.2. Parámetro ΔT_c

Es la diferencia entre las temperaturas críticas bajas del ligante asfáltico obtenidas con el reómetro de viga a flexión (BBR). El cálculo de ΔT_c se determina mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

- **$T_{c,m}$** : la temperatura crítica correspondiente al valor de la pendiente “m” (pendiente de relajamiento de la rigidez) igual a 0.300 con tiempo de carga de 60 segundos.
- **$T_{c,S}$** : la temperatura crítica correspondiente al valor de la rigidez igual a 300 MPa obtenido con tiempo de carga de 60 segundos.

Mientras mayor sea el envejecimiento que presente el ligante, ΔT_c se incrementará de manera secuencial, el cual indicara que el asfalto tendrá perdidas en sus propiedades de relajamiento. Este cambio de temperatura presenta condiciones de borde, las cuales indican a que temperatura puede exhibirse el agrietamiento. Si este valor alcanza los 2.5°C ocurrirá un inicio de agrietamiento, pero si sobrepasa los 5°C el agrietamiento será de modo severo. Este parámetro que se obtiene realizando ensayos a bajas

temperaturas, puede relacionarse al comportamiento del ligante a temperaturas intermedias (Vila R. , 2017).

4.2.1. Resultados del parámetro ΔT_c

Los resultados fueron obtenidos para diferentes tiempos de envejecimiento tanto en el procedimiento RTFO como PAV. A continuación, se presentarán diversas tablas las cuales indican dichos resultados.

Para RTFO con duración de 70 minutos los resultados obtenidos en las pruebas al residuo luego de diferentes tiempos en el PAV se presentan en la Tabla 14 y en la Figura 30.

Tabla 14. ΔT_c en residuos RTFO a 70 min y diferentes tiempos en PAV

ΔT_c (°C), con RTFO 70 minutos			
PAV	Tc,m	Tc,s	ΔT_c
10 h	-23.82	-21.52	-2.29
20 h	-19.78	-22.48	2.71
40 h	-18.38	-21.23	2.85
60 h	-14.56	-21.22	6.66

Fuente: Autores

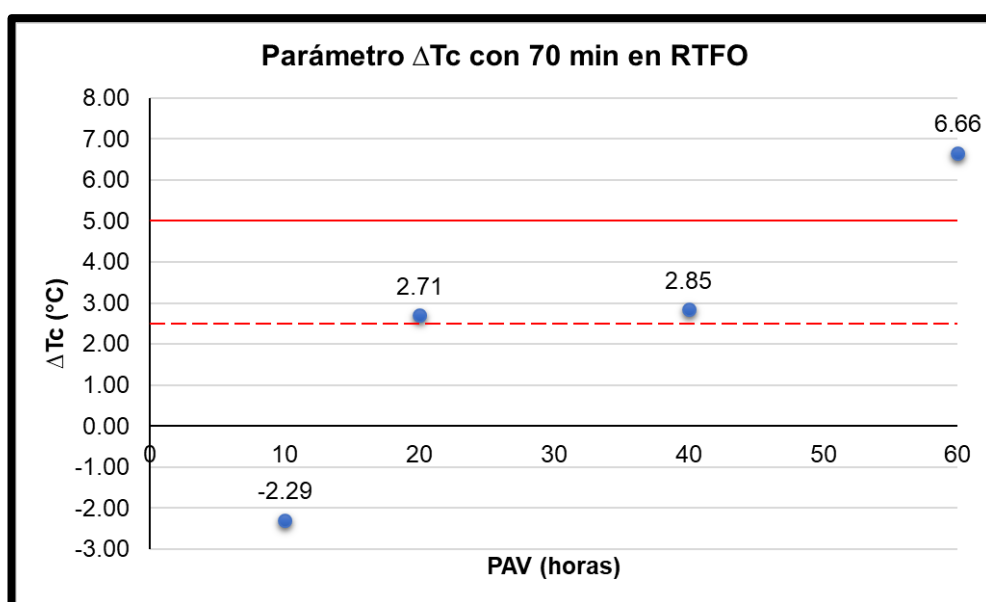


Figura 30. Variación de ΔT_c con RTFO a 70 min y varios tiempos PAV

Fuente: Autores

Para RTFO con duración de 85 minutos los resultados se presentan en la Tabla 15 y en la Figura 31.

Tabla 15. ΔT_c en residuos RTFO a 85 min y diferentes tiempos en PAV.

ΔT_c (°C), con RTFO 85 minutos			
PAV	Tc,m	Tc,s	ΔT_c
10 h	-23.07	-22.11	-0.96
20 h	-17.97	-21.03	3.06
40 h	-18.75	-22.79	4.04
60 h	-14.80	-21.20	6.40

Fuente: Autores.

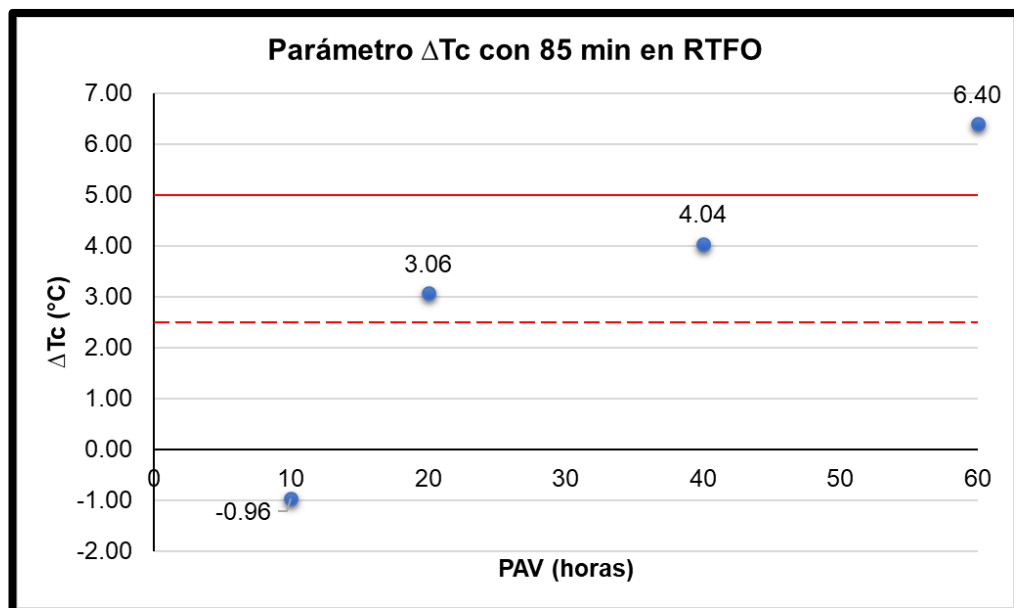


Figura 31. Variación de ΔT_c con RTFO a 85 min y varios tiempos PAV
Fuente: Autores

Para RTFO con duración de 100 minutos los resultados se presentan en la Tabla 16 y en la Figura 32.

Tabla 16. Resultados ΔT_c para RTFO 100 min y todos sus tiempos PAV.

ΔT_c (°C), con RTFO 100 minutos			
PAV	Tc,m	Tc,s	ΔT_c
10 h	-17.95	-21.42	3.47
20 h	-16.34	-21.01	4.67
40 h	-17.87	-22.28	4.41
60 h	-10.87	-20.92	10.05

Fuente: Autores.

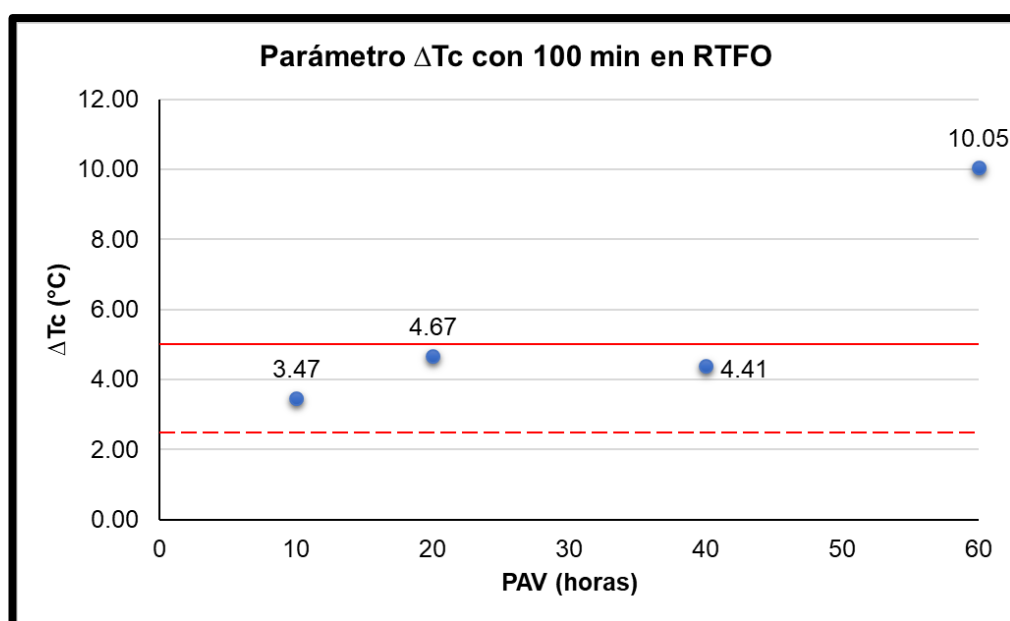


Figura 32. Variación de ΔT_c con RTFO a 100 min y varios tiempos PAV
Fuente: Autores

Para 70 minutos en horno de película delgada puede evidenciarse que a 10 horas PAV no se presentara agrietamiento, debido a que está muy por debajo del límite en el cual el asfalto iniciaría su proceso de agrietamiento. A medida que avanza con el envejecimiento en PAV, los tiempos de 20 y 40 horas ya presentan agrietamiento debido a que la variación de temperatura para ambos se encuentra en zona de transición. Mientras que para 60 horas PAV el asfalto se agrietó en su totalidad.

Analizando para 85 minutos RTFO, puede notarse que para 10 horas el asfalto tiene buen comportamiento debido a que se encuentra alejado del inicio de agrietamiento. A medida que avanza con el envejecimiento PAV ya para 20 y

40 horas este ya se encuentra situado en zona de agrietamiento, el ligante presentara fallas por agrietamiento. Mientras que para 60 horas PAV se tiene un agrietamiento total.

Transcurridos los 100 minutos en RTFO el asfalto experimenta agrietamiento para todos sus tiempos PAV, tanto como para 10, 20 y 40 horas estos ya se encuentran en zona de transición, pero para 60 horas PAV el asfalto ya presenta severos problemas de agrietamiento.

Realizando una comparación entre las tres gráficas, puede comentarse que las tendencias fueron las mismas y el comportamiento basado en los límites indicados para el agrietamiento es muy similar, con la excepción del RTFO con 100 min donde ya para un tiempo en PAV de 10 horas el asfalto entra en zona de agrietamiento.

4.3. Ductilidad según Kandhal

El criterio de Kandhal desarrollado en 1977 a partir de asfaltos recuperados en carreteras, relaciona la ductilidad a temperaturas bajas en el cemento asfáltico frente al daño que se produce por agrietamientos debido al envejecimiento en las mezclas asfálticas. El ensayo debe cumplir ciertos criterios como son una temperatura de 15.6°C y una velocidad de estiramiento en el ductilímetro de 1 cm/min (Kandhal, 1977).

Kandhal determinó rangos de comportamiento del asfalto en función de dicha ductilidad, si se encuentra por debajo de los 10 cm reflejará una pérdida de áridos superficiales en la mezcla, a su vez si se encuentra por debajo de los 8 cm empezará a visualizarse una pérdida de agregados gruesos. El problema de agrietamiento aparece cuando la ductilidad se encuentra por debajo de los 5 cm, pero si este se encuentra por debajo de los 3 cm el agrietamiento en la mezcla asfáltica será del orden destructivo y las condiciones de rodadura en dicho pavimento no serán las idóneas.

4.3.1. Resultados del criterio de Kandhal

Los resultados obtenidos mediante este criterio se presentan a continuación en la Tabla 17 y Figura 33.

Tabla 17. Resultados de la ductilidad según Kandhal en las combinaciones del diseño experimental

Ductilidad según Kandhal (cm)		PAV (h)				
		0	10	20	40	60
RTFO (min)	70	15.88	6.1	4.3	3.7	2.5
	85	13.4	5.6	4.2	3.5	2.5
	100	9.5	5.0	3.7	3.2	2.5

Fuente: Autores

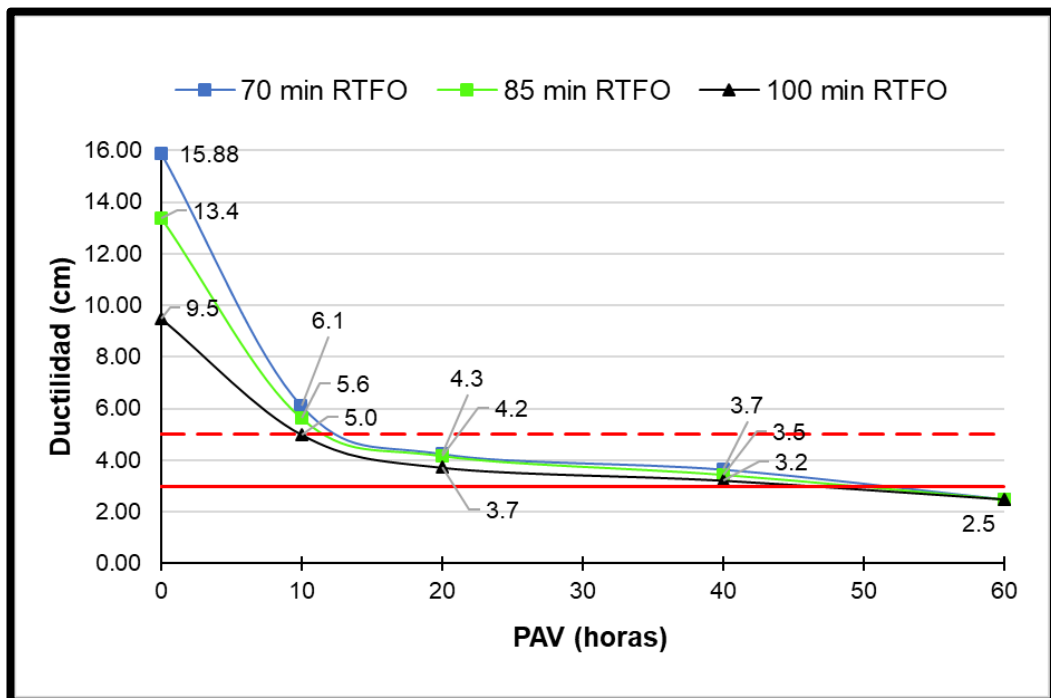


Figura 33. Variación de la ductilidad Kandhal en las combinaciones
Fuente: Autores

Observando la Figura 33, se aprecia que el ligante envejecido para los tres tiempos de RTFO sin PAV tiene buen comportamiento frente al agrietamiento y sus ductilidades se mantienen alejadas de los límites. Mientras mayor sea el tiempo de envejecimiento en RTFO la ductilidad será menor debido a que el asfalto se torna más rígido.

A medida que aumenta el envejecimiento empleando la cámara de presión PAV, se observa que para 10 horas en todos los casos hay un acercamiento a la zona de peligro, especialmente en la combinación con 100 min en RTFO. En cuanto avanza el envejecimiento PAV tanto para 20 y 40 horas, el asfalto con los tres tiempos RTFO ya ingresa en zona de transición, es decir, ya presentará agrietamiento en forma moderada. Envejecido a 60 horas en PAV luego de cualquiera de los tres tiempos en RTFO, el asfalto se encontrará totalmente agrietado.

Considerando que para el envejecimiento en RTFO de 85 min y luego PAV de 20 horas, usual en la clasificación PG, la calidad del asfalto se asemeja a la que tendría luego de 7 a 10 años de colocado en obra, puede estimarse que nuestro asfalto ya estará en zona de deterioros por agrietamiento y durabilidad.

4.4. Criterio de Glover – Rowe

En el año 2011 se desarrolló el llamado parámetro de daño Glover-Rowe (G–R) obtenido de pruebas DSR con barrido de frecuencia a 15°C y 0.005 rad/s (King & et al, 2012). Este criterio esta desarrollado bajo la siguiente expresión:

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

Glover – Rowe cuenta con una zona de daños definida, la que permite determinar el inicio del agrietamiento en bloques, provocado a partir de los 180 kPa y de los daños significativos, a partir de los 600 kPa. Estos límites fueron obtenidos a partir de correlaciones entre los resultados del DSR y las pruebas de ductilidad realizadas con los criterios de Kandhal (Anderson M. , 2014). Los límites anteriores responden a las expresiones:

$$G - R = G * \frac{(\cos \delta)^2}{\text{sen } \delta} = 180 \text{ Kpa}$$

$$G - R = G * \frac{(\cos \delta)^2}{\sin \delta} = 600 \text{ Kpa}$$

4.4.1. Resultados del criterio de Glover – Rowe

Los resultados obtenidos mediante el criterio de Glover – Rowe serán presentados a continuación en la Tabla 18 y en la Figura 34.

Tabla 18. Resultados del criterio Glover – Rowe en las combinaciones del diseño experimental

RTFO 70 min			
PAV (h)	δ (°)	G* (Pa)	LOG G* (Pa)
0	60.7	31501	4.498
10	55.1	94836	4.977
20	50.7	164738	5.217
40	46.2	310925	5.493
60	36.5	536619	5.730
RTFO 85 min			
PAV (h)	δ (°)	G* (Pa)	LOG G* (Pa)
0	55.9	46172	4.664
10	51.0	100800	5.003
20	46.9	188236	5.275
40	37.6	371334	5.570
60	30.6	505162	5.703
RTFO 100 min			
PAV (h)	δ (°)	G* (Pa)	LOG G* (Pa)
0	53.0	50474	4.703
10	50.6	110381	5.043
20	44.8	258726	5.413
40	36.7	452500	5.656
60	30.3	636467	5.804

Fuente: Autores

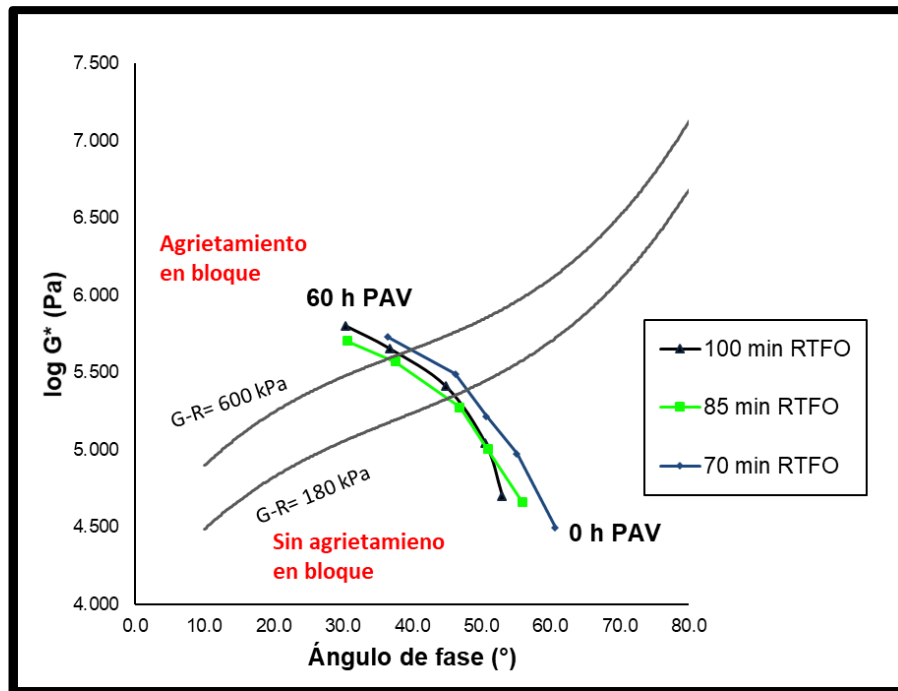


Figura 34. Variación del parámetro G - R en las combinaciones
Fuente: Autores

En la Figura 34 puede observarse el cambio del módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) que experimenta un asfalto para diferentes tiempos de envejecimientos. Para 0 h y 10 h en el PAV los comportamientos de las tres variantes de tiempos en el RTFO se encuentran en zona de no daño por agrietamiento. Sin embargo, a las 20 horas la variante con 100 minutos RTFO ya se encuentra en zona de daño, mientras que las demás no inician su agrietamiento.

A las 40 horas las variantes con 70 y 85 min RTFO ya ingresan a zona de agrietamiento, en tanto que la restante se encuentra en zona de fisuras intensas. Finalmente, a 60 horas las tres variantes estudiadas se localizan en la zona correspondiente a un pavimento fuertemente agrietado.

Vale destacar que la variante con 70 minutos en el RTFO presenta en todos los casos características menos rígidas que las demás al tener valores menores de G^* y δ , evidenciando la influencia directa del tiempo de envejecimiento en el RTFO.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Al analizar el asfalto ecuatoriano se obtiene como resultado que en su estado original el asfalto se comporta como un AC-30 según la clasificación por viscosidad, aunque después de envejecido en horno RTFO no cumple con las exigencias correspondientes a dicho grado. Por otra parte, al observar la clasificación según el grado de desempeño la muestra clasifica como un PG 64-22, resultado técnicamente adecuado para nuestro medio según las condiciones climáticas del Ecuador. Llama la atención que esta clasificación no detecta el fenómeno de excesivo envejecimiento que se visualiza en la clasificación por viscosidad.

Respecto a las pruebas realizadas directamente al residuo del RTFO (sin PAV), el ensayo de viscosidad dinámica a 60°C determinó que la muestra con 70 min de envejecimiento es la única que cumple la exigencia de la norma para AC-30, máximo 1200 Pa.s, quedando fuera del límite permitido las combinaciones con tiempos de 85 y 100 min, las cuales posiblemente clasificarían como un AC-42. En las pruebas de cambio de masa se observa que en todos los casos existe pérdida de masa de signo negativo, es decir, la masa en el residuo disminuyó, cumpliendo todos con la exigencia (máximo 1%). Al examinar los valores de ductilidad a 25°C se evidencia que ninguna de las combinaciones alcanza el valor mínimo establecido de 40 cm para clasificar como un AC-30, lo cual podría ser síntoma de un excesivo envejecimiento en nuestro asfalto.

Respecto al parámetro ΔT_c se evidencia que el asfalto en condiciones de bajo envejecimiento, o sea, con 70 y 85 min en RTFO más 10 h en PAV no debe presentar problemas de agrietamiento. Sin embargo, al incrementarse el tiempo en el PAV a 20 y 40 horas las muestras entran en la zona de agrietamiento. De igual manera, la combinación con 100 min en RTFO y 10 horas en PAV también se encuentran en dicha zona. Para todos los tiempos

analizados en RTFO se generan con 60 horas en PAV problemas severos de agrietamiento.

Al evaluar el asfalto por medio del criterio de Kandhal, se pudo determinar que el ligante envejecido para cualquiera de los tiempos analizados en el RTFO y con PAV de 20 o 40 horas ya se encuentra en la zona de falla. Para el tiempo siguiente de 60 horas todas las muestras estarían en zona de falla total, llamando la atención que los valores coinciden en un valor de ductilidad igual a 2.5 cm.

Los resultados obtenidos en el criterio de Glover-Rowe respecto a la posición de los puntos en la zona de falla son bastante similares a los obtenidos aplicando el criterio de Kandhal. Es decir, que en general para todos los tiempos en el RTFO y con PAV de 20 o 40 horas ya se encuentra en la zona de falla o muy cercana a esta. Para 60 horas en el PAV las tres combinaciones correspondientes se encuentran en zona de agrietamiento total.

Más allá de la calidad de nuestro asfalto según las pruebas de clasificación realizadas, las pruebas reológicas avanzadas nos permiten concluir que empleando los tiempos de envejecimiento usuales: RTFO de 85 min y PAV de 20 h, nuestro asfalto se encuentra en zona de falla por agrietamiento y durabilidad, destacándose que dicho tiempo en el PAV provocaría una calidad en el asfalto similar a un tiempo de colocación en obra entre 7 y 10 años, algo que también es objeto de estudio en el Laboratorio de Carreteras.

5.2. Recomendaciones

- a) Ante los resultados obtenidos se recomienda emplear aditivos para contrarrestar elevado envejecimiento de nuestro asfalto en el proceso de fabricación de mezclas en caliente, para ello pudiera valorarse el empleo de: aditivos rejuvenecedores, aditivos que permitan utilizar temperaturas de trabajo más bajas en planta o algunos tipos particulares de polímeros.
- b) Profundizar el estudio con respecto al envejecimiento que presenta el asfalto producido en la Refinería de Esmeraldas y su comportamiento en mezclas producidas con diferentes tipos de agregados y envejecidas a nivel de laboratorio.
- c) Realizar estudios con asfaltos recuperados de diferentes obras y con distintos niveles de deterioros que permitan precisar los tiempos de envejecimiento de nuestro asfalto en las pruebas de laboratorio RTFO y PAV, así como ajustar las zonas de agrietamiento correspondientes a las pruebas reológicas avanzadas.

REFERENCIAS

- Anderson, A., Christensen, D., Bahia, H., Dongre, R., Sharma, M., & Antle, C. (1994). Binder Characterization and Evaluation . 3rd ed.
- Anderson, D., Christensen, D., & Bahia , H. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.
- Anderson, M. (2014). Asphalt Binder Characteristic Affecting Durability Cracking. Material Conference. Tempe.
- Anderson, R., King, G., Hanson, D., & Blankenship, P. (2011). Evaluation of the relationship between asphalt binder properties and non-load related cracking. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 80. .
- Araya, F., González, A., Delgadillo, R., Wahr, C., García, G., & Zúñiga, R. (2012). Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. Revista Ingeniería de Construcción. , (Vol. 27 N°3, p. 4-7).
- Arenas, H. L. (2000). Tecnología del cemento asfáltico. Cali.
- Asphalt Institute. (1995). Superpave performance, graded asphalt binder specification and testing. Lexington, Kentucky USA.
- Aveñado, K., & López, P. (Abril 2017). Construcción de curvas maestras mediante la caracterización de mezclas asfálticas en caliente obteniendo el módulo dinámico de: plantas asfálticas dentro de la provincia de Imbabura. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Boosherian, A., Mogawer , W., & Bonaquist, R. (2013). How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between rap and virgin Binders. Journal of materials in civil engineering, (p.3).

- Cardenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelacion del Comportamiento Reologico de Asfalto Convencional y Modificado con Polimero reciclado, estudiada desde la relacion viscosidad-temperatura. EIA.
- Christensen, D. W., & Anderson, D. A. (1992). Dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements (with discussion). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 61. Retrieved from. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=486935>.
- Cuadro Causil, C., & Osorio Esquivel, J. (2012). Construcción de las curvas maestras del Mástic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y de muestras recuperadas de mezclas en servicio. España.
- ECOPETROL. (2013, Enero 21). Slide Serve. Retrieved from <https://www.slideserve.com/denna/importancia-de-la-quimica-del-asfalto-en-sus-propiedades-fisicas>
- Fernández Gómez, W. D., Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2011). Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas. Estado del conocimiento.
- Fernandez, J. (1983). Pavimentos bituminosos en frío. Barcelona: Editores técnicos asociados S.A.
- Hveem, F. N., Zube, & Skog. (1963). Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts. In Proc. Assn. Asphalt Paving Technol (pp. 247-327).
- INEN, 2. (2010). "Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (clasificación por viscosidad). Requisitos". Quito, Pichincha, Ecuador.
- Jin, X. (2012). Asphalt oxidation kinetics and pavement oxidation modeling. Texas.
- Kandhal, P. (1977). Low-Temperature Ductility in Relation to Pavement Performance. In ASTM STP 628 (pp. 95-106). USA.

- King, G., & et al. (2012). Using Black Space Diagrams to Predict Age-Induced Cracking. RILEM 2012 Cracking Conference, (pp. pp. 1-11). Delft. The Netherlands.
- López, T., & Miró, R. (2015). El envejecimiento en mezclas asfálticas. Cataluña: N. 5 Cuadernos tecnologicos de la PTC.
- Márquez, M. F., & Ureta, N. E. (2018). Estudio del efecto de rejuvenecedores en el asfalto ecuatoriano. Guayaquil.
- Martínez, G., & Caicedo, B. (2005). Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas. Bogotá D.C, Colombia.
- Menapace, I., Yiming Wubulikasimu, & Eyed, M. (2017). Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods.
- Mera, W., & Icaza, K. (2018). Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Guayaquil: Tesis.
- Norma-CMT-4-05-001. (2005). Características de los materiales. México.
- Vallerga, Monismith, C. L., & Granthem, K. (1957). A study of some factors influencing the weathering of paving asphalt. In Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (pp. 126-150).
- Vila, R. (2017). Estudio del asfalto ecuatoriano a temperaturas intermedias con la tecnología superpave. CILA XIX. Medellín.
- Vila, R. (2018). Cementos asfálticos. Generalidades. Caracterización química, física y reológica. Guayaquil.
- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., & Troya, H. (2017, Noviembre). Estudio del asfalto ecuatoriano a temperaturas intermedias con la tecnología superpave. XIX CILA.
- Villao, A., & León, A. (2017). Caracterización reológica avanzada de asfaltos. Guayaquil, Ecuador: Tesis.

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

Villegas, R., Aguiar, J., & Loria, L. (n.d.). Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos. Memorias XVIII CILA, ISBN 978-950-630-031-9., 1-(209-219).

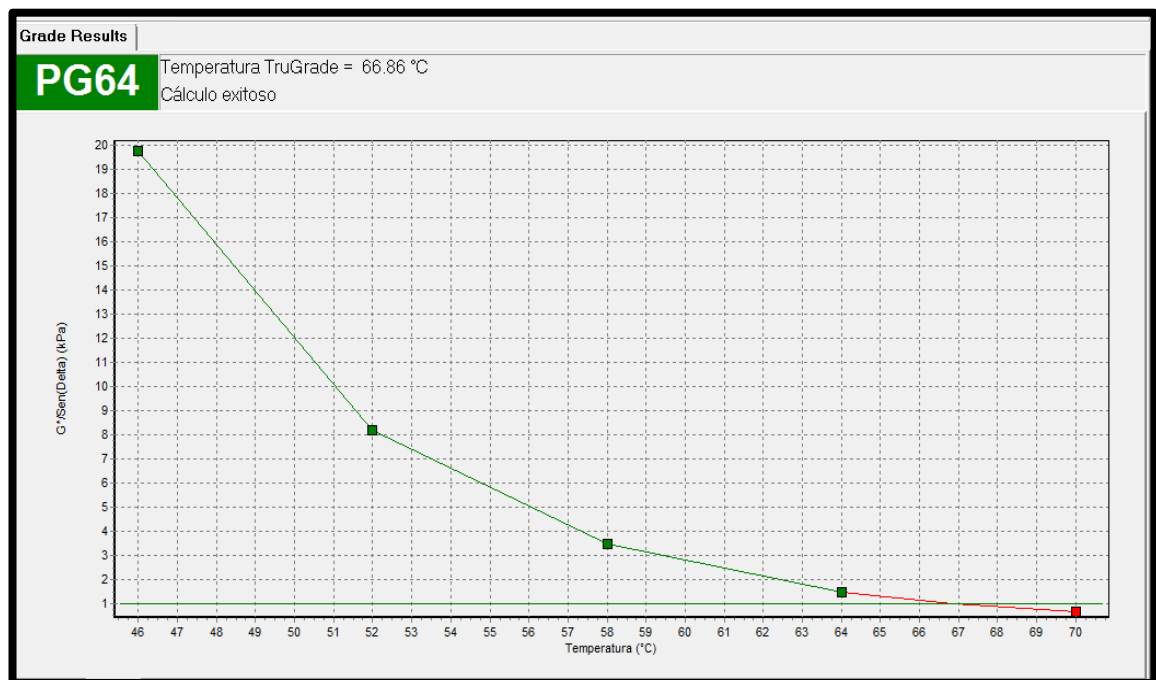
Wulf , F. A. (2008). Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Valdivia.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la clasificación por grado de desempeño PG del programa Bohlin TruGrade en DSR

PG64		Temperatura TruGrade = 66.86 °C Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5	
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	
G*/Sen(Delta) (kPa)	19.8	8.2	3.44	1.47	0.652	
Notas						
Angulo de fase (°)	71.1	74.8	78.1	80.6	82.1	
Módulo complejo (kPa)	18.7	7.91	3.37	1.46	0.646	
Temperatura (°C)	46.00	51.98	58.00	64.00	70.01	
Deformación (%)	12.18	11.85	11.97	11.98	12.04	
Esfuerzo cortante (Pa)	2274.6	936.181	402.236	173.563	77.253	
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	

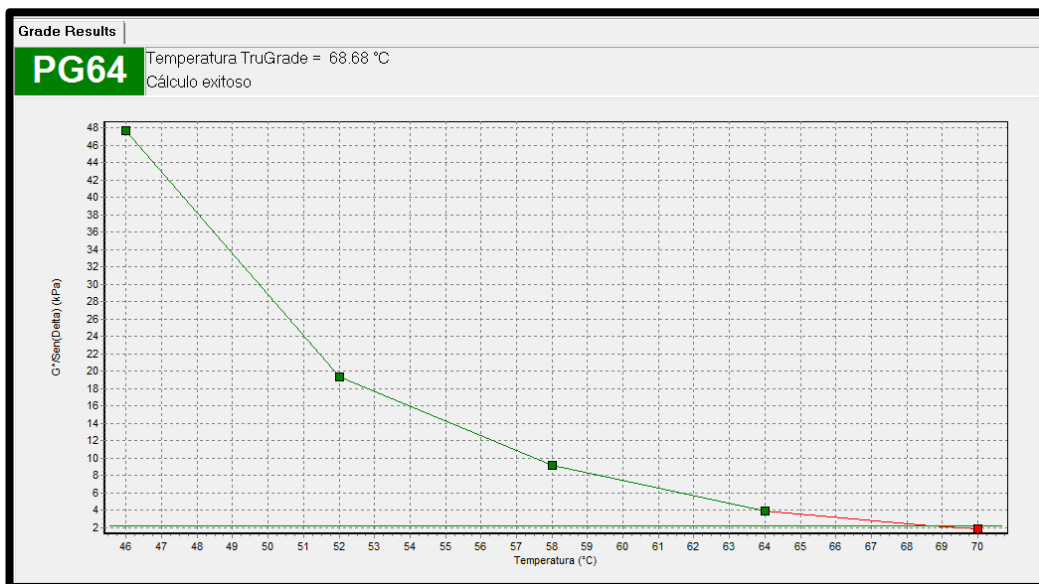
Resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto en estado Original.



Gráfica de resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto en estado Original.

Grade Results					
PG64	Temperatura TruGrade = 68.68 °C				
	Cálculo exitoso				
	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*/Sen(Delta) (kPa)	47.7	19.3	9.22	3.89	1.87
Notas	21	21			
Angulo de fase (°)	61.8	65.4	69.3	72.9	76.0
Módulo complejo (kPa)	42	17.6	8.62	3.72	1.82
Temperatura (°C)	46.00	52.00	58.00	64.00	70.00
Deformación (%)	7.76	10.63	10.36	10.07	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.73	1864.12	891.727	373.265	181.283
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200	15/10/200

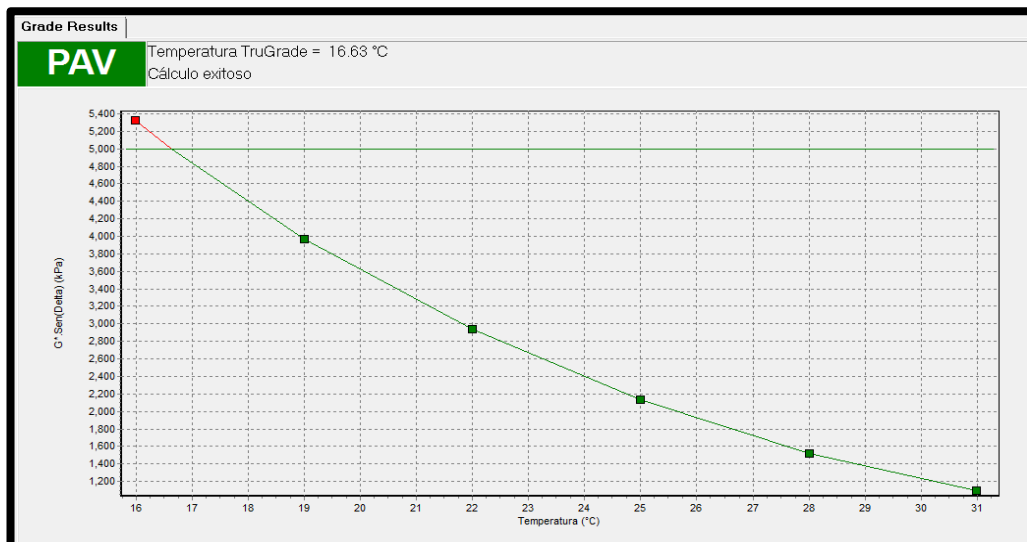
Resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto Envejecido RTFO.



Gráfica de resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto Envejecido RTFO.

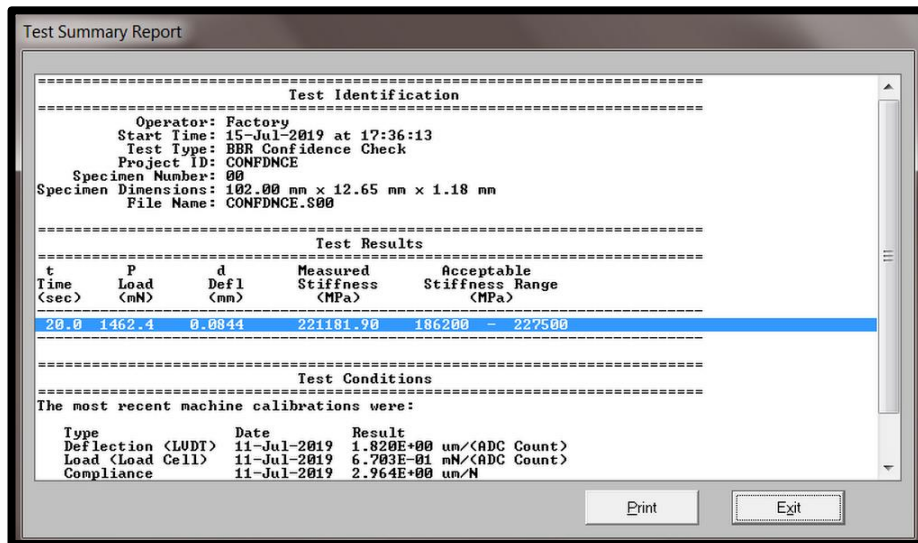
Grade Results						
PAV	Temperatura TruGrade = 16.63 °C					
	Cálculo exitoso					
	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*.Sen(Delta) (kPa)	1.1E3	1.52E3	2.14E3	2.93E3	3.97E3	5.32E3
Notas						
Anqulo de fase (°)	41.6	40.1	38.5	37.0	35.6	34.1
Módulo complejo (kPa)	1.65E3	2.36E3	3.44E3	4.88E3	6.82E3	9.51E3
Temperatura (°C)	30.99	28.00	25.00	22.00	19.00	15.99
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Esfuerzo cortante (Pa)	16624.4	23820.2	34556.2	49045	68821.8	95650.1
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03

Resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto Envejecido en PAV.

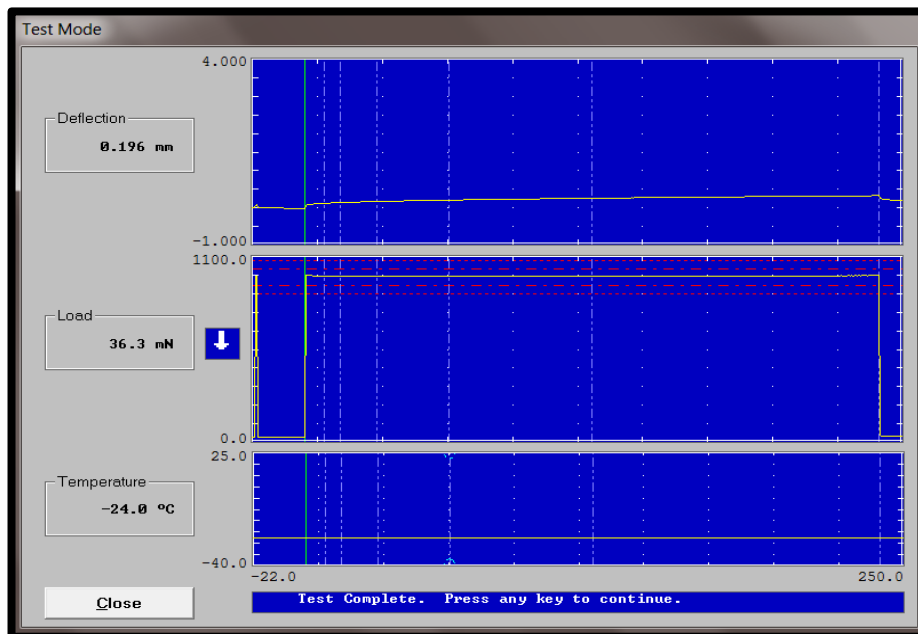


Grafica de resultado del programa Bohlin TuGrade en Equipo DSR.
Asfalto Envejecido en PAV.

Anexo 2. Resultados para determinar parámetro ΔT_c del programa Bohlin TruGrade en BBR



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: V-J
 Start Time: 15-Jul-2019 at 17:40:45
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS
 Specimen Number: 26
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS.S26

=====

Test Results

=====

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	n-value
0.0	30.4	0.0104	--	--	--	--
0.5	987.6	0.0659	--	--	--	--
8.0	985.6	0.1229	660.2092	659.3534	-0.129628	0.233547
15.0	985.3	0.1436	564.6207	565.6741	0.186554	0.254011
30.0	984.2	0.1722	470.2416	470.6577	0.008488	0.276575
60.0	983.4	0.2595	385.0534	385.3242	-0.141107	0.299469
120.0	984.0	0.2602	311.1809	310.8891	-0.093764	0.321703
240.0	986.9	0.3294	246.5929	246.8124	0.089018	0.344267
250.0	36.3	0.1963	--	--	--	--

=====

Correlation Coefficient R² = 0.999993

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).

Test Summary Report

=====

Regression Coefficients: A = 5.999466, B = -0.165855, C = -0.037478

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 983.1 and 987.7 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 984.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 3.1 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -24.0 and -23.9 C.

=====

Test Conditions

=====

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

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

The most recent machine calibrations were:

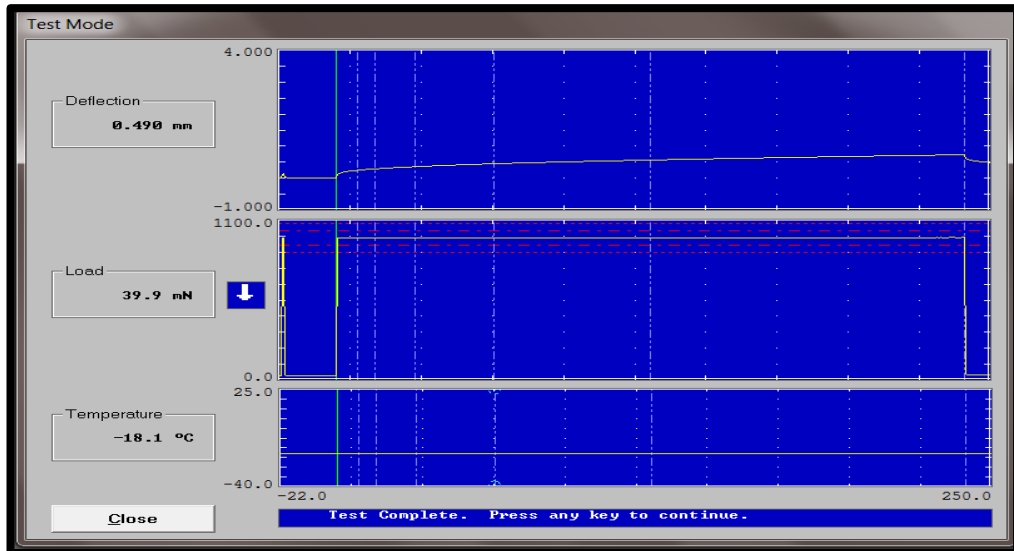
Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	15-Jul-2019	2.212E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:
 ENSAYO A -24C CON RTFO 70 MIN Y PAV 10 HORAS

=====

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-18°C).

Test Summary Report

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

Operator: Factory
 Start Time: 11-Jul-2019 at 13:15:27
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: DEFAULT
 Specimen Number: 0
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: _DEFAULT.S0

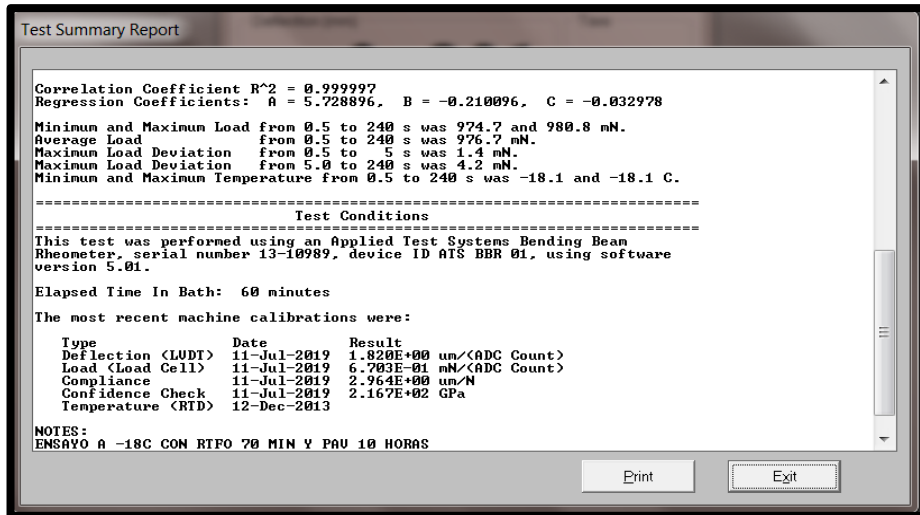
=====
Test Results
 =====

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	n-value
0.0	33.0	0.0005	--	--	--	--
0.5	977.5	0.1192	--	--	--	--
8.0	976.9	0.2469	325.5823	325.2850	-0.091290	0.269660
15.0	975.5	0.2945	272.5897	273.0164	0.156536	0.287666
30.0	975.6	0.3614	222.1694	222.1284	-0.018450	0.307521
60.0	975.1	0.4302	178.2691	178.2554	-0.007626	0.327325 *
120.0	975.9	0.5686	141.2435	141.0927	-0.106732	0.347230
240.0	980.6	0.7332	110.0766	110.1513	0.067859	0.367884
250.0	39.9	0.4901	--	--	--	--

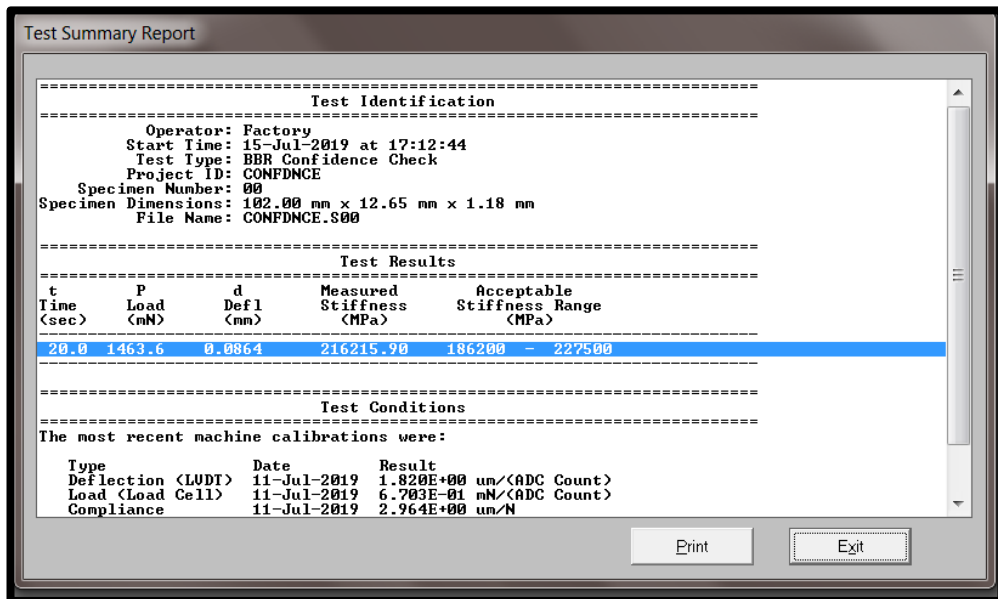
Correlation Coefficient R^2 = 0.999997

Print Exit

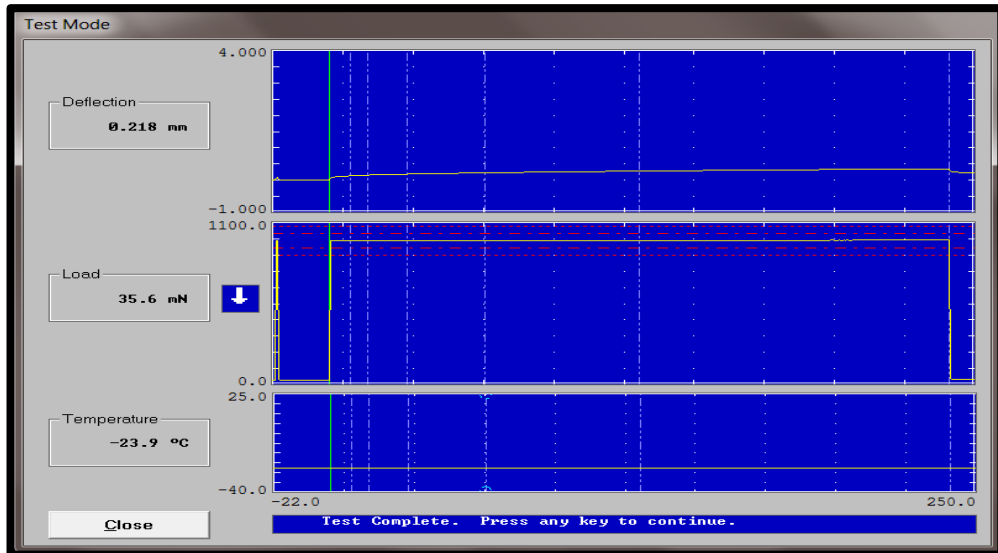
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-18°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).

Test Summary Report

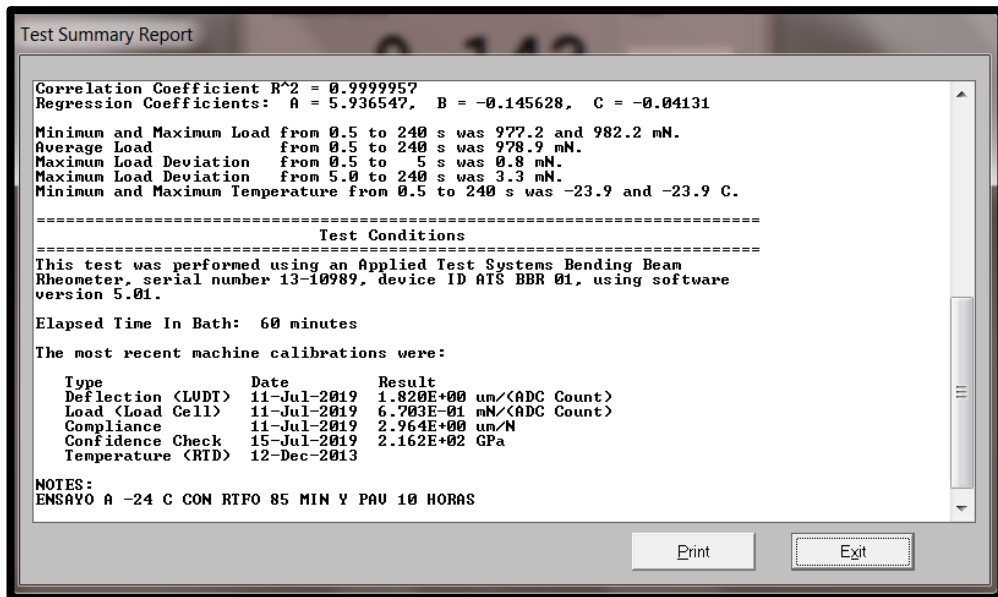
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: W-J
Start Time: 15-Jul-2019 at 17:17:58
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: W-J 25
Specimen Number:
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: W-J 25.S
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured  Estimated
Time  Load  Defl   Stiffness  Stiffness  Difference  m-value
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)     (MPa)     (N)        (N)
-----
0.0   30.0   0.0022  --         --         --         --
0.5   979.4  0.0741  --         --         --         --
8.0   978.3  0.1363  590.8065  590.6655  -0.023847  0.220240
15.0  977.8  0.1577  510.2303  510.6660  0.005403   0.242795
30.0  977.9  0.1880  428.1113  427.8631  -0.057986  0.267666
60.0  978.0  0.2282  352.7456  352.3578  -0.169517  0.292587 *
120.0 977.6  0.2826  284.7391  285.2199  0.168869  0.317408
240.0 982.0  0.3559  227.0697  226.9274  -0.062644  0.342279
250.0 35.6   0.2181  --         --         --         --
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999957
=====

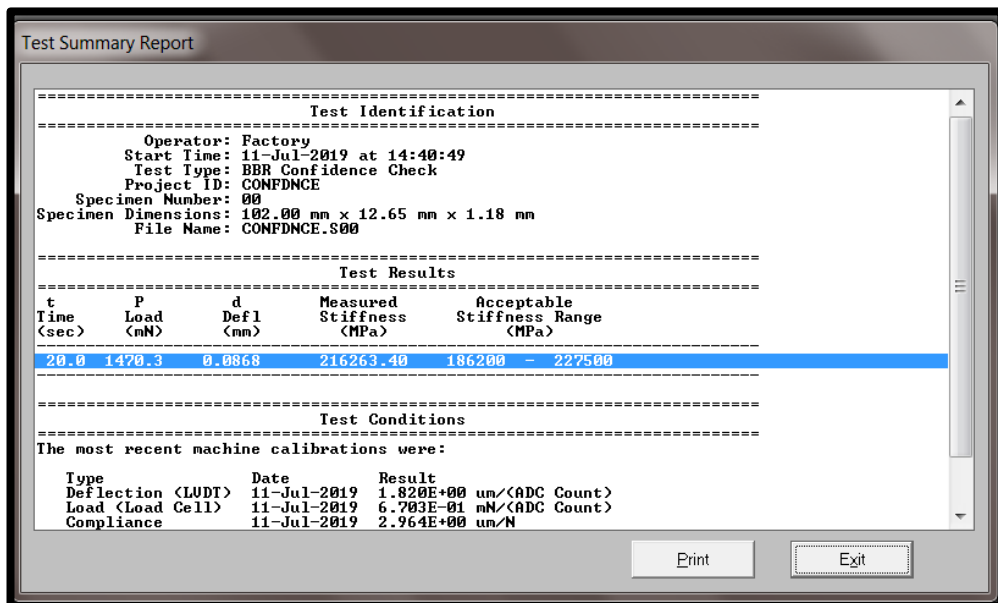
```

Print Exit

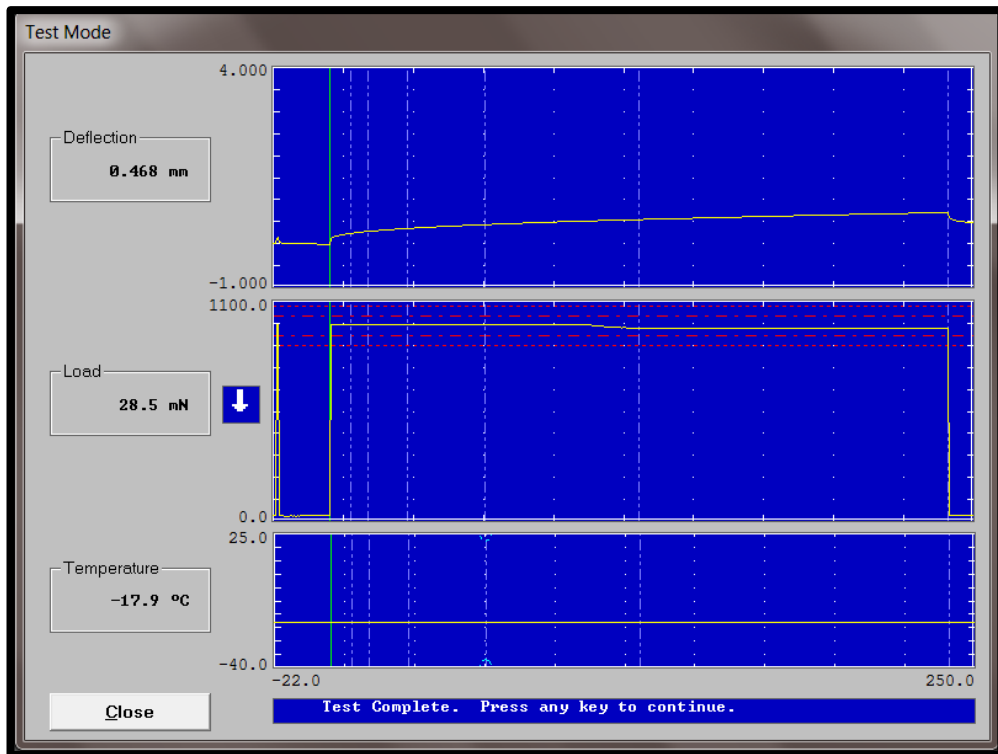
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas (-18°C).

Test Summary Report

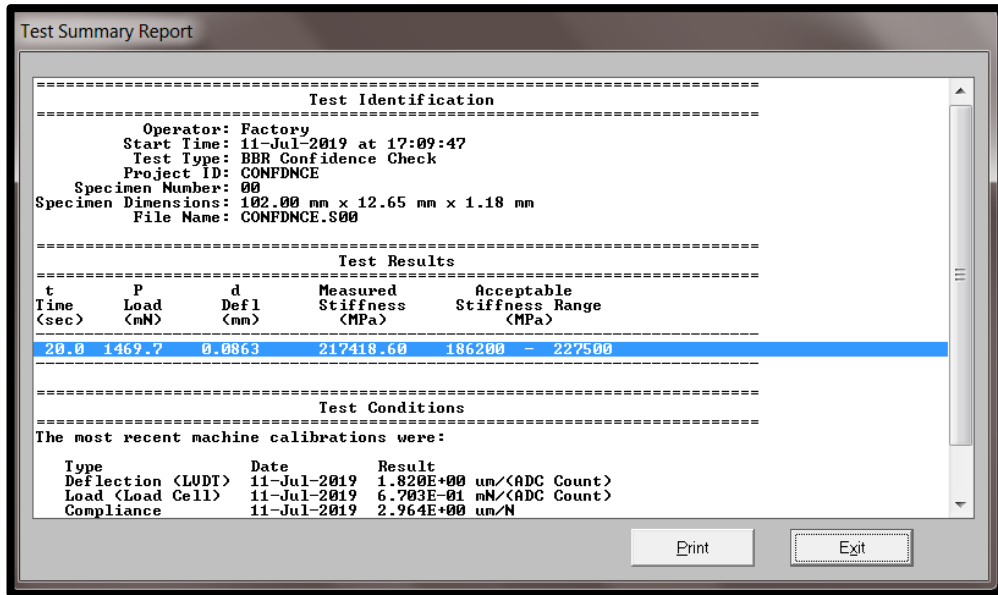
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: W-J
Start Time: 11-Jul-2019 at 14:46:37
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: TESIS85-
Specimen Number:
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: TESIS85-$.
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured  Estimated
Time  Load  Defl   Stiffness Stiffness
(sec) (mN)  (mm)   (MPa)     (MPa)     Difference  m-value
                                     (%)
-----
0.0    28.8   0.0095  --         --         --         --
0.5    985.0  0.1105  --         --         --         --
8.0    981.4  0.2354  343.1147   342.9098  -0.059729  0.267657
15.0   981.8  0.2811  287.4214   287.7399  0.110809   0.290434
30.0   980.9  0.3465  232.9679   233.2334  0.113952   0.315548
60.0   982.8  0.4334  186.5966   185.7895  -0.432521  0.340663 *
120.0  965.9  0.5486  144.8975   145.4425  0.376139   0.365778
240.0  965.2  0.7091  112.0122   111.8925  -0.106806  0.390892
250.0  28.5   0.4678  --         --         --         --
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999793
=====

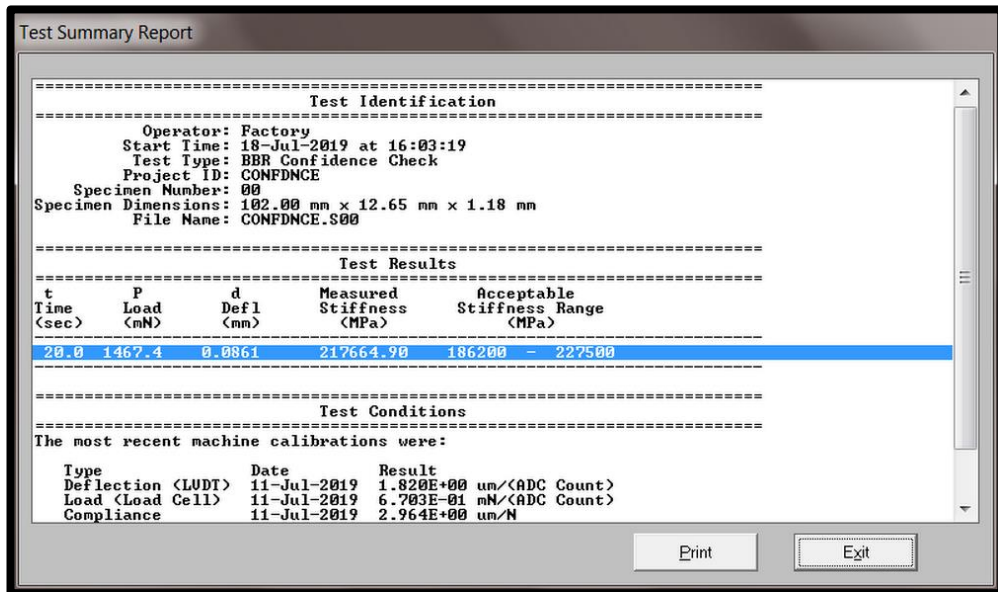
```

Print Exit

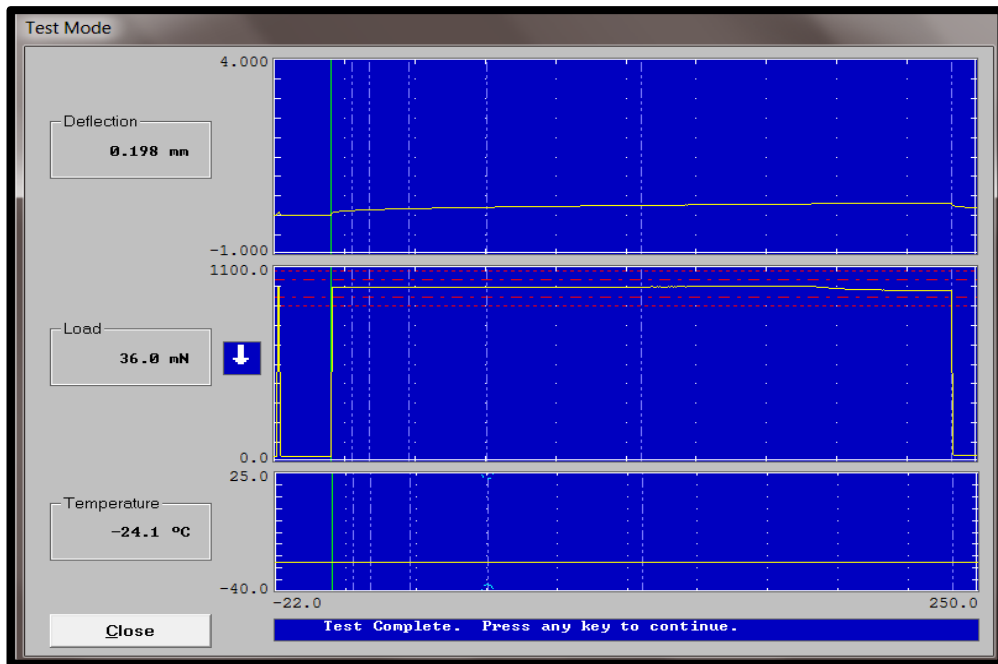
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas (-18°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-24°C).

Test Summary Report

Test Identification

Operator: W-J
 Start Time: 18-Jul-2019 at 16:09:31
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS-24
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS-24.S

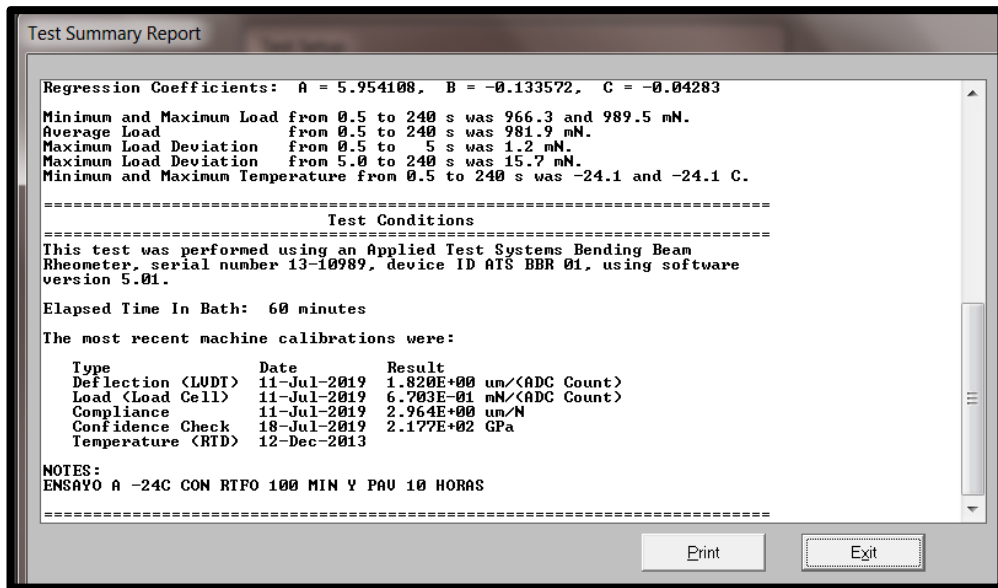
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	33.7	0.0002	--	--	--	--
0.5	982.0	0.0720	--	--	--	--
8.0	981.7	0.1283	629.9105	628.8533	-0.167823	0.210931
15.0	981.8	0.1480	545.9214	546.7300	0.148120	0.234316
30.0	982.5	0.1760	459.3723	460.6335	0.274543	0.260102
60.0	984.0	0.2122	381.6036	381.2201	-0.100516	0.285888 *
120.0	986.0	0.2608	311.1171	309.9085	-0.388468	0.311675
240.0	967.6	0.3225	246.8913	247.4736	0.235857	0.337461
250.0	36.0	0.1983	--	--	--	--

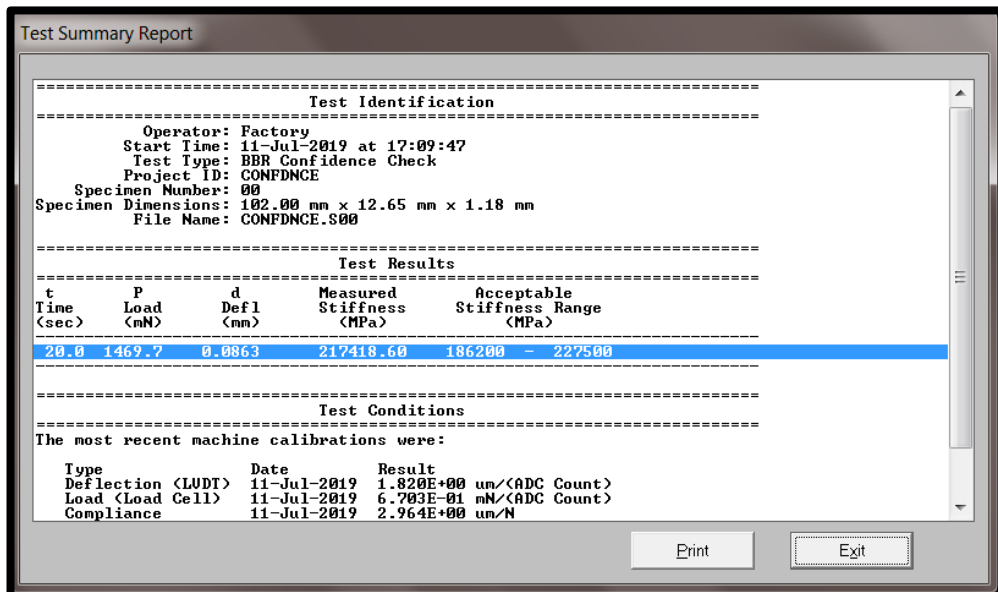
Correlation Coefficient R² = 0.9999723

Print Exit

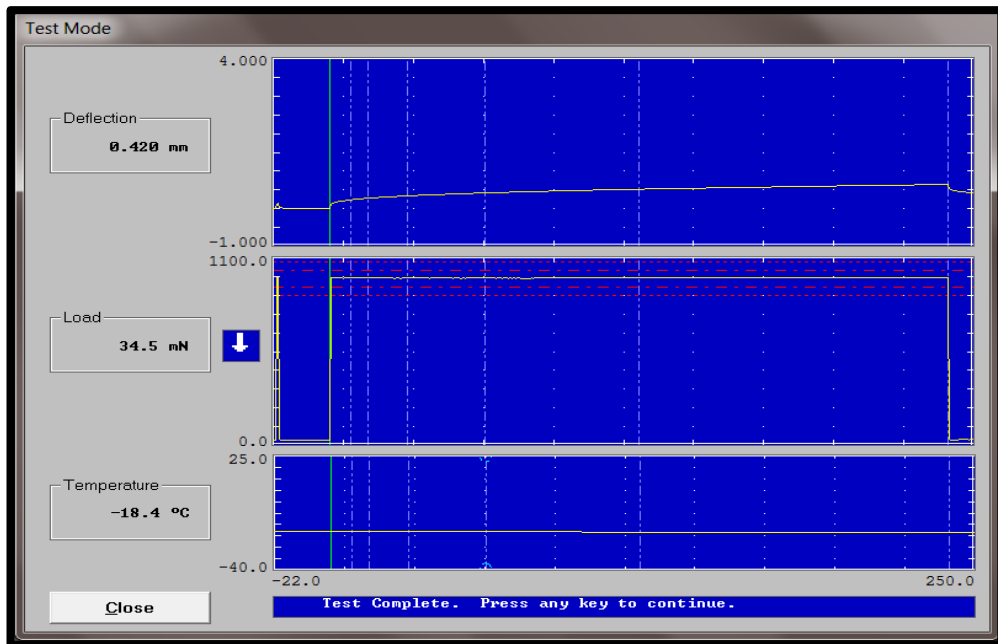
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 hora (-18°C).

Test Summary Report

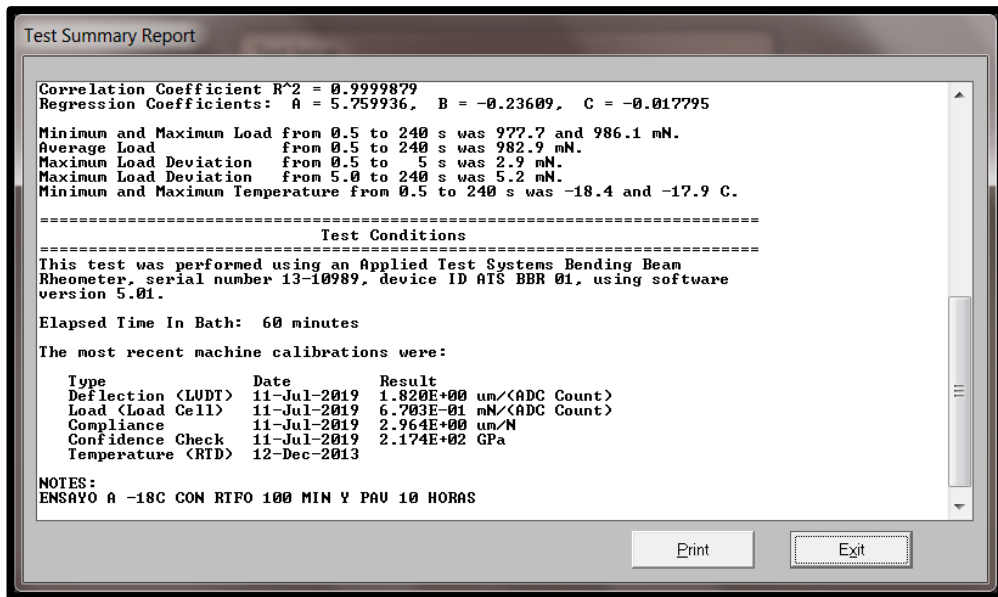
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: W-J
Start Time: 11-Jul-2019 at 17:16:11
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: J-W 2
Specimen Number:
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: J-W 2.S
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured   Estimated
Time  Load  Defl  Stiffness  Stiffness
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)     (MPa)     Difference  m-value
-----
0.0   32.3   0.0005  --         --
0.5   985.8  0.1179  --         --
8.0   982.7  0.2377  340.2627   340.5746   0.091669   0.268231
15.0  981.7  0.2815  287.0081   286.8524   -0.054223  0.277947
30.0  981.2  0.3416  236.3600   235.7086   -0.275604  0.288661
60.0  981.0  0.4211  191.7222   192.2504   0.275485   0.299375 *
120.0 983.6  0.5203  155.5743   155.6445   0.045100   0.310089
240.0 984.2  0.6471  125.1784   125.0763   -0.081567  0.320802
250.0 34.5   0.4202  --         --
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999879
=====

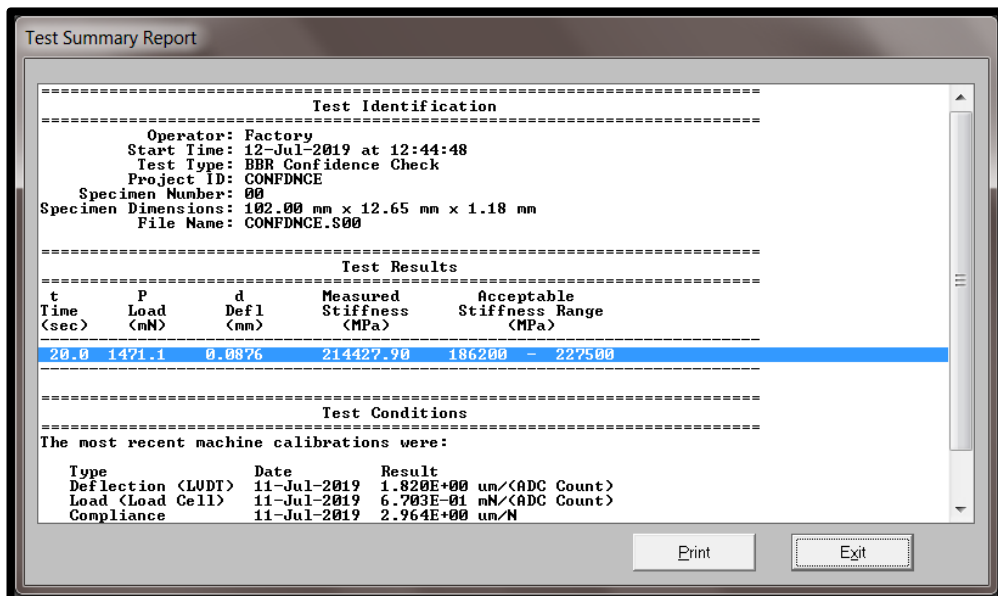
```

Print Exit

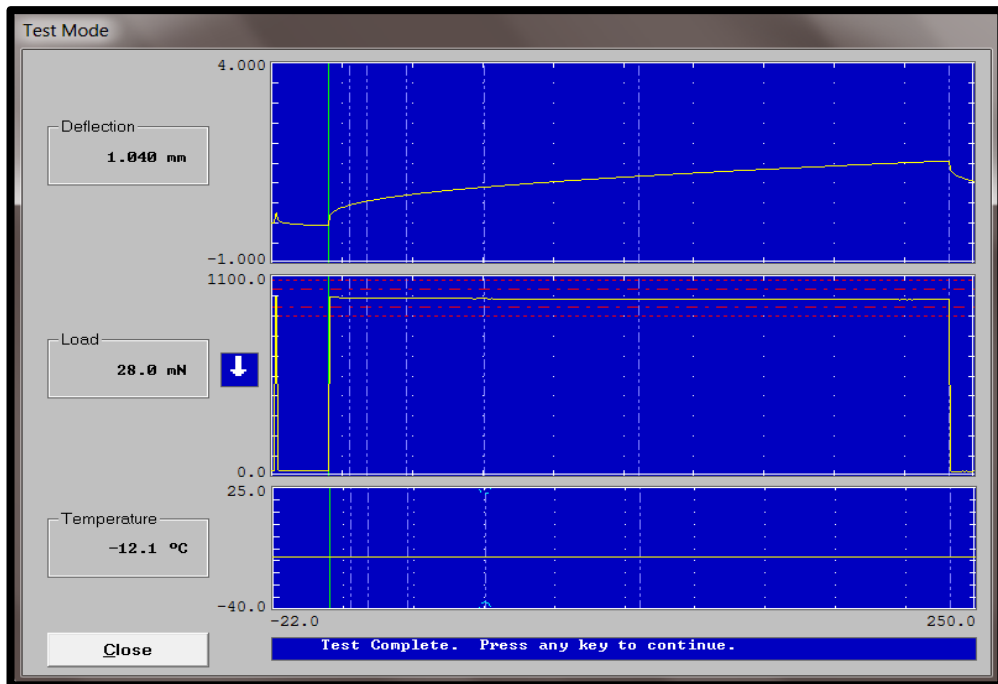
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-18°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-12°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-12°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 12-Jul-2019 at 12:52:51
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: W-J 11
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: W-J 11.S

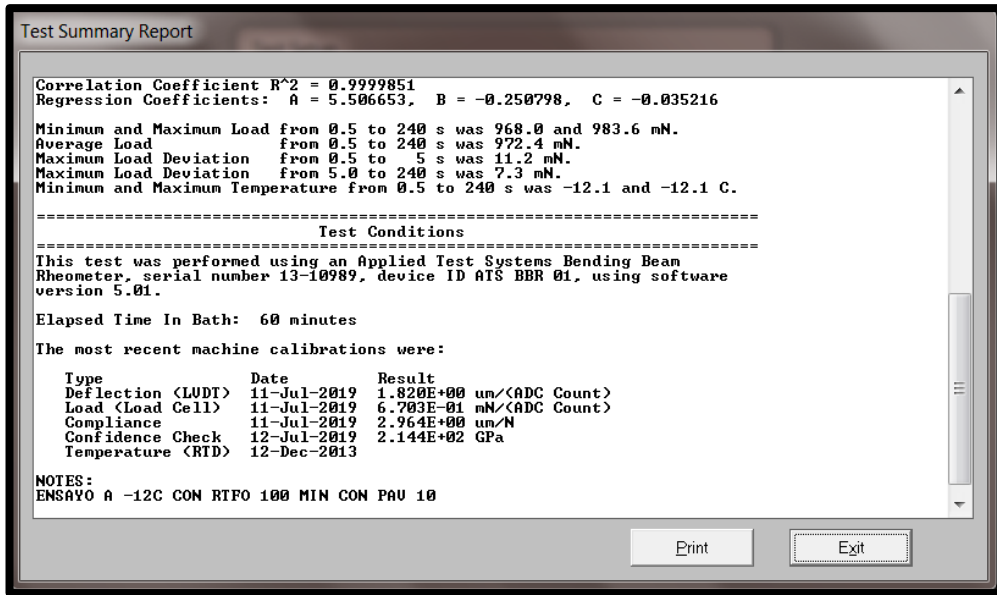
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	31.4	0.0608	--	--	--	--
0.5	983.6	0.1635	--	--	--	--
8.0	978.3	0.4501	178.8646	178.4179	-0.249746	0.314405
15.0	977.5	0.5549	144.9802	145.5394	0.385747	0.333633
30.0	976.1	0.7014	114.5266	114.6451	0.103497	0.354836
60.0	974.7	0.8993	89.1905	88.9914	-0.223216	0.326838 *
120.0	971.9	1.1730	68.1906	68.0704	-0.176256	0.397241
240.0	968.6	1.5560	51.2253	51.3081	0.161617	0.418443
250.0	28.0	1.0398	--	--	--	--

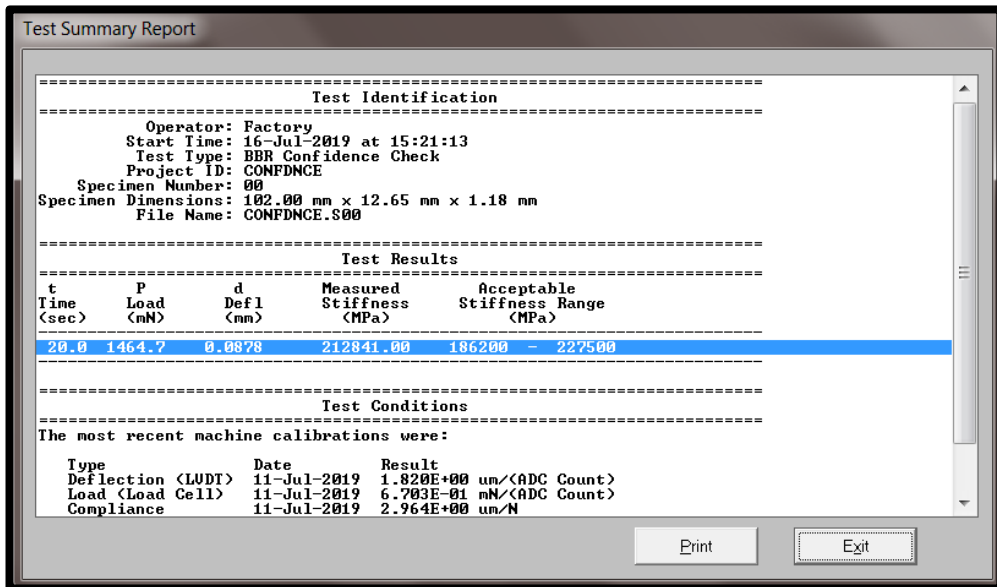
 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999851

Print Exit

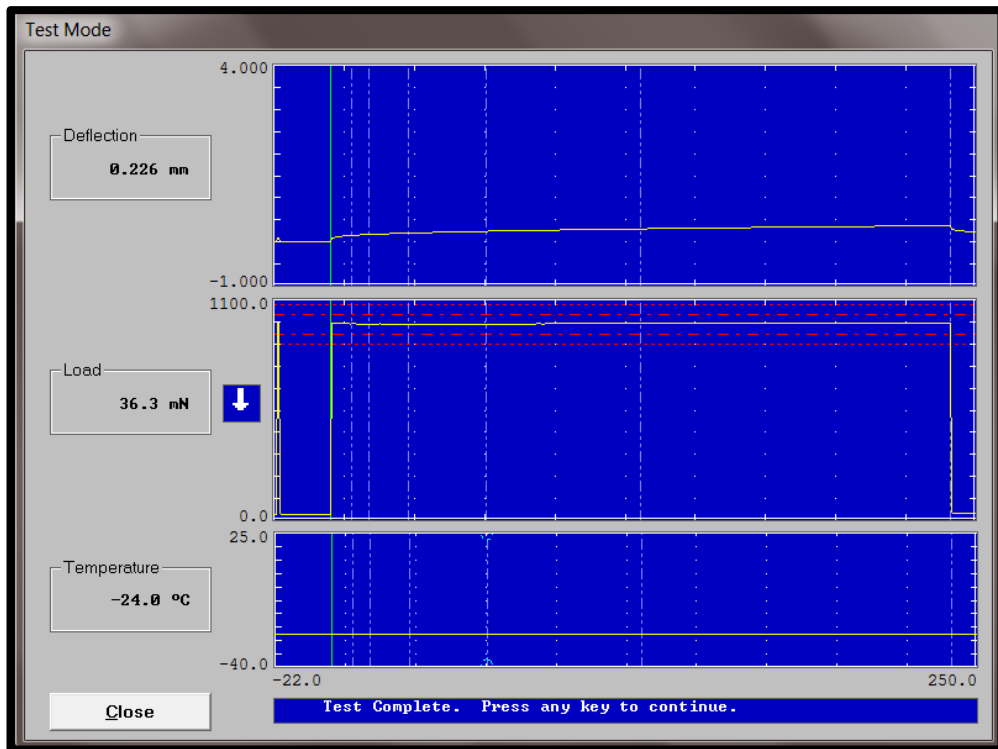
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-12°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 10 horas (-12°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-24°C).

Test Summary Report

```

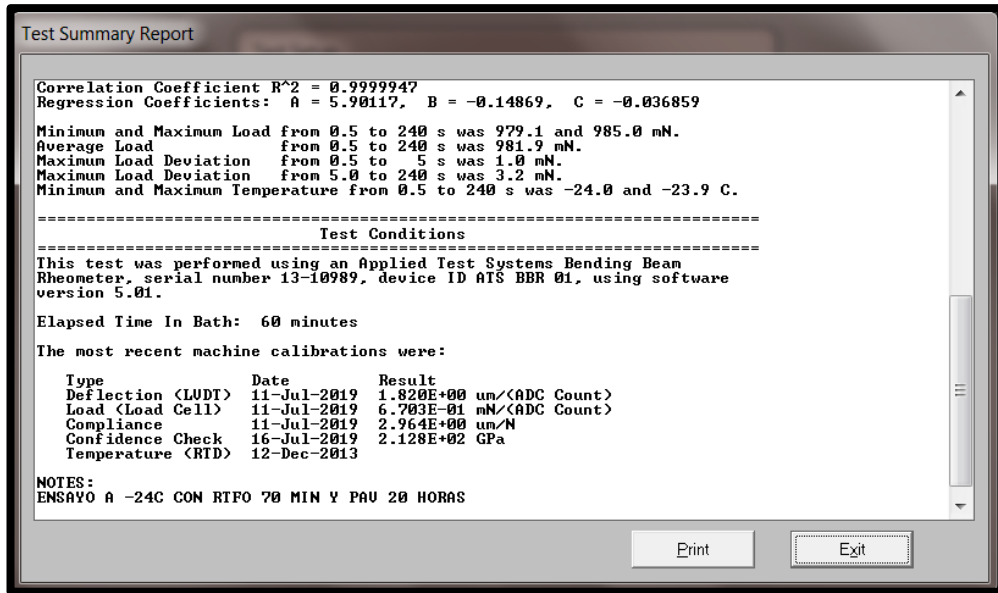
=====
                        Test Identification
=====
Operator: W-J
Start Time: 16-Jul-2019 at 15:26:43
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: TESIS
Specimen Number: 28
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: TESIS.S28
=====

                        Test Results
=====
t      P      d      Measured  Estimated  Difference  n-value
Time  Load  Defl  Stiffness Stiffness  (%)         (MPa)
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)     (MPa)
-----
0.0   30.0   0.0000  --         --         --         --
0.5   982.4  0.0843  --         --         --         --
8.0   980.4  0.1477  546.1188  545.5430  -0.105440  0.215263
15.0  979.9  0.1706  472.7828  473.4944  0.150508  0.235388
30.0  980.2  0.2022  398.8647  399.1314  0.066884  0.257579
60.0  977.5  0.2411  311.6153  311.6317  -0.091701  0.222273 *
120.0 981.4  0.2979  271.0917  270.8179  -0.100972  0.301961
240.0 984.7  0.3721  217.8141  217.9906  0.081038  0.324153
250.0 36.3   0.2264  --         --         --         --
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999947
=====

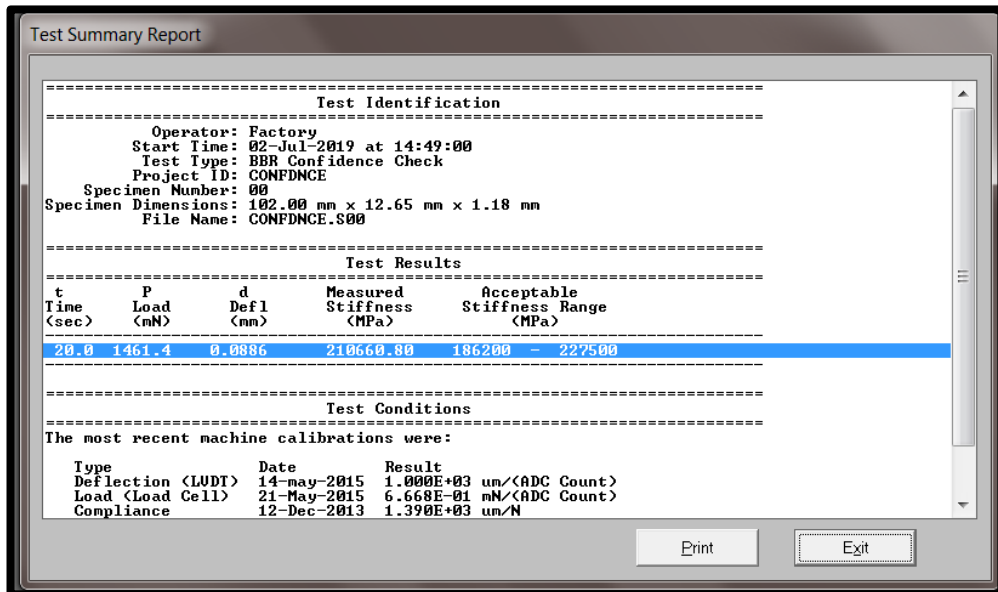
```

Print Exit

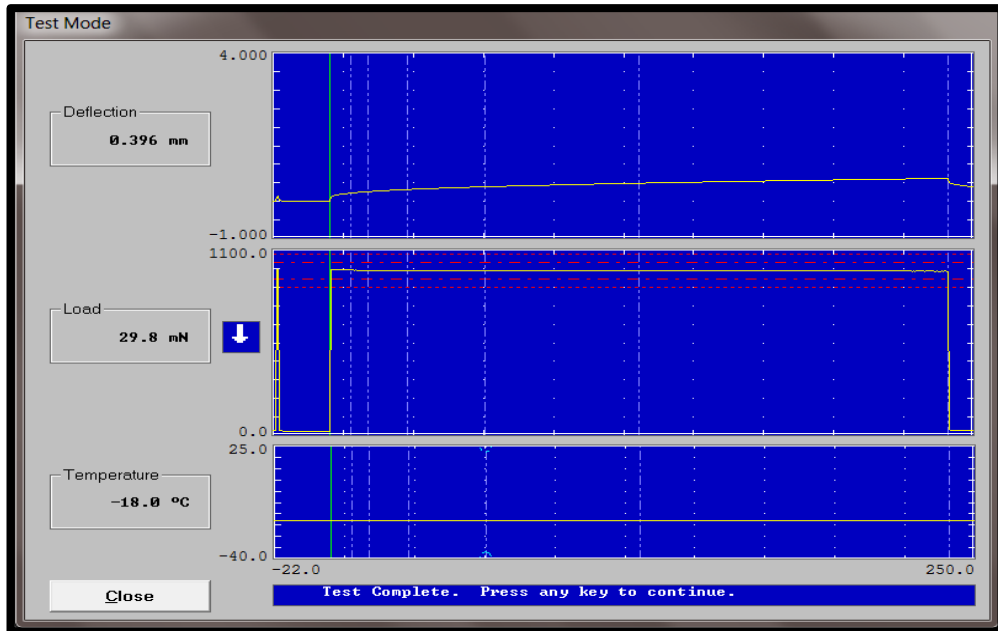
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-18°C).

Test Summary Report

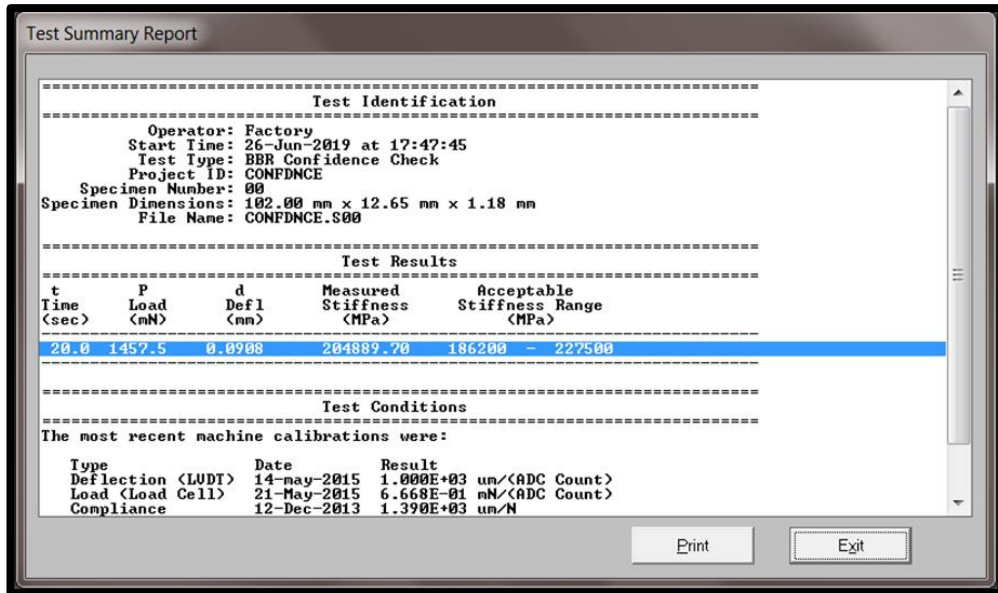
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: J-W
Start Time: 02-Jul-2019 at 15:07:44
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: TES-18
Specimen Number:
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.30 mm
File Name: TES-18.S
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured   Estimated   Difference   m-value
Time  Load  Defl  Stiffness  Stiffness   (%)
(sec) (<nN) (<mm) (<MPa)    (<MPa)
-----
0.0   27.5   0.0035  --         --         --         --
0.5   984.1  0.1151  --         --         --         --
8.0   980.4  0.2262  363.6172  363.2421  -0.103166  0.247696
15.0  979.9  0.2663  308.6875  309.0188  0.107323  0.266670
30.0  978.8  0.3224  254.6754  255.0119  0.132124  0.287591
60.0  978.4  0.3954  207.5183  207.4139  -0.050299  0.308512 *
120.0 976.0  0.4913  166.6344  166.2714  -0.217826  0.329433
240.0 974.2  0.6228  131.1972  131.3709  0.132380  0.350355
250.0 29.8   0.3958  --         --         --         --
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999927
=====

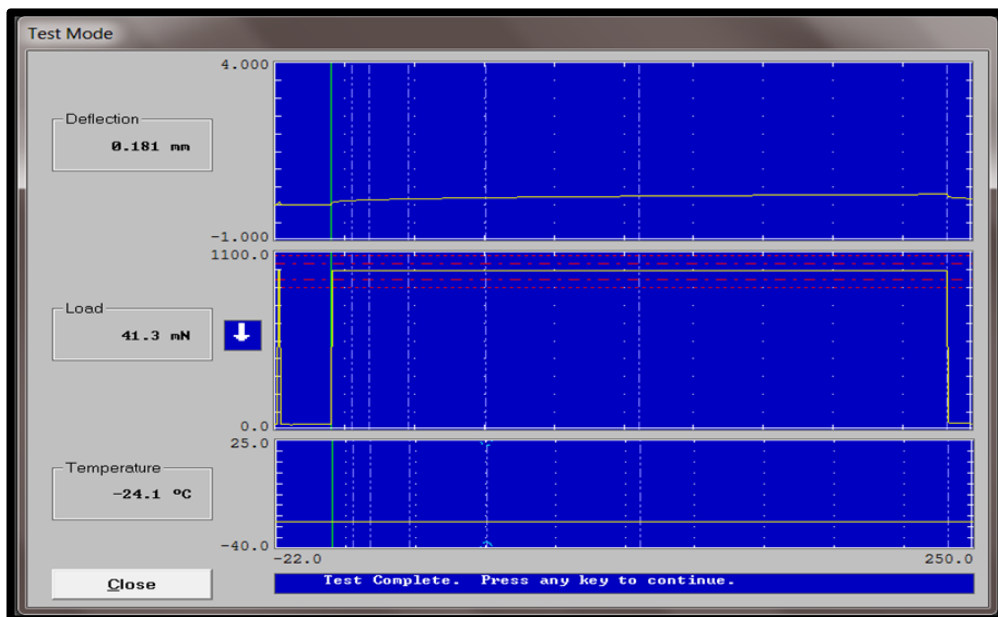
```

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 10 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-24°C).

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: INGENIEROS
 Start Time: 26-Jun-2019 at 18:09:23
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS W-
 Specimen Number: 1
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS W-.S1

=====

Test Results

=====

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	35.1	0.0004	--	--	--	--
0.5	985.5	0.0746	--	--	--	--
8.0	982.1	0.1272	635.4454	636.0491	0.095016	0.211343
15.0	982.4	0.1457	554.8660	553.9655	-0.162301	0.228273
30.0	981.6	0.1720	469.6683	469.8463	0.037898	0.246941
60.0	981.3	0.2052	393.5716	393.3722	-0.049388	0.265609 *
120.0	981.8	0.2490	324.5710	325.1195	0.168992	0.284277
240.0	981.9	0.3044	265.4896	265.2511	-0.089837	0.302945
250.0	41.3	0.1811	--	--	--	--

=====

Correlation Coefficient R² = 0.999993

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-24°C).

Test Summary Report

Correlation Coefficient R² = 0.999993
 Regression Coefficients: A = 5.969065, B = -0.155339, C = -0.031007

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 980.6 and 985.5 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.9 mN.
 Minimum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 1.8 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -24.1 and -24.0 C.

=====

Test Conditions

=====

This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10789, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

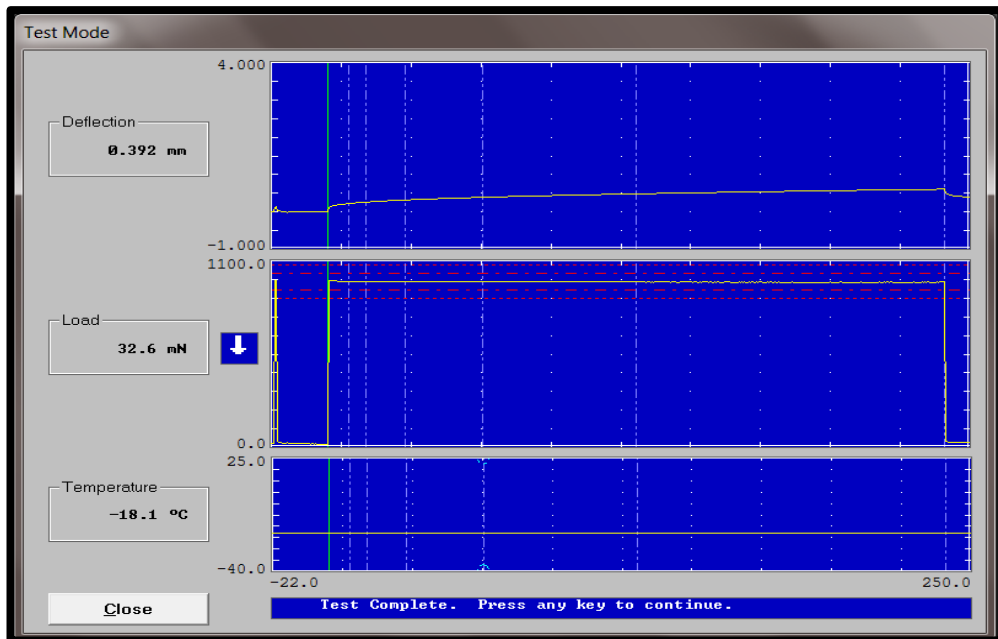
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUFT)	14-May-2015	1.000E+03 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	21-May-2015	6.668E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	12-Dec-2013	1.390E+03 um/N
Confidence Check	26-Jun-2019	2.049E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

NOTES:
 Ensayo a -24C muestra 85 min RTFO y 20 horas PAV

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-18°C).

Test Summary Report

```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: J-W
Start Time: 27-Jun-2019 at 15:12:24
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: MALUMA
Specimen Number:
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: MALUMA.S
=====
                        Test Results
=====

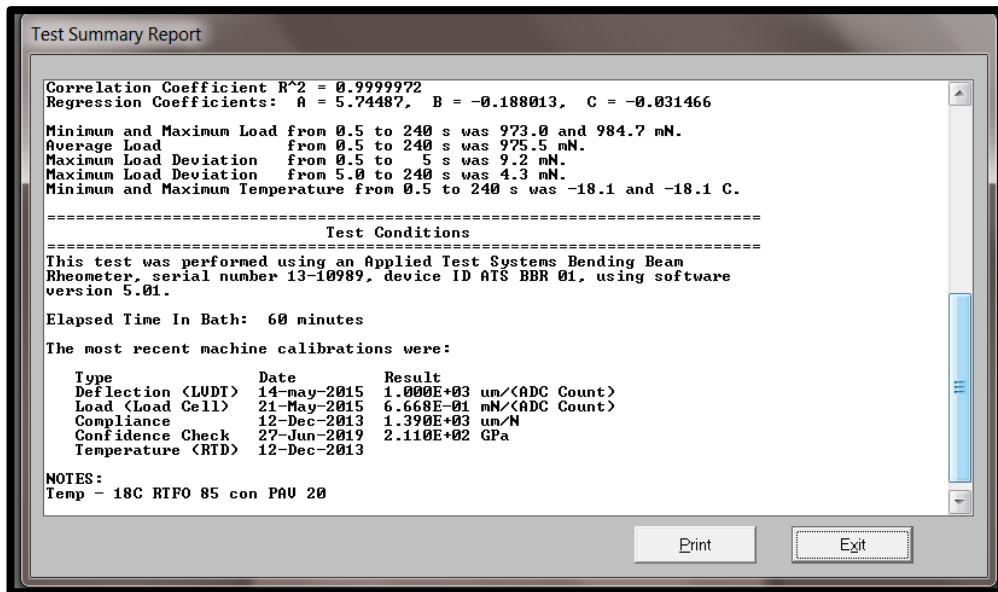
```

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	20.2	0.0005	--	--	--	--
0.5	984.7	0.1186	--	--	--	--
8.0	978.1	0.2270	354.5179	354.3358	-0.051361	0.244845
15.0	976.9	0.2662	301.9770	302.1530	0.058290	0.262025
30.0	976.9	0.3215	250.0765	250.3214	0.097940	0.280970
60.0	977.1	0.3923	204.9848	204.6758	-0.150757	0.299914 *
120.0	975.0	0.4859	165.1256	165.1703	0.027068	0.318858
240.0	975.4	0.6103	131.5262	131.5512	0.019019	0.337802
250.0	32.6	0.3919	--	--	--	--

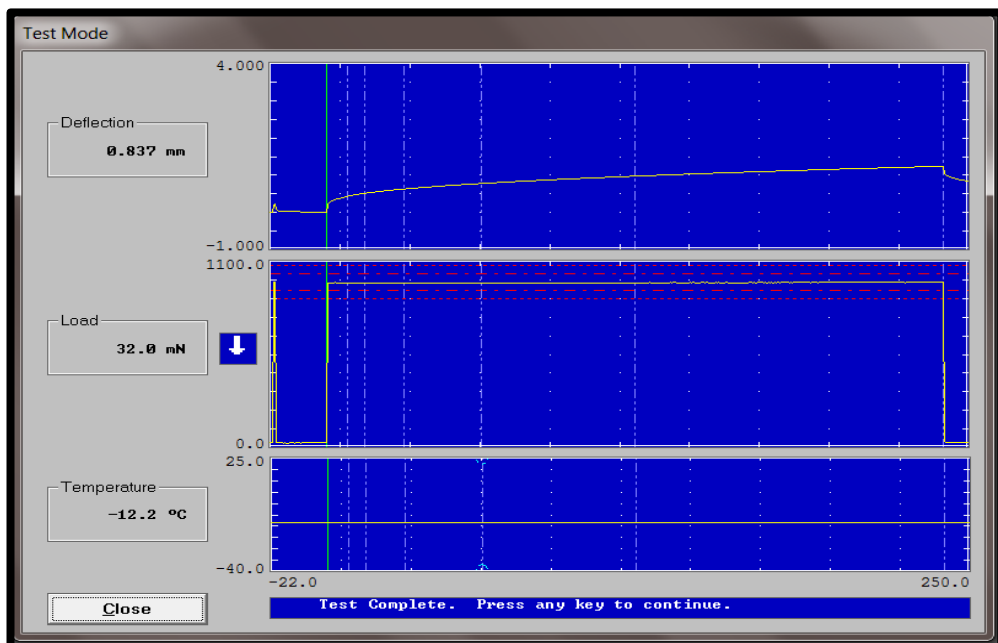
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999972

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-12°C).

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: J-W
 Start Time: 01-Jul-2019 at 15:22:16
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS a
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.30 mm
 File Name: TESIS a .S

=====

Test Results

=====

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	29.0	0.0187	--	--	--	--
0.5	973.1	0.2051	--	--	--	--
8.0	973.4	0.4350	187.6883	187.6111	-0.041123	0.262778
15.0	973.7	0.5164	158.1374	158.2174	0.050538	0.279376
30.0	972.5	0.6299	129.4939	129.5385	0.034411	0.297679
60.0	972.5	0.7788	104.7337	104.7210	-0.012104	0.315781 *
120.0	973.8	0.9763	83.6572	83.5910	-0.079246	0.334283
240.0	975.3	1.2422	65.8519	65.8833	0.047595	0.352586
250.0	32.0	0.8368	--	--	--	--

=====

Correlation Coefficient R² = 0.9999991

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 20 horas (-12°C).

Test Summary Report

=====

Test Identification

=====

Operator: Factory
 Start Time: 22-Jul-2019 at 16:41:39
 Test Type: BBR Confidence Check
 Project ID: CONFDNCE
 Specimen Number: 00
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 1.18 mm
 File Name: CONFDNCE.S00

=====

Test Results

=====

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Acceptable Stiffness Range (MPa)
20.0	1467.5	0.0875	214160.20	186200 - 227500

=====

Test Conditions

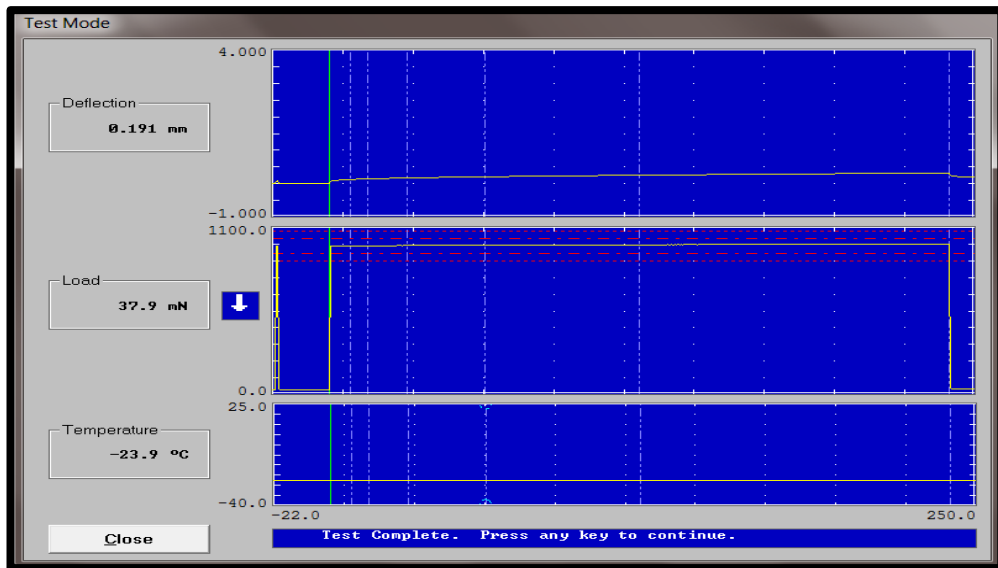
=====

The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDI)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N

Print Exit

Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-25°C).

Test Summary Report

Test Identification

Operator: U-J
 Start Time: 22-Jul-2019 at 16:46:24
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS 40
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS 40.S

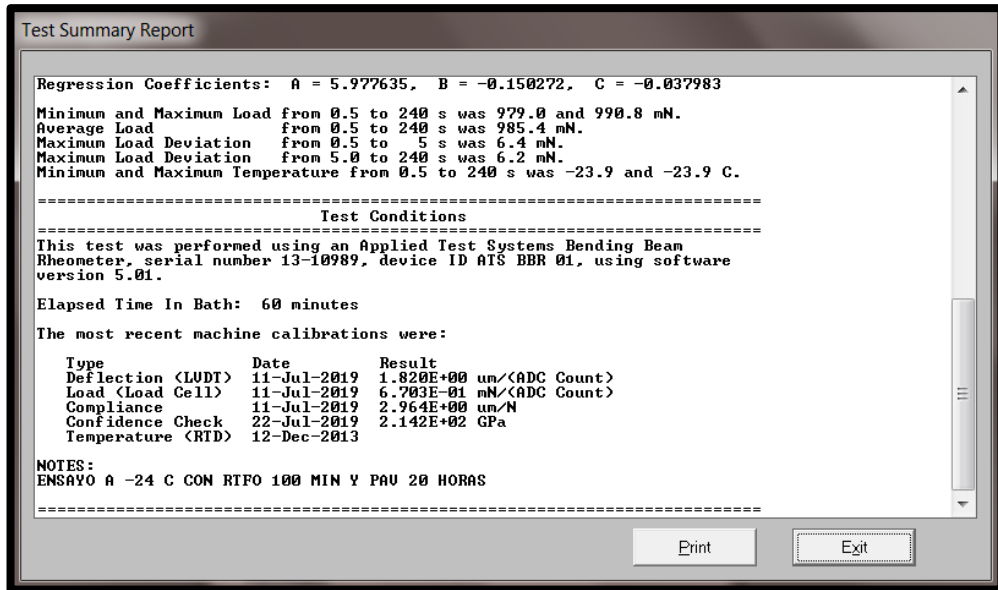
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	33.6	0.0042	--	--	--	--
0.5	979.0	0.0696	--	--	--	--
8.0	979.2	0.1244	647.8699	647.0658	-0.124109	0.218876
15.0	979.5	0.1441	559.4252	560.2271	0.143327	0.239615
30.0	980.8	0.1717	470.1267	470.7504	0.132682	0.262483
60.0	982.4	0.2075	389.6039	389.3439	-0.066738	0.285352 *
120.0	985.7	0.2554	317.6737	316.9509	-0.227530	0.308220
240.0	990.5	0.3214	253.5980	253.9607	0.143020	0.331088
250.0	37.9	0.1914	--	--	--	--

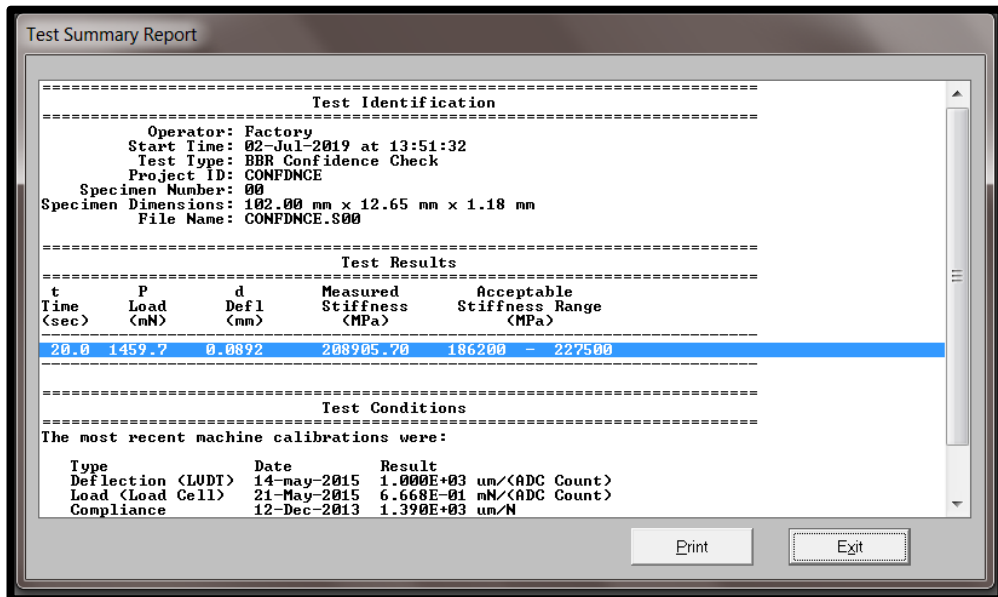
Correlation Coefficient R² = 0.9999895

Print Exit

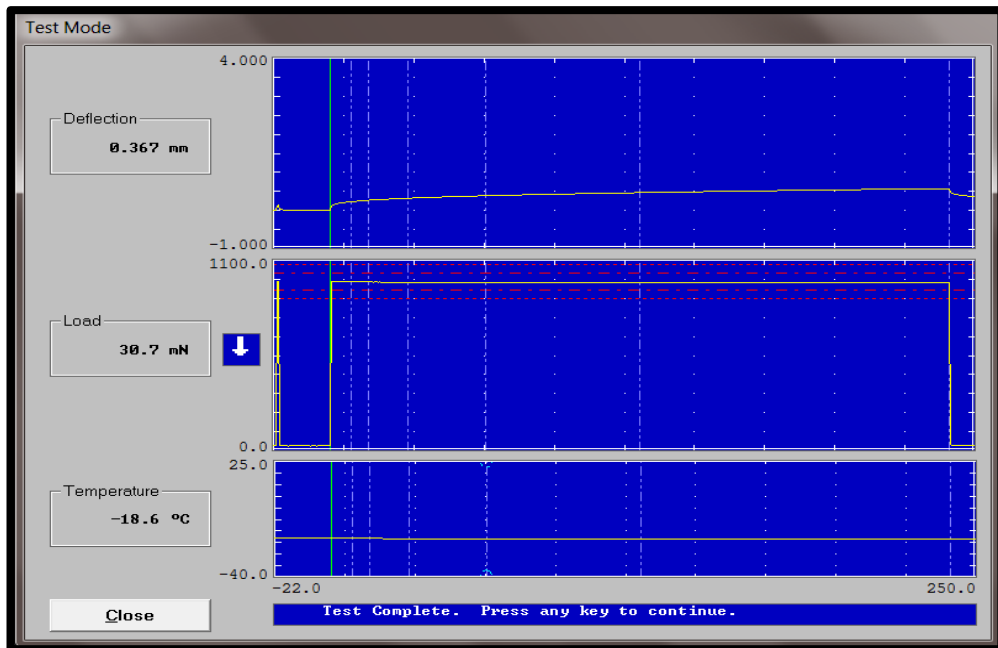
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-24°C)



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-18°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: J-W
 Start Time: 02-Jul-2019 at 14:20:19
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS-18
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.30 mm
 File Name: TESIS-18.S

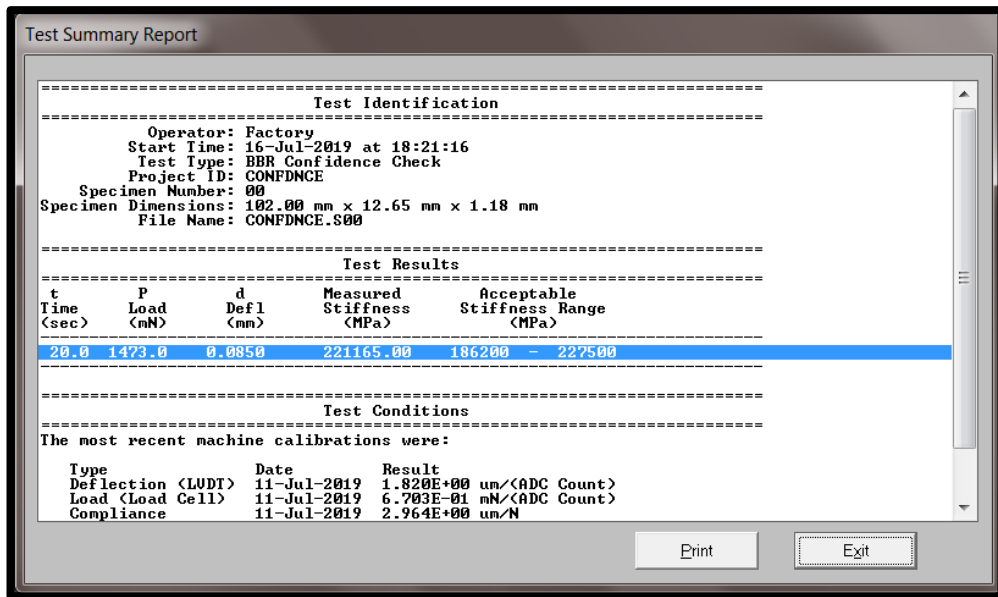
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	28.7	0.0062	--	--	--	--
0.5	977.6	0.1220	--	--	--	--
8.0	975.6	0.2314	353.6759	353.2816	-0.111465	0.241145
15.0	974.7	0.2705	302.2319	302.5874	0.117628	0.251675
30.0	973.7	0.3230	252.8492	253.1288	0.110562	0.263286
60.0	973.1	0.3887	209.9894	210.0569	0.032178	0.274897 *
120.0	972.2	0.4701	173.4690	172.9168	-0.318323	0.286508
240.0	973.2	0.5791	140.9625	141.2025	0.170270	0.298118
250.0	30.7	0.3672	--	--	--	--

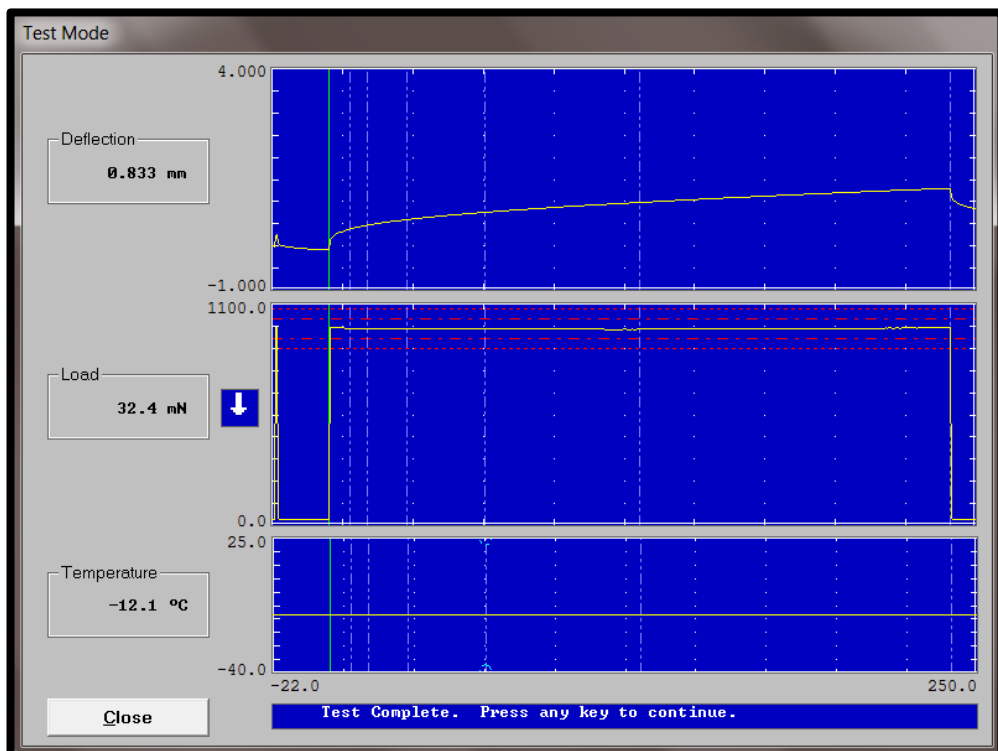
Correlation Coefficient R² = 0.9999857

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-12°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-12°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 16-Jul-2019 at 18:26:06
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: 29
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: 29.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	31.2	0.0847	--	--	--	--
0.5	985.4	0.1266	--	--	--	--
8.0	979.6	0.3840	209.9379	209.5102	-0.203709	0.315715
15.0	979.2	0.4723	170.4382	170.9552	0.303305	0.331337
30.0	977.2	0.5960	134.9317	135.0663	0.099813	0.348563
60.0	975.9	0.7604	105.6159	105.4452	-0.161622	0.365788 *
120.0	974.9	0.9844	81.4950	81.3431	-0.186396	0.383014
240.0	981.1	1.3041	61.9127	62.0054	0.149743	0.400239
250.0	32.4	0.8328	--	--	--	--

 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999892

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-12°C).

Test Summary Report

 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999892
 Regression Coefficients: A = 5.58299, B = -0.264039, C = -0.028611

 Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 972.9 and 985.4 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 977.5 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 8.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 4.6 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -12.1 and -12.0 C.

Test Conditions

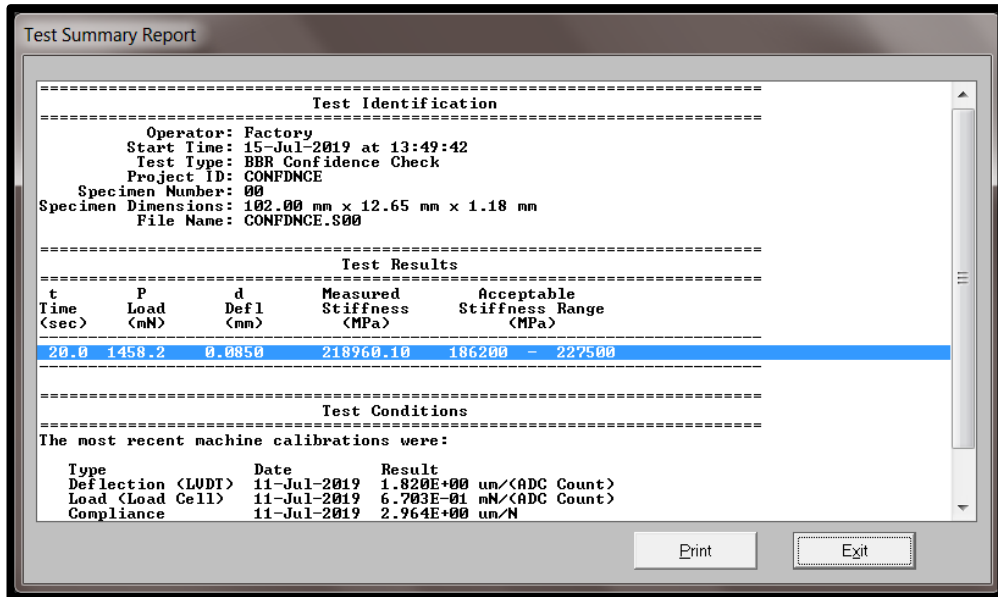
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	16-Jul-2019	2.212E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

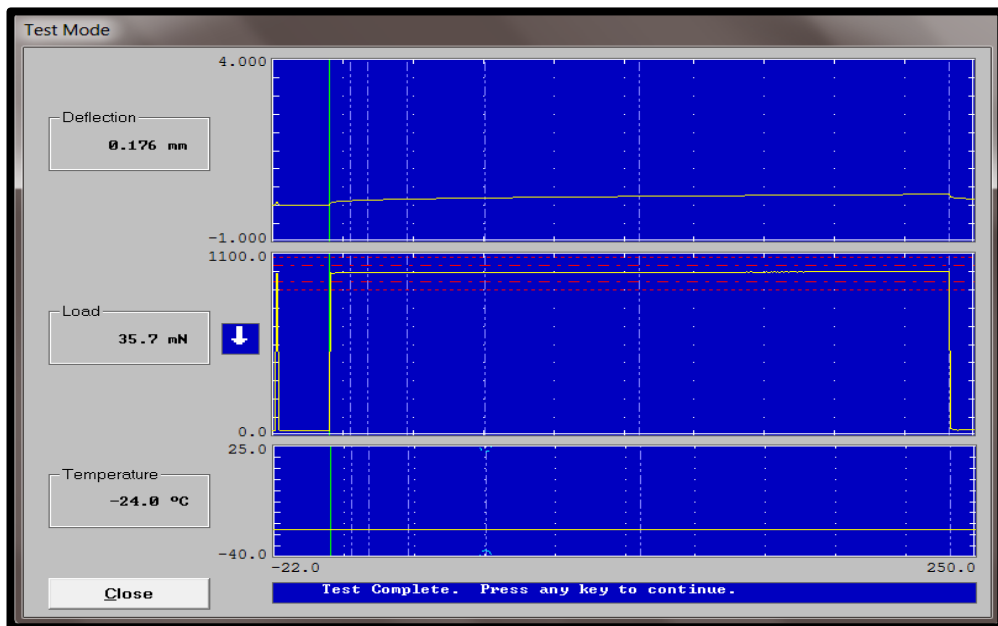
NOTES:
 ENSAYO A -12C CON RTFO 100 MIN Y PAV 20 HORAS

Print Exit

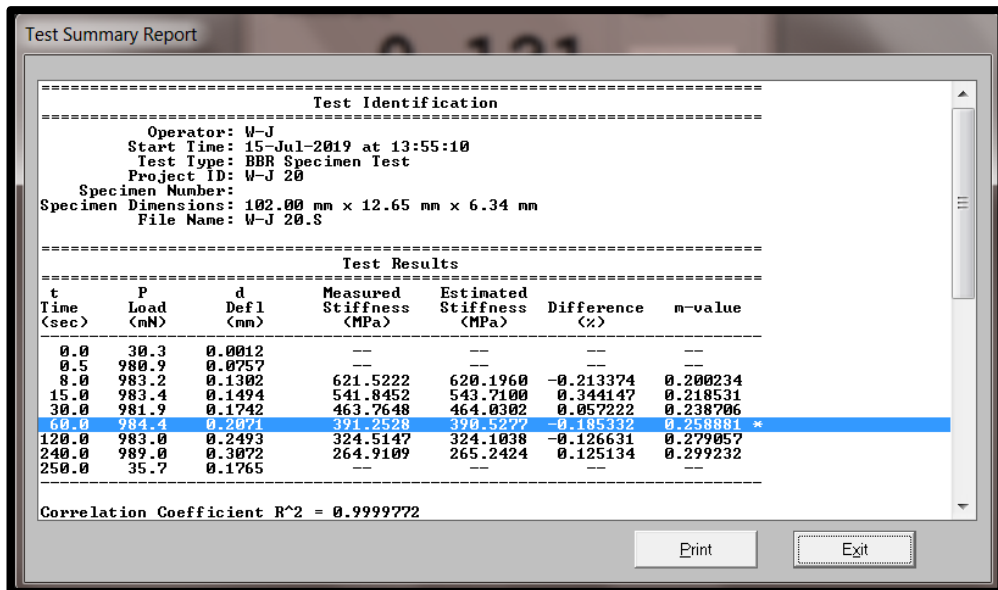
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 20 horas (-12°C).



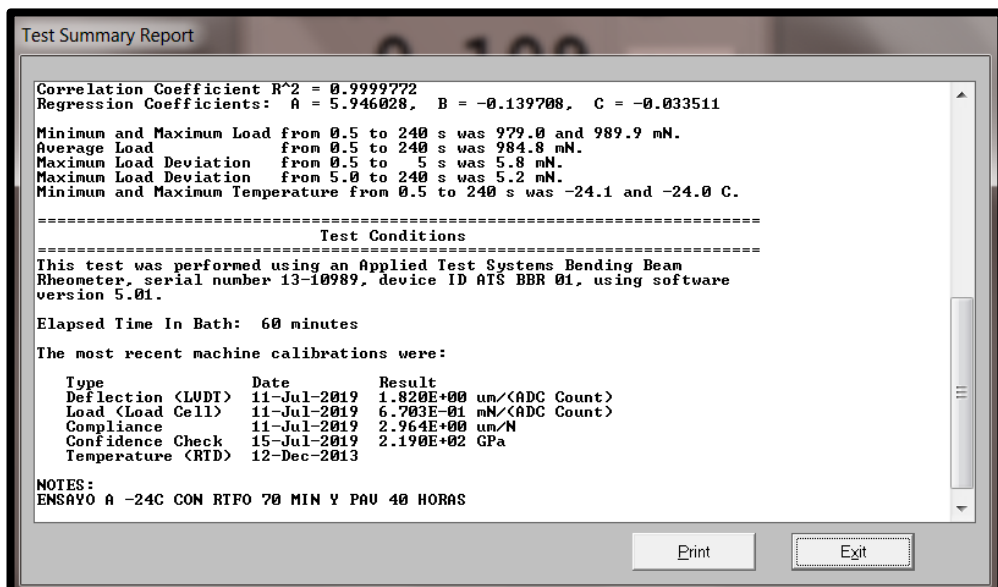
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



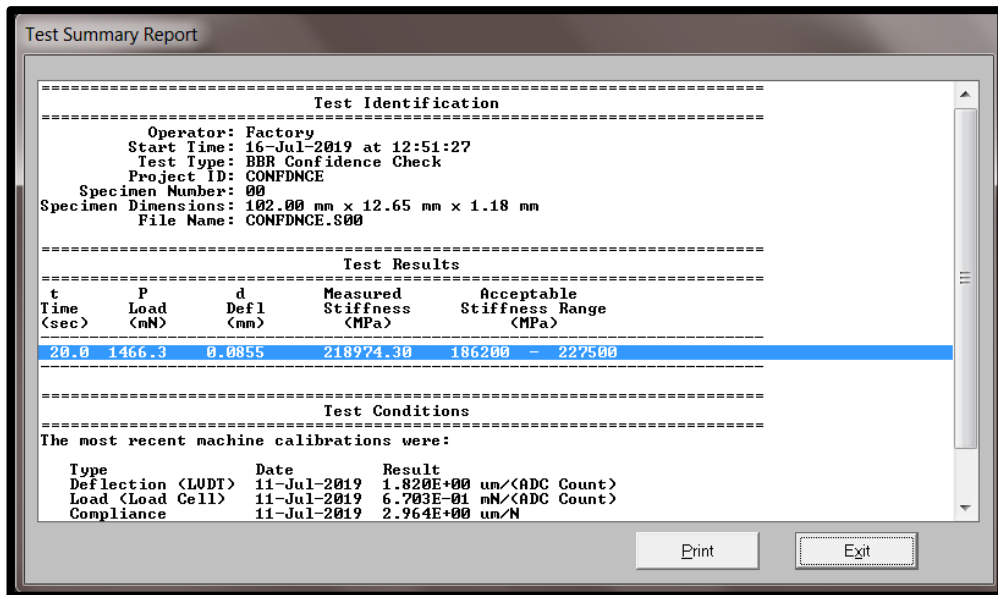
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



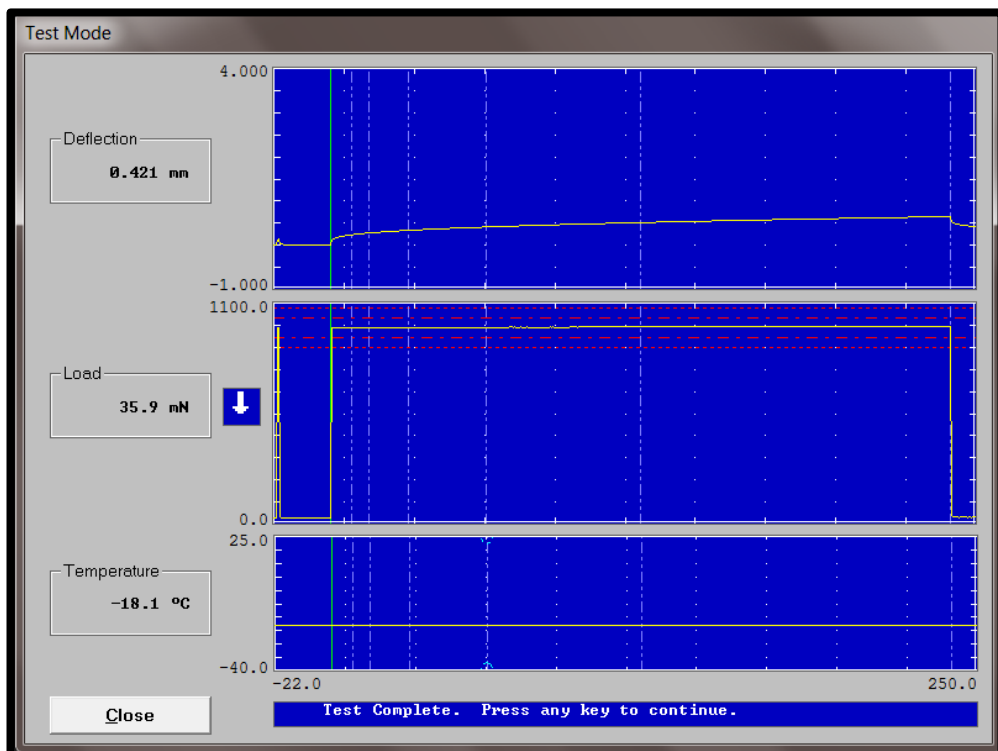
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-18°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 16-Jul-2019 at 12:57:04
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: W-J 27
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: W-J 27.S

Test Results

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	m-value
0.0	29.2	0.0055	--	--	--	--
0.5	977.8	0.1186	--	--	--	--
8.0	977.9	0.2384	337.5469	337.5257	-0.006285	0.243638
15.0	978.5	0.2796	287.9622	287.9217	-0.014052	0.262092
30.0	978.1	0.3379	238.2229	238.4043	0.076164	0.282441
60.0	979.7	0.4139	194.6315	194.6332	-0.003165	0.302790 *
120.0	981.5	0.5157	156.6398	156.6811	0.026333	0.323139
240.0	984.4	0.6514	124.3575	124.3596	0.001714	0.343487
250.0	35.9	0.4213	--	--	--	--

 Correlation Coefficient R^2 = 0.999999

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-18°C).

Test Summary Report

 Regression Coefficients: A = 5.720768, B = -0.182591, C = -0.033799

 Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 977.5 and 984.5 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.3 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 240 s was 3.5 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 3.7 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.1 and -18.0 C.

Test Conditions

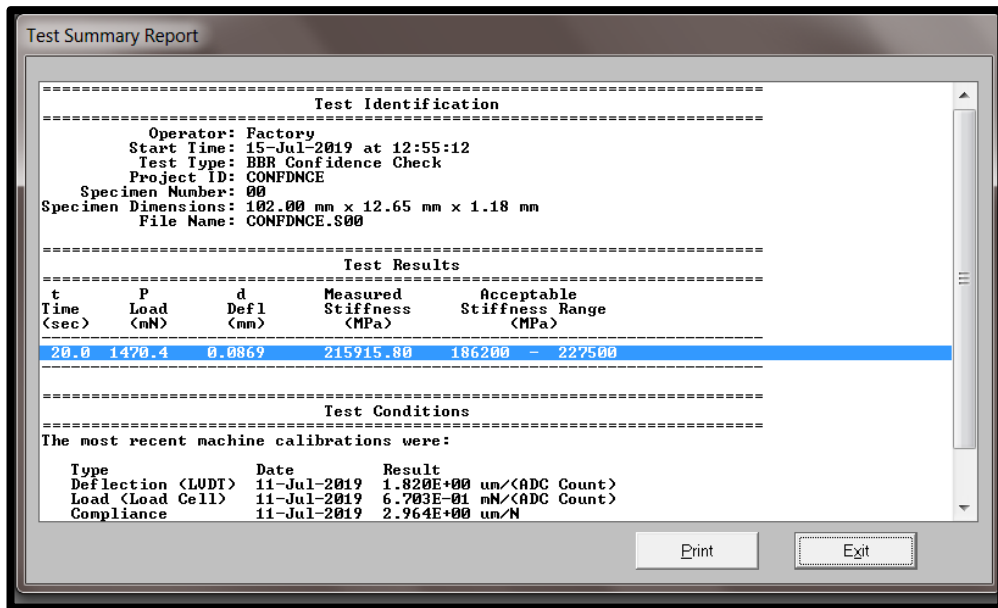
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID ATS BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection <LUDT>	11-Jul-2019	1.820E+00 um/<ADC Count>
Load <Load Cell>	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/<ADC Count>
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	16-Jul-2019	2.190E+02 GPa
Temperature <RTD>	12-Dec-2013	

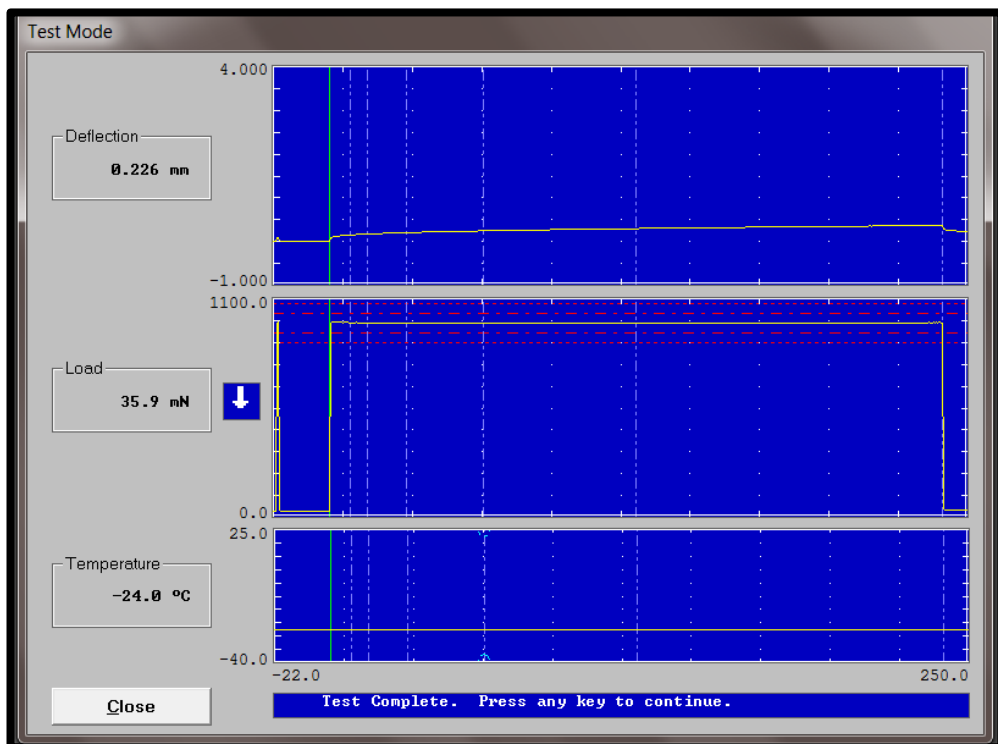
NOTES:
 ENSAYO A -18C CON RTFO 70 MIN Y PAU 40 HORAS

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-24°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 15-Jul-2019 at 13:02:10
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESISWJ-
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESISWJ-.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	30.0	0.0047	--	--	--	--
0.5	979.4	0.0870	--	--	--	--
8.0	980.1	0.1524	529.2459	529.0763	-0.032046	0.208292
15.0	979.6	0.1748	461.2170	461.3234	0.023073	0.227697
30.0	978.5	0.2061	390.7631	391.0579	0.075455	0.249095
45.0	977.9	0.2453	326.3092	326.6143	-0.092101	0.270392 *
120.0	978.3	0.2994	260.8990	260.7745	-0.046322	0.291891
240.0	980.3	0.3703	217.8397	217.9212	0.037372	0.313289
250.0	35.9	0.2256	--	--	--	--

Correlation Coefficient R^2 = 0.9999987

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-24°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.882638, B = -0.144098, C = -0.035541

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 977.3 and 981.7 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 978.8 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 2.8 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.0 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -24.0 and -24.0 C.

Test Conditions

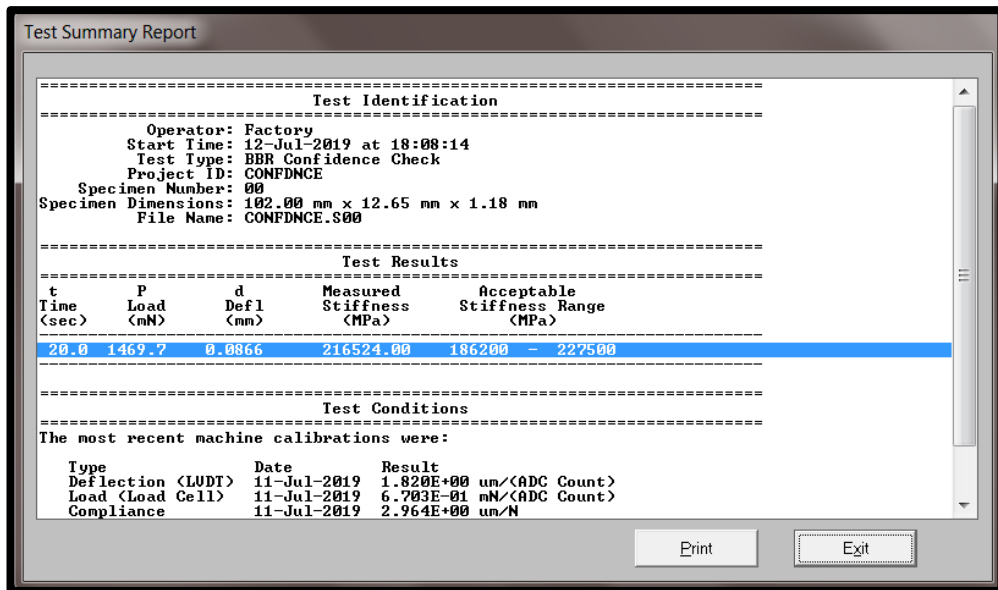
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AIS BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDI)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	15-Jul-2019	2.159E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

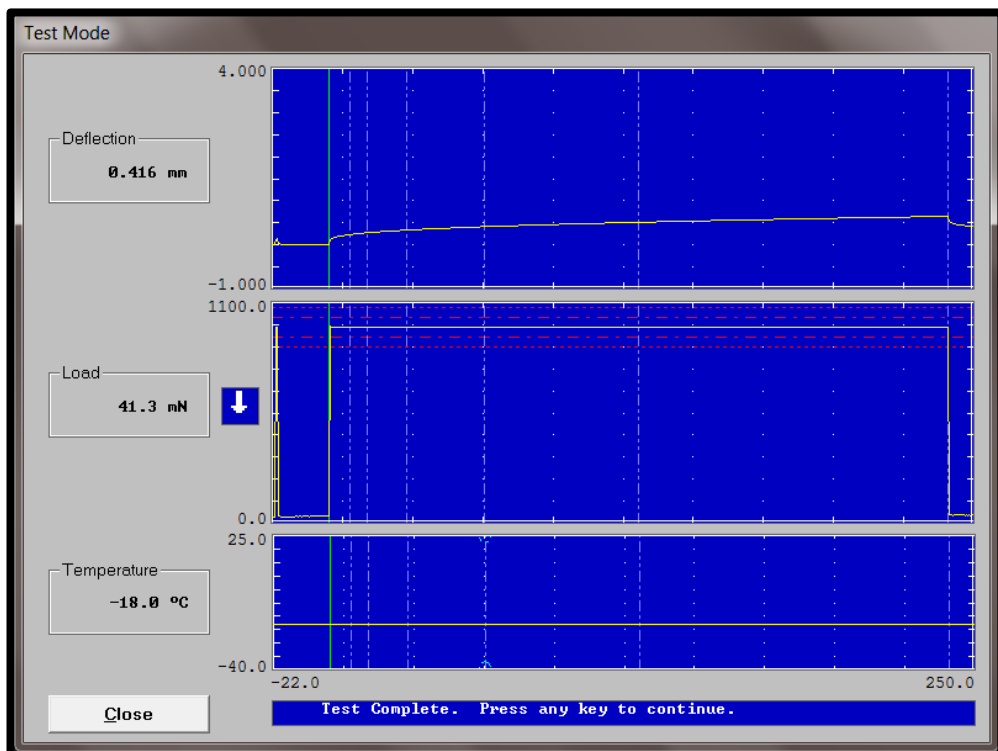
NOTES:
 ENSAYO A -24 C CON RTFO 85 MIN Y PAV 40 HORAS

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-18°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 12-Jul-2019 at 18:13:49
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: W-J 15
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: W-J 15.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	35.1	0.0011	--	--	--	--
0.5	980.5	0.1169	--	--	--	--
8.0	977.3	0.2367	339.7952	339.6524	-0.042021	0.249973
15.0	976.6	0.2786	288.4628	288.7227	0.090113	0.266902
30.0	976.0	0.3368	238.4768	238.4107	-0.027719	0.285569
60.0	976.7	0.4168	192.6203	192.8351	-0.054535	0.310287 *
120.0	976.9	0.5143	156.3120	156.3713	0.037918	0.322904
240.0	979.7	0.6491	124.2111	124.2063	-0.003832	0.341571
250.0	41.3	0.4165	--	--	--	--

Correlation Coefficient R² = 0.999999

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-18°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.731495, B = -0.193971, C = -0.031006

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 975.4 and 980.5 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 977.5 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.1 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.5 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.0 and -17.9 C.

Test Conditions

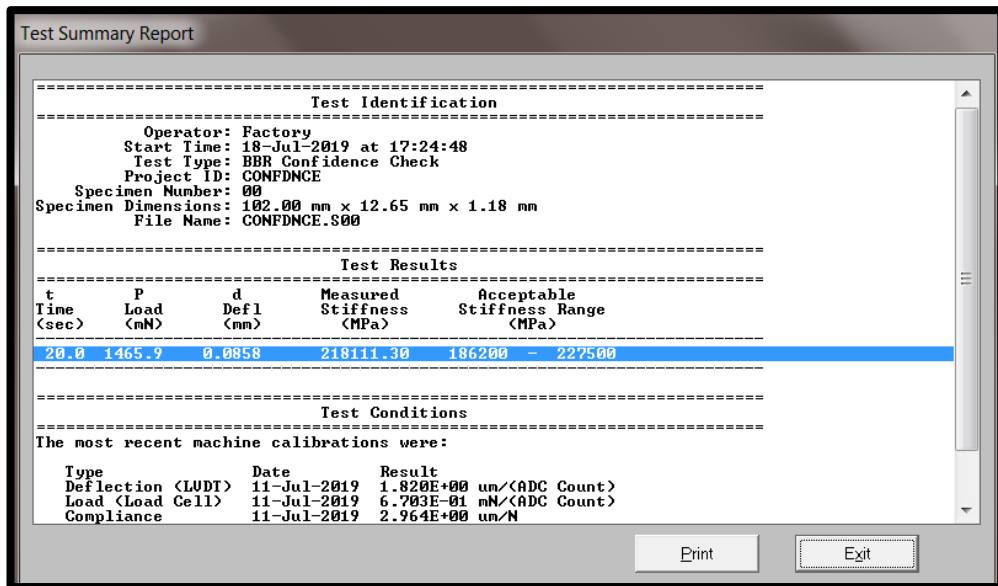
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	12-Jul-2019	2.165E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

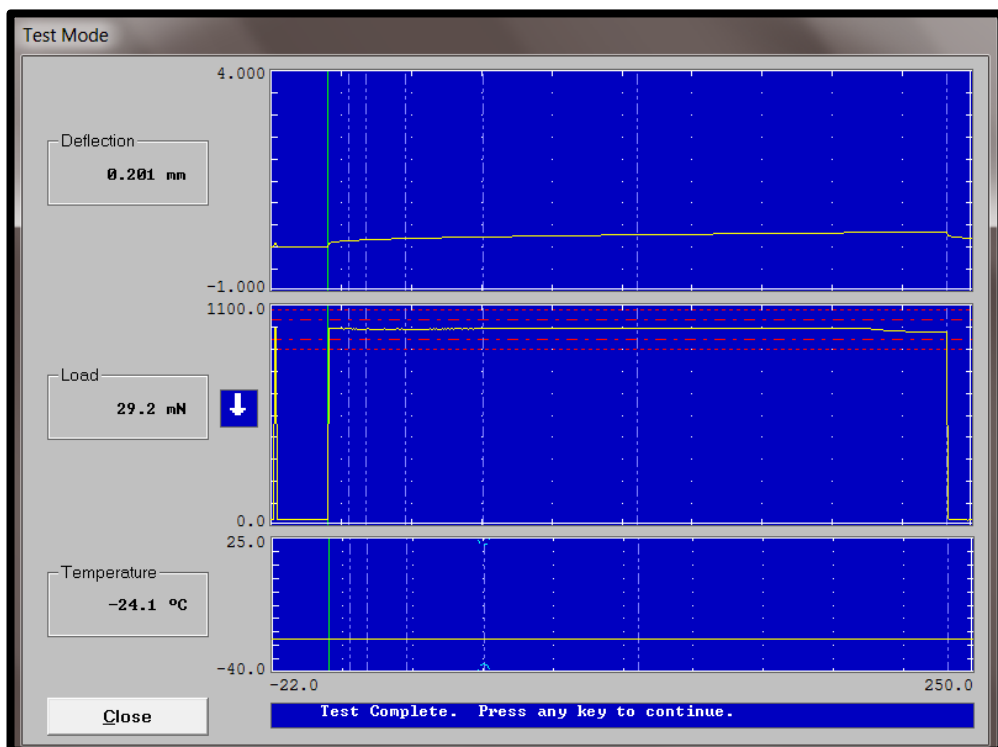
NOTES:
 ENSAYO A -18C CON RTFO 85 MIN Y PAV 20 HORAS

Print Exit

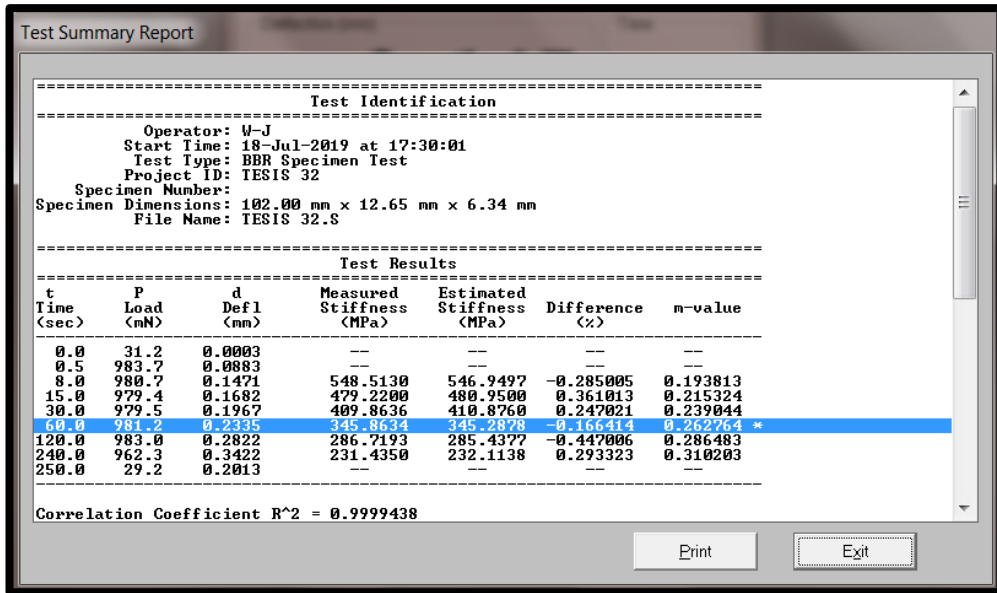
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



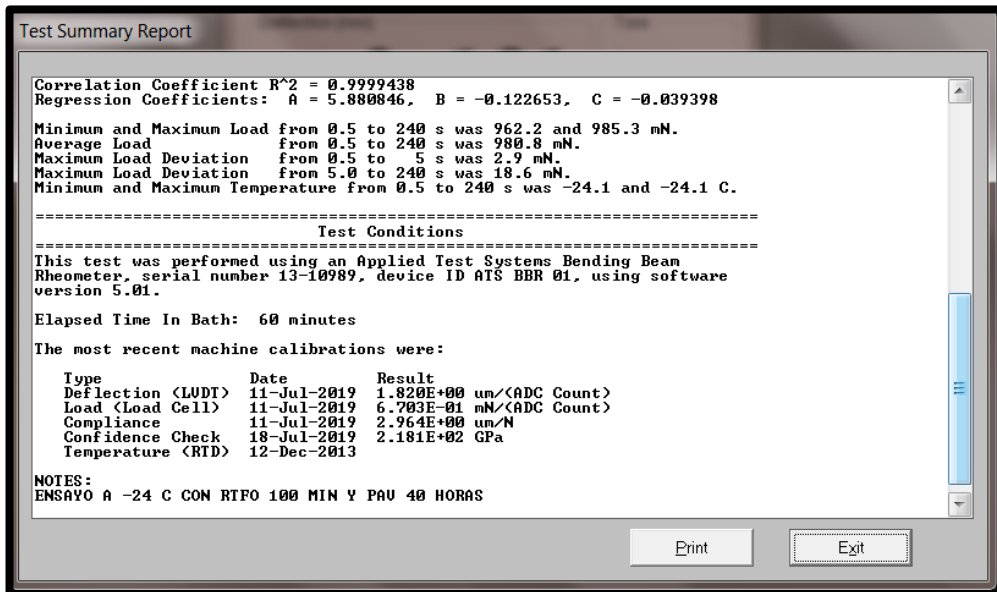
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



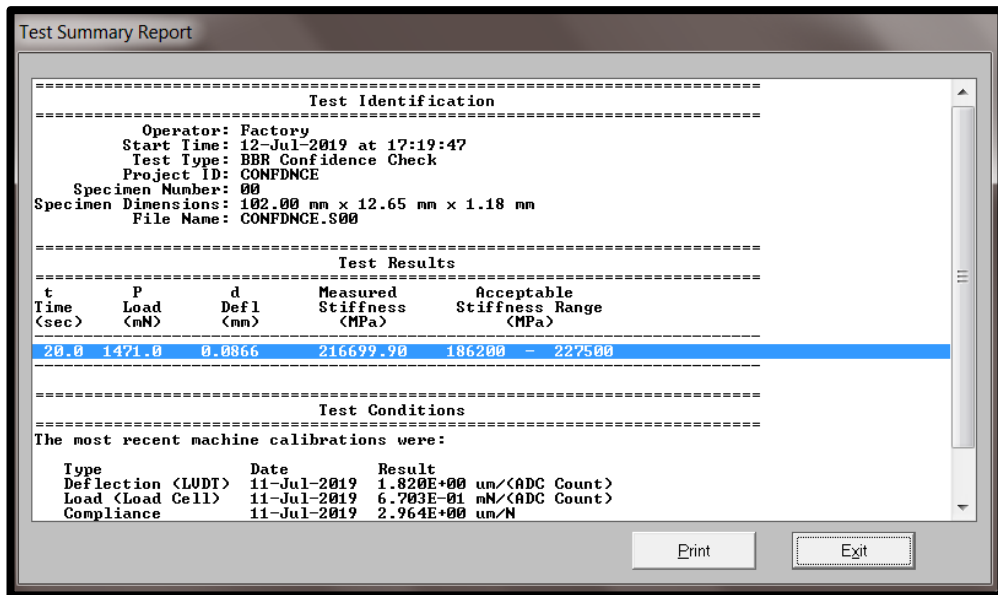
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



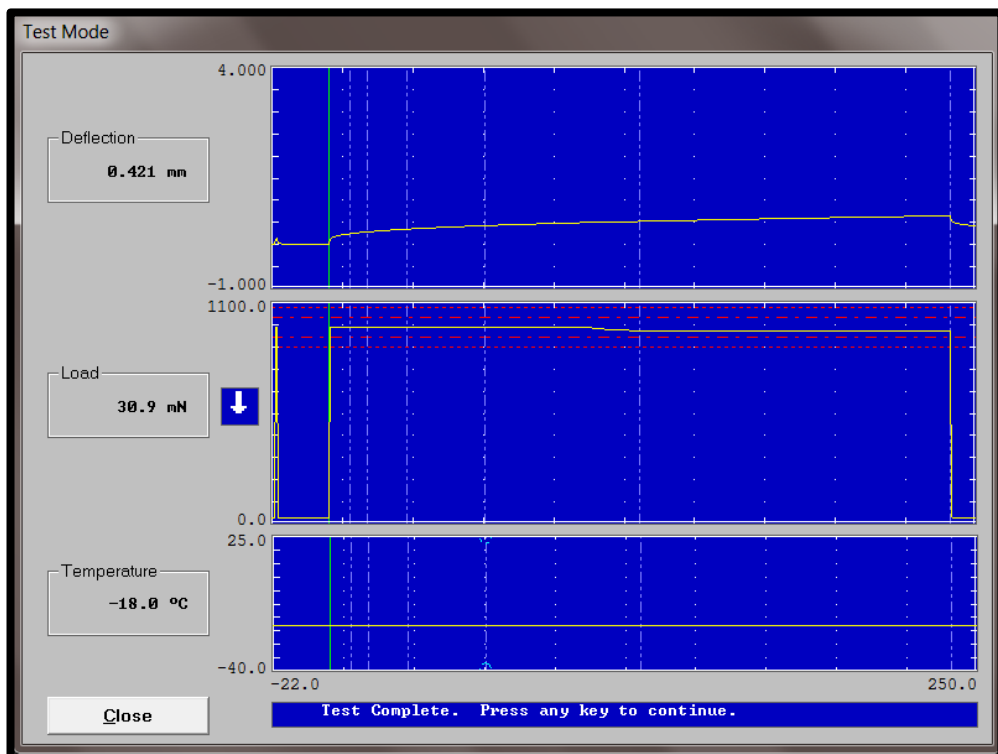
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



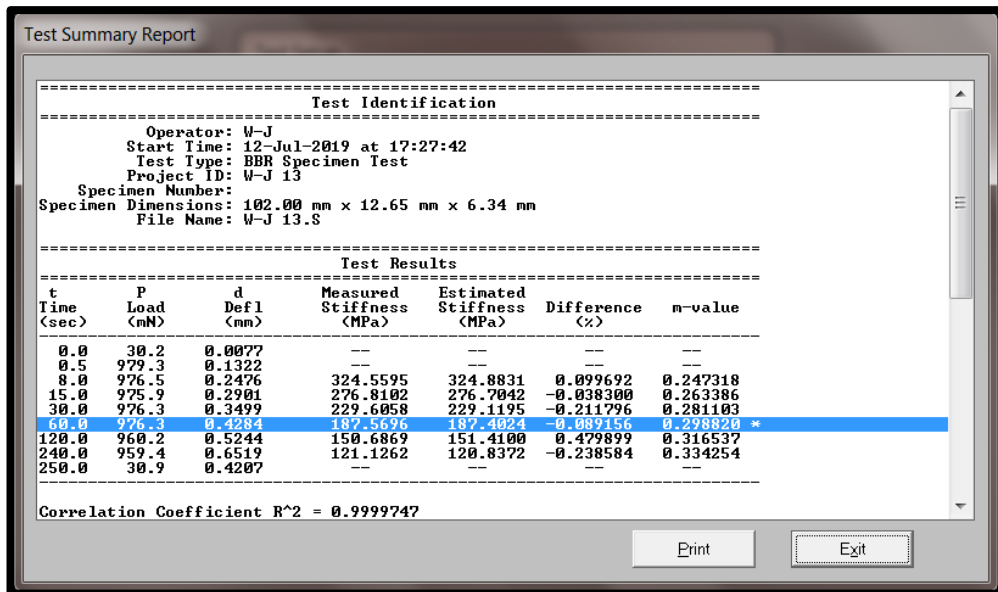
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-24°C).



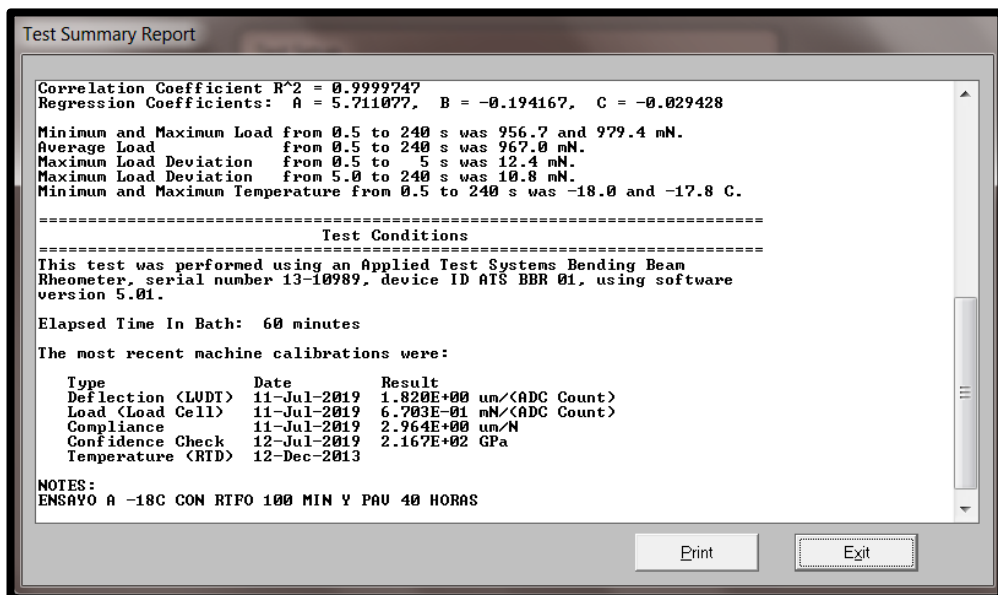
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



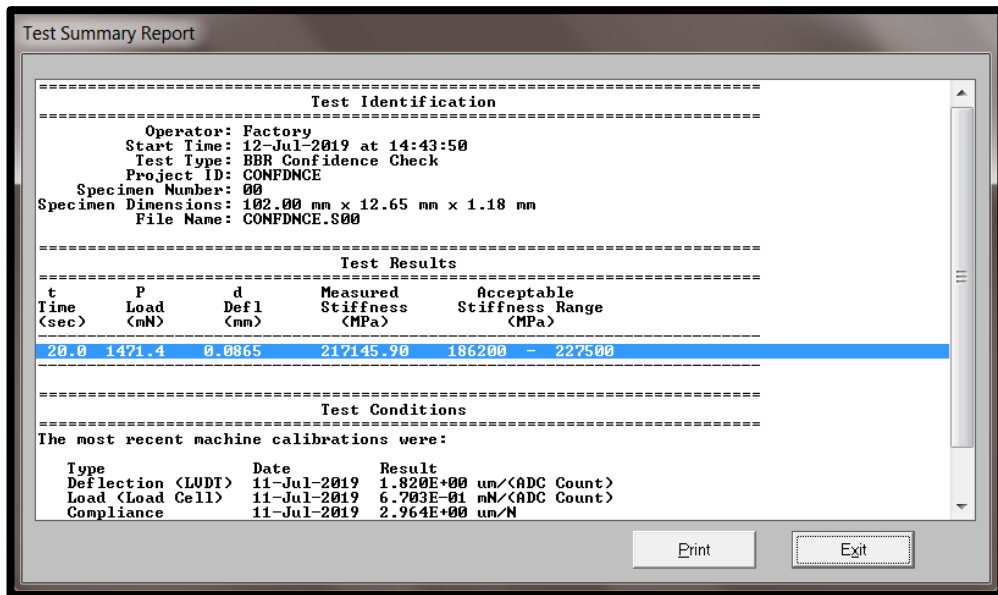
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



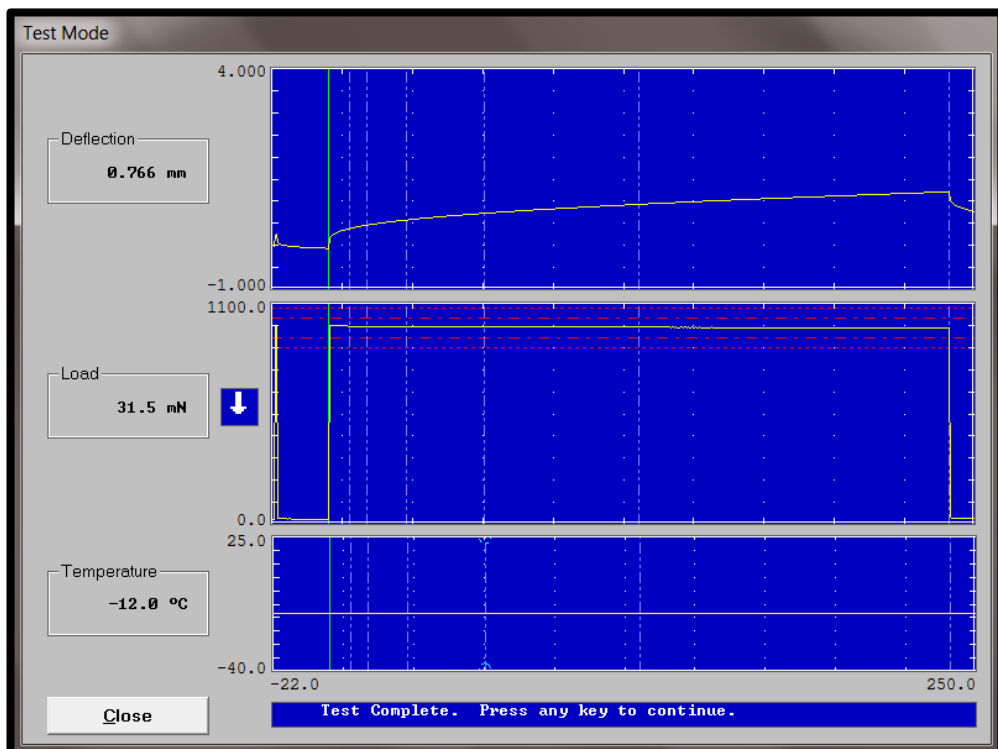
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-12°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-12°C).

Test Summary Report

Test Identification

Operator: W-J
 Start Time: 12-Jul-2019 at 14:49:50
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: W-J 12
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: W-J 12.S

Test Results

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	m-value
0.0	23.2	0.0668	--	--	--	--
0.5	990.4	0.1456	--	--	--	--
8.0	986.5	0.3813	212.9103	212.4878	-0.198460	0.291288
15.0	985.2	0.4624	175.3328	175.9012	0.324147	0.309919
30.0	985.8	0.5758	140.8773	140.8905	0.009365	0.330463
60.0	983.7	0.7272	111.3257	111.2577	-0.065605	0.351006 *
120.0	982.0	0.9311	86.7951	86.6074	-0.216305	0.371550
240.0	977.9	1.2125	66.3702	66.4684	0.147946	0.392093
250.0	31.5	0.7664	--	--	--	--

Correlation Coefficient R² = 0.9999886

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-12°C).

Test Summary Report

Correlation Coefficient R² = 0.9999886
 Regression Coefficients: A = 5.562564, B = -0.229658, C = -0.034122

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 977.3 and 990.4 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.9 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 8.5 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 5.1 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -12.0 and -12.0 C.

Test Conditions

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

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

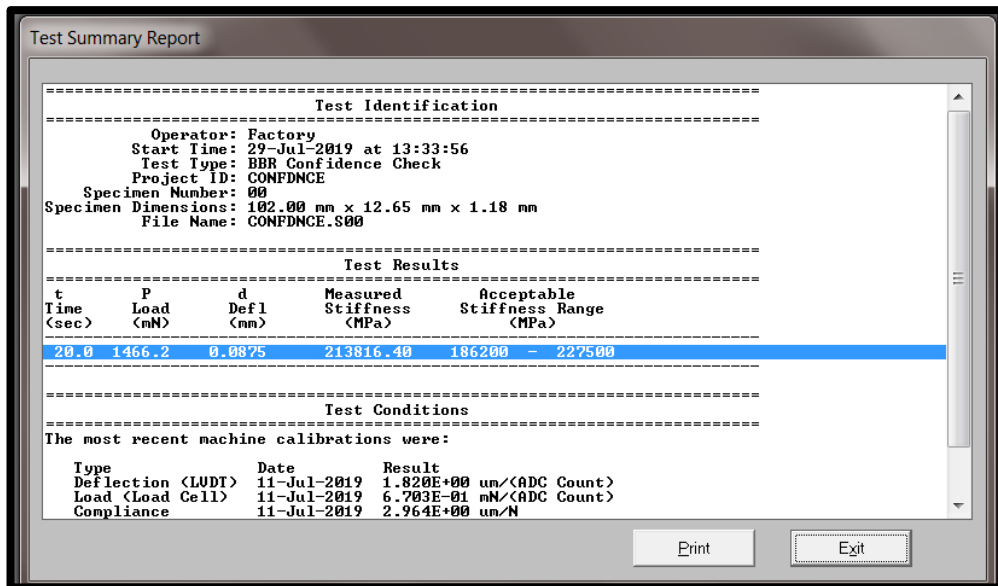
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LVDI)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	12-Jul-2019	2.171E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

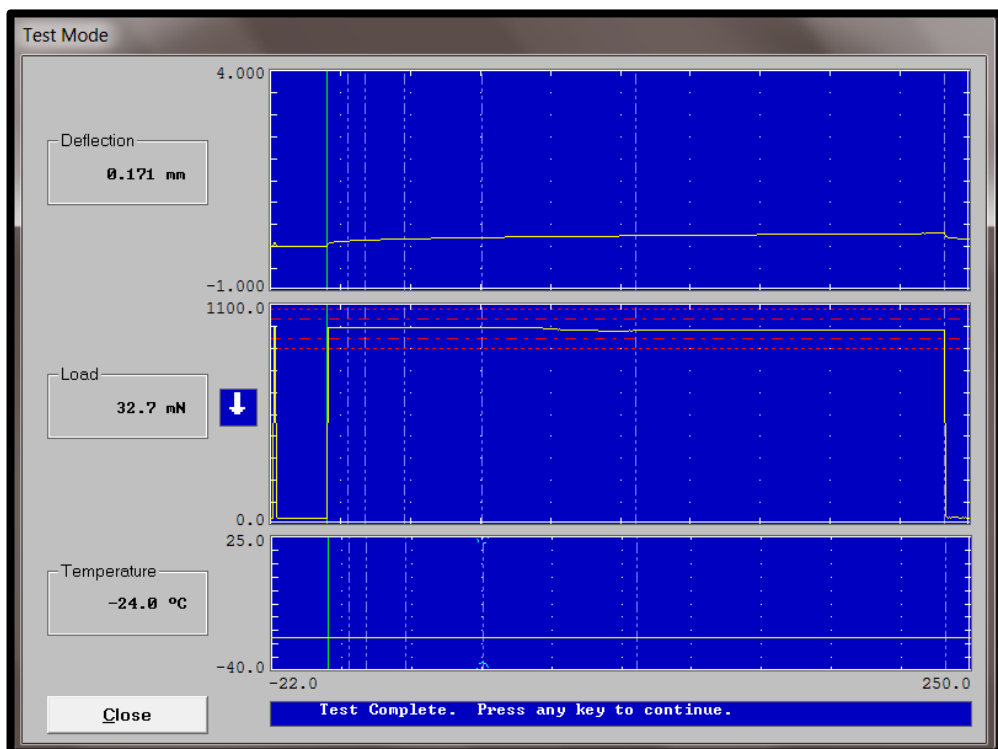
NOTES:
 ENSAYO A -12C CON RTFO 100 MIN Y PAU 40 HORAS

Print Exit

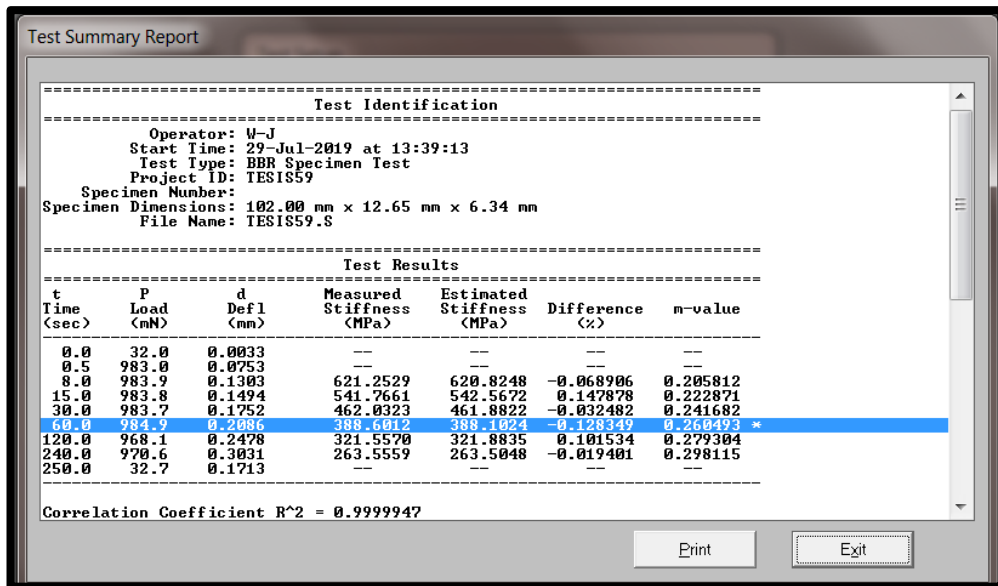
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 40 horas (-12°C).



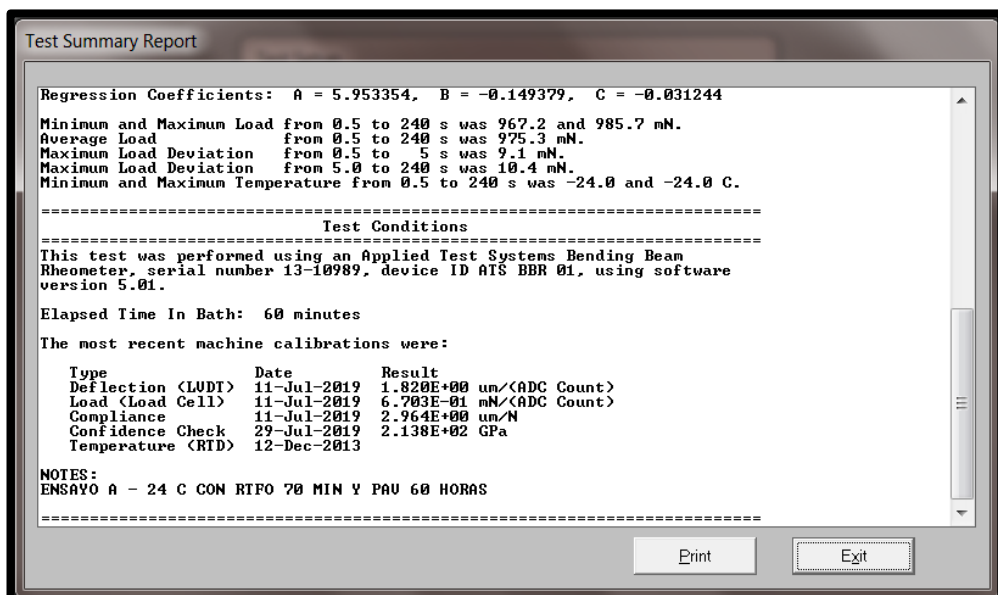
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



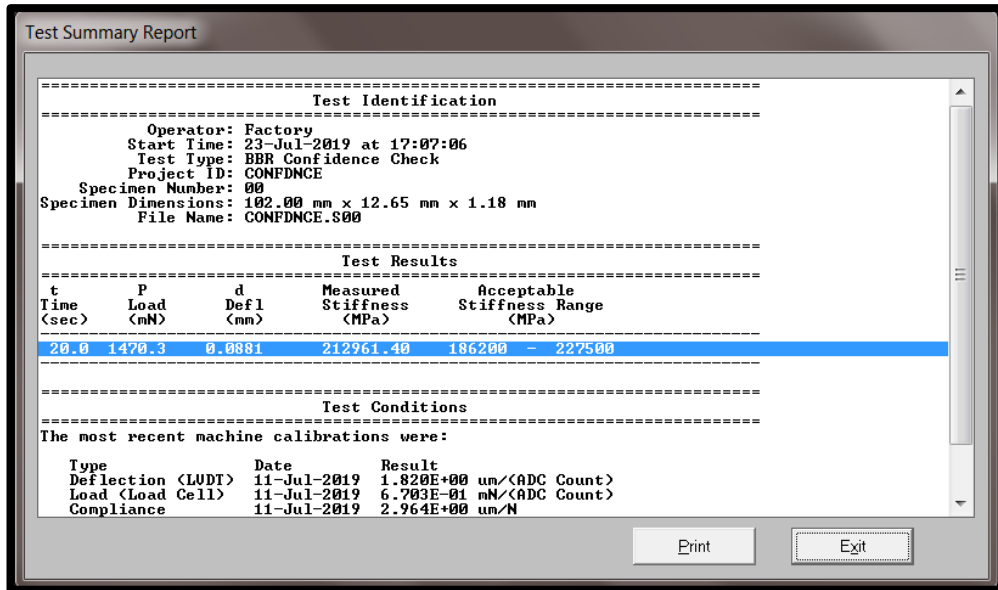
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



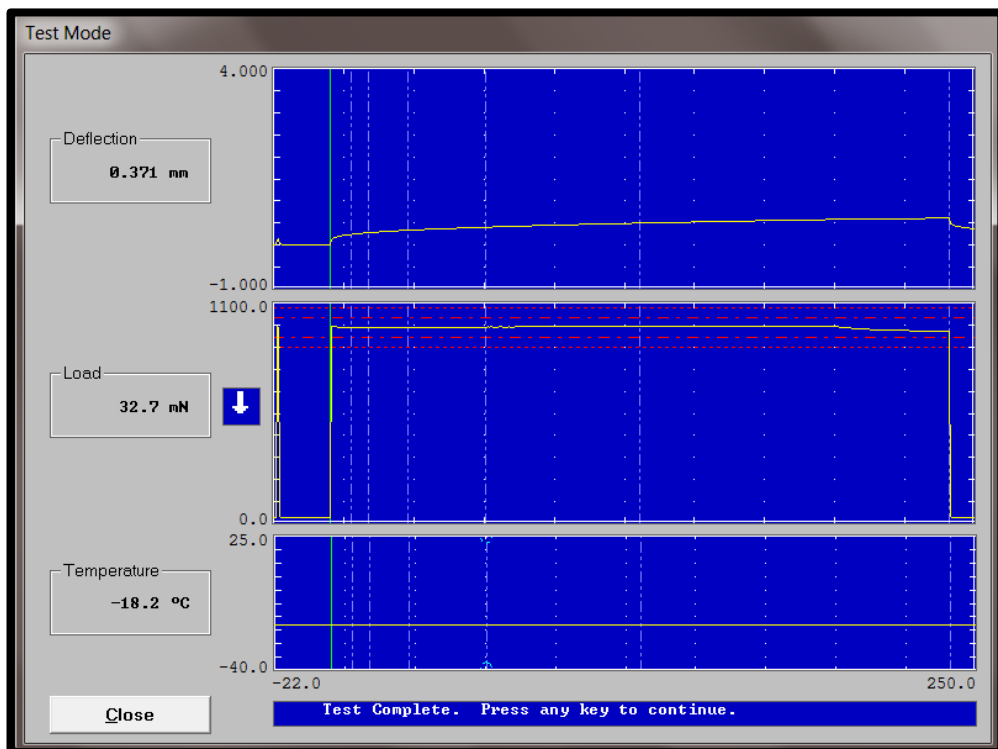
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

Test Identification

Operator: W-J
 Start Time: 23-Jul-2019 at 17:11:49
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS-48
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS-48.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	31.3	0.0031	--	--	--	--
0.5	981.3	0.1251	--	--	--	--
8.0	978.7	0.2426	331.9893	330.9731	-0.306107	0.223794
15.0	979.2	0.2831	284.6677	285.7764	0.389463	0.243357
30.0	978.8	0.3371	238.9292	239.6192	0.288769	0.264929
60.0	978.4	0.4066	190.4493	192.8692	-0.248323	0.233501 *
120.0	982.7	0.5001	161.7187	161.0759	-0.397446	0.308073
240.0	961.5	0.6145	128.7658	129.1352	0.286820	0.329645
250.0	32.7	0.3712	--	--	--	--

Correlation Coefficient R² = 0.9999494

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.692676, B = -0.159078, C = -0.03583

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 960.5 and 984.2 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 978.6 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 2.7 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 18.1 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.2 and -18.1 C.

Test Conditions

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

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

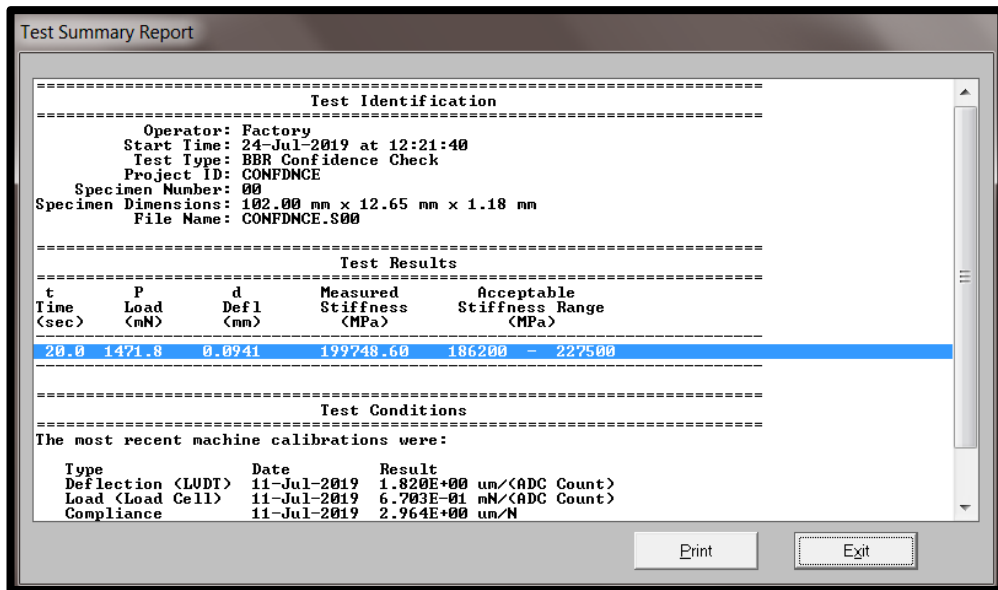
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDI)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	23-Jul-2019	2.130E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

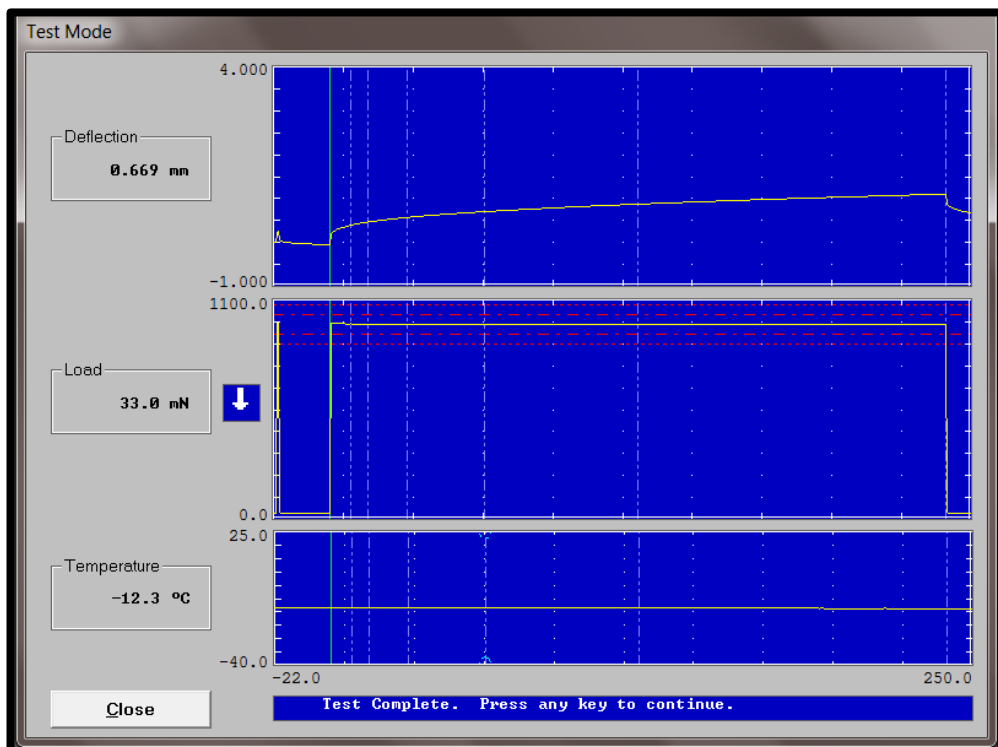
NOTES:
 ENSAYO A -18C CON RTFO 70 MIN Y PAV 60 HORAS

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-12°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 24-Jul-2019 at 12:26:50
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS50
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS50.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	29.8	0.0441	--	--	--	--
0.5	982.4	0.1691	--	--	--	--
8.0	980.7	0.3947	204.4884	204.1883	-0.146732	0.265181
15.0	979.6	0.4695	171.6932	172.0782	0.224277	0.279175
30.0	979.0	0.5716	140.9648	141.0468	0.058160	0.294607
60.0	978.0	0.7029	114.5084	114.3813	-0.111010	0.310038 *
120.0	978.0	0.8759	91.8876	91.7702	-0.127780	0.325469
240.0	977.1	1.1050	72.7702	72.8456	0.103658	0.340900
250.0	33.0	0.6687	--	--	--	--

 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999924

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-12°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.52861, B = -0.218887, C = -0.025631

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 976.7 and 982.8 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 978.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 4.7 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.8 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -12.3 and -12.2 C.

Test Conditions

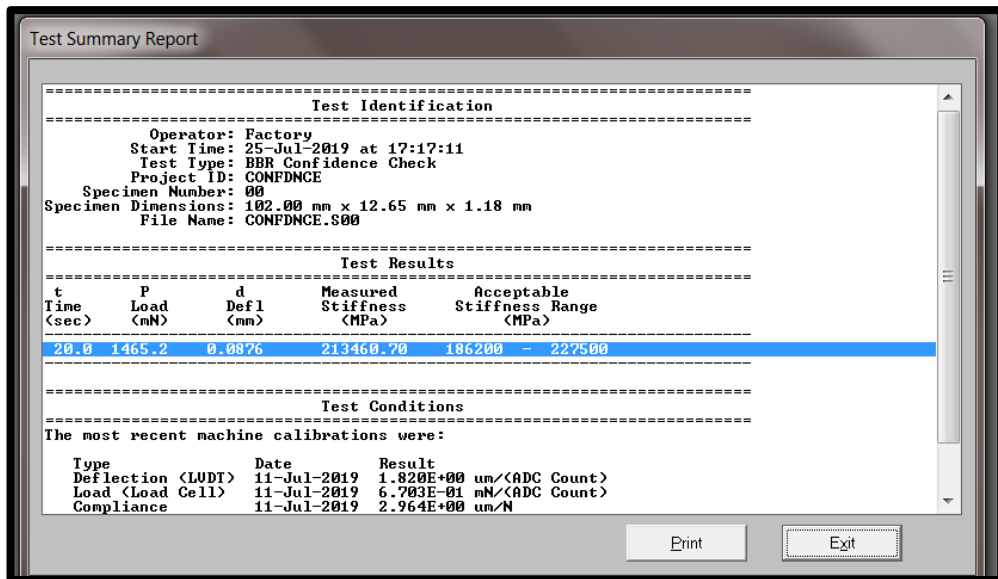
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUFT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	24-Jul-2019	1.997E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

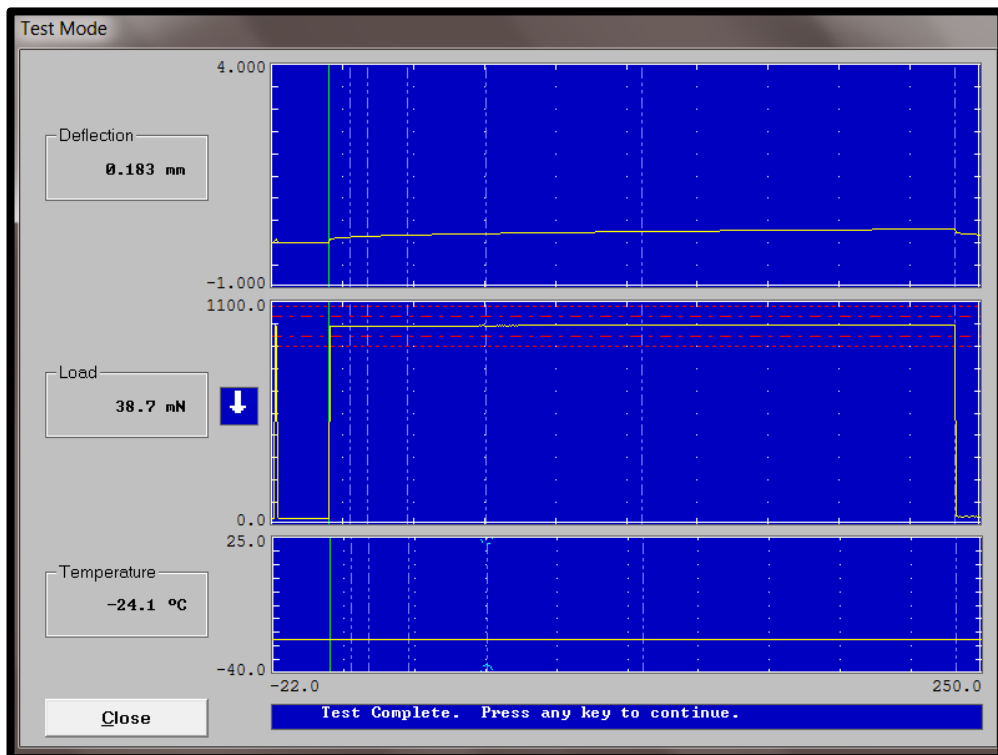
NOTES:
 ENSAYO A -12C CON RTFO 70 MINUTOS Y PAU 60 HORAS

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 70 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-24°C).

Test Summary Report

Test Identification

Operator: W-J
 Start Time: 25-Jul-2019 at 17:22:10
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS601
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS601.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	31.9	0.0016	--	--	--	--
0.5	979.9	0.0776	--	--	--	--
8.0	978.2	0.1319	610.4291	610.5031	0.012113	0.202998
15.0	977.3	0.1507	533.6574	534.3820	0.135769	0.220708
30.0	978.3	0.1760	457.4106	455.4837	-0.421268	0.240236
60.0	979.2	0.2116	331.4283	308.0477	-0.316334	0.259706 *
120.0	981.8	0.2543	317.7720	317.7456	-0.008296	0.279292
240.0	985.8	0.3118	260.1945	260.0550	-0.053635	0.298820
250.0	38.7	0.1835	--	--	--	--

Correlation Coefficient R² = 0.9999697

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-24°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.94256, B = -0.144414, C = -0.032435

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 977.1 and 986.0 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 982.0 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 3.5 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 -24.0 and -23.8 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

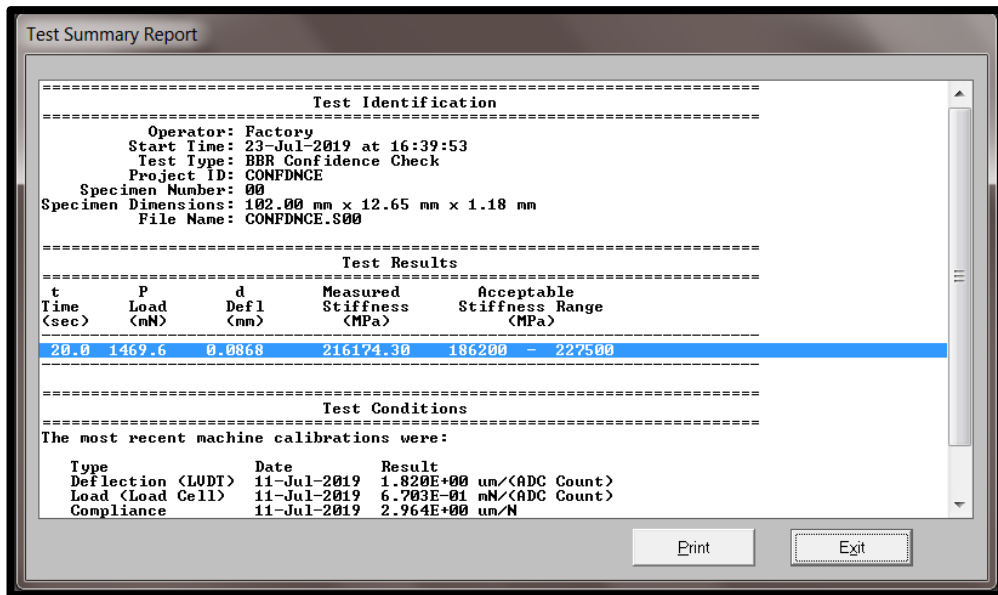
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	25-Jul-2019	2.135E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

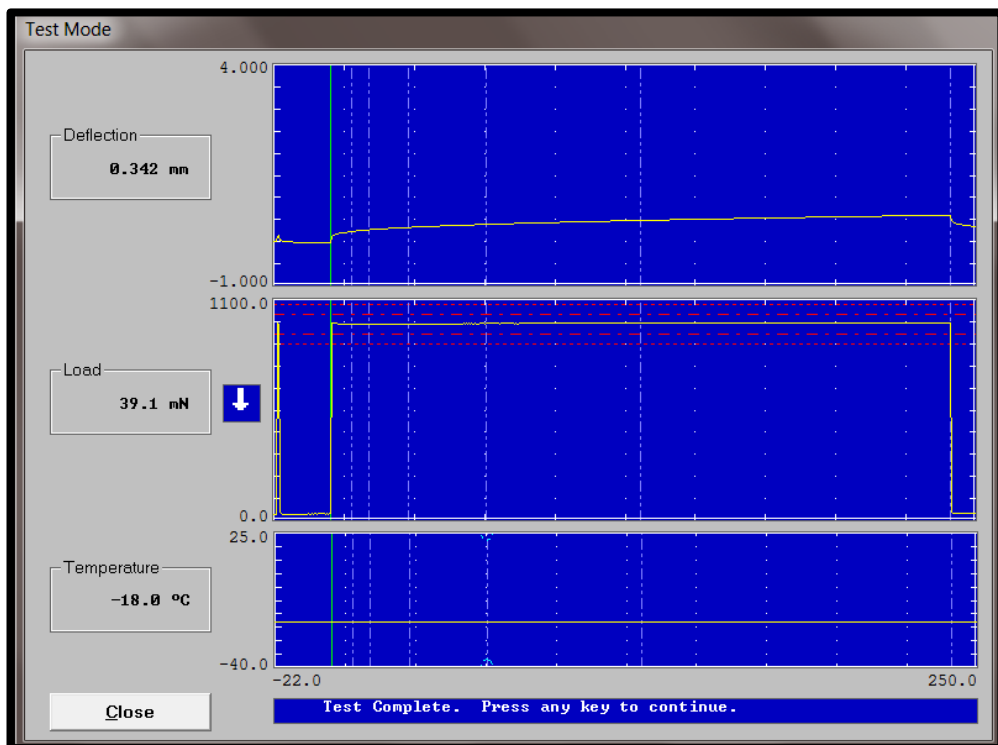
NOTES:
 ENSAYO A -24 C CON RTFO 85 MIN Y PAU 60 HORAS

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

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

Operator: W-J
 Start Time: 23-Jul-2019 at 16:43:55
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS -
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS - .S

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

t Time <sec>	P Load <mN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	n-value
0.0	34.6	0.0265	--	--	--	--
0.5	981.7	0.1153	--	--	--	--
8.0	980.1	0.2316	348.3477	347.5686	-0.223654	0.235265
15.0	978.9	0.2710	297.3095	298.2625	0.320564	0.251486
30.0	979.6	0.3243	248.6010	249.0014	0.161060	0.269372
60.0	980.7	0.3921	205.8432	205.3150	-0.256564	0.287258 *
120.0	981.1	0.4822	167.4593	167.2074	-0.150419	0.305144
240.0	983.7	0.6028	134.2929	134.4950	0.150462	0.323029
250.0	39.1	0.3419	--	--	--	--

=====
 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999773

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

=====
 Regression Coefficients: A = 5.729277, B = -0.181607, C = -0.029708

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 978.5 and 984.0 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.3 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 1.4 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 2.8 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.0 and -18.0 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

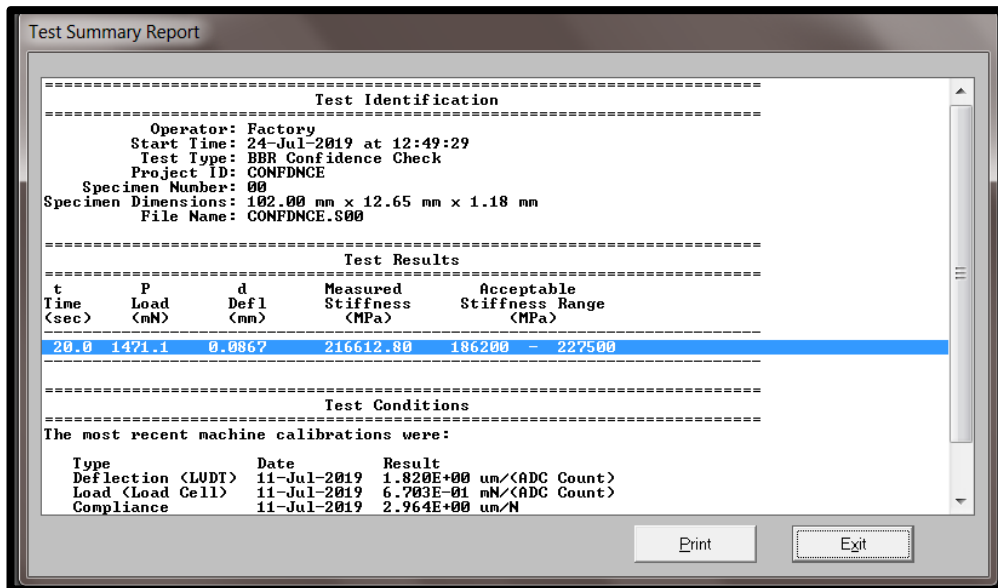
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection <LU DT>	11-Jul-2019	1.820E+00 um/<ADC Count>
Load <Load Cell>	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/<ADC Count>
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	23-Jul-2019	2.162E+02 GPa
Temperature <RTD>	12-Dec-2013	

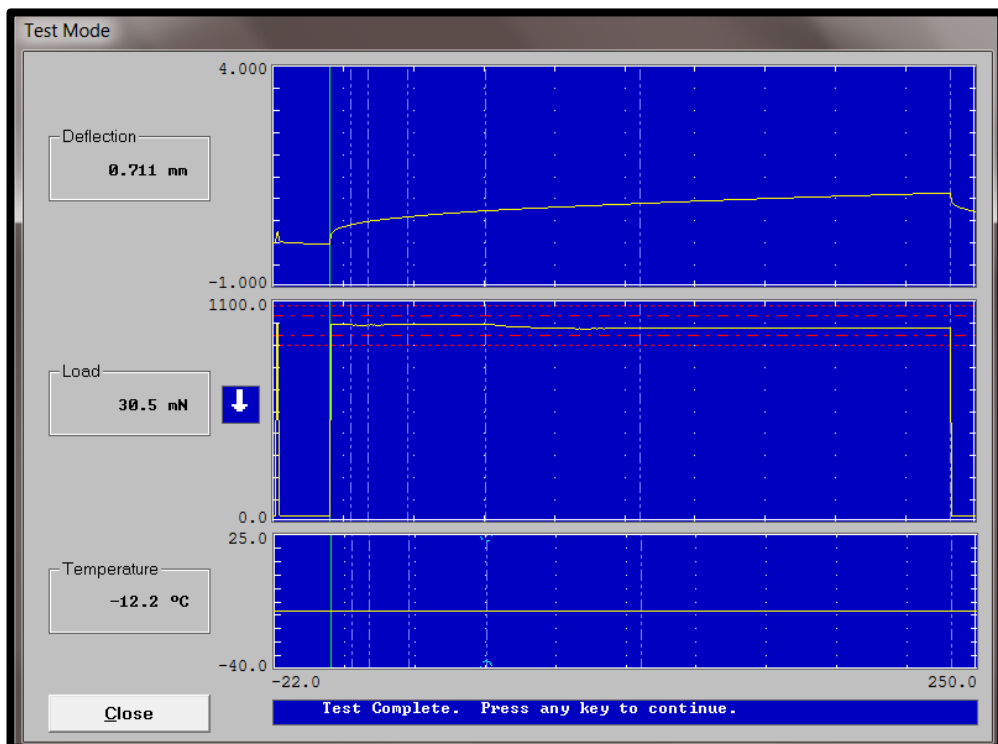
NOTES:
 ENSAYO A -18 C CON RTFO 85 MIN Y PAV 60 HORAS

=====
 Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-12°C).

Test Summary Report

Test Identification

 Operator: W-J
 Start Time: 24-Jul-2019 at 12:55:20
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS51
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS51.S

Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	32.1	0.0172	--	--	--	--
0.5	982.7	0.1991	--	--	--	--
8.0	981.0	0.4123	195.7919	195.5635	-0.116656	0.254150
15.0	980.6	0.4879	165.3819	165.7591	0.228080	0.271932
30.0	982.0	0.5927	136.3592	136.3535	-0.004168	0.291539
60.0	988.8	0.7306	110.9114	110.6595	-0.235382	0.311146 *
120.0	963.2	0.8962	88.4519	88.5804	0.145238	0.330754
240.0	965.0	1.1351	69.9667	69.9552	-0.016481	0.350361
250.0	30.5	0.7113	--	--	--	--

 Correlation Coefficient R^2 = 0.9999905

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-12°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.494248, B = -0.195329, C = -0.032567

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 961.1 and 984.2 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 969.5 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 13.2 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 14.7 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -12.2 and -12.2 C.

Test Conditions

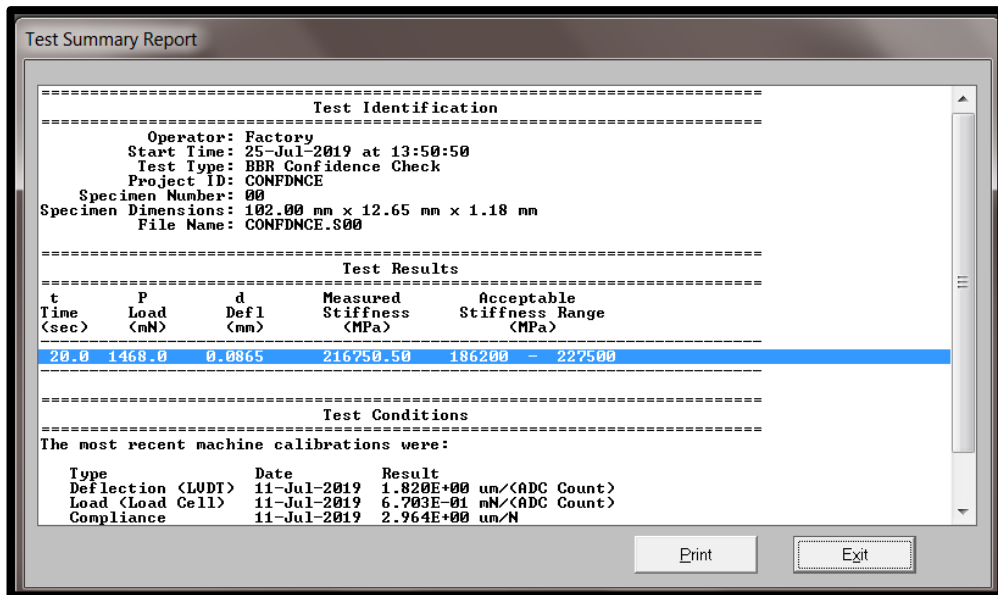
 This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID AT5 BBR 01, using software version 5.01.
 Elapsed Time In Bath: 60 minutes
 The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUDT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	24-Jul-2019	2.166E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

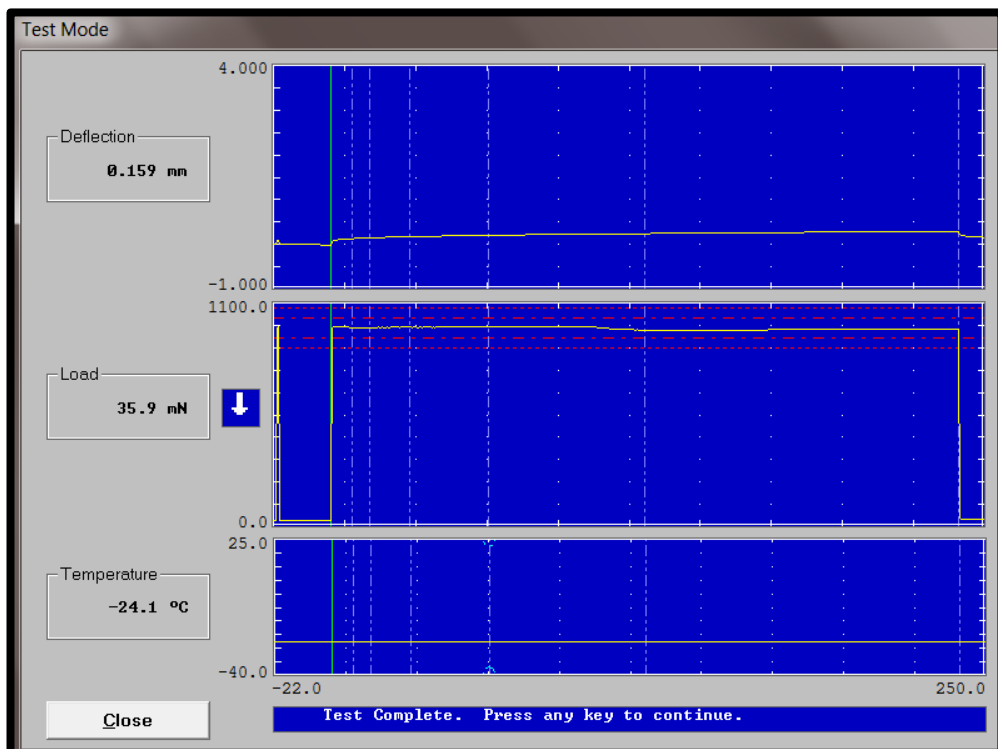
NOTES:
 ENSAYO A - 12 C CON RTFO 85 MIN Y PAV 60 HORAS

Print Exit

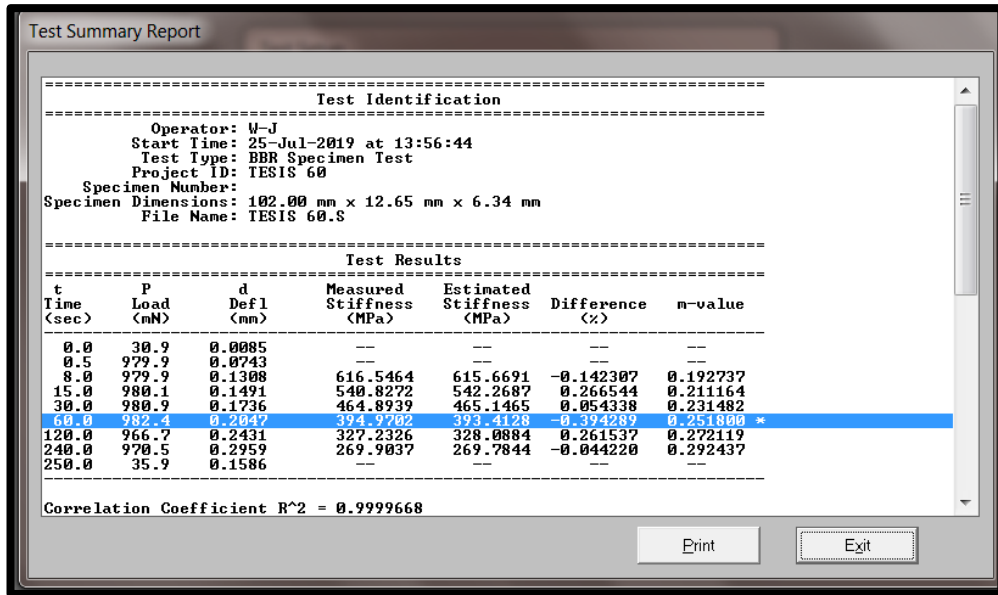
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 85 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



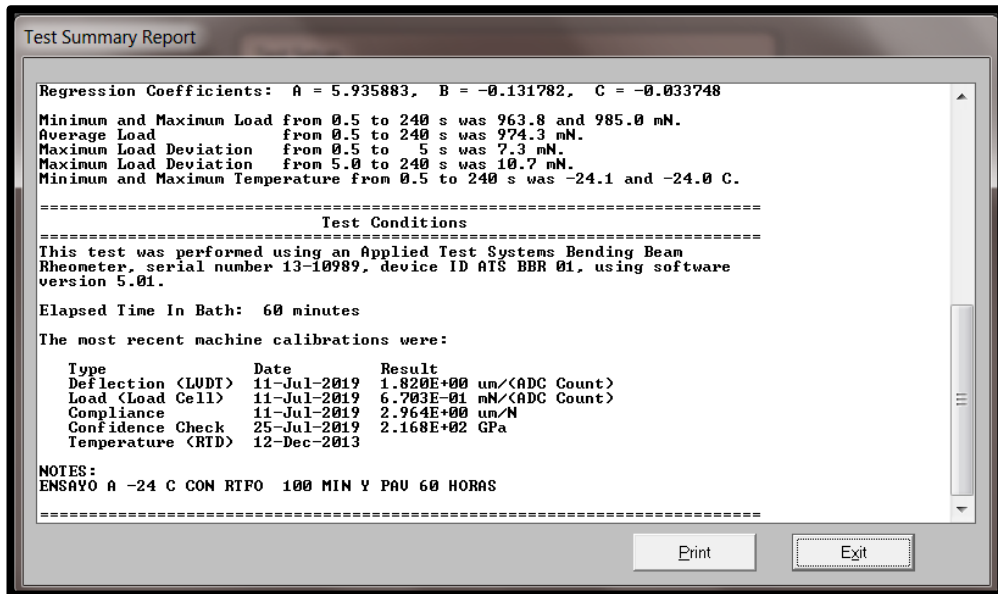
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



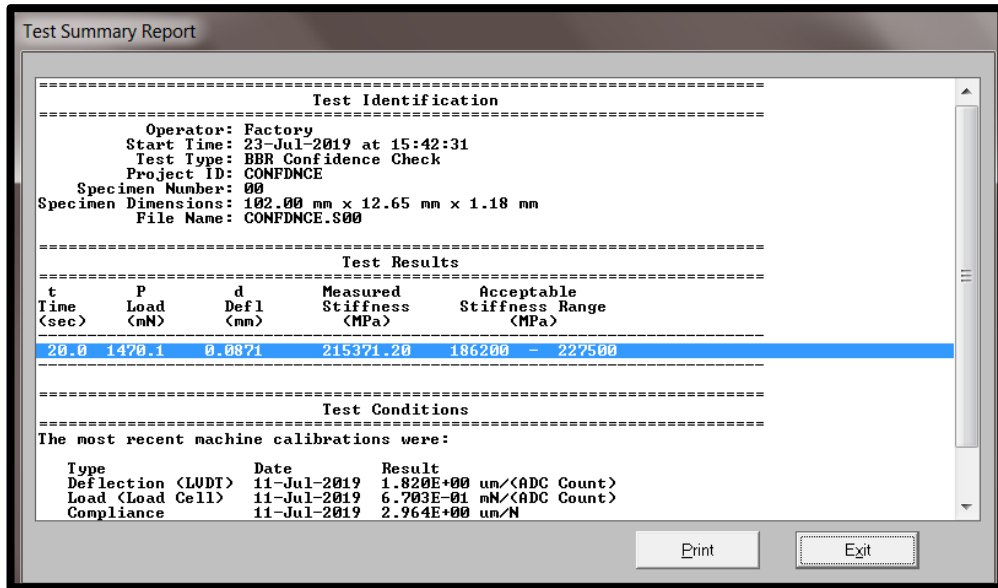
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



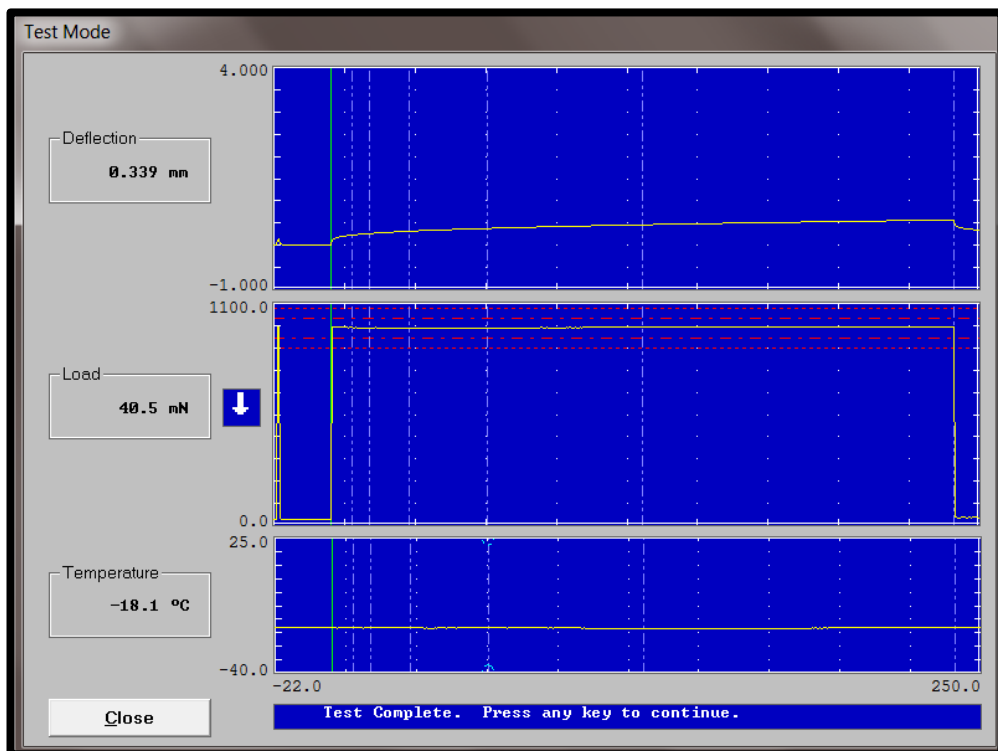
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-24°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

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

Operator: W-J
 Start Time: 23-Jul-2019 at 15:47:29
 Test Type: BBR Specimen Test
 Project ID: TESIS-47
 Specimen Number:
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
 File Name: TESIS-47.S

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

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	33.5	0.0012	--	--	--	--
0.5	982.2	0.1229	--	--	--	--
8.0	980.5	0.2310	349.2472	349.0284	-0.062631	0.224324
15.0	980.2	0.2675	301.5317	301.7017	0.056359	0.239287
30.0	979.7	0.3175	253.9214	254.1335	0.083515	0.255786
60.0	979.4	0.3309	211.6655	211.6309	0.012524	0.272236 *
120.0	981.4	0.4627	174.5683	174.2327	-0.192258	0.288785
240.0	984.9	0.5721	141.6657	141.8121	0.103299	0.305284
250.0	40.5	0.3392	--	--	--	--

Correlation Coefficient R^2 = 0.9999946

Print Exit

Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-18°C).

Test Summary Report

Regression Coefficients: A = 5.723094, B = -0.174825, C = -0.027405

Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 978.9 and 985.3 mN.
 Average Load from 0.5 to 240 s was 981.9 mN.
 Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 1.3 mN.
 Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 3.4 mN.
 Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -18.2 and -18.2 C.

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

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

Elapsed Time In Bath: 60 minutes

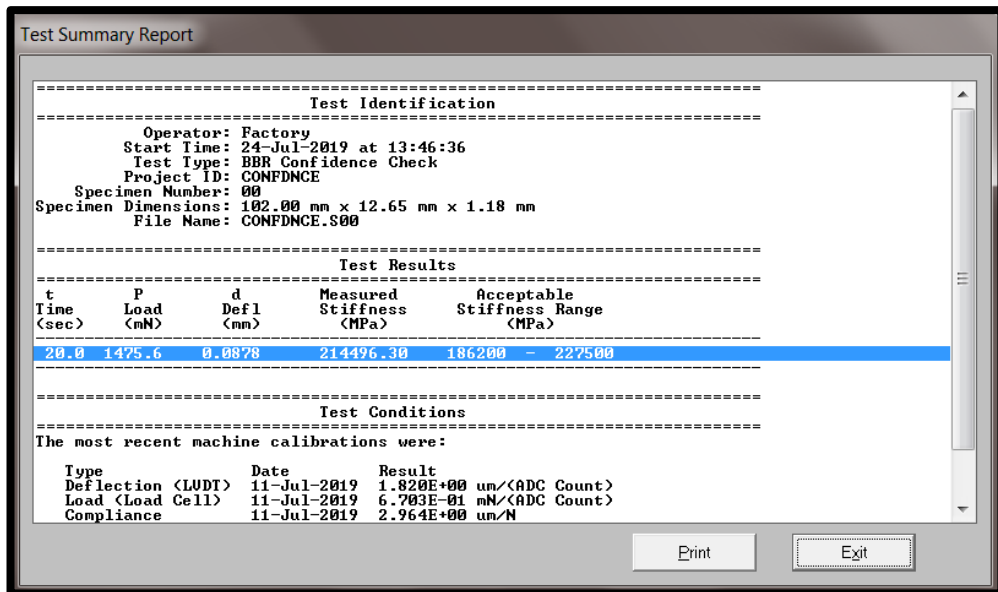
The most recent machine calibrations were:

Type	Date	Result
Deflection (LUPT)	11-Jul-2019	1.820E+00 um/(ADC Count)
Load (Load Cell)	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/(ADC Count)
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	23-Jul-2019	2.154E+02 GPa
Temperature (RTD)	12-Dec-2013	

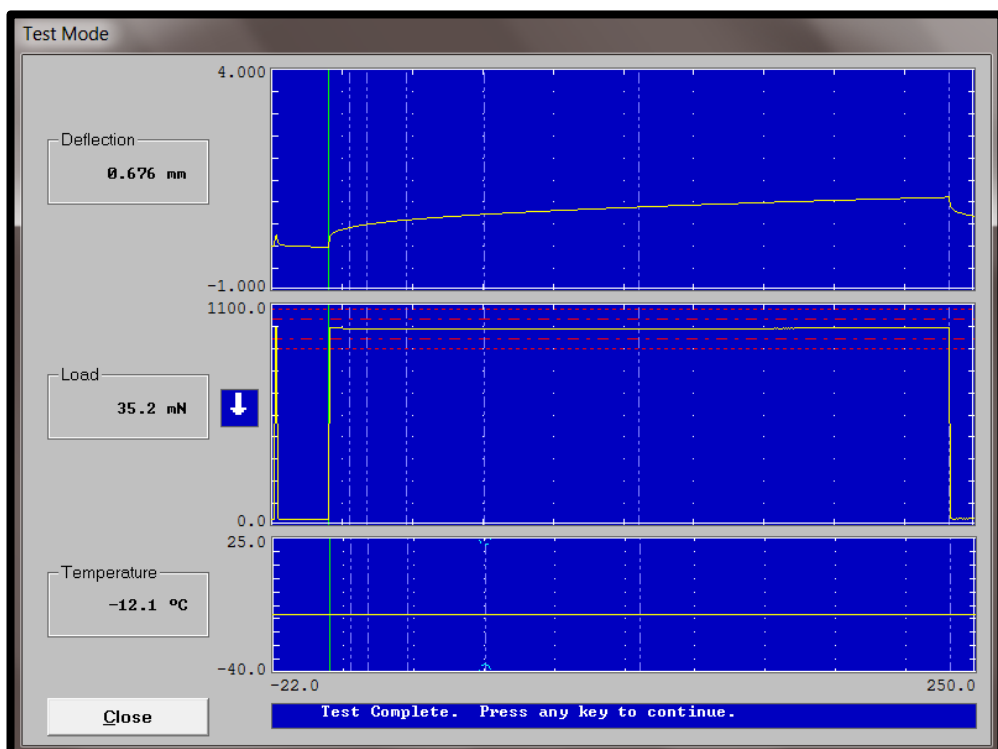
NOTES:
 ENSAYO A -18C CON RTFO 100 MIN Y PAU 60 HORAS

=====
 Print Exit

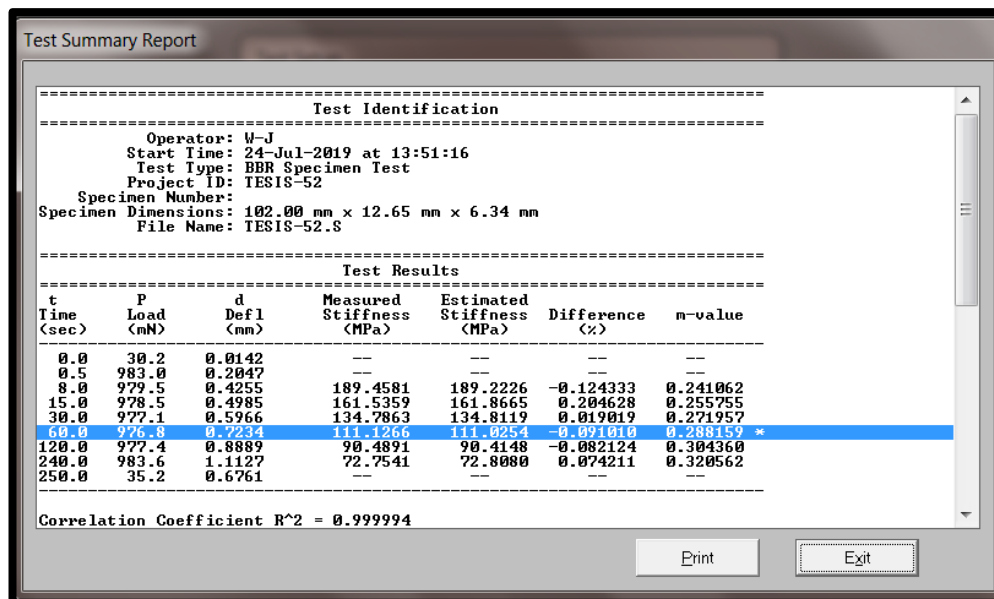
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
 Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-18°C).



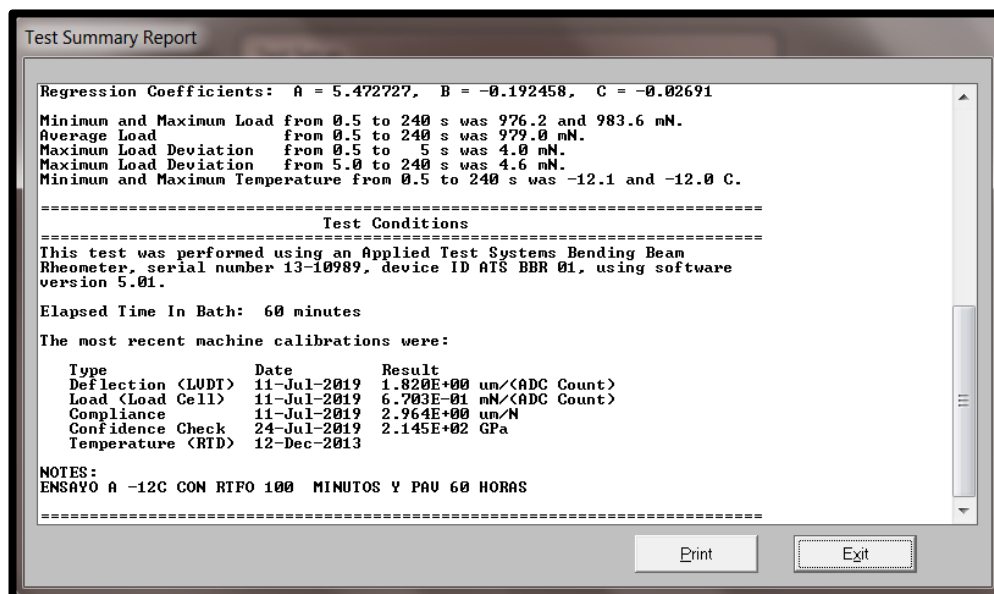
Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



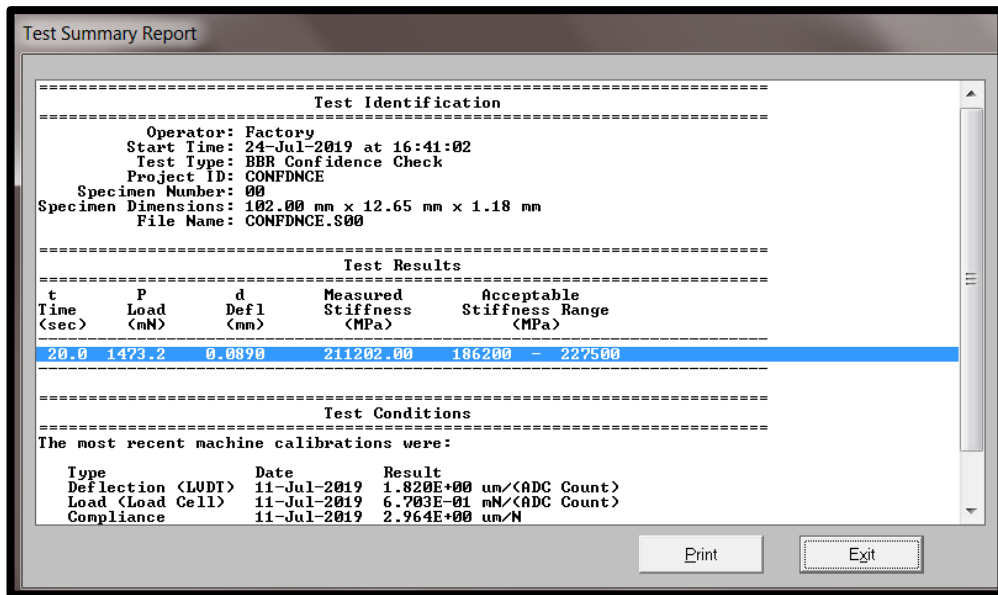
Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



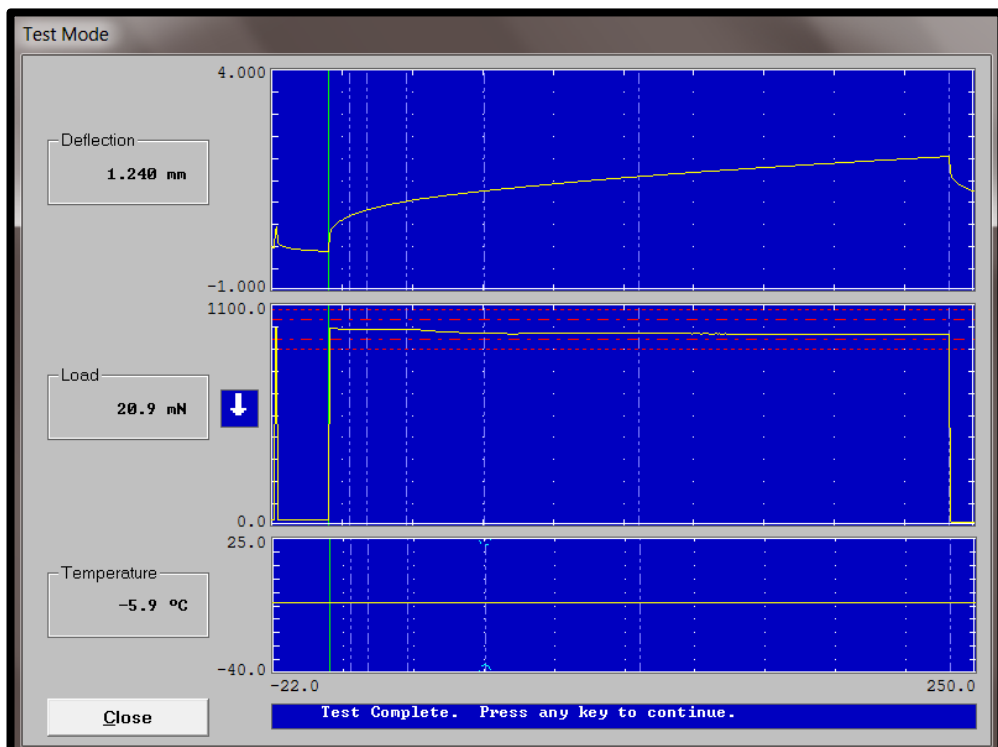
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-12°C).



Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-6°C).



Gráfica de resultados del programa Bohlin del Equipo BBR. Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-6°C).

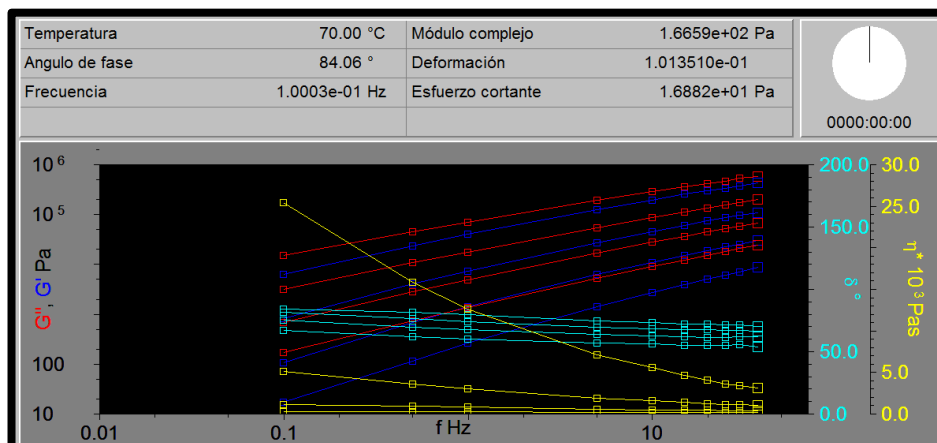
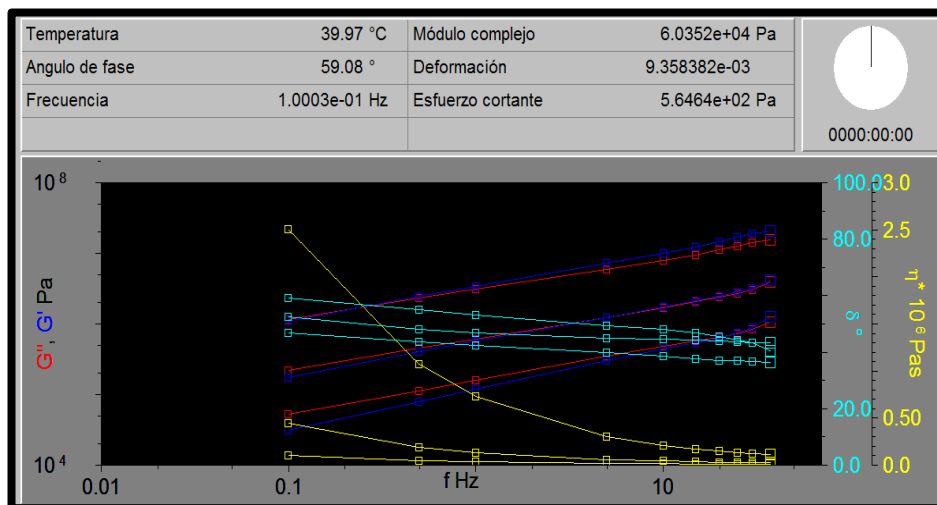
Test Summary Report						
Test Identification						
Operator: W-J						
Start Time: 24-Jul-2019 at 16:45:54						
Test Type: BBR Specimen Test						
Project ID: TESIS-53						
Specimen Number:						
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm						
File Name: TESIS-53.S						
Test Results						
t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	30.9	0.1033	--	--	--	--
0.5	984.5	0.2830	--	--	--	--
8.0	978.3	0.6957	115.7207	115.4527	-0.231644	0.276593
15.0	977.3	0.8363	96.1733	96.4989	0.338538	0.293967
30.0	977.9	1.0297	78.1561	78.1890	0.042881	0.313125
60.0	959.2	1.2692	59.4725	62.3496	0.463974	0.332038 *
120.0	956.6	1.5884	49.5641	49.3278	-0.476867	0.351441
240.0	951.3	2.0438	38.3072	38.4073	0.261275	0.370599
250.0	20.9	1.2405	--	--	--	--
Correlation Coefficient R ² = 0.9999726						
				Print	Exit	

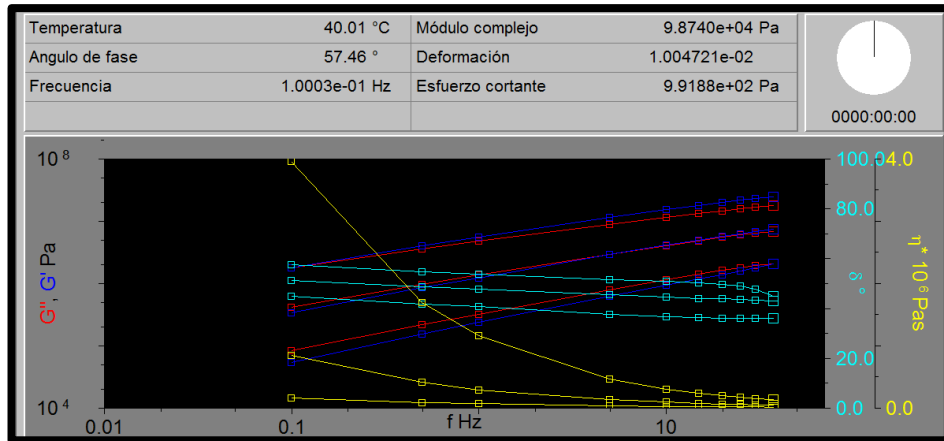
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-6°C).

Test Summary Report		
Regression Coefficients: A = 5.28624, B = -0.219119, C = -0.031821		
Minimum and Maximum Load from 0.5 to 240 s was 951.1 and 984.5 mN.		
Average Load from 0.5 to 240 s was 959.2 mN.		
Maximum Load Deviation from 0.5 to 5 s was 25.3 mN.		
Maximum Load Deviation from 5.0 to 240 s was 19.9 mN.		
Minimum and Maximum Temperature from 0.5 to 240 s was -6.0 and -5.9 C.		
Test Conditions		
This test was performed using an Applied Test Systems Bending Beam Rheometer, serial number 13-10989, device ID ATS BBR 01, using software version 5.01.		
Elapsed Time In Bath: 60 minutes		
The most recent machine calibrations were:		
Type	Date	Result
Deflection <LU DI>	11-Jul-2019	1.820E+00 um/<ADC Count>
Load <Load Cell>	11-Jul-2019	6.703E-01 mN/<ADC Count>
Compliance	11-Jul-2019	2.964E+00 um/N
Confidence Check	24-Jul-2019	2.112E+02 GPa
Temperature <RTD>	12-Dec-2013	
NOTES: ENSAYO A - 6 C CON RTFO 100 MIN Y PAV 60 HORAS		
		Print
		Exit

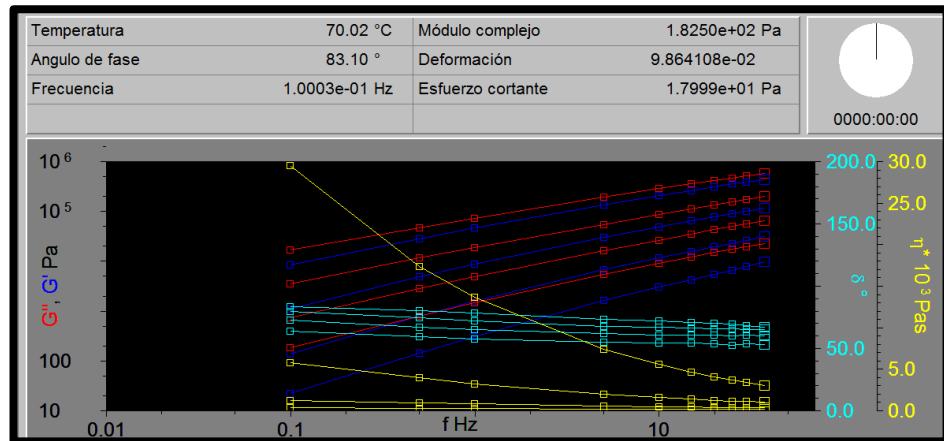
Resultados del programa Bohlin del Equipo BBR.
Asfalto Envejecido con RTFO 100 minutos y PAV 60 horas (-6°C).

Anexo 3. Resultados para determinar curvas maestras del programa Bohlin Software Integrated del equipo DSR

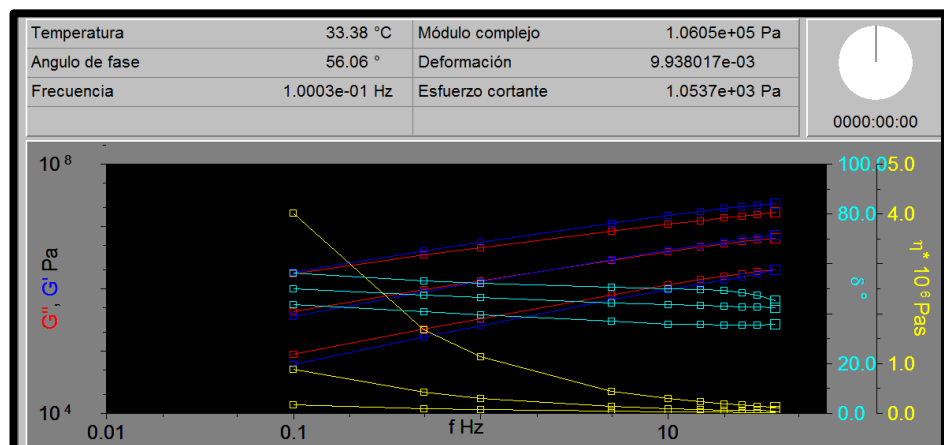




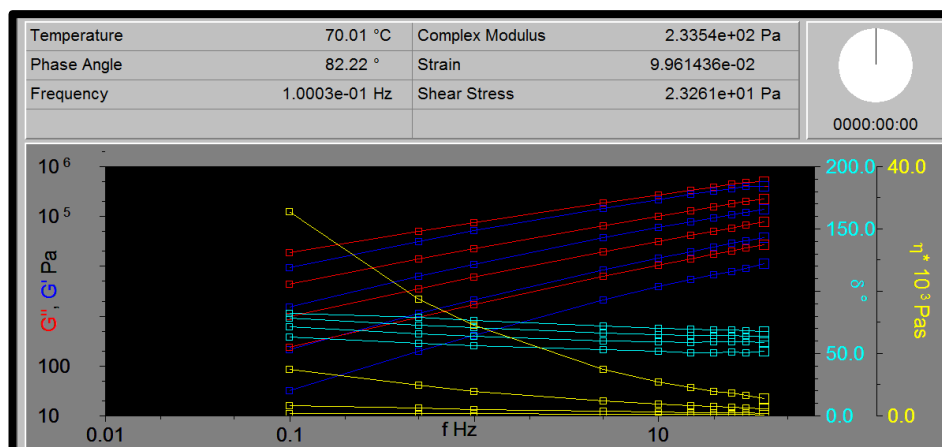
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos. Temperaturas: 10-30 °C.



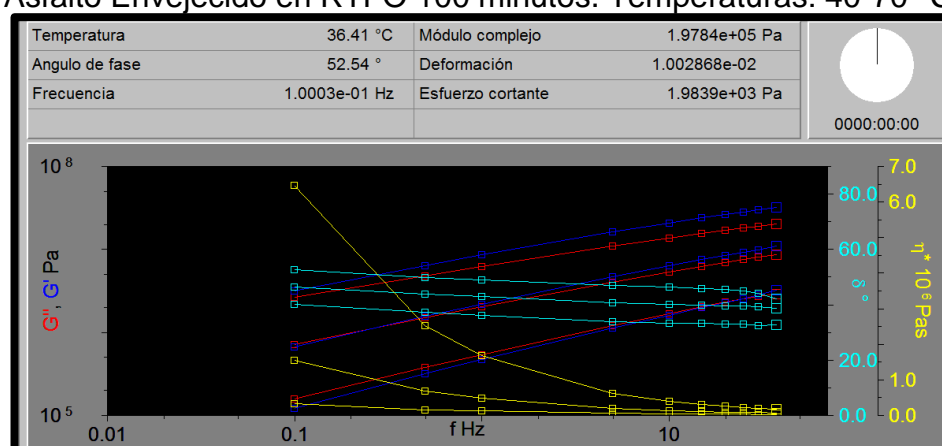
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos. Temperaturas: 40-70 °C.



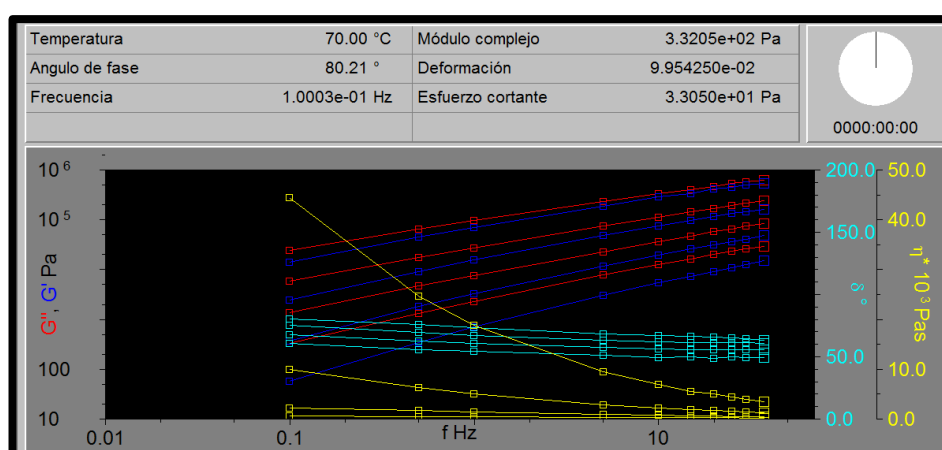
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos. Temperaturas: 10-30 °C.



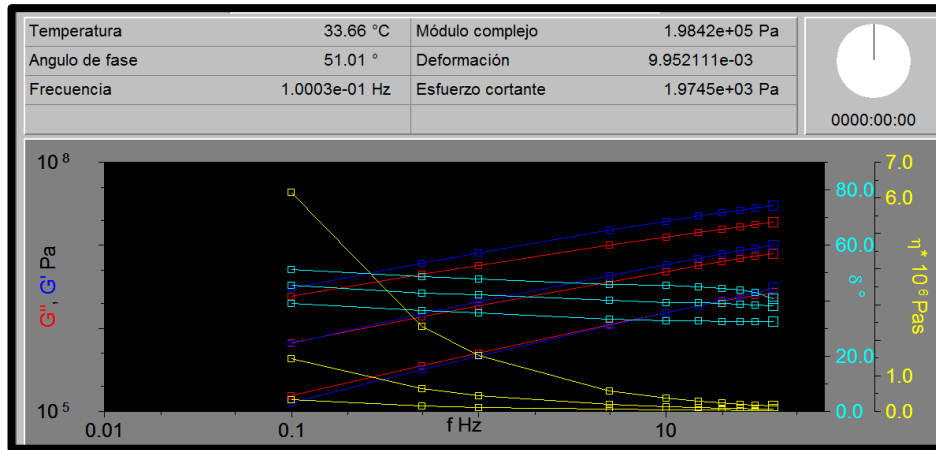
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos. Temperaturas: 40-70 °C.



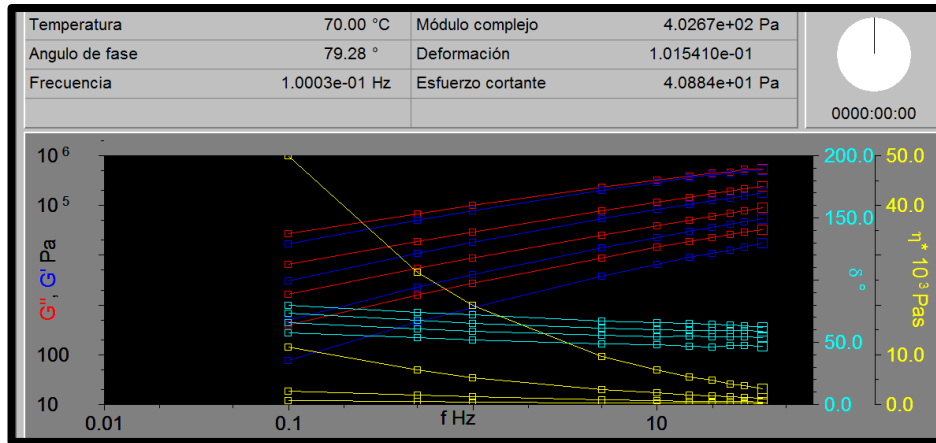
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



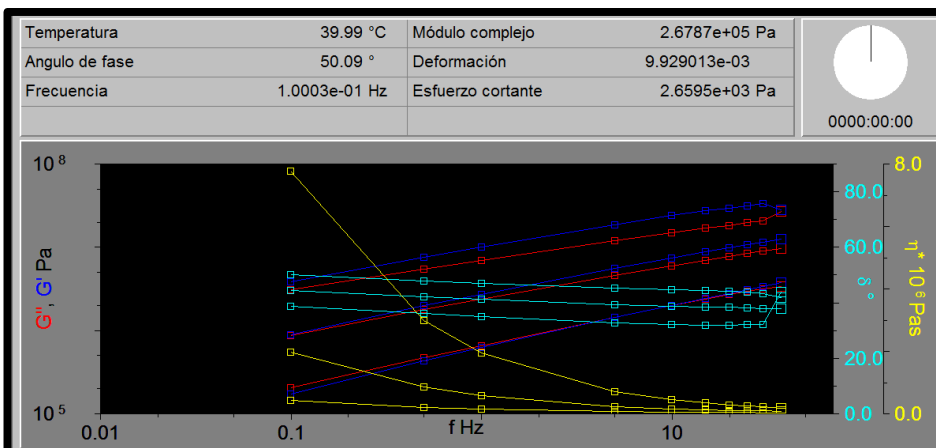
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas: 40-70 °C.



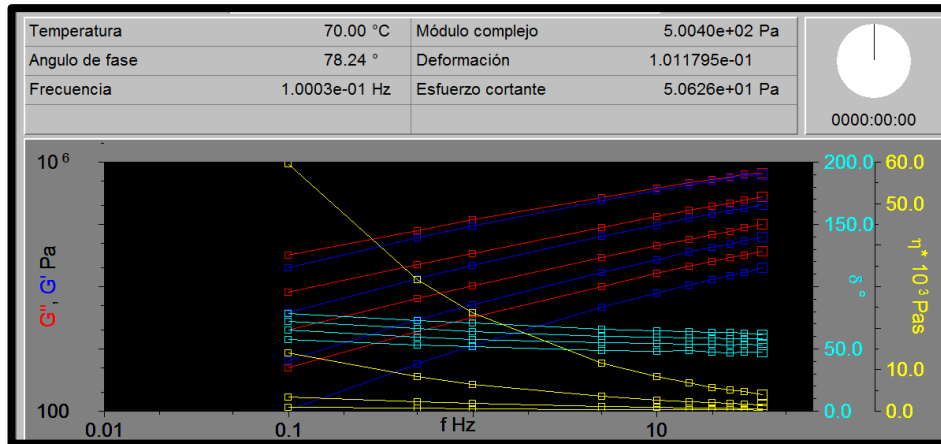
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



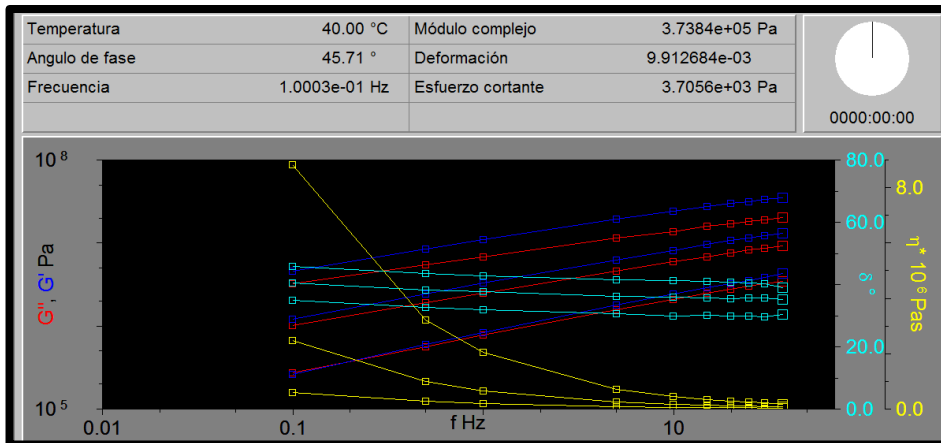
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas: 40-70 °C.



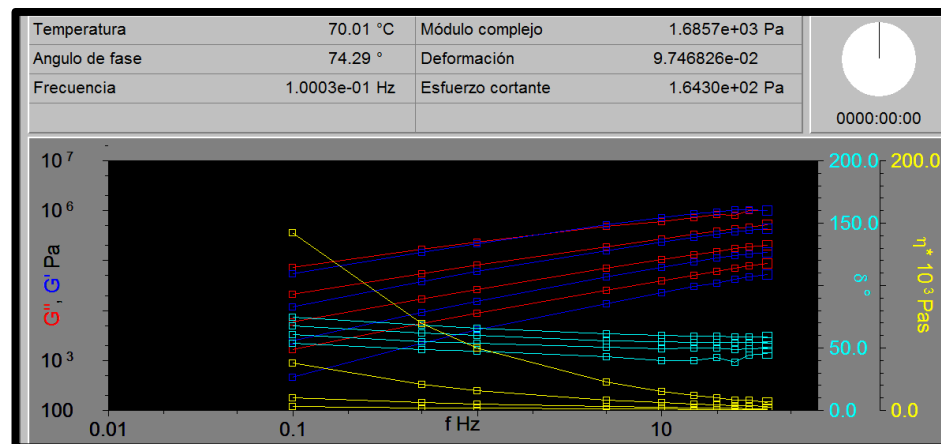
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



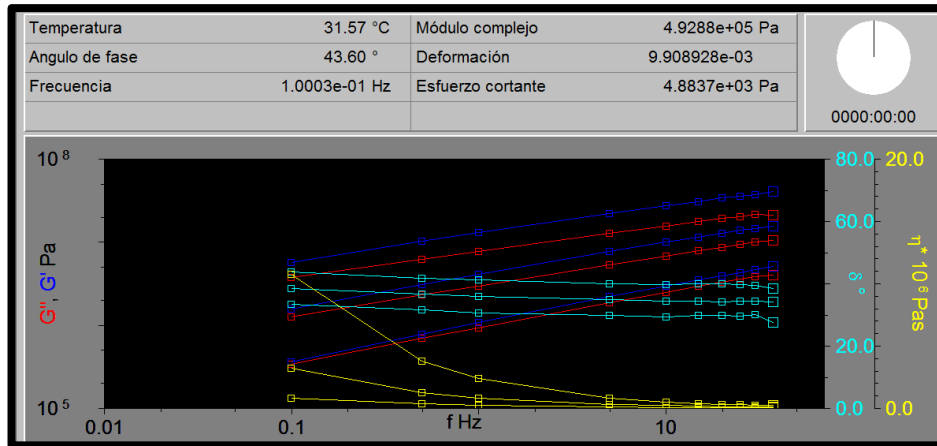
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 10 horas. Temperaturas:
 40-70 °C.



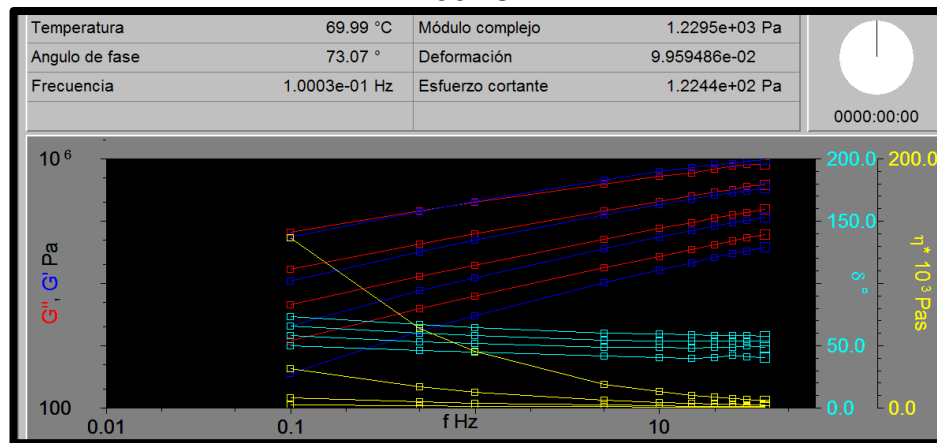
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas: 10-
 30 °C.



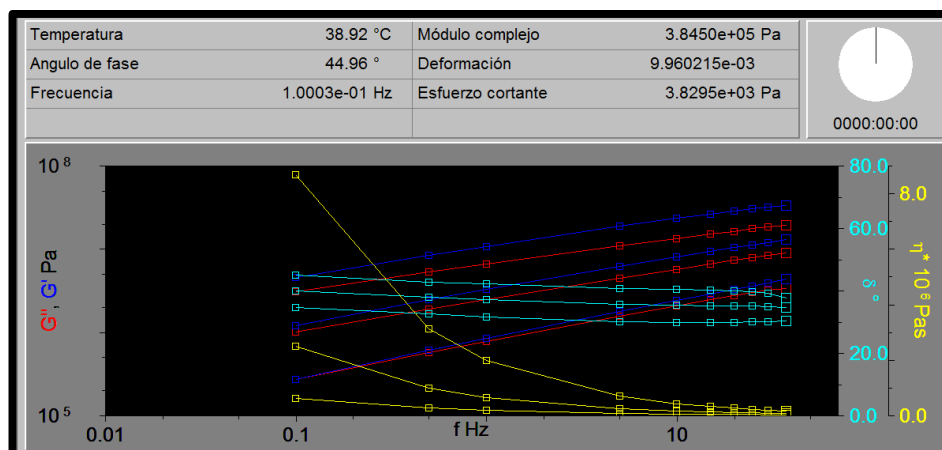
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas: 40-
 70 °C.



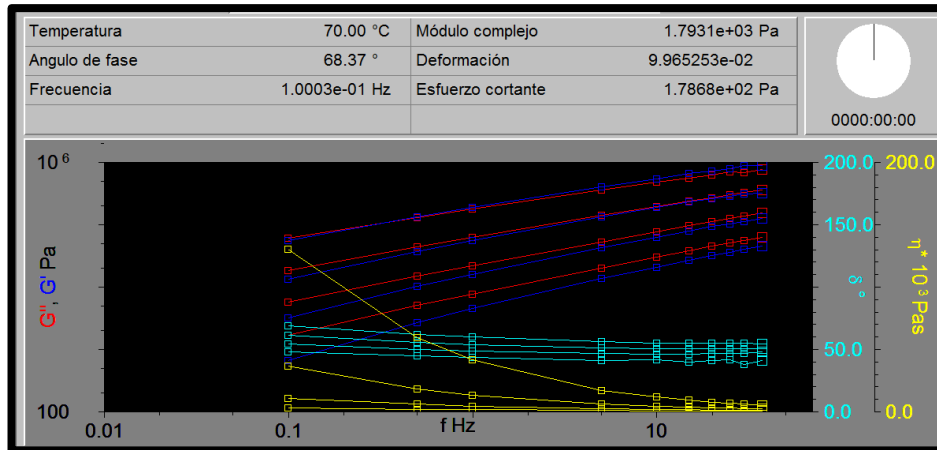
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



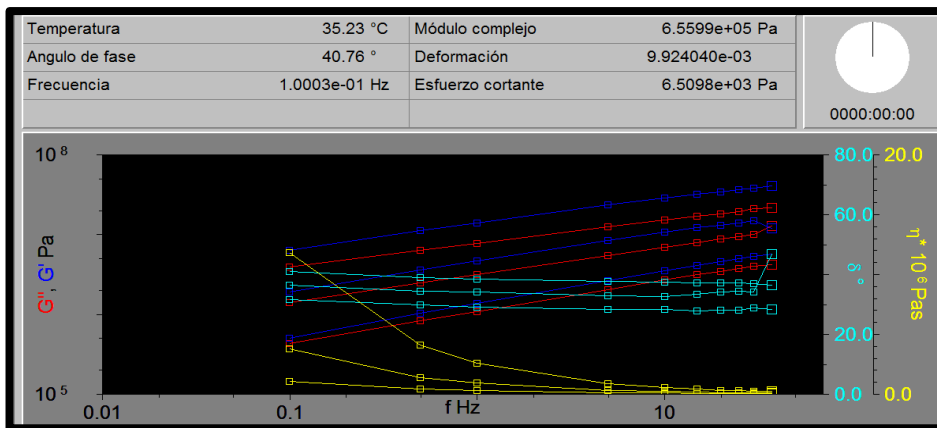
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas: 40-70 °C.



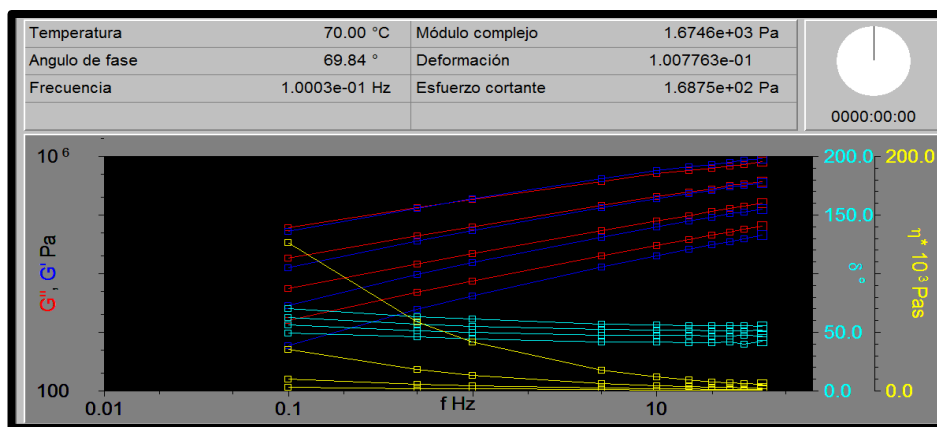
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



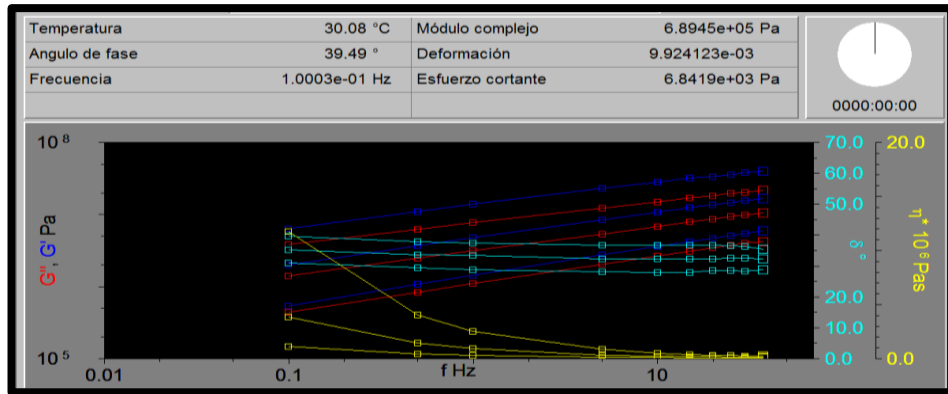
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 20 horas. Temperaturas:
 40-70 °C.



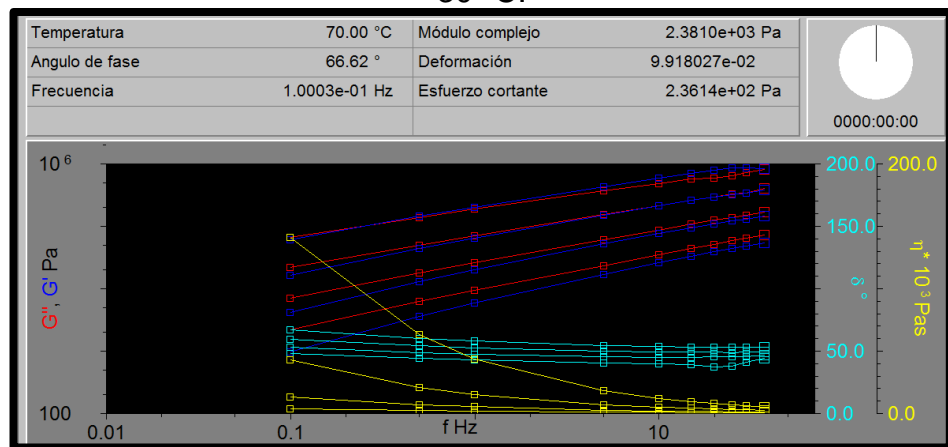
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas: 10-
 30 °C.



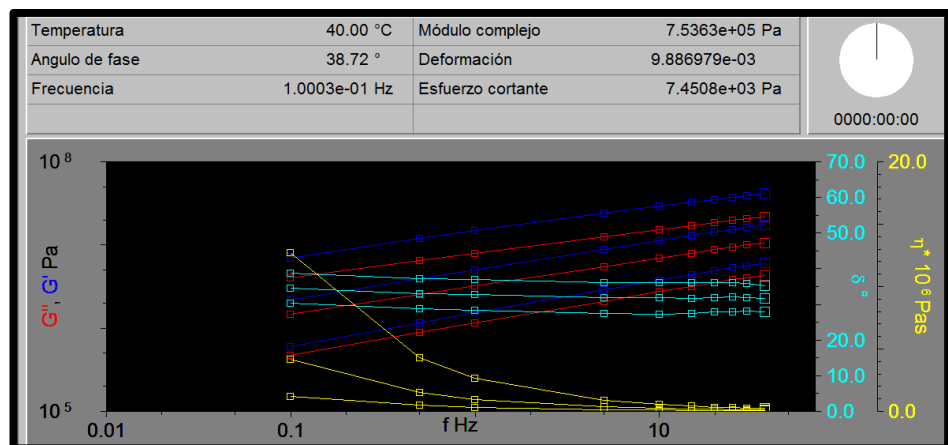
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas: 40-
 70 °C.



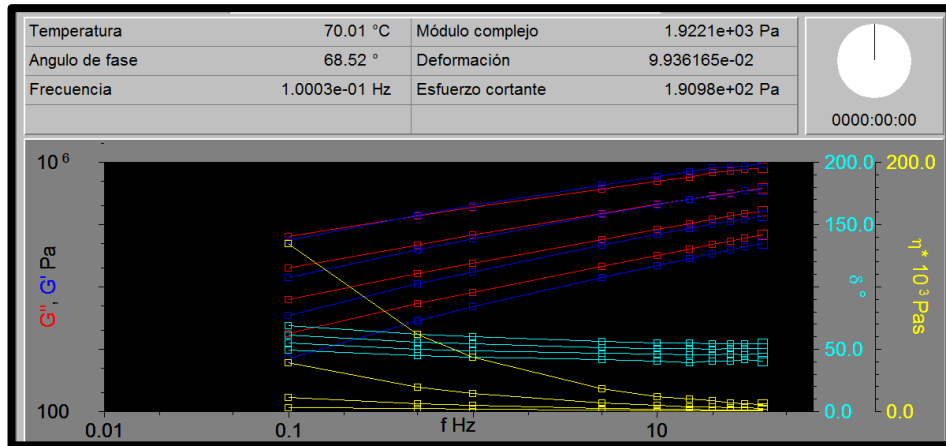
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



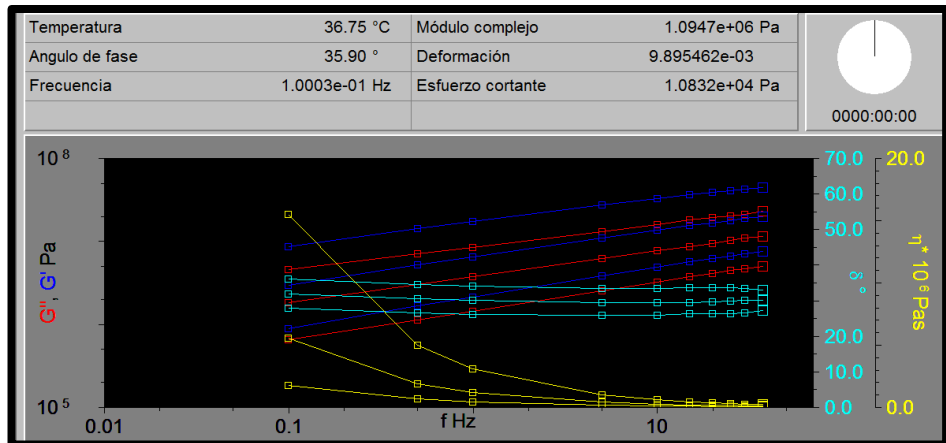
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas: 40-70 °C.



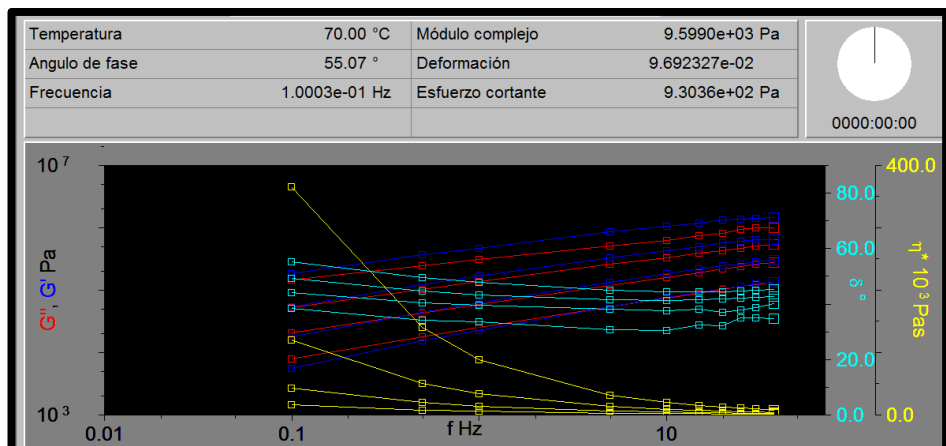
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



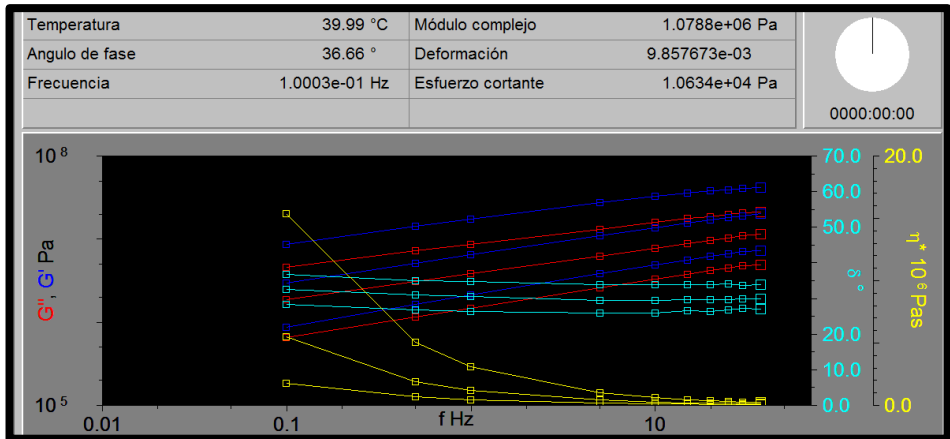
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 40 horas. Temperaturas:
 40-70 °C.



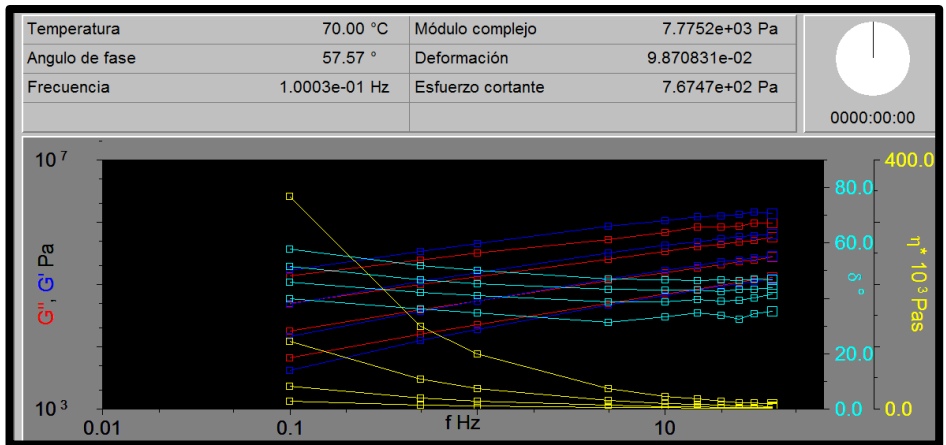
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas: 10-
 30 °C.



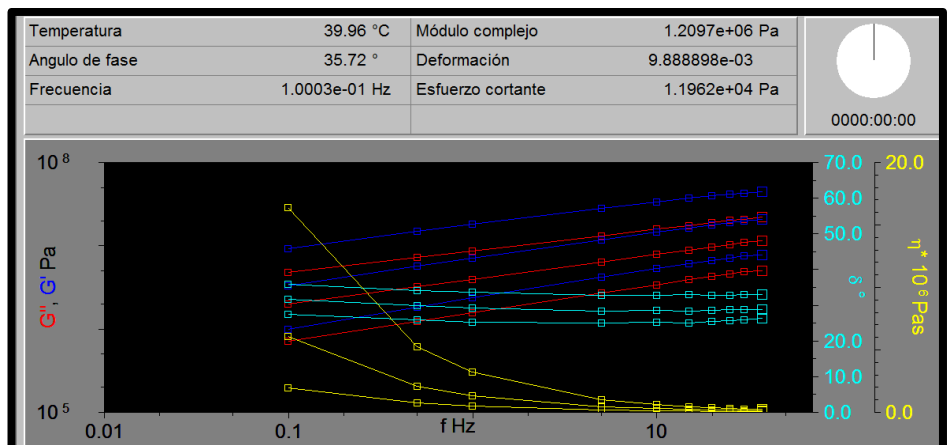
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 70 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas: 40-
 70 °C.



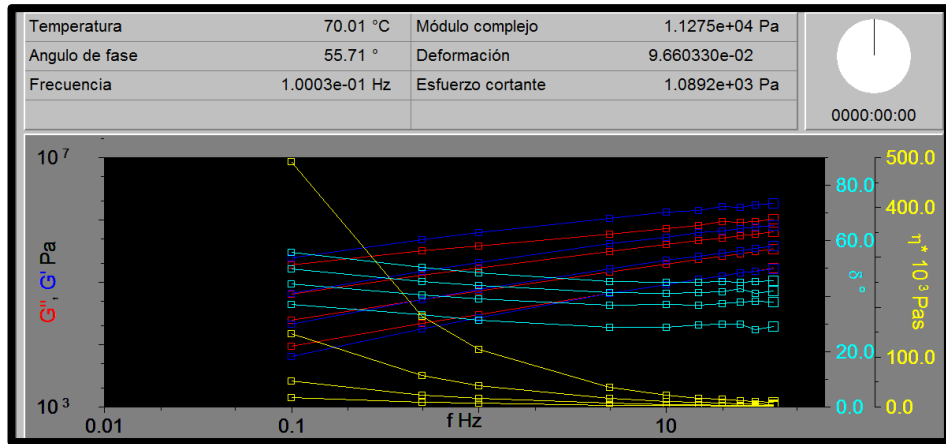
Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 85 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas: 40-70 °C.



Gráfica de resultados del programa Bohlin.
Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas: 10-30 °C.



Gráfica de resultados del programa Bohlin.
 Asfalto Envejecido en RTFO 100 minutos y PAV 60 horas. Temperaturas:
 40-70 °C.



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



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



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Franco Palma Jonathan Enrique y García Solarte Washington Andrés** con C.C respectivamente: # **1719187757** y # **0202129250** autores del trabajo de titulación: **Comportamiento del Asfalto Ecuatoriano ante el Envejecimiento** 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, **18 de Septiembre de 2019**

EI AUTOR

EI AUTOR

f. _____

f. _____

Franco Palma Jonathan Enrique

García Solarte Washington

Andrés

C.C: 1719187757

C.C: 0202129250

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Comportamiento del asfalto ecuatoriano ante el envejecimiento		
AUTOR(ES)	Franco Palma Jonathan Enrique – García Solarte Washington Andrés		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Rolando Vila Romaní		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniería Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	18 de Septiembre de 2019	No. PÁGINAS:	161
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos, Asfaltos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	<i>Asfaltos, envejecimiento, curvas maestras, ΔT_c, ductilidad, Glover-Rowe.</i>		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	El objetivo del trabajo es caracterizar el comportamiento del asfalto ecuatoriano mediante pruebas reológicas luego de envejecerse a nivel de laboratorio en el horno de película delgada rotatoria (RTFO) y la cámara de envejecimiento a presión (PAV) con diferentes tiempos de ensayo, para formular recomendaciones de orden teórico-práctico que permitan su mejor control. Los tiempos empleados para el RTFO fueron 70, 85 y 100 minutos y para el PAV de 0, 10, 20, 40 y 60 horas, creándose una matriz experimental de 15 combinaciones. El asfalto procedió de la Refinería de Esmeraldas y clasificó como PG 64-22. A las combinaciones se les realizaron pruebas reológicas convencionales y avanzadas, que fueron: viscosidad a 135°C, punto de ablandamiento, curvas maestras, parámetro ΔT_c , ductilidad según Kandhal y criterio de Glover-Rowe. Para todos los tiempos en el RTFO y PAV de 20 o 40 horas el asfalto se encuentra en la zona de falla o muy cercana a esta. Para 60 horas en el PAV, las tres combinaciones correspondientes se encuentran en zona de agrietamiento total. Las pruebas reológicas avanzadas permiten concluir que empleando los tiempos de 85 min en RTFO y 20 h en PAV, nuestro asfalto se encuentra en zona de falla por agrietamiento y durabilidad, destacándose que dicho tiempo en el PAV provocaría una calidad en el asfalto similar a un tiempo de colocación en obra entre 7 y 10 años. Se recomienda emplear aditivos para contrarrestar elevado envejecimiento del asfalto en el proceso de fabricación de mezclas en caliente.		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-996110152 Teléfono: +593-985515539	E-mail: jonathan.franco.palma@gmail.com E-mail: washington.andres.garcia@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos Teléfono: +593-4 -2206956 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):			