



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:**

**MEJORA DE LA CALIDAD DE LOS ASFALTOS ECUATORIANOS  
MEDIANTE LA ADICIÓN DE ACEITES Y REJUVENECEDORES**

**AUTOR:**

**Farah Castillo, María Fernanda**

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.**

**Guayaquil, Ecuador**

**2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **María Fernanda Farah Castillo**, 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 14 días del mes de septiembre del año 2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **María Fernanda Farah Castillo**

### DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Mejora de los asfaltos ecuatorianos mediante la adición de aceites y rejuvenecedores** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

**Guayaquil, a los 14 días del mes de septiembre del año 2018**

**LA AUTORA:**

f. \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **María Fernanda Farah Castillo**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Mejora de la calidad de los asfaltos ecuatorianos mediante la adición de aceites y rejuvenecedores**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 14 días del mes de septiembre del año 2018**

**LA AUTORA:**

f. \_\_\_\_\_

## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS MARIA FERNANDA FARAH CASTILLO.docx (D41018950)  
**Submitted:** 8/28/2018 6:41:00 PM  
**Submitted By:** rebeca.gonzalez@cu.ucsg.edu.ec  
**Significance:** 3 %

### Sources included in the report:

TESIS - URETA Y MÁRQUEZ.docx (D35654466)  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/788>  
<https://www.coursehero.com/file/p1cjo36/El-valor-P-en-la-l%C3%ADnea-de-Falta-de-ajuste-es-usado-para-probar-la-hip%C3%B3tesis-de/>  
<https://dokumen.tips/documents/estadistica-montgomery-ejercicio-1130.html>

### Instances where selected sources appear:

10

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Jehová por darme la vida y guiarme en cada paso, sin el nada sería posible.

Mi mayor gratitud para mis padres y tíos que de cierta manera ayudaron a mi formación como profesional. A mis hermanos, primos y novio que siempre me brindaron su cariño siendo los motivadores de mi felicidad.

A mi tutor, PhD. Rolando Vila que ha sido un orientador incondicional, esencialmente por la oportunidad y confianza brindada para realizar este trabajo. Además, al Ing. José Jaramillo por su apoyo, conocimiento y tiempo dedicado a lo largo de esta investigación.

A mis compañeros de laboratorio Walter Mera y Kevin Icaza, por su actitud positiva, entusiasmo y una amistad sincera. Y debo expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que han formado parte de mi vida y con los que ahora puedo compartir este logro.

**María Fernanda Farah Castillo**

## **DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mis padres por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y creer en mi capacidad, aunque han existido momentos difíciles siempre me han brindado su apoyo.

A mis hermanos Dylan y Fernando que a pesar de no vivir juntos desde que empecé mi carrera siempre han estado presentes en mi mente y corazón iluminando mis fines de semana, a mis tíos Carlos, John, Leonor y Sarah, que siempre me brindaron su apoyo y confianza, a mis primas Sayling, Karla y Melanie que son las hermanas que no tengo y ultimo pero no menos importante a mi novio Gabriel Fabre por compartir mis sueños y aspiraciones.

Le dedico a cada una de las personas mencionadas este logro porque sin ellos no lo hubiese podido lograr.

**María Fernanda Farah Castillo**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL**

f. \_\_\_\_\_

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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Lilia Valarezo Moreno. MSc.  
DECANA DE INGENIERIA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Guillermo Ponce Vásquez, MSc.  
DOCENTE DE LA CARRERA**

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 el estudio.....	2
1.3 Justificación del tema.....	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos.....	3
1.5 Alcance.....	4
1.6 Metodología.....	4
CAPÍTULO II.....	6
2. CEMENTOS ASFÁLTICOS Y DISEÑOS DE EXPERIMENTO.....	6
2.1 Características del cemento asfáltico.....	6
2.1.1 Definición.....	6
2.1.2 Caracterización química y física.....	7
2.2 Aditivos rejuvenecedores.....	12
2.2.1 Generalidades.....	12
2.2.2 Diseño de experimento de mezclado.....	14
2.3 Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad... 18	
2.3.1 Introducción.....	18
2.3.2 Ensayo de viscosidad.....	19
2.3.3 Ensayo de penetración.....	20
2.3.4 Punto de reblandecimiento.....	20
2.3.5 Gravedad específica.....	21
2.3.6 Punto de inflamación.....	22

2.3.7	Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT) .....	22
2.3.8	Cambio de masa .....	23
2.3.9	Ductilidad .....	24
2.3.10	Sistema de clasificación de cementos asfálticos por viscosidad 25	
2.4	Clasificación por grado de desempeño según tecnología Superpave 26	
2.4.1	Cámara de envejecimiento a presión (PAV) .....	28
2.4.2	Reómetro de corte dinámico (DSR) .....	29
2.4.3	Reómetro de viga a flexión (BBR) .....	31
2.5	Parámetro $\Delta T_c$ .....	32
CAPITULO III .....		33
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	33
3.1	Estudios de los asfaltos empleados .....	33
3.1.1	Clasificación según tecnología Superpave (PG) .....	33
3.1.2	Ensayos de clasificación por viscosidad .....	34
3.2	Diseño experimental realizado .....	35
3.2.1	Corridas con asfalto PG 64-22 .....	35
3.2.2	Corridas con asfaltos PG 64-28 .....	55
CAPITULO IV .....		74
4.1	Conclusiones .....	74
4.2	Recomendaciones .....	76
BIBLIOGRAFÍA .....		77

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

FIGURA 2. 1 Esquema coloidal de Pfeiffer .....	8
FIGURA 2. 2 Macroestructura de los asfaltenos .....	9
FIGURA 2. 3 Consistencia del Asfalto .....	10
FIGURA 2. 4 Adhesión entre el agregado y el cemento asfáltico .....	11
FIGURA 2. 5 Fuerzas de adhesión y cohesión entre ligante asfáltico y áridos. .....	11
FIGURA 2. 6 Rejuvenecedor SYLVAROAD RP1000 .....	13
FIGURA 2. 7 Asfalto Base .....	16
FIGURA 2. 8 Toma de temperatura al asfalto base y rejuvenecedor Sylvaroad RP1000.....	17
FIGURA 2. 9 Incorporación del rejuvenecedor y/o aceite al asfalto base .....	17
FIGURA 2. 10 Mezcla del rejuvenecedor y/o aceite al asfalto base .....	18
FIGURA 2. 11 Viscosímetro rotatorio Brookfield .....	19
FIGURA 2. 12 Ensayo de penetración .....	20
FIGURA 2. 13 Ensayo de anillo y bola.....	21
FIGURA 2. 14 Ensayo de gravedad específica .....	21
FIGURA 2. 15 Ensayo de punto de inflamación .....	22
FIGURA 2. 16 Horno RTFOT.....	23
FIGURA 2. 17 Botellas de RTFOT .....	23
FIGURA 2. 18 Ensayo de cambio de masa .....	24
FIGURA 2. 19 Ensayo de ductilidad .....	25
FIGURA 2. 20 Pressure Asphalt Vessel (PAV) .....	29
FIGURA 2. 21 Ensayo DSR.....	30
FIGURA 2. 22 Ensayo de reómetro de viga a flexión (BBR) .....	31

### CAPÍTULO 3

FIGURA 3. 1 Superficie de respuesta estimada.....	42
FIGURA 3. 2 Contornos de la superficie de respuesta estimada .....	42
FIGURA 3. 3 Superficie de respuesta estimada.....	46
FIGURA 3. 4 Contornos de la superficie de respuesta.....	46
FIGURA 3. 5 Superficie de respuesta estimada.....	50
FIGURA 3. 6 Contornos de la superficie de residuos estimada .....	50

FIGURA 3. 7 Superficie de respuesta estimada.....	54
FIGURA 3. 8 Contornos de la superficie de respuesta estimada .....	54
FIGURA 3. 9 Superficie de repuesta estimada .....	61
FIGURA 3. 10 Contornos de la superficie de respuesta estimada .....	61
FIGURA 3. 11 Superficie de respuesta estimada.....	65
FIGURA 3. 12 Contornos de la superficie de repuesta estimada .....	65
FIGURA 3. 13 Superficie de respuesta estimada.....	69
FIGURA 3. 14 Contornos de la superficie de respuesta estimada .....	69
FIGURA 3. 15 Superficie de repuesta estimada .....	73
FIGURA 3. 16 Contornos de la superficie de repuesta estimada .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1 Modelo de diseño experimental según Statgraphics .....	15
Tabla 2. 2 Combinaciones para el asfalto PG 64-22 .....	16
Tabla 2. 3 Requisitos para la clasificación de cementos asfálticos por viscosidad.....	26
Tabla 2. 4 Especificación AASHTO para Ligantes asfálticos en Función de la Performance (MP1) .....	27
Tabla 2. 5 Especificación AASHTO para Ligantes asfálticos en Función de la Performance (MP1) .....	28

### CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1 Clasificación Superpave.....	33
Tabla 3. 2 Rangos de temperatura en el pavimento de acuerdo con la tecnología Superpave .....	34
Tabla 3. 3 Resultados de la Clasificación por Grado de Viscosidad.....	35
Tabla 3. 4 Componentes del diseño experimental con asfalto PG 64-22 .....	36
Tabla 3. 5 Respuestas esperadas en el diseño experimental con asfalto PG 64-22 .....	36
Tabla 3. 6 Resumen de resultados con asfalto PG 64-22 .....	37
Tabla 3. 7 Resumen de cumplimiento del asfalto PG 64-22.....	38
Tabla 3. 8 Resultados del ANOVA para la viscosidad original .....	39
Tabla 3. 9 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad original .....	40
Tabla 3. 10 Valores óptimos de respuesta .....	41
Tabla 3. 11 Valores óptimos de respuesta.....	41
Tabla 3. 12 Resultados del ANOVA para la viscosidad en el residuo .....	43
Tabla 3. 13 Resultados de ajuste de modelo para viscosidad en el residuo .....	44
Tabla 3. 14 Valores óptimos de respuesta .....	45
Tabla 3. 15 Valores óptimos de respuesta.....	45
Tabla 3. 16 Resultados del ANOVA para ductilidad en el residuo.....	47
Tabla 3. 17 Resultados de ajuste del modelo para ductilidad en el residuo. ....	48
Tabla 3. 18 Valores óptimos de respuesta .....	49
Tabla 3. 19 Valores óptimos de respuesta .....	49

Tabla 3. 20 Resultado del ANOVA para el parámetro $\Delta T_c$ .....	51
Tabla 3. 21 Resultados de ajuste de modelo para $\Delta T_c$ .....	52
Tabla 3. 22 Valores óptimos de respuesta.....	53
Tabla 3. 23 Valores óptimos de respuesta.....	53
Tabla 3. 24 Componentes del diseño experimental con asfalto PG 64-28 ...	55
Tabla 3. 25 Respuestas esperadas en el diseño experimental con asfalto PG 64-28 .....	55
Tabla 3. 26 Resumen de resultados con asfalto PG64-28 .....	56
Tabla 3. 27 Resumen de cumplimiento del asfalto PG 64-28.....	57
Tabla 3. 28 Resultados del ANOVA para la viscosidad original .....	58
Tabla 3. 29 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad original .....	59
Tabla 3. 30 Valores óptimos de respuestas .....	60
Tabla 3. 31 Valores óptimos de respuestas .....	60
Tabla 3. 32 Resultados del ANOVA para la viscosidad en el residuo .....	62
Tabla 3. 33 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad en el residuo	63
Tabla 3. 34 Valores óptimos de respuestas .....	64
Tabla 3. 35 Valores óptimos de respuestas .....	64
Tabla 3. 36 Resultados del ANOVA para ductilidad en el residuo.....	66
Tabla 3. 37 Resultados de Ajuste de Modelo para Ductilidad en el residuo .	67
Tabla 3. 38 Valores óptimos de respuestas. ....	68
Tabla 3. 39 Valores óptimos de respuestas. ....	68
Tabla 3. 40 Resultados para ANOVA del parámetro $\Delta T_c$ .....	70
Tabla 3. 41 Resultados de Ajuste de Modelo para $\Delta T_c$ .....	71
Tabla 3. 42 Valores óptimos de respuestas. ....	72
Tabla 3. 43 Valores óptimos de respuestas. ....	72

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR para PG 64-22 .....	79
Anexo 2. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR para PG 64-28 .....	82
Anexo 3. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR para PG 64-22 .....	85
Anexo 4. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR para PG 64-28 .....	111

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evalúa la utilización de un aceite industrial de producción nacional y el aditivo rejuvenecedor Sylvaroad mezclado en diferentes proporciones con los asfaltos que produce la Refinería de Esmeraldas: PG 64-22 y PG 64-28, con vista a mejorar el desempeño de los mismos luego de envejecidos a las temperaturas intermedias.

Las proporciones y combinaciones correspondientes se obtuvieron de un diseño experimental de mezclado de acuerdo al programa Statgraphics. Para cada combinación se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio: viscosidad del asfalto original, viscosidad y ductilidad del asfalto envejecido en el horno de película delgada y adicionalmente el parámetro  $\Delta T_c$  asociado a la durabilidad de las mezclas asfálticas en obra.

A partir de los resultados obtenidos de las 15 combinaciones para cada tipo de asfalto, se realizaron comparaciones para determinar el impacto de los aditivos empleados y sus proporciones en la mejora de los asfaltos ecuatorianos envejecidos.

**Palabras claves:** *Rejuvenecedores, Sylvaroad, aditivos, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos,  $\Delta T_c$ , temperatura, envejecimiento.*



## ABSTRACT

The application of national production industrial oil and the recycling additive Sylvaroad will be evaluated by applying different quantities of each one to Ecuadorian asphalts: PG 64-22 AND PG 64-28, looking forward to enhancing its performance to intermediate temperatures once it has aged.

The used proportions and combinations were obtained by an experimental design mix provided by the statistic program Statgraphics. Many laboratory tests were carried out for each combination: absolute viscosity, ductility and viscosity of RTFOT aged asphalt and additionally the  $\Delta TC$  parameter, which is associated to the asphalt mix's durability.

From the obtained results for each of the fifteen asphalt combinations, comparisons were made to determine the impact and improvement of the applied additives and their proportions in the aged Ecuadorian asphalt.

**Keywords:** Recycling, Sylvaroad, additives, viscosity, Superpave, asphalt binder,  $\Delta T_c$ , temperature, aging.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En el país es muy común encontrar pavimentos asfálticos que a los pocos años de construidos o rehabilitados, presentan agrietamientos por fatiga o bloques. Estos deterioros, sin dudas son mucho más frecuentes en la región sierra, también se presentan en la región costa y en la región amazónica donde las temperaturas son altas. Dichas fallas ocurren pese a emplearse usualmente el método de diseño de pavimento establecido y el método Marshall para el diseño y control de calidad de las mezclas asfálticas.

Experiencias obtenidas en el control de calidad del cemento asfáltico procedente de la Refinería de Esmeraldas reflejan como particular característica un excesivo envejecimiento del residuo asfáltico luego de la prueba de película delgada rotatoria (RTFOT), que simula el envejecimiento primario del asfalto durante el proceso de mezclado con los agregados, el transporte y compactación. En búsqueda de solucionar el problema mencionado, el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (UCSG), ha impulsado investigaciones que implican aplicar la metodología Superpave y pruebas adicionales según los criterios de Kandhal, Glover-Rowe y  $\Delta T_c$  en asfaltos modificados. Un primer estudio con aceites y rejuvenecedores reflejaron resultados que motivaron el realizar investigaciones más profundas para evaluar el efecto de estos en el asfalto ecuatoriano.

### 1.2 Razones que motivaron el estudio

La característica de convertirse en un asfalto muy rígido luego del proceso de envejecimiento primario (RTFOT) se detecta al incumplir con las pruebas de viscosidad y ductilidad. Por este motivo en este estudio, se busca aplicar

un aceite local más un producto rejuvenecedor que permita alcanzar las posibles mejoras en los dos cementos asfálticos producidos por la Refinería de Esmeraldas: PG64-22 y PG64-28, y así tener pavimentos asfálticos con mayor durabilidad.

Vale aclarar que a nivel internacional se comercializan actualmente varios tipos de agentes rejuvenecedores, para mejorar las mezclas que se producen con el material fresado de capas asfálticas viejas.

### **1.3 Justificación del tema**

Entender el comportamiento reológico de los cementos asfálticos permite predecir y analizar la respuesta que tendrá ante los diferentes tipos de esfuerzos que soporte y conocer las falencias que podría presentar. Por ende, la búsqueda de soluciones que permitan mejorar la calidad de las mezclas asfálticas y las componentes que lo constituyen es de gran aporte para el desarrollo de las carreteras del país.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

El objetivo de este trabajo es evaluar a través de la ejecución de un diseño de experimentos el efecto del empleo combinado de un aceite lubricante y un agente rejuvenecedor en la mejora del comportamiento de los cementos asfálticos PG 64-22 y PG 64-28 producidos en la Refinería de Esmeraldas.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar los procedimientos experimentales a aplicar en las diferentes pruebas a realizar.
- Muestrear y calificar los dos tipos de asfaltos a emplear.

- Preparar las diferentes muestras a caracterizar, variando los contenidos de aceite y rejuvenecedor, según el diseño de experimentos factorial previsto.
- Realizar todas las pruebas de acuerdo a los procedimientos vigentes.
- Analizar los resultados de acuerdo a criterios estadísticos.

## **1.5 Alcance**

Se estudiará la incidencia de contenidos variables de un aceite lubricante de producción nacional y un agente rejuvenecedor importado en las propiedades de mayor interés de dos asfaltos que se producen en la Refinería de Esmeraldas: PG 64-22 y PG 64-28, de acuerdo a un diseño experimental factorial. Se evaluará la viscosidad en el asfalto original, así como la viscosidad y ductilidad del asfalto envejecido en el horno de película delgada (RTFOT). Además, a las muestras preparadas también se le aplicará un envejecimiento secundario, en la prueba PAV, que permita utilizando un reómetro de viga en flexión (BBR), determinar el valor del parámetro  $\Delta T_c$ , muy adecuado para caracterizar el efecto del envejecimiento sobre la propiedad de relajamiento. Con la información obtenida se realizarán comparaciones y harán recomendaciones sobre las mejores alternativas a utilizar en el país.

## **1.6 Metodología**

El presente trabajo investigativo se basa en un método experimental, por medio de la evaluación de dos tipos de cementos asfálticos bases producidos en la Refinería de Esmeraldas que son PG64-22 y PG64-28, los cuales serán mezclados con un aceite y un aditivo rejuvenecedor, para posteriormente realizar ensayos de laboratorio como clasificación por viscosidad y Superpave.

La investigación se determina en 3 fases:

### **I. Marco Teórico**

II. Desarrollo Experimental

III. Análisis de resultados

Cada una de las diferentes fases se divide en las siguientes etapas:

I. Marco Teórico:

- a. Estudio Bibliográfico
- b. Definición de ensayos y procedimientos

II. Desarrollo Experimental

- a. Clasificación por grado de viscosidad y según la metodología Superpave a los cementos asfálticos base procedente de la Refinería de Esmeraldas.
- b. Mezclar el aceite y rejuvenecedor en las proporciones indicadas por un diseño de experimento de mezclado, con cada uno por separado de los dos asfaltos producidos por la Refinería de Esmeraldas.
- c. Ejecución de los ensayos de Viscosidad y ductilidad a las diferentes mezclas de asfaltos con aceite y rejuvenecedor y adicionalmente determinar el parámetro  $\Delta TC$ .

III. Análisis de Resultados

- a. Interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de laboratorio.
- b. Conclusiones.
- c. Recomendaciones.

## **CAPÍTULO II**

### **2. CEMENTOS ASFÁLTICOS Y DISEÑOS DE EXPERIMENTO**

#### **2.1 Características del cemento asfáltico**

##### **2.1.1 Definición**

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencias, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Estos pueden tener dos orígenes: los derivados de petróleos y los naturales. (Loor, 2012)

Los betunes y asfaltos naturales se han formado en la naturaleza por un fenómeno de migración de determinados petróleos naturales hacia la superficie terrestre, a través de fisuras y rocas porosas, seguido o combinado con una volatilización de sus componentes más ligeros y la consiguiente concentración de los compuestos asfálticos ya existentes en el mismo, que de esta forma se encuentra normalmente mezclados con mayor o menor proporción de materia mineral.

Esencialmente, el proceso de su formación es similar al de los betunes obtenidos por destilación del petróleo, con la diferencia de que en el caso de los betunes y asfaltos naturales, el proceso se ha realizado a más baja temperatura y en tiempo infinitamente más largo. Sin embargo, los asfaltos más utilizados en el mundo de hoy en día, son los derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90% de la producción total de los asfaltos. (Fernandez Del Campo, 1983)

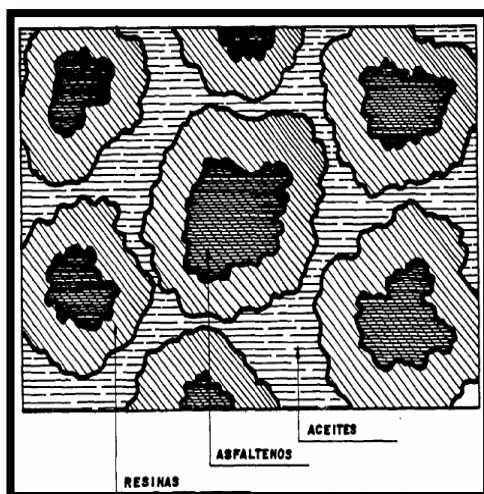
El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (Asphalt Cement en un país anglosajón) y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad. Otra forma de clasificación se realiza a través del grado de desempeño, conocido por las siglas PG (Performance Grade), desarrollado por el Strategic Highway Research Program de los EE.UU. en los años noventa. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

## **2.1.2 Caracterización química y física**

### **2.1.2.1 Caracterización química de los asfaltos**

La composición química del asfalto es compleja, presenta en mayor proporción Carbono (80-88%) y el hidrógeno (8-12%), y en menor proporción se encuentra el oxígeno (0-2%), nitrógeno (0-2%), azufre (0-9%), adicionalmente se encuentran trazas de metales como níquel, vanadio y magnesio. Cada asfalto es diferente según su origen, en la actualidad el mejor modelo que describe el asfalto es el coloidal.

Según esquema coloidal de Pfeiffer, la estructura molecular del asfalto se divide en dos fases: los asfaltenos y los maltenos que a su vez se componen de resinas y aceites. Las moléculas más pesadas se encuentran en suspensión formando micelas (fase dispersa) mientras las moléculas más ligeras actúan como medio de dispersión a través del líquido intermicelar (fase continua), (ver Figura 2.1). (Fernandez-Gómez, Rondón Quintana, & Reyes Lizcano, 2011)



**FIGURA 2. 1 Esquema coloidal de Pfeiffer**

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

Como se ha mencionado anteriormente, la composición química de los cementos asfálticos es muy compleja ya que está conformado por hidrocarburos de peso molecular variable.

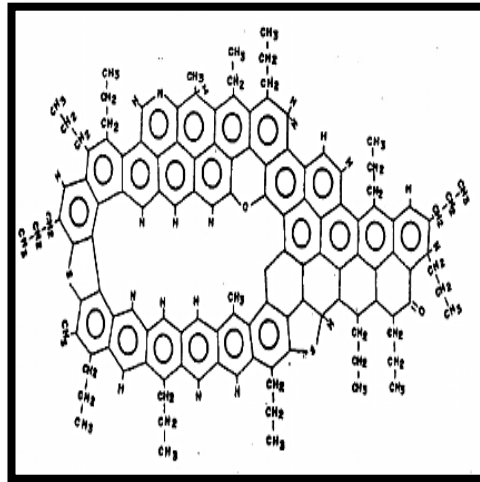
### **Los asfaltenos**

Se define como los compuestos solubles que se precipitan del petróleo crudo por la adición de un mínimo de 40 volúmenes de n-pentano. Son partículas sólidas, cuyo color va desde el café oscuro hasta el negro, sin punto de fusión definido; al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y aglutina, dejando un residuo de carbón. Diversos estudios analíticos muestran que los asfaltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares, rodeados de cadenas alquílicas con un peso molecular que varía de 1.000 a 4.000 unidades de masa atómica, con estructura plana, generalmente conocida como microestructura.

Estas moléculas se agrupan en capas de cinco o seis para formar un cristal o partícula con un peso molecular que varía entre 4.000 a 10.000 unidades de masa atómica. A su vez, varios de estos cristales se agrupan para formar las llamadas micelas con peso molecular que varía de 40.000 a 40.000.000 unidades de masa atómica, que contienen en su interior metales como el níquel y el vanadio. A estos agrupamientos se les conoce como la



macroestructura de los asfaltenos, los asfaltenos en general son compuestos polares de alto peso molecular (ver Figura 2.2). (Arenas Lozano, 2006)



**FIGURA 2. 2 Macroestructura de los asfaltenos**

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

## **Los maltenos**

Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Se describe como un dispersante coloidal de partículas de asfaltina disueltas en un material parecido al aceite y muy pesado. Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y una muy poca cadena parafínica; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos. El mayor contenido de maltenos es lo que le da la calidad a un asfalto; esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos. Los maltenos se separan por métodos químicos en resinas y aceites (saturados y aromáticos). (Arenas Lozano, 2006)

Las resinas son compuestos aromáticos polares, fuertemente adhesivos. Son sólidos o semisólidos y peptizan a los asfaltenos haciendo que el betún sea estable. La fracción de aceites aromáticos no polares constituye un componente mayoritario de betún (40 a 65%). Presentan una alta capacidad

para disolver otras cadenas hidrocarbonadas. La fracción de aceites saturados son componentes viscosos no polares de muy baja reactividad.

### 2.1.2.2 Caracterización física de los asfaltos

Las propiedades físicas del cemento asfáltico, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de las obras viales son:

**Consistencia.** – Debido a que los asfaltos son materiales termoplásticos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas para poder caracterizarlos. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada. Se debe establecer por ende una temperatura de referencia para poder comparar la misma. El cemento asfáltico tiende a endurecerse y aumentar su consistencia cuando se lo expone al aire en películas delgadas sometándolo a un calentamiento prolongado (ver Figura 2.3). Se usan ensayos de viscosidad o penetración para especificar y medir la consistencia del asfalto. (Equipment, 2005)

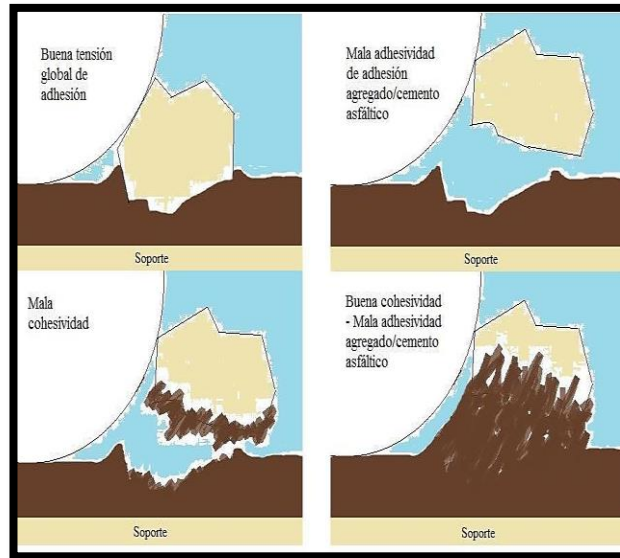


**FIGURA 2. 3 Consistencia del Asfalto**

Fuente: Cova, 2015

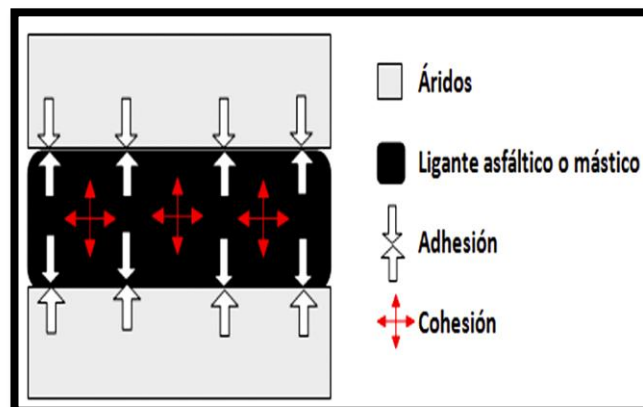
**Adhesión.** – Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación (ver Figura 2.4. Siempre se anhela que un sistema

ligante asfáltico-agregado pétreo tenga buenas condiciones de adhesión en estado seco y que la pérdida de material ligante conocida como “stripping” sea lo mínimo posible en presencia del agua. (USOM, 2002)



**FIGURA 2. 4 Adhesión entre el agregado y el cemento asfáltico**  
 Fuente: Asociación Mexicana del Asfalto, 2010

**Cohesión.** – Es la propiedad que posee el cemento asfáltico para adherirse al agregado midiendo la fuerza de atracción, sea este fino o grueso. En el diseño de mezclas asfálticas las determinantes principales a evaluar son la cohesión y adhesión, caracterizando la interacción físico-químico del mismo (ver Figura 2.5).



**FIGURA 2. 5 Fuerzas de adhesión y cohesión entre ligante asfáltico y áridos.**

Fuente: Valdéz, Calabi, Sanchez, Miró, & Reyes, 2015

**Envejecimiento.** – Existen distintos procesos de envejecimiento a los cuales están sometidos los cementos asfálticos, que ocurren durante el mezclado en la planta, la construcción de la carretera y la vida de servicio. Existen dos tipos de envejecimiento: el envejecimiento a corto y a largo plazo. La primera etapa del fenómeno se debe a la pérdida de componentes volátiles cuando la mezcla está con elevada temperatura, la segunda se produce por las condiciones ambientales y los efectos del clima que generalmente generan una oxidación progresiva durante el tiempo de servicio. (Fernandez-Gómez, Rondón Quintana, & Reyes Lizcano, 2011)

**Susceptibilidad a la Temperatura.** – Todos los asfaltos son viscoelásticos, se vuelven más viscosos a medida que su temperatura disminuye y menos viscosos a medida que su temperatura aumenta. Esta es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferentes orígenes, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. (USOM, 2002)

**Seguridad.** – El cemento asfáltico, si se le somete a elevadas temperaturas, genera vapores que arden en presencia de la chispa o llama. La temperatura a la que ocurre esto, normalmente es más elevada que la de trabajo en las obras de pavimentación para tener la certeza de que existe un adecuado margen de seguridad, se debe conocer el punto de inflamación del asfalto. Por otra parte en el proceso de caracterización un asfalto puede espumar debido a contaminaciones con agua. La espuma que genera puede construir un riesgo para la seguridad, por lo tanto las normas requieren que el asfalto no forme espuma hasta temperaturas de 175°C. (Equipment, 2005)

## **2.2 Aditivos rejuvenecedores**

### **2.2.1 Generalidades**

Los aditivos rejuvenecedores, se encargan de proporcionar al asfalto envejecido los componentes perdidos de tal forma que recupera sus

propiedades. Además, crea un reacomodo en el asfalto disminuyendo la permeabilidad al agua y al aire. El efecto encontrado es una recuperación de las propiedades del asfalto presente en las capas superficiales del pavimento, donde se concentra la oxidación del mismo, evitando el desprendimiento de agregados y erosiones. (Sanabria, Correa, Hernández, & Morales, 2015)

El rejuvenecedor a utilizar en el siguiente trabajo de investigación es SYLVAROAD RP1000 Performance Additive que se muestra en la Figura 2.6 Es un aditivo líquido que moviliza el aglutinante envejecido de pavimento de asfalto recuperado (RA) utilizado en mezclas de pavimentación de asfalto. Esto mejora la flexibilidad y la resistencia al agrietamiento, permitiendo mayores cantidades de RA en una mezcla de asfalto. (KRATON, 2017)

El aumento del contenido de RA mejora la resistencia a la formación de surcos mientras reduce el consumo de material virgen. SYLVAROAD RP1000 permite un cambio en la cantidad de RA utilizada en la mezcla para todo el asfalto de carreteras sin sacrificar la facilidad de fabricación o de aplicación. (KRATON, 2017)



**FIGURA 2. 6 Rejuvenecedor SYLVAROAD RP1000**  
Fuente: Autor

## **Características**

- Alto punto de inflamación >280°C.
- No volátil y sin riesgo conocido en proceso de elevadas temperaturas, lo que permite la adición directamente en el RA antes de la entrada al tambor.
- Estabilidad térmica y oxidativa para una actuación uniforme.
- Restaura la flexibilidad del material envejecido.
- Resistencia al agrietamiento.
- Resistencia al desgaste debido al aumento del contenido de RA.
- Mejora la sensibilidad al agua en comparación con RA no tratada.
- Permite una buena trabajabilidad a un mayor contenido de RA.
- Producido a partir de una materia prima de pino purificada y formulado a una especificación controlada.
- Basado en un producto renovable, materia prima no alimentario, no animal.

Si bien el uso general de rejuvenecedor se aplica al reciclado del pavimento, en este trabajo de investigación se usa para mejorar directamente las características del asfalto.

### **2.2.2 Diseño de experimento de mezclado**

Para el presente trabajo de investigación se utilizó un aceite y un agente rejuvenecedor, los que fueron aplicados directamente a los asfaltos.

#### **2.2.2.1 Determinación del porcentaje de rejuvenecedor a emplear**

Se realizó a partir de un diseño de experimento a través del programa Statgraphics. Creando un diseño Simplex-Látice el cual estudiará los efectos de 3 componentes en 15 corridas de las cuales 5 son réplicas. El diseño deberá ser corrido en un solo bloque, el orden de los experimentos no ha sido aleatorizado. Puesto que el modelo seleccionado es cúbico especial, el

diseño intentará ajustar un modelo con todos los términos de primero, segundo y tercer orden. Ver Tabla 2.1.

**Tabla 2. 1 Modelo de diseño experimental según Statgraphics**

Componentes	Bajo	Alto	Unidades	Respuestas	Unidades
PG 64-22	0.95	1.0	Porcentaje	Visc original	60 °C, Pa.s
Aceite base	0.0	0.05	Porcentaje	Visc residuo	60 °C, Pa.s
Sylvaroad	0.0	0.05	Porcentaje	Duct residuo	25 °C, cm
				$\Delta T_c$	

Fuente: Autor

### **Diseño Base**

- Número de componentes: 3
- Número de respuestas: 4
- Número de corridas: 15
- Tipo de modelo: Cúbico especial
- Total mezcla = 1 (100%)

### **Combinaciones a emplear**

El programa Statgraphics para nuestro modelo de diseño nos da 15 combinaciones a usar en cada uno de nuestros asfaltos. Ver en la Tabla 2.2, como ejemplo, las combinaciones para el asfalto PG 64-22.

**Tabla 2. 2 Combinaciones para el asfalto PG 64-22**

#COMBINACIÓN	ASFALTO PG 64-22	ACEITE BASE	REJUVENECEDOR SYLVAROAD RP 1000
1	100%	0%	0%
2	98%	2%	0%
3	98%	0%	2%
4	97%	3%	0%
5	96%	2%	2%
6	97%	0%	3%
7	95%	5%	0%
8	95%	3%	2%
9	95%	2%	3%
10	95%	0%	5%
11=2	98%	2%	0%
12=3	98%	0%	2%
13=5	96%	2%	2%
14=8	95%	3%	2%
15=9	95%	2%	3%

Fuente: Autor

### **Proceso de mezclado**

Seleccionar la cantidad de asfalto a utilizar y en base a esta calcular el peso del aceite y/o rejuvenecedor a añadir, según el porcentaje determinado previamente. En general 1000 gr de asfalto es suficiente como se aprecia en la Figura 2.7.



**FIGURA 2. 7 Asfalto Base**

Fuente: Autor



1. Calentar las cantidades de asfalto y de aceite y/o rejuvenecedor calculado (ver Figura 2.8), a una temperatura entre 145°C a 150°C.



**FIGURA 2. 8 Toma de temperatura al asfalto base y rejuvenecedor Sylvaroad RP1000**

Fuente: Autor

2. Añadir la cantidad respectiva de aceite y/o rejuvenecedor al asfalto base a utilizar, controlando la temperatura en 150°C como se muestra en la Figura 2.9.



**FIGURA 2. 9 Incorporación del rejuvenecedor y/o aceite al asfalto base**

Fuente: Autor

3. Mezclar el asfalto con el aceite y/o rejuvenecedor por un periodo de 15 minutos (ver Figura 2.10), manteniendo la temperatura establecida.



**FIGURA 2. 10 Mezcla del rejuvenecedor y/o aceite al asfalto base**  
Fuente: Autor

## **2.3 Clasificación de los cementos asfálticos por grado de viscosidad**

### **2.3.1 Introducción**

La viscosidad es la resistencia que tiene un material al fluir sobre una superficie, para el caso de los pavimentos, es un parámetro físico-químico para determinar de manera aproximada las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas y de extensión y compactación de dichas mezclas en el laboratorio. Ofrece una medida indirecta de la consistencia y la rigidez del cemento asfáltico, demostrando que a mayor viscosidad el asfalto es más rígido. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

**Viscosidad Dinámica:** Es la relación entre el esfuerzo aplicado de corte y el gradiente de velocidad obtenido. Este coeficiente es la capacidad de la resistencia al flujo de un líquido. La unidad SI es  $1\text{Pa}\cdot\text{s}$  ( $1\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ) y es equivalente a 10 Poise. (Laime, 2012)

La unidad que se acostumbra usar es 1 centipoise ( $1\text{cP} = 0.001\text{P}$ ).

**Viscosidad Cinemática:** Es la interacción de la viscosidad dinámica y la densidad de un elemento en estado líquido, siendo una medida de la resistencia del líquido a fluir bajo la acción de la gravedad. La unidad SI es  $\text{m}^2/\text{s}$ . La unidad que se acostumbra usar es 1 centistoke ( $1\text{cSt} = 0.001\text{St}$ ) que equivale a  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

### 2.3.2 Ensayo de viscosidad

Para el ensayo mencionado se utiliza un viscosímetro de cilindro rotacional coaxial tipo Brookfield, como el especificado por la norma ASTM D4402 que se muestra a continuación en la Figura 2.11. A diferencia de los viscosímetros de tubo capilar, los aparatos rotativos son adecuados para asfaltos modificados y sin modificar. El viscosímetro está conectado a un control digital que calcula la viscosidad de forma automática a la temperatura del ensayo. Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a alta temperatura con el objetivo de asegurar que el asfalto es suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezcla. (Instituto del Asfalto, 1995)



**FIGURA 2. 11 Viscosímetro rotatorio Brookfield**  
Fuente: Autor

### 2.3.3 Ensayo de penetración

Es un método para cuantificar la consistencia del asfalto. Indicando la profundidad expresada en décimas de milímetros, a la que penetra una aguja normalizada de acero aplicada durante 5 segundos con una carga de 100 gramos en una muestra de betún a 25° C (ver Figura 2.12). El método de ensayo correspondiente es relativamente delicado de realización y está definido por la norma ASTM D 583. (Wauquier, 2004)

El resultado del ensayo será el promedio de 3 mediciones evaluadas a la muestra del betún, en general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los asfaltos más rígidos. (Salazar Delgado J. , 2011)



**FIGURA 2. 12 Ensayo de penetración**  
Fuente: Autor

### 2.3.4 Punto de reblandecimiento

Es la temperatura a la que un producto bituminoso se vuelve fluido en condiciones normalizadas. Se mide por medio del método llamado de “anillo y bola” (R&B) que está normalizado por la ASTM D36-95 y se observa en la Figura 2.13. Una bola de acero de dimensiones y peso bien definidos se coloca sobre na pastilla de betún insertada en un anillo metálico también completamente definido. El conjunto se calienta lentamente. Cuando la pastilla de betún se reblandece lo suficiente para que la bola la atraviese y

recorra una distancia de 2.5 cm la temperatura correspondiente es el punto de reblandecimiento. (Wauquier, 2004)



**FIGURA 2. 13 Ensayo de anillo y bola**  
Fuente: Autor

### **2.3.5 Gravedad específica**

Es la relación entre la masa de un volumen dado por un material y la masa de volumen igual de agua a la misma temperatura. Dicho ensayo está basado en la norma ASTM D 70-09, se coloca la muestra en un picnómetro calibrado, se pesa con la muestra y el volumen remanente del picnómetro es completado con agua a la temperatura de 25°C (ver Figura 2.14).



**FIGURA 2. 14 Ensayo de gravedad específica**  
Fuente: Autor

### 2.3.6 Punto de inflamación

Se utiliza para determinar la volatilidad del asfalto, es el punto al cual la temperatura inflama el cemento asfáltico y se lo realiza en el equipo denominado Copa Abierta Cleveland mostrado a continuación en la Figura 2.15. Entre mayor temperatura sea el punto de inflamación, menor es la probabilidad de experimentar problemas de combustión e inflamación durante los procesos de almacenamiento del asfalto y de fabricación de las mezclas asfálticas en planta.



**FIGURA 2. 15 Ensayo de punto de inflamación**

Fuente: Autor

### 2.3.7 Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT)

El método está definido por la norma ASTM D 2872 utilizado para evaluar la resistencia al envejecimiento a corto plazo. Para este ensayo se usa el horno RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), que se muestra en la Figura 2.16. En este se expone una delgada película de cemento asfáltico al calor y aire en recipientes especiales (ver Figura 2.17) recreando la exposición del asfalto durante el mezclado en caliente y la manipulación en planta, midiendo sus características físicas antes y después del envejecimiento artificial (Wauquier, 2004).



**FIGURA 2. 16 Horno RTFOT**  
Fuente: Autor



**FIGURA 2. 17 Botellas de RTFOT**  
Fuente: Autor

### **2.3.8 Cambio de masa**

Este ensayo se emplea para evaluar la susceptibilidad al endurecimiento o envejecimiento de tendría el asfalto durante las operaciones de mezclado, cuando se realiza esta prueba se debe reportar el resultado obtenido como se muestra en la Figura 2.18, de esta manera se puede expresar el resultado como pérdida de masa (al usar signo negativo) o ganancia de masa (utilizando signo positivo). Esta tendencia al endurecimiento o envejecimiento se mide por un cambio de masa comparando la masa

original respecto a la masa luego del calentamiento en el horno RTFOT (Salazar Delgado J. , 2011).

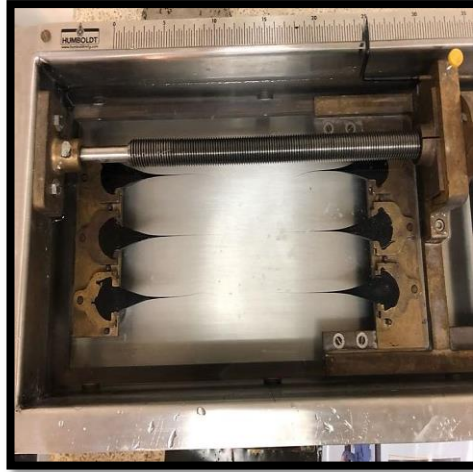


**FIGURA 2. 18 Ensayo de cambio de masa**  
Fuente: Autor

### **2.3.9 Ductilidad**

En el cemento asfáltico es una medida de cuanto puede llegar a estirarse una muestra de betún antes de que se rompa en dos el material bituminoso (ver Figura 2.19) según la norma ASTM D-113. Al momento del corte se toma la medida en centímetros y esta es la ductilidad de la muestra, a mayor ductilidad mejores propiedades aglomerantes tiene la muestra, sin embargo, si un cemento asfáltico tiene una excesiva ductilidad es susceptible a los cambios de temperatura y fácilmente deformables.





**FIGURA 2. 19 Ensayo de ductilidad**  
Fuente: Autor

### **2.3.10 Sistema de clasificación de cementos asfálticos por viscosidad**

La Refinería de Esmeraldas produce un cemento asfáltico que se evalúa mediante la clasificación por viscosidad, es decir, parte de la viscosidad absoluta a 60°C, luego de la cual deben chequearse las restantes exigencias. Esto permite establecer el grado de AC correspondiente de acuerdo a la normativa vigente en el país que se muestra en la Tabla 2.3. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

**Tabla 2. 3 Requisitos para la clasificación de cementos asfálticos por viscosidad.**

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 <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, <sup>c</sup>	%	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 <sup>b</sup>		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad <sup>a</sup> , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
<sup>a</sup> Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
<sup>b</sup> Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s												
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
<sup>c</sup> Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014

## 2.4 Clasificación por grado de desempeño según tecnología Superpave

Los ensayos SUPERPAVE nombre derivado de Superior PERforming asphalt PAVements, desarrollados en los estudios del Strategic Highway Research Program, miden propiedades físicas de los cementos asfálticos que pueden ser directamente relacionadas con el comportamiento en obra, es decir, esta tecnología es un sistema mejorado de especificaciones para la clasificación de asfaltos por medio de ensayos en equipos como: viscosímetro rotatorio, horno de película delgada, cámara de envejecimiento a presión, reómetro de corte directo y reómetro de viga a flexión. (Instituto del Asfalto, 1995)

Las especificaciones para ligantes asfálticos AASHTO se muestran a continuación en las siguientes tablas 2.4 y 2.5:

**Tabla 2. 4 Especificación AASHTO para Ligantes asfálticos en Función de la Performance (MP1)**

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

Fuente: Instituto del Asfalto, 1995

**Tabla 2. 5 Especificación AASHTO para Ligantes asfálticos en Función de la Performance (MP1)**

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

Fuente: Instituto del Asfalto, 1995

### 2.4.1 Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

El envejecimiento del cemento asfáltico a largo plazo es la vida útil o de servicio que experimenta la mezcla, en laboratorio se simula este envejecimiento a través de hornos como el PAV (Pressure Asphalt Vessel),

que puede apreciarse en la Figura 2.20. Este ensayo expone las muestras de asfalto a la acción de calor y presión con el objeto de recrear, en cuestión de horas, años de envejecimiento en servicio del pavimento. Un cemento asfáltico envejecido genera disminución en la adherencia entre el agregado y el ligante y un cambio del comportamiento dúctil a frágil del ligante y de la mezcla asfáltica, acompañado de un incremento en su rigidez. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)



**FIGURA 2. 20 Pressure Asphalt Vessel (PAV)**  
Fuente: Autor

#### **2.4.2 Reómetro de corte dinámico (DSR)**

El reómetro de corte dinámico sirve para evaluar el comportamiento visco-elástico que posee el cemento asfáltico a altas e intermedias temperaturas de servicio (ver Figura 2.21). Se utiliza una muestra delgada de asfalto para realizar el ensayo, colocándose entre dos placas circulares, la placa inferior es fija, mientras que la placa superior oscila hacia delante y atrás a través de la muestra a  $10 \text{ rad/s}$  para crear una acción de corte. El ensayo es normalizado por la AASHTO T 315-05.



**FIGURA 2. 21 Ensayo DSR**

Fuente: Autor

#### **2.4.2.1 Deformación permanente (Ahuellamiento)**

Las deformaciones permanentes o ahuellamientos, son fallas que se producen debido a las cargas de tránsito y a mezclas muy blandas, este fenómeno puede ser elevado bajo condiciones de temperaturas muy altas y largos tiempos de cargas. El cemento asfáltico al ser un material viscoelásticos, al aumentar la temperatura las componentes viscosas aumentan produciendo que el asfalto presente condiciones más blandas, es decir, más proclive al ahuellamiento.

El Superpave estudia las deformaciones permanentes tomando en cuenta el módulo de corte complejo y el ángulo de fase, donde el módulo complejo representa la rigidez del asfalto y el ángulo de fase representa la distribución de la componente elástico-viscosa. Por tal motivo, se evalúa este fenómeno en dos fases: la primera en estado original, donde la condición es  $G^*/\text{sen}\delta \geq 1$ , la segunda fase es para el asfalto envejecido después del horno RTFOT donde  $G^*/\text{sen}\delta \geq 2$  para evitar las deformaciones permanentes.

### 2.4.2.2 Agrietamiento por Fatiga (piel de cocodrilo)

El agrietamiento por fatiga o piel de cocodrilo se presenta en los pavimentos, principalmente por la acumulación de altas cargas horizontales generadas por cargas transmitidas por vehículos pesados, últimos años de servicio y temperaturas intermedias. La tecnología Superpave controla este fenómeno por la siguiente expresión  $G^* \times \text{sen} \delta \leq 5000$  en asfaltos con envejecimientos secundario (PAV), este fenómeno es más susceptible en asfaltos más rígidos.

### 2.4.3 Reómetro de viga a flexión (BBR)

Este ensayo es utilizado para evaluar la capacidad que tendrá la mezcla de resistir agrietamiento por bajas temperaturas, para realizar este ensayo primero se necesita una viga de cemento asfáltico simplemente apoyada, la cual estuvo previamente a bajas temperaturas. Se le aplica una carga en el centro de la viga y se mide la deformación que experimenta la viga bajo la carga contra el tiempo. Este ensayo esta normalizado por la AASHTO T 313 y puede apreciarse en la Figura 2.22. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)



**FIGURA 2. 22 Ensayo de reómetro de viga a flexión (BBR)**

Fuente: Autor

### 2.4.3.1 Agrietamiento térmico

Los ligantes se comportan como sólidos a muy bajas temperaturas (<-50°C) y como líquidos a altas temperaturas (>70°C). Las temperaturas del pavimento asfáltico están habitualmente entre esos extremos. La viga de flexión es otra forma de definir si el comportamiento del cemento asfáltico se parecerá a un sólido-elástico o a un líquido-viscoso, pero a temperaturas mucho más bajas que las correspondientes a los ensayos con reómetro de corte dinámico. Si la rigidez a la fluencia es muy alta, el asfalto puede tener un comportamiento frágil, y la probabilidad de que este se agriete es alta. Por lo tanto, el límite máximo de 300 MPa se fijó para evitar este problema. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

## 2.5 Parámetro $\Delta T_c$

Es un parámetro que permite determinar mediante cálculos la pérdida de las propiedades de relajamiento. El parámetro es calculado mediante la diferencia entre dos bajas temperaturas  $T(S=300\text{MPa}) - T(m=0.3)$  con los datos obtenidos mediante el ensayo del equipo BBR mediante la siguiente ecuación:

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

En caso de que el cemento asfáltico envejezca, el parámetro  $\Delta T_c$  aumenta, reflejando una pérdida en las propiedades de relajamiento. Cuando el valor  $\Delta T_c$  alcanza un valor de 2.5°C indica el inicio del agrietamiento, mientras que si alcanza un valor superior a 5°C presentaría problemas serios de agrietamiento. (Anderson, King, Hanson, & Blankenship, 2011)



## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Estudios de los asfaltos empleados

Para la investigación se seleccionaron dos tipos de asfaltos que en realidad fueron clasificados en primera instancia por el método Superpave, donde se determinaron diferencias importantes y posteriormente se clasificaron por viscosidad. Las características de ambos asfaltos se muestran a continuación.

##### 3.1.1 Clasificación según tecnología Superpave (PG)

En la Tabla 3.1 pueden observarse los resultados obtenidos para ambos asfaltos.

**Tabla 3. 1 Clasificación Superpave**

PROPIEDAD		MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	ASFALTO 1	ASFALTO 2	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>						
Punto de Inflamación (°C)		AASHTO T 48	230 mín	290	286	
Viscosidad (Pa.s)	135°C	AASHTO T 316	3,0 máx	0,343	0,341	
	46°C			14,50	13,70	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	52°C	AASHTO T 315	1,0 mín	6,25	5,84	
	58°C			2,68	2,61	
	64°C			1,19	1,17	
	70°C			0,55	0,56	
	70°C					
<b>RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)</b>						
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	43,40	
	52°C			21,30	20,20	
	58°C			9,70	9,03	
	64°C			4,59	4,28	
	70°C			2,21	2,07	
	76°C			1,10		
<b>RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)</b>						
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	31°C	AASHTO T 315	5000 max	989	1060	
	28°C			1390	1560	
	25°C			1950	2260	
	22°C			2750	3330	
	19°C			3800	4730	
	16°C			5140	6560	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-30°C	AASHTO T 313	300 máx			
Valor m			0,300 mín			
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-24°C		300 máx	380,5144	365,0171	
Valor m			0,300 mín	0,268352	0,263298	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-18°C		300 máx	196,7917	182,3563	
Valor m			0,300 mín	0,293977	0,305209	
Rigidez al desplazamiento, Mpa (60 sec)	-12°C		300 máx	86,5506		
Valor m			0,300 mín	0,345205		
<b>GRADO PG SUPERPAVE</b>			<b>AASHTO M 320</b>	<b>--</b>	<b>PG 64-22</b>	<b>PG 64-28</b>

Fuente: Autor

Con la clasificación Superpave se determinó que el Asfalto 1 clasifica como PG 64-22 mientras que el Asfalto 2 como PG 64-28. Considerando las temperaturas altas y bajas de dichos asfaltos se podría considerar que ambos tendrían un comportamiento adecuado en el país debido a las temperaturas extremas que pueden presentarse en el pavimento (ver Tabla 3.2) se encontrarían por debajo de la máxima.

De igual forma tampoco deberían presentar problemas con el rango mínimo (-22 y -28), debido a que son inferiores a las esperadas en el pavimento.

**Tabla 3. 2 Rangos de temperatura en el pavimento de acuerdo con la tecnología Superpave**

<b>Regiones</b>	<b>Temperatura máxima (°C)</b>	<b>Temperatura mínima (°C)</b>
COSTA	54 a 58	8 a 16
SIERRA	42 a 52	-3 a 8
AMAZONÍA	52 a 57	7 a 1

Fuente: Jaramillo Briceño & Vila Romaní, 2015

### **3.1.2 Ensayos de clasificación por viscosidad**

En la Tabla 3.3 se visualiza los resultados obtenidos por ambos asfaltos.

La clasificación por grados de viscosidad de los asfaltos provenientes de la Refinería de Esmeraldas se puede observar un comportamiento particular, debido que al considerar la viscosidad dinámica a 60°C en estado original los valores que se obtuvieron fueron 235 y 220 Pa.s respectivamente, cumpliendo con las características de un asfalto AC-20 según la normativa INEN y ASTM. Sin embargo, al pasar por el proceso de envejecimiento primario en el horno RTFOT, dichos asfaltos presentan un excesivo envejecimiento debido a que los valores de viscosidad dinámica fueron de 1315 y 1497 Pa.s y ductilidades de 25 y 28,5 cm respectivamente, incumpliendo con las especificaciones exigidas para un asfalto AC-20, esto

indicaría que presentan características de un asfalto rígido y con poca durabilidad.

**Tabla 3. 3 Resultados de la Clasificación por Grado de Viscosidad**

CLASIFICACION POR GRADO DE VISCOSIDAD							
ASTM D-3381-92						ASFALTO 1	ASFALTO 2
PROPIEDADES	UNIDAD	AC 20		AC 30			
		mín	máx	mín	máx		
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>							
Viscosidad dinámica, 60°C	Pa,s	160	240	240	360	235,0	220,0
Viscosidad cinemática, 135°C	mm <sup>2</sup> /s	300	-	350	-	362,5	360,7
Punto de Inflamación	°C	232	-	232	-	290,0	286,0
Grav. Específica 25°C/25°C	-	-	-	-	-	1,0132	1,0123
Punto de Ablandamiento	°C	-	-	-	-	49,5	51,0
Penetración, 25°C, 100g, 5s	0,1 mm	60	-	50	-	67,7	64,6
Índice de penetración		-1,5	1,0	-1,5	1,0	-0,6	-0,3
<b>ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT</b>							
Viscosidad dinámica, 60°C	Pa,s	-	800	-	1200	1315,0	1497,0
Cambio de masa	% w/w	-	1	-	1	0,049	0,055
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	cm	50	-	40	-	25,0	28,5

Fuente: Autor

Como puede notarse, la tecnología Superpave no reconoce el excesivo envejecimiento que se observa en la clasificación por viscosidad.

## 3.2 Diseño experimental realizado

Los resultados obtenidos en las distintas corridas realizadas, 15 en total para cada tipo de asfalto mezclado con un aceite base y un rejuvenecedor, se pueden apreciar a continuación.

### 3.2.1 Corridas con asfalto PG 64-22

#### Atributos del Diseño de Mezclas

- Clase de diseño: Mezcla

- Nombre del Diseño: Simplex-Látice

### **Diseño Base**

- Número de componentes: 3
- Número de respuestas: 4
- Número de corridas: 15
- Tipo de modelo: Cúbico Especial
- Aleatorizar: No

La organización de la información para este diseño se muestra en las tablas 3.4 a 3.6

**Tabla 3. 4 Componentes del diseño experimental con asfalto PG 64-22**

<b>Componentes</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Unidades</b>
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	Porcentaje
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	Porcentaje
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	Porcentaje

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

**Tabla 3. 5 Respuestas esperadas en el diseño experimental con asfalto PG 64-22**

<b>Respuestas</b>	<b>Unidades</b>
<b>Viscosidad original</b>	60°C, Pa.s
<b>Viscosidad residuo</b>	60°C, Pa.s
<b>Ductilidad residuo</b>	25°C, cm
<b>Delta Tc</b>	

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Luego de realizarse las 15 corridas se obtienen los valores para cada parámetro que se pueden visualizar a continuación en la Tabla 3.6.

**Tabla 3. 6 Resumen de resultados con asfalto PG 64-22**

CORRIDAS	BLOQUE	Asfalto PG 64-22	Aceite base	Sylvaroad	Viscosidad 60°C original, Pa.s	Viscosidad 60°C residuo, Pa.s	Ductilidad 25°C residuo, cm	Δ TC
1	1	1,0	0,0	0,0	235	1315	24,7	5,1
2	1	0,98	0,02	0,00	162	1104	33,5	3,0
3	1	0,98	0,00	0,02	160	819	51,2	1,1
4	1	0,97	0,03	0,00	151	1132	29,0	2,7
5	1	0,96	0,02	0,02	92	604	57,0	-1,4
6	1	0,97	0,00	0,03	130	656	61,3	0,6
7	1	0,95	0,05	0,00	103	615	64,5	0,9
8	1	0,95	0,03	0,02	82	538	77,7	0,7
9	1	0,95	0,02	0,03	90	472	73,5	-2,0
10	1	0,95	0,00	0,05	65	384	109,0	0,2
11	1	0,98	0,02	0,00	174	1141	35,5	2,7
12	1	0,98	0,00	0,02	184	675	49,7	0,6
13	1	0,96	0,02	0,02	115	574	54,5	-1,2
14	1	0,95	0,03	0,02	90	563	76,0	-0,2
15	1	0,95	0,02	0,03	78	526	65,0	0,8

Fuente: Autor

Analizando los valores de viscosidad en estado original de las diferentes corridas en la Tabla 3.6 se observa que el asfalto PG 64-22 cumple con las características de un AC-20 antes de pasar por el proceso de envejecimiento primario, de igual manera al mezclarlos con 2% de rejuvenecedor o 2% de aceite, sin embargo al aumentar el porcentaje o combinar ambos productos las viscosidades se encuentran por debajo del mínimo de 160 Pa.s que permite un AC-20 indicando que la consistencia de dichas combinaciones es muy blanda.

Al considerarse los resultados de viscosidad y ductilidad de las diferentes combinaciones de las diferentes combinaciones después de pasar por el horno RTFOT se observa que el rejuvenecedor Sylvaroad RP 1000 ayuda a disminuir el excesivo envejecimiento que presenta el asfalto PG 64-22 en comparación al llamado aceite base, debido a que al analizar las combinaciones con rejuvenecedor en todos los casos presentan menores valores de viscosidad y mayores valores de ductilidad. Es importante mencionar que se busca cumplir con las exigencias de la clasificación por viscosidad de un AC-20 luego de envejecido, los cuales indican que la viscosidad del residuo debe ser menor a 800Pa.s y ductilidades mayores a 50 cm.

Adicionalmente se determina el parámetro  $\Delta T_c$ , el cual es un indicador de las pérdidas de las propiedades de relajación. Se busca evitar valores mayores a 2.5°C el cual como ya se ha expresado en el trabajo sería un indicador de inicio de agrietamiento o problemas serios de grietas.

Considerando estos conceptos se puede concluir que el asfalto PG 64-22 mezclado con 2% de aceite se encontraría en la zona de inicio de agrietamiento, además es evidente que el rejuvenecedor ayuda de mejor manera a tener menores problemas de agrietamiento que el aceite base.

Tomando como referencia los criterios de calidad para el asfalto AC-20 de la norma INEN 2515:2010 / Enmienda 1, la viscosidad original evaluada debería estar entre 160 y 240 Pa.s, la viscosidad del residuo menor a 800 Pa.s, la ductilidad del residuo mayor a 50 cm y  $\Delta T_c$  menor a 2.5. La Tabla 3.7 resume los cumplimientos de dichos criterios. No se incluyen las réplicas aunque su incidencia fue considerada, por ejemplo, si en la Corrida 12 (réplica de la 3) la viscosidad es de 675 Pa.s, entonces la Corrida 3 aparece como No Cumple.

**Tabla 3. 7 Resumen de cumplimiento del asfalto PG 64-22**

CORRIDAS	BLOQUE	Asfalto PG 64-22	Aceite base	Sylvaroad	Viscosidad 60°C original, Pa.s	Viscosidad 60°C residuo, Pa.s	Ductilidad 25°C residuo, cm	$\Delta T_c$
1	1	1,0	0,0	0,0	√	X	X	X
2	1	0,98	0,02	0,00	√	X	X	X
3	1	0,98	0,00	0,02	√	X	√	√
4	1	0,97	0,03	0,00	X	X	X	X
5	1	0,96	0,02	0,02	X	√	√	√
6	1	0,97	0,00	0,03	X	√	√	√
7	1	0,95	0,05	0,00	X	√	√	√
8	1	0,95	0,03	0,02	X	√	√	√
9	1	0,95	0,02	0,03	X	√	√	√
10	1	0,95	0,00	0,05	X	√	√	√

Fuente: Autor

**Observaciones:**

- Cumple: √
- No cumple: X

### 3.2.1.1 Resultados del Statgraphics para la viscosidad original a 60°C

#### Análisis de varianza

A continuación se muestra en la Tabla 3.8 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 8 Resultados del ANOVA para la viscosidad original**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	32110.2	6	5351.7	49.70	<b>0.0000</b>
<b>Error total</b>	861.382	8	107.673		
<b>Total (corr.)</b>	32971.6	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.3875 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4281 por ciento
- Error estándar del est. = 10.3765
- Error absoluto medio = 6.0624
- Estadístico Durbin-Watson = 1.5761 (P=0.2153)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.206014

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Viscosidad original y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97.3875% de la variabilidad en Viscosidad original. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con

diferente número de variables independientes, es 95.4281%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10.3765. El error medio absoluto (MAE) de 6.0624 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

### **Ajuste del modelo**

En la Tabla 3.9 se muestran los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 9 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad original**

<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Estadístico T</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A:PG 64-22</b>	234.827	10.1171		
<b>B: Aceite base</b>	103.123	10.0576		
<b>C: Sylvaroad</b>	65.0503	10.0576		
<b>AB</b>	-45.9653	39.1662	-1.1736	0.2743
<b>AC</b>	10.0086	39.1662	0.25554	0.8048
<b>BC</b>	3.80658	37.1337	0.10251	0.9209
<b>ABC</b>	-264.596	276.097	-0.958345	0.3660

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.3875 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4281 por ciento
- Error estándar del est. = 10.3765
- Error absoluto medio = 6.0624
- Estadístico Durbin-Watson = 1.5761 (P=0.2153)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.206014



La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\text{Viscosidad original} = 234.827 \cdot \text{PG6422} + 103.123 \cdot \text{Aceite base} + 65.0503 \cdot \text{Sylvaroad} - 45.9653 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} + 10.0086 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Sylvaroad} + 3.80658 \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad} - 264.596 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad}.$$

### **Optimización de respuesta**

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Viscosidad original en 200.0 Pa.s
- Valor óptimo = 200.0

En la Tabla 3.10 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de viscosidad original.

**Tabla 3. 10 Valores óptimos de respuesta**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.99003
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.00742924
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00254054

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener Viscosidad original en 160.0 Pa.s
- Valor óptimo = 160.0

En la Tabla 3.11 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de viscosidad original.

**Tabla 3. 11 Valores óptimos de respuesta**

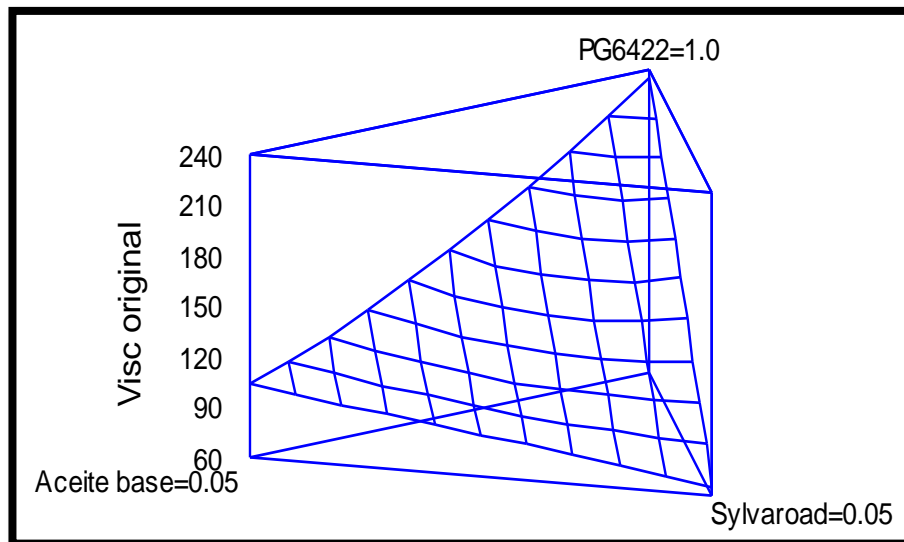
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.97783
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.001979
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.0201907

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas muy diferentes para los valores óptimos seleccionados.

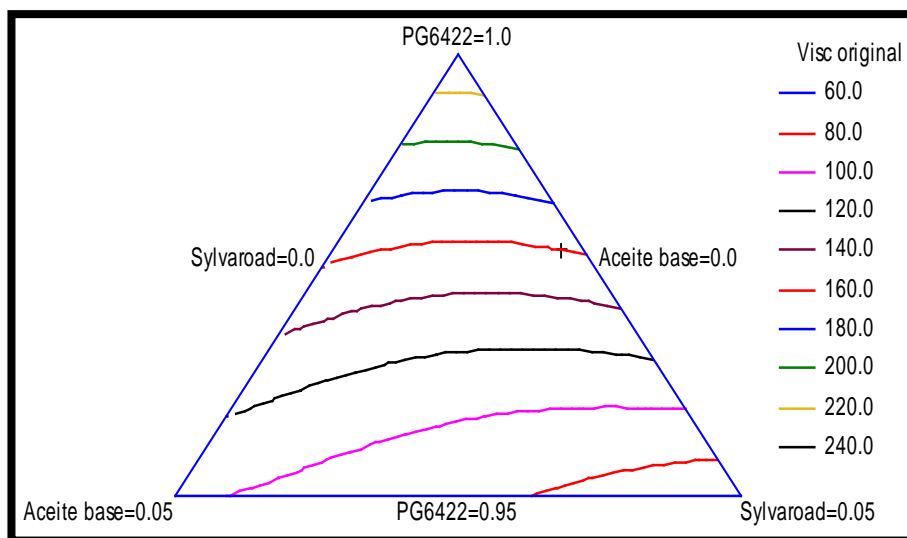
### **Gráficas de comportamiento de la viscosidad**

Se muestran en las figuras 3.1 y 3.2 el comportamiento de la viscosidad original.



**FIGURA 3. 1 Superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 2 Contornos de la superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.1.2 Análisis del Statgraphics para viscosidad en el residuo RTFOT 60°C

#### Análisis de varianza

A continuación se muestra en la Tabla 3.12 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 12 Resultados del ANOVA para la viscosidad en el residuo**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	1.14053E6	6	190088.	46.47	0.0000
<b>Error total</b>	32725.2	8	4090.65		
<b>Total (corr.)</b>	1.17325E6	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.2107 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.1188 por ciento
- Error estándar del est. = 63.9582
- Error absoluto medio = 37.1687
- Estadístico Durbin-Watson = 1.5854 (P=0.2205)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.183656

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Viscosidad en el residuo y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97.2107% de la variabilidad en Viscosidad en el residuo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.1188%. El error

estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 63.9582. El error medio absoluto (MAE) de 37.1687 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

### **Ajuste del modelo**

En la Tabla 3.13 se observa los resultados de los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 13 Resultados de ajuste de modelo para viscosidad en el residuo**

<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Estadístico T</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A:PG 64-22</b>	1284.79	62.359		
<b>B:Aceite base</b>	634.334	61.992		
<b>C:Sylvaroad</b>	394.876	61.992		
<b>AB</b>	601.762	241.41	24.927	0.0374
<b>AC</b>	-636.793	241.41	-263.781	0.0298
<b>BC</b>	422.711	228.882	0.184685	0.8581
<b>ABC</b>	-2612.59	1701.79	-15.352	0.1633

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.2107 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.1188 por ciento
- Error estándar del est. = 63.9582
- Error absoluto medio = 37.1687
- Estadístico Durbin-Watson = 1.5854 (P=0.2205)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.183656

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\text{Viscosidad en el residuo} = 1284.79 \cdot \text{PG6422} + 634.334 \cdot \text{Aceite base} + 394.876 \cdot \text{Sylvaroad} + 601.762 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} - 636.793 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Sylvaroad} + 42.2711 \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad} - 2612.59 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad}$$

### **Optimización de respuesta**

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Viscosidad en el residuo en 800.0 Pa.s
- Valor óptimo = 800.0

En la Tabla 3.14 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de viscosidad en el residuo.

**Tabla 3. 14 Valores óptimos de respuesta**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.958087
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0405017
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00141183

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener Viscosidad en el residuo en 600.0 Pa.s
- Valor óptimo = 600.0

En la Tabla 3.15 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de viscosidad en el residuo.

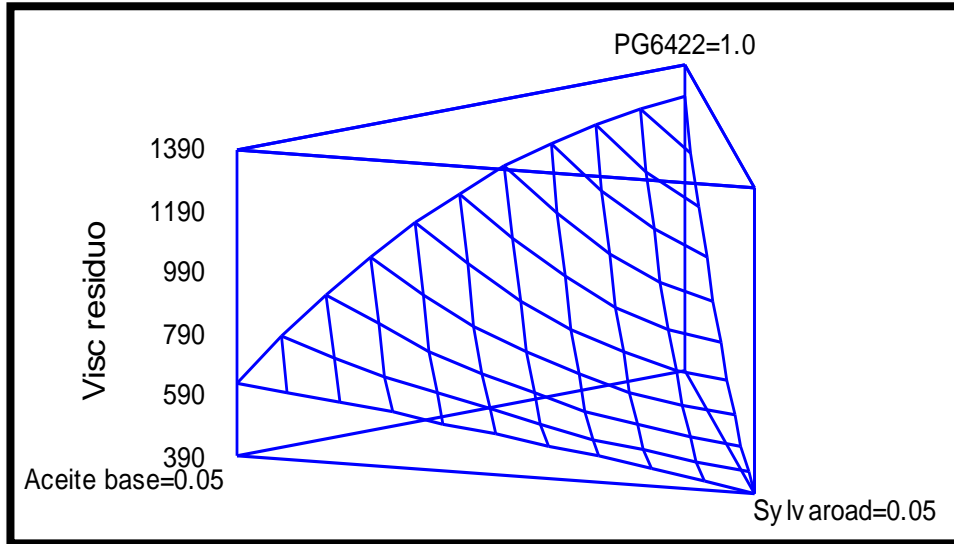
**Tabla 3. 15 Valores óptimos de respuesta**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.956004
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0276449
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.016351

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

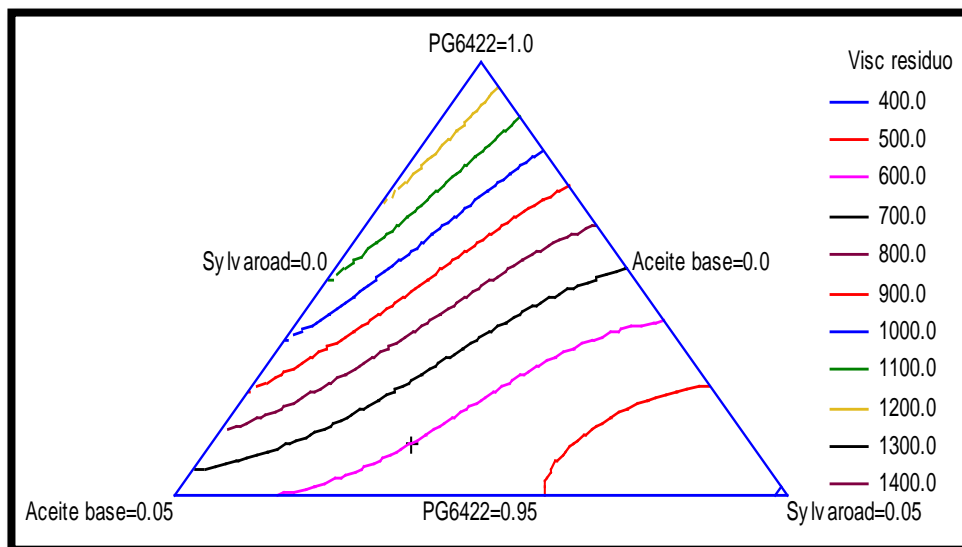
Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas diferentes para los valores óptimos seleccionados.

**Graficas de comportamiento de la viscosidad del residuo**



**FIGURA 3. 3 Superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 4 Contornos de la superficie de respuesta**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.1.3 Análisis del Statgraphics para la ductilidad en el residuo RTFOT a 25°C

#### Análisis de varianza

En la siguiente Tabla 3.16 se observa un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 16 Resultados del ANOVA para ductilidad en el residuo.**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	6398.72	6	1066.45	19.51	0.0002
<b>Error total</b>	437.369	8	546.711		
<b>Total (corr.)</b>	6836.09	14			

**Fuente:** Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 93.6021 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 88.8036 por ciento
- Error estándar del est. = 7.39399
- Error absoluto medio = 4.33203
- Estadístico Durbin-Watson = 2.36093 (P=0.7482)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.35151

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Ductilidad en el residuo y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 93.6021% de la variabilidad en Ductilidad en el residuo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88.8036%. El error

estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 7.39399. El error medio absoluto (MAE) de 4.33203 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

### **Ajuste del modelo**

En la Tabla 3.17 se observa los resultados del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 17 Resultados de ajuste del modelo para ductilidad en el residuo.**

<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Estadístico T</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A:PG 64-22</b>	271.037	720.911		
<b>B: Aceite base</b>	658.313	716.669		
<b>C: Sylvaroad</b>	105.265	716.669		
<b>AB</b>	-521.246	279.086	-186.769	0.0988
<b>AC</b>	-396.346	279.086	-142.016	0.1933
<b>BC</b>	-520.756	264.603	-196.807	0.0846
<b>ABC</b>	-761.381	196.738	-0.387003	0.7088

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 93.6021 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 88.8036 por ciento
- Error estándar del est. = 7.39399
- Error absoluto medio = 4.33203
- Estadístico Durbin-Watson = 2.36093 (P=0.7482)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.35151



Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Duct residuo} = 27.1037 \cdot \text{PG6422} + 65.8313 \cdot \text{Aceite base} + 105.265 \cdot \text{Sylvaroad} - 52.1246 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} - 39.6346 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Sylvaroad} - 52.0756 \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad} - 76.1381 \cdot \text{PG6422} \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad}.$$

### **Optimización de respuesta**

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Ductilidad en el residuo en 50.0 cm
- Valor óptimo = 50.0

En la Tabla 3.18 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de ductilidad.

**Tabla 3. 18 Valores óptimos de respuesta**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.97427
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.00445267
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.0212776

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener Ductilidad en el residuo en 60.0 cm
- Valor óptimo = 60.0

En la Tabla 3.19 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para un valor óptimo de ductilidad.

**Tabla 3. 19 Valores óptimos de respuesta**

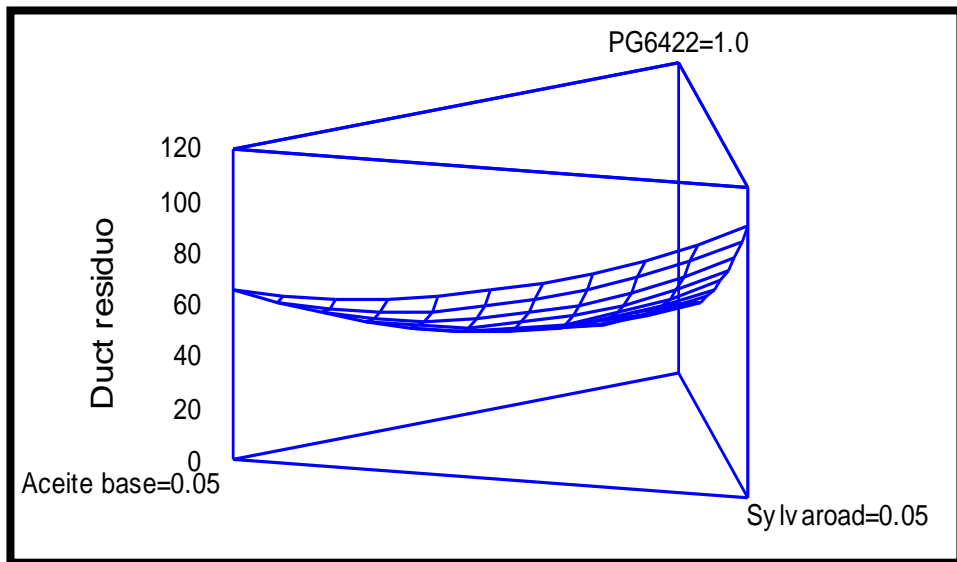
<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.968907
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.00360468
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.027488

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas muy similares para los valores óptimos seleccionados.

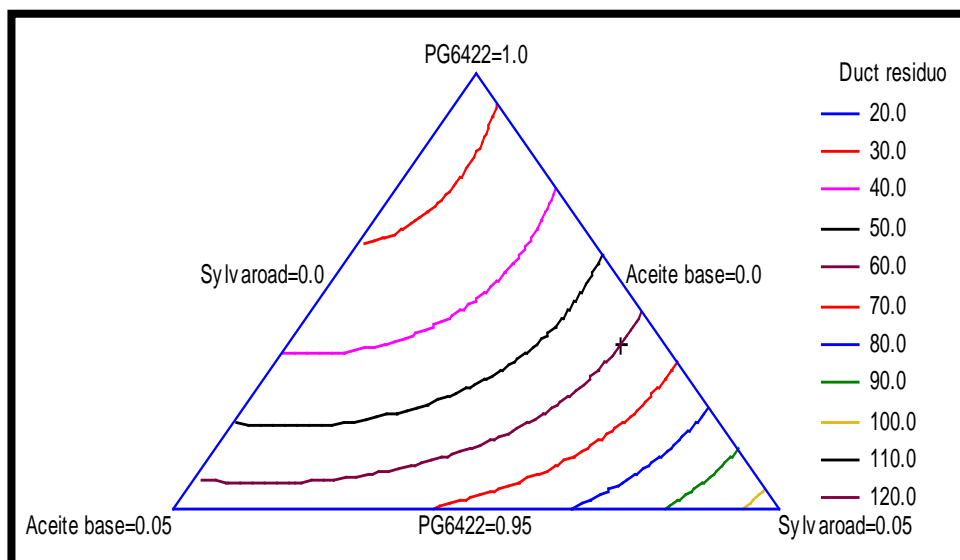
### **Gráficas de comportamiento de la ductilidad**

Se muestran en las figuras 3.5 y 3.6 el comportamiento de la ductilidad.



**FIGURA 3. 5 Superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 6 Contornos de la superficie de residuos estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.1.4 Análisis en el Statgraphics del parámetro $\Delta T_c$

#### Análisis de varianza

A continuación se muestra en la Tabla 3.20 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 20 Resultado del ANOVA para el parámetro  $\Delta T_c$**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	430.024	6	716.707	10.23	0.0022
<b>Error total</b>	560.689	8	0.700862		
<b>Total (corr.)</b>	486.093	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 88.4654 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 79.8144 por ciento
- Error estándar del est. = 0.837175
- Error absoluto medio = 0.407454
- Estadístico Durbin-Watson = 2.43388 (P=0.7902)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = -0.321813

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre  $\Delta T_c$  y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 88.4654% de la variabilidad en  $\Delta T_c$ . El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 79.8144%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.837175. El error medio absoluto (MAE) de 0.407454 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de

Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

### **Ajuste del modelo**

En la Tabla 3.21 se observa los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 21 Resultados de ajuste de modelo para  $\Delta Tc$**

<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Estadístico T</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A:PG 64-22</b>	492.469	0.816242		
<b>B:Aceite base</b>	111.356	0.811439		
<b>C:Sylvaroad</b>	0.161751	0.811439		
<b>AB</b>	-144.234	315.991	-0.456451	0.6602
<b>AC</b>	-806.383	315.991	-255.192	0.0341
<b>BC</b>	-338.606	299.593	-113.022	0.2911
<b>ABC</b>	-466.499	222.754	-209.424	0.0696

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 88.4654 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 79.8144 por ciento
- Error estándar del est. = 0.837175
- Error absoluto medio = 0.407454
- Estadístico Durbin-Watson = 2.43388 (P=0.7902)
- Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.321813

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\Delta tc = 4.92469*PG6422 + 1.11356*Aceite\ base + 0.161751*Sylvaroad - 1.44234*PG6422*Aceite\ base - 8.06383*PG6422*Sylvaroad - 3.38606*Aceite\ base*Sylvaroad - 46.6499*PG6422*Aceite\ base*Sylvaroad.$$

### **Optimización de respuesta**

- Meta: mantener  $\Delta T_c$  en 2.5
- Valor óptimo = 2.5

En la Tabla 3.38 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para el parámetro  $\Delta T_c$ .

**Tabla 3. 22 Valores óptimos de respuesta**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	0.973034
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0269346
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.0000313604

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener  $\Delta T_c$  en 5.0
- Valor óptimo = 4.92469

En la Tabla 3.39 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para el parámetro  $\Delta T_c$ .

**Tabla 3. 23 Valores óptimos de respuesta**

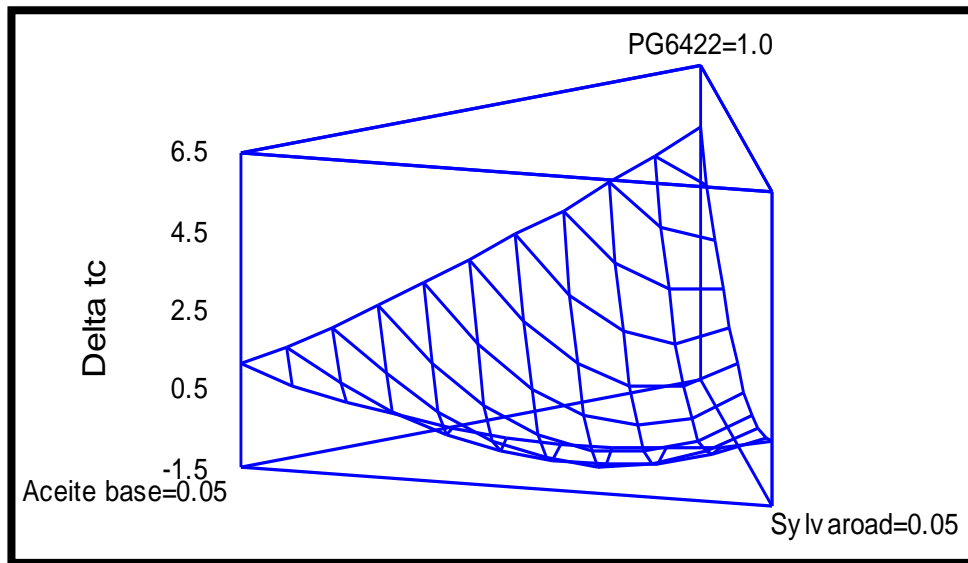
<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-22</b>	0.95	1.0	1.0
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.0

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas muy diferentes para los valores óptimos seleccionados.

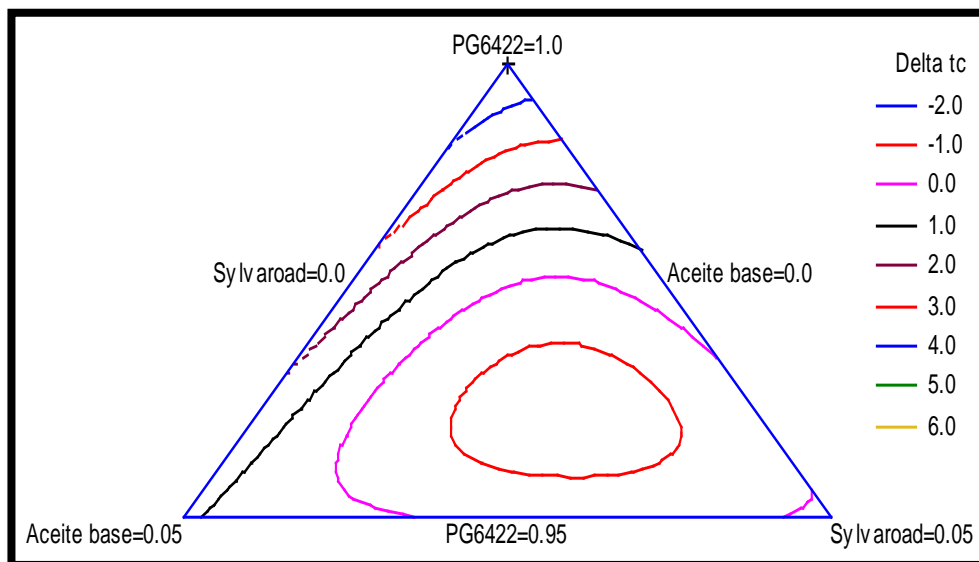
## Gráficas de comportamiento del parámetro $\Delta T_c$

Se muestran en las figuras 3.7 y 3.8 el comportamiento del parámetro  $\Delta T_c$ .



**FIGURA 3. 7 Superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 8 Contornos de la superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.2 Corridas con asfaltos PG 64-28

#### Atributos del Diseño de Mezcla

- Clase de diseño: Mezcla
- Nombre del Diseño: Simplex-Látice

#### Diseño Base

- Número de componentes: 3
- Número de respuestas: 4
- Número de corridas: 15
- Tipo de modelo: Cúbico Especial
- Aleatorizar: No

La organización de la información para este diseño se muestra en las tablas 3.24 a 3.26.

**Tabla 3. 24 Componentes del diseño experimental con asfalto PG 64-28**

Componentes	Bajo	Alto	Unidades
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	Porcentaje
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	Porcentaje
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	Porcentaje

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

**Tabla 3. 25 Respuestas esperadas en el diseño experimental con asfalto PG 64-28**

Respuestas	Unidades
Viscosidad original	60 °C, Pa.s
Viscosidad residuo	60 °C, Pa.s
Ductilidad residuo	25 °C, cm
Delta tc	

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Luego de realizarse las 15 corridas se obtienen los valores para cada parámetro que se pueden visualizar en la Tabla 3.26.

**Tabla 3. 26 Resumen de resultados con asfalto PG 64-28**

CORRIDAS	BLOQUE	Asfalto PG 64-28	Aceite base	Sylvaroad	Viscosidad 60°C original, Pa.s	Viscosidad 60°C residuo, Pa.s	Ductilidad 25°C residuo, cm	$\Delta T_c$
1	1	1,0	0,0	0,0	220	1497	28,5	3,5
2	1	0,98	0,02	0,00	174	1031	35,0	3,5
3	1	0,98	0,00	0,02	179	778	68,0	1,6
4	1	0,97	0,03	0,00	120	958	45,5	1,7
5	1	0,96	0,02	0,02	115	545	58,5	0,2
6	1	0,97	0,00	0,03	131	419	79,5	-1,2
7	1	0,95	0,05	0,00	83	652	57,3	0,6
8	1	0,95	0,03	0,02	89	457	78,5	-0,9
9	1	0,95	0,02	0,03	86	334	80,7	-2,1
10	1	0,95	0,00	0,05	63	434	91,0	-1,3
11	1	0,98	0,02	0,00	164	922	42,7	3,2
12	1	0,98	0,00	0,02	160	796	74,0	1,4
13	1	0,96	0,02	0,02	147	595	56,3	0,8
14	1	0,95	0,03	0,02	88	431	74,5	-0,8
15	1	0,95	0,02	0,03	87	357	81,3	-1,1

Fuente: Autor

Analizando los valores de viscosidad en estado original de las diferentes corridas en la Tabla 3.26 nos podemos dar cuenta que al pasar las 15 combinaciones por el proceso de envejecimiento primario en el horno RTFOT se observa que al incrementar 2% de rejuvenecedor cumple los parámetros de clasificación por viscosidad pero al incrementar 3% y 5% respectivamente tenemos que luego de pasar por el horno RTFOT las viscosidades y ductilidades cumplen con los parámetros de clasificación. Sin embargo, la viscosidad original sufre un cambio generando que el cemento asfáltico se vuelva demasiado blando. Algo opuesto ocurre cuando usamos aceite en lugar de rejuvenecedor, al incrementar 2% de rejuvenecedor no cumple con la ductilidad requerida, pero al utilizar 3% y 5% los parámetros de viscosidad y ductilidad cumplen con los valores requeridos.

Al utilizar aceite y rejuvenecedor en proporciones combinadas, el cemento asfáltico se vuelve demasiado susceptible a la deformación siendo propenso a producir ahuellamiento.



En la siguiente Tabla 3.27 se toma como referencia los criterios de calidad para el asfalto AC-20 de la norma INEN 2515:2010 / Enmienda 1, y se observa si los parámetros de viscosidad original a 60°C, viscosidad en el residuo a 60°C, ductilidad a 25°C y el parámetro  $\Delta T_c$  cumplen o no cumplen respectivamente.

**Tabla 3. 27 Resumen de cumplimiento del asfalto PG 64-28**

CORRIDAS	BLOQUE	Asfalto PG 64-28	Aceite base	Sylvaroad	Viscosidad 60°C original, Pa.s	Viscosidad 60°C residuo, Pa.s	Ductilidad 25°C residuo, cm	$\Delta T_c$
1	1	1,0	0,0	0,0	√	X	X	X
2	1	0,98	0,02	0,00	√	X	X	X
3	1	0,98	0,00	0,02	√	√	√	√
4	1	0,97	0,03	0,00	X	X	X	√
5	1	0,96	0,02	0,02	X	√	√	√
6	1	0,97	0,00	0,03	X	√	√	√
7	1	0,95	0,05	0,00	X	√	√	√
8	1	0,95	0,03	0,02	X	√	√	√
9	1	0,95	0,02	0,03	X	√	√	√
10	1	0,95	0,00	0,05	X	√	√	√

Fuente: Autor

**Observaciones:**

- Cumple: √
- No cumple: X

**3.2.2.1 Análisis del Statgraphics para la viscosidad original a 60 °C**

**Análisis de varianza**

A continuación se muestra en la Tabla 3.28 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 28 Resultados del ANOVA para la viscosidad original**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	27838.5	6	4639.75	34.74	<b>0.0000</b>
<b>Error total</b>	1068.43	8	133.554		
<b>Total (corr.)</b>	28906.9	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 96.3039 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93.5318 por ciento
- Error estándar del est. = 11.5566
- Error absoluto medio = 6.15608
- Estadístico Durbin-Watson = 1.88227 (P=0.4143)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.0522556

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre viscosidad original y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.3039% de la variabilidad en viscosidad original. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 93.5318%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 11.5566. El error medio absoluto (MAE) de 6.15608 es el valor promedio de los residuos.

El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

## Ajuste del modelo

En la Tabla 3.29 se observa los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 29 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad original**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>A:PG 64-28</b>	223.543	112.676		
<b>B:Aceite base</b>	799.935	112.013		
<b>C:Sylvaroad</b>	624.633	112.013		
<b>AB</b>	-161.944	436.202	-0.37126	0.7201
<b>AC</b>	345.586	436.202	0.792262	0.4511
<b>BC</b>	677.984	413.565	163.936	0.1398
<b>ABC</b>	530.993	307.495	172.684	0.1225

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 96.3039 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93.5318 por ciento
- Error estándar del est. = 11.5566
- Error absoluto medio = 6.15608
- Estadístico Durbin-Watson = 1.88227 (P=0.4143)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.0522556

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\text{Viscosidad original} = 223.543 \cdot \text{PG6428} + 79.9935 \cdot \text{Aceite base} + 62.4633 \cdot \text{Sylvaroad} - 16.1944 \cdot \text{PG6428} \cdot \text{Aceite base} + 34.5586 \cdot \text{PG6428} \cdot \text{Sylvaroad} + 67.7984 \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad} + 530.993 \cdot \text{PG6428} \cdot \text{Aceite base} \cdot \text{Sylvaroad}$$

## Optimización de respuesta

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Viscosidad original en 200.0 Pa.s
- Valor óptimo = 200.0

En la Tabla 3.30 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la viscosidad original.

**Tabla 3. 30 Valores óptimos de respuestas**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	0.99074
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.000897698
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00836274

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener viscosidad original en 160.0 Pa.s
- Valor óptimo = 160.0

En la Tabla 3.31 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la viscosidad original.

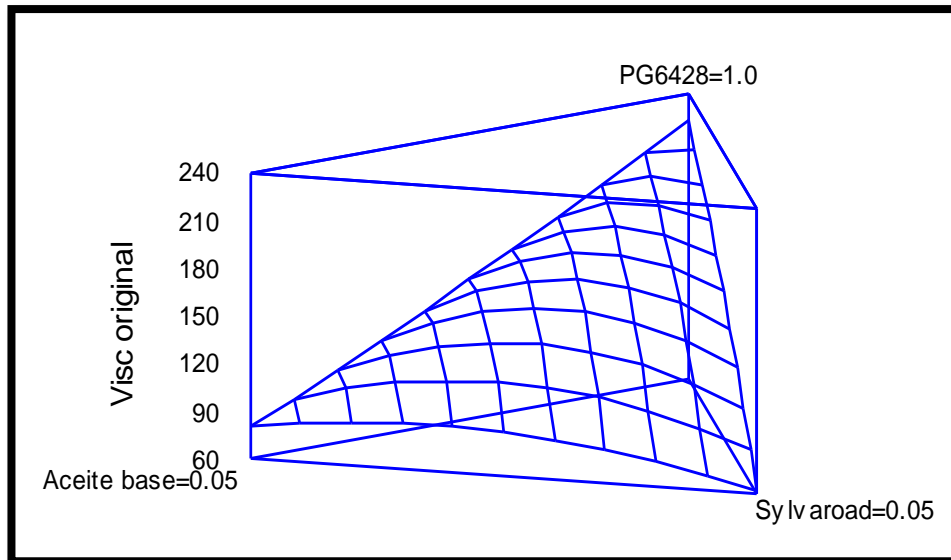
**Tabla 3. 31 Valores óptimos de respuestas**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG6428</b>	0.95	1.0	0.978611
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0208396
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.000549537

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

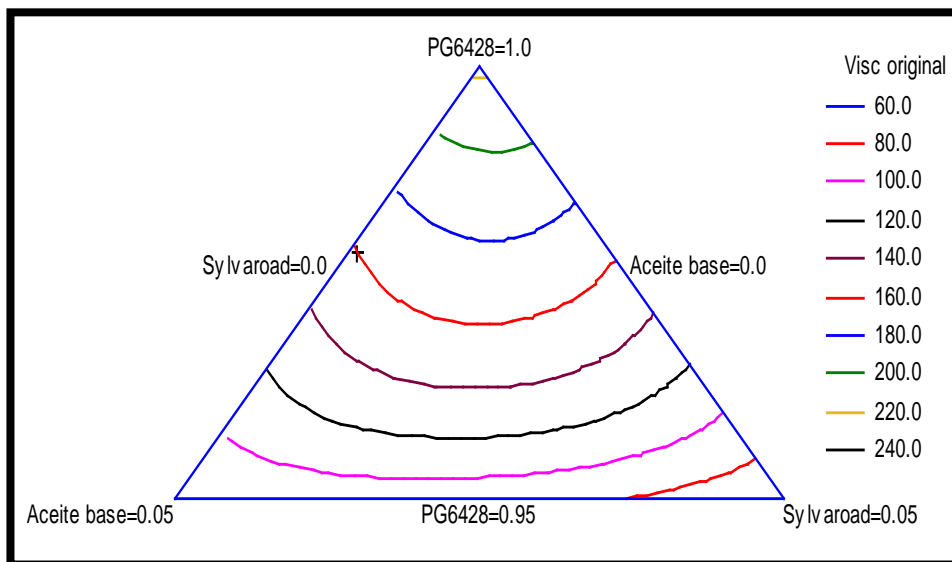
### **Gráficas de comportamiento de la viscosidad**

Se muestran en las figuras 3.9 y 3.10 el comportamiento de la viscosidad original.



**FIGURA 3. 9 Superficie de repuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 10 Contornos de la superficie de respuesta estimada**

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.2.2 Análisis del Statgraphics para la viscosidad en el residuo RTFOT a 60°C

#### Análisis de varianza

La siguiente Tabla 3.32 muestra el resultado de ajustar diferentes modelos.

**Tabla 3. 32 Resultados del ANOVA para la viscosidad en el residuo**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	139.985.000.000	6	233309.	46.21	<b>0.0000</b>
<b>Error total</b>	40389.2	8	5048.65		
<b>Total (corr.)</b>	144.024.000.000	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.1957 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.0924 por ciento
- Error estándar del est. = 71.0538
- Error absoluto medio = 39.9665
- Estadístico Durbin-Watson = 2.1665 (P=0.6204)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = -0.0845628

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Viscosidad en el residuo y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97.1957% de la variabilidad en Viscosidad en el residuo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.0924%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 71.0538. El error medio absoluto (MAE) de 39.9665 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

## Ajuste del modelo

En la Tabla 3.33 se observa los resultados de los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 33 Resultados de Ajuste de Modelo para Viscosidad en el residuo**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>A:PG 64-28</b>	1497.6	692.772		
<b>B:Aceite base</b>	680.047	688.695		
<b>C:Sylvaroad</b>	405.348	688.695		
<b>AB</b>	-607.269	268.192	-22.643	0.0534
<b>AC</b>	-1348.13	268.192	-502.674	0.0010
<b>BC</b>	-616.448	254.274	-242.434	0.0416
<b>ABC</b>	2855.77	1890.59	151.052	0.1694

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 97.1957 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.0924 por ciento
- Error estándar del est. = 71.0538
- Error absoluto medio = 39.9665
- Estadístico Durbin-Watson = 2.1665 (P=0.6204)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = -0.0845628

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\text{Viscosidad en el residuo} = 1497.6*PG6428 + 680.047*Aceite\ base + 405.348*Sylvaroad - 607.269*PG6428*Aceite\ base - 1348.13*PG6428*Sylvaroad - 616.448*Aceite\ base*Sylvaroad + 2855.77*PG6428*Aceite\ base*Sylvaroad.$$

## Optimización de respuesta

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Viscosidad en el residuo en 800.0 Pa.s

- Valor óptimo = 800.0

En la Tabla 3.34 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la viscosidad en el residuo.

**Tabla 3. 34 Valores óptimos de respuestas**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG6428</b>	0.95	1.0	0.96662
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0306905
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00269

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener Viscosidad residuo en 600.0
- Valor óptimo = 600.0

En la Tabla 3.35 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la viscosidad en el residuo.

**Tabla 3. 35 Valores óptimos de respuestas**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
<b>PG6428</b>	0.95	1.0	0.961147
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0206494
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.018204

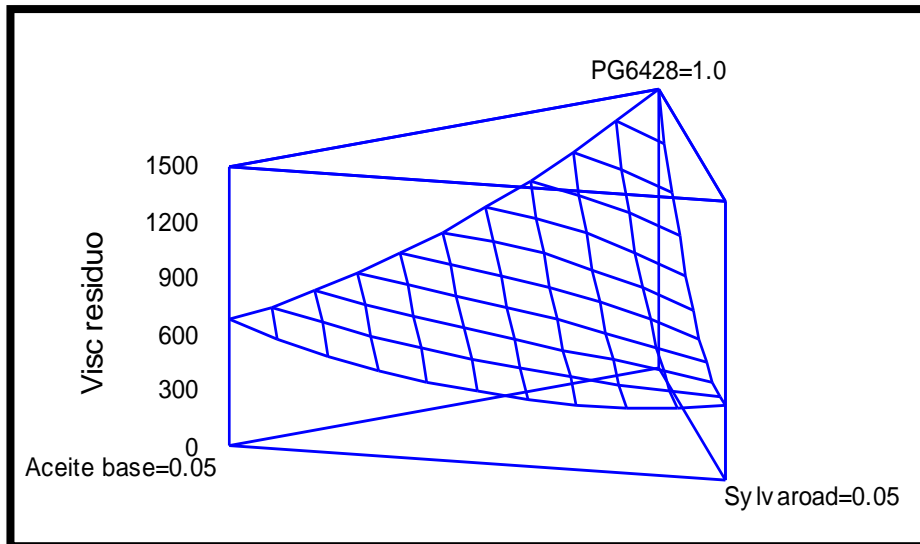
Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas muy diferentes para los valores óptimos seleccionados.

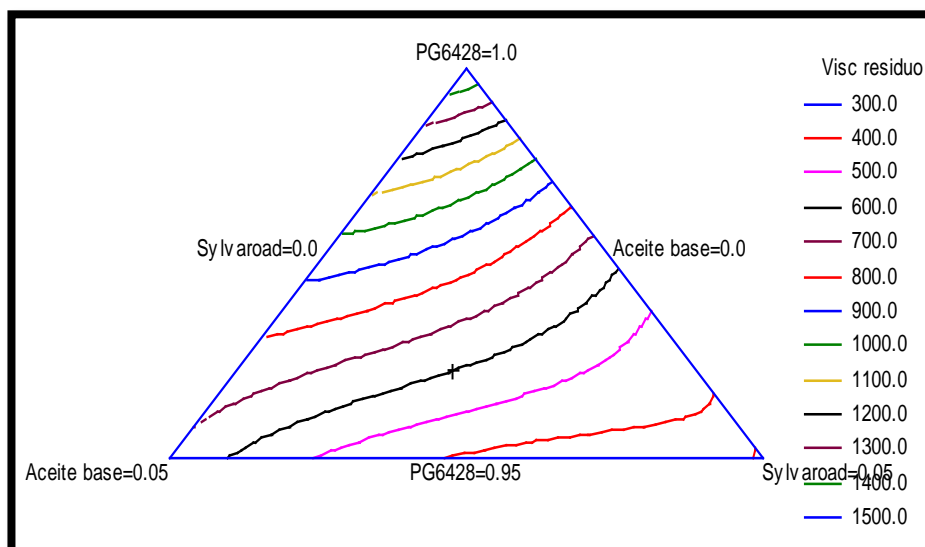
### **Gráficas de comportamiento de la viscosidad en el residuo**

Se muestran en las figuras 3.11 y 3.12 el comportamiento de la viscosidad en el residuo.





**FIGURA 3. 11 Superficie de respuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 12 Contornos de la superficie de repuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.2.3 Análisis del Statgraphics para la ductilidad en el residuo RTFOT a 25°C

#### Análisis de varianza

A continuación se muestra en la Tabla 3.36 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 36 Resultados del ANOVA para ductilidad en el residuo**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	4937.37	6	822.895	90.01	0.0000
<b>Error total</b>	731.358	8	914.198		
<b>Total (corr.)</b>	5010.5	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 98.5403 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.4456 por ciento
- Error estándar del est. = 3.02357
- Error absoluto medio = 1.7811
- Estadístico Durbin-Watson = 1.55515 (P=0.2038)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.218256

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Ductilidad en el residuo y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98.5403% de la variabilidad en Ductilidad en el residuo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 97.4456%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 3.02357. El error medio absoluto (MAE) de 1.7811 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

## Ajuste del modelo

En la Tabla 3.37 se observa los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 37 Resultados de Ajuste de Modelo para Ductilidad en el residuo**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>A:PG 64-28</b>	28.884	294.797		
<b>B:Aceite base</b>	578.074	293.062		
<b>C:Sylvaroad</b>	901.086	293.062		
<b>AB</b>	-547.877	114.124	-0.480069	0.6440
<b>AC</b>	682.411	114.124	597.953	0.0003
<b>BC</b>	199.666	108.202	18.453	0.1022
<b>ABC</b>	-492.464	804.505	-612.133	0.0003

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 98.5403 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.4456 por ciento
- Error estándar del est. = 3.02357
- Error absoluto medio = 1.7811
- Estadístico Durbin-Watson = 1.55515 (P=0.2038)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.218256

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\text{Ductilidad en el residuo} = 28.884*PG6428 + 57.8074*Aceite\ base + 90.1086*Sylvaroad - 5.47877*PG6428*Aceite\ base + 68.2411*PG6428*Sylvaroad + 19.9666*Aceite\ base*Sylvaroad - 492.464*PG6428*Aceite\ base*Sylvaroad$$

## Optimización de respuesta

A partir de las exigencias establecidas se realizaron los siguientes tanteos:

- Meta: mantener Ductilidad residuo en 50.0 cm
- Valor óptimo = 50.0

En la Tabla 3.38 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la ductilidad.

**Tabla 3. 38 Valores óptimos de respuestas.**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	0.961465
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0380542
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.000481119

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener Ductilidad residuo en 60.0
- Valor óptimo = 60.0

En la Tabla 3.39 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para la ductilidad.

**Tabla 3. 39 Valores óptimos de respuestas.**

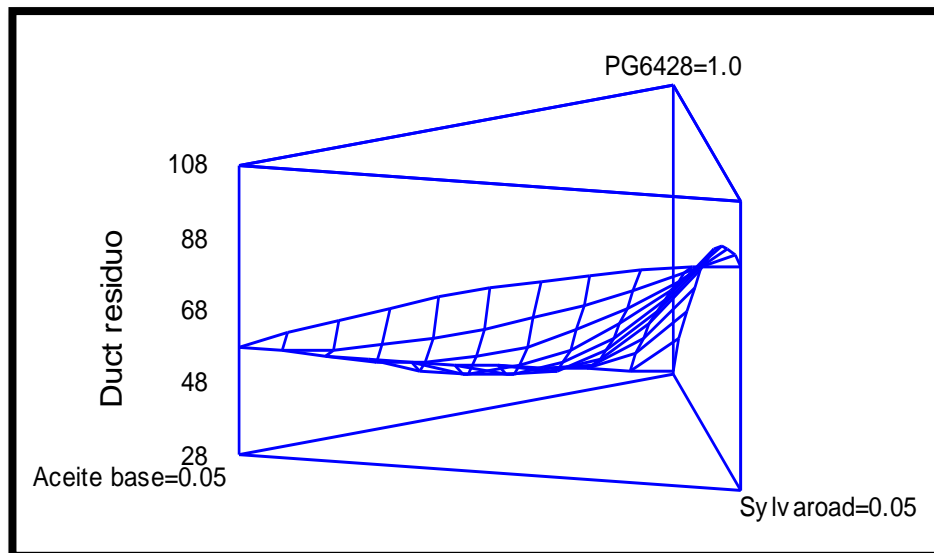
<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	0.953712
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0370351
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00925313

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

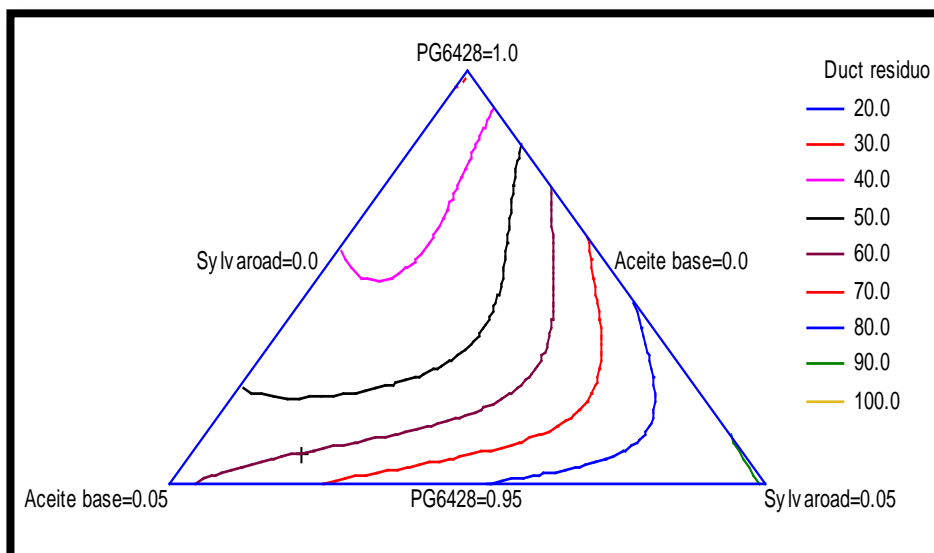
Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas diferentes para los valores óptimos seleccionados.

### **Gráficas de comportamiento de ductilidad**

Se muestran en las figuras 3.13 y 3.14 el comportamiento de la ductilidad en el residuo.



**FIGURA 3. 13 Superficie de respuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 14 Contornos de la superficie de respuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

### 3.2.2.4 Análisis en el Statgraphics del parámetro $\Delta T_c$

#### ANOVA para el parámetro $\Delta T_c$

A continuación se muestra en la Tabla 3.40 un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado.

**Tabla 3. 40 Resultados para ANOVA del parámetro  $\Delta T_c$**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo Cúbico Especial</b>	444.212	6	740.353	17.18	<b>0.0004</b>
<b>Error total</b>	344.815	8	0.431019		
<b>Total (corr.)</b>	478.693	14			

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 92.7967 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 87.3943 por ciento
- Error estándar del est. = 0.65652
- Error absoluto medio = 0.406005
- Estadístico Durbin-Watson = 1.75211 (P=0.3237)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.0900803

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Delta tc y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 92.7967% de la variabilidad en Delta tc. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 87.3943%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.65652. El error medio absoluto (MAE) de 0.406005 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

## Ajuste del modelo

En la Tabla 3.41 se observa los parámetros del modelo cúbico especial.

**Tabla 3. 41 Resultados de Ajuste de Modelo para  $\Delta T_c$ .**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
<b>A:PG 64-28</b>	384.691	0.640105		
<b>B:Aceite base</b>	0.533772	0.636338		
<b>C:Sylvaroad</b>	-158.069	0.636338		
<b>AB</b>	208.008	247.803	0.839408	0.4256
<b>AC</b>	-297.514	247.803	-120.061	0.2642
<b>BC</b>	-29.231	234.943	-124.417	0.2487
<b>ABC</b>	215.213	174.686	123.201	0.2529

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- R-cuadrada = 92.7967 por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 87.3943 por ciento
- Error estándar del est. = 0.65652
- Error absoluto medio = 0.406005
- Estadístico Durbin-Watson = 1.75211 (P=0.3237)
- Auto-correlación residual de Lag 1 = 0.0900803

La ecuación del modelo cúbico especial ajustado es:

$$\Delta TC = 3.84691*PG6428 + 0.533772*Aceite\ base - 1.58069*Sylvaroad + 2.08008*PG6428*Aceite\ base - 2.97514*PG6428*Sylvaroad - 2.9231*Aceite\ base*Sylvaroad + 21.5213*PG6428*Aceite\ base*Sylvaroad.$$

## Optimización de respuesta

- Meta: mantener  $\Delta T_c$  en 2.5
- Valor óptimo = 2.5

En la Tabla 3.42 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para el parámetro  $\Delta T_c$ .

**Tabla 3. 42 Valores óptimos de respuestas.**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	0.987473
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.00344163
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.00908497

Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

- Meta: mantener  $\Delta T_c$  en 5.0
- Valor óptimo = 3.84691

En la Tabla 3.43 se observan los resultados de la combinación de los niveles de los factores para el parámetro  $\Delta T_c$ .

**Tabla 3. 43 Valores óptimos de respuestas.**

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
<b>PG 64-28</b>	0.95	1.0	1.0
<b>Aceite base</b>	0.0	0.05	0.0
<b>Sylvaroad</b>	0.0	0.05	0.0

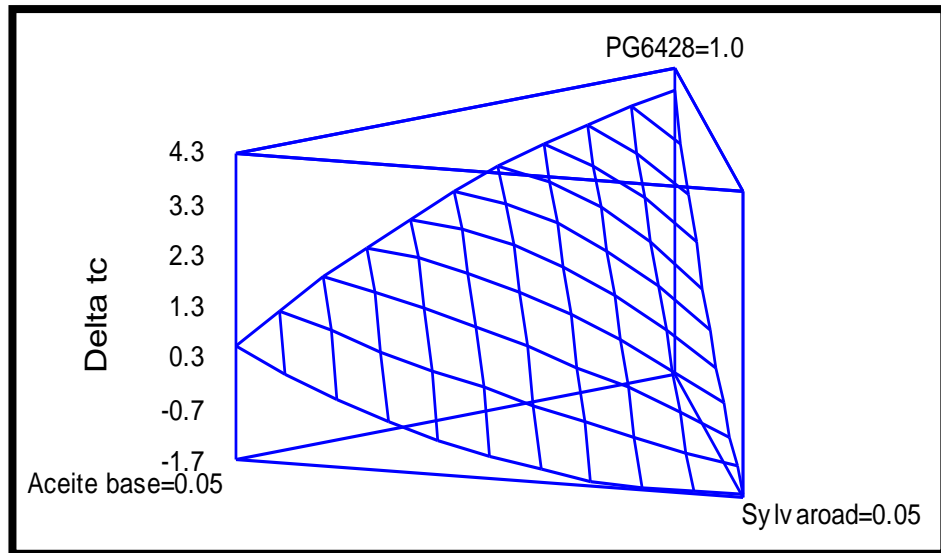
Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

Comparando los resultados de ambas tablas se aprecian respuestas diferentes para los valores óptimos seleccionados.

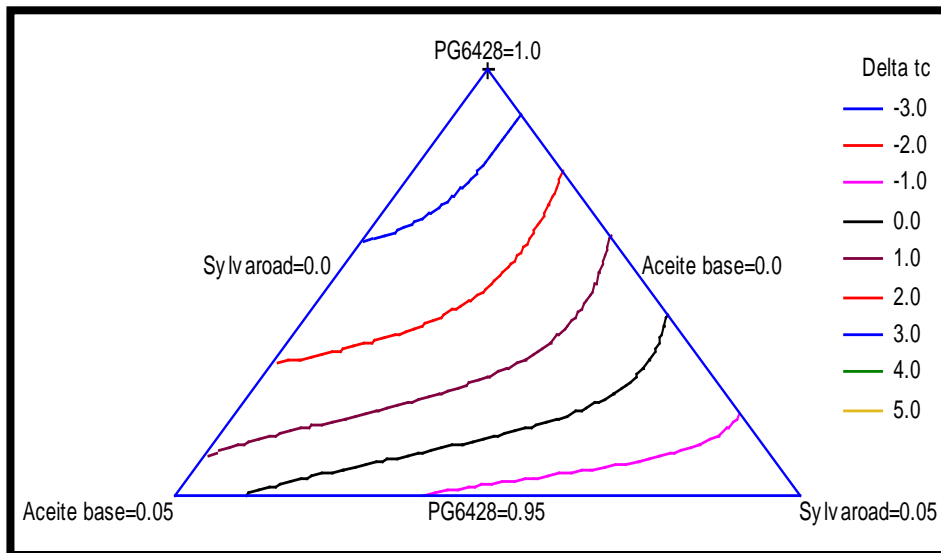
### **Gráficas de comportamiento del parámetro $\Delta T_c$**

Se muestran en las figuras 3.15 y 3.16 el comportamiento del parámetro  $\Delta T_c$ .





**FIGURA 3. 15 Superficie de repuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006



**FIGURA 3. 16 Contornos de la superficie de repuesta estimada**  
 Fuente: Salida de resultados del STATGRAPHICS Centurion XV, 2006

## CAPITULO IV

### 4.1 Conclusiones

- a) Al aplicar la clasificación por Superpave se obtuvo que los asfaltos ecuatorianos clasifican como PG 64-22 y PG 64-28 respectivamente, que en realidad son los tipos usuales que indistintamente se fabrican por la Refinería de Esmeraldas. Considerando los rangos de temperaturas extremas en nuestros pavimentos, estos asfaltos deberían tener un buen comportamiento en todas las regiones, lo que en realidad no sucede, especialmente en la Sierra.
- b) Los asfaltos procedentes de la refinería de Esmeraldas clasifican por grado de viscosidad en su estado original como AC-20, sin embargo después de pasar por un proceso de envejecimiento primario por el horno RTFOT no cumple con las exigencias de la normativa ecuatoriana vigente, lo que implica un posible comportamiento inadecuado en obra luego del proceso de mezclado, transporte y compactación. Esta situación no es detectada en la clasificación por grado de desempeño PG, donde los asfaltos clasifican como PG 64-22 y PG 64-28, indicando un grado excelente para nuestras condiciones.
- c) Los cuadros de cumplimiento con las 15 combinaciones o corridas para los dos tipos de asfalto estudiados son parecidos. En las combinaciones No. 1 y 2 la viscosidad original se cumple, pero en general las propiedades restantes se incumplen. La Combinación No. 3 (2% de Sylvaroad) es la que más se aproxima a cumplir con todas las exigencias; solo no cumple, y por un margen muy pequeño, con la viscosidad en el residuo para el caso del asfalto PG 64-22. La Combinación No. 4 (3% de aceite) es por el contrario la de peor comportamiento, incumpliendo la mayor parte de las propiedades del ligante original y envejecido. En las combinaciones restantes (No. 5 a

No. 10) si bien se incumple la viscosidad original se garantizan buenos resultados en el residuo envejecido.

- d) La tendencia mostrada con los resultados de las combinaciones No. 5 a No. 10 podría significar que para el empleo de estos productos rejuvenecedores probablemente se deberán generar nuevas exigencias técnicas, ya que el cumplimiento de las propiedades en el residuo del TFOT entra en contradicción con el cumplimiento de las propiedades correspondientes al asfalto original.
- e) Para ambos asfaltos queda demostrado que el rejuvenecedor empleado presenta una mayor efectividad ante el envejecimiento que el aceite base, analizando ambos independientemente a través de sus proporciones de 2, 3 y 5%. Si adecuadas propiedades después del envejecimiento se pueden alcanzar con 5% de aceite base, lo mismo se lograría con 3% de Sylvaroad y “casi” con 2%. Hay que considerar que los dos asfaltos presentaron propiedades muy malas luego de envejecidos (viscosidad y ductilidad).
- f) Los valores del parámetro  $\Delta TC$  calculado permiten determinar que el asfalto PG 64-22 presenta un peor comportamiento una vez envejecido en el PAV en comparación con el asfalto PG 64-28. Es decir, mientras el primero se encuentra en zona de agrietamiento serio, el segundo no entra aun a la zona de agrietamiento de acuerdo a los valores obtenidos. Al usar el rejuvenecedor y aceite base se puede evidenciar que el Sylvaroad ayuda de mejor manera a tener menores problemas de agrietamiento que el aceite base.
- g) Las combinaciones que presentan mejor potencial para su empleo son la No. 3 (2% de Sylvaroad), la No. 5 (2% de aceite base más 2% de Sylvaroad) y la No. 6 (3% de Sylvaroad).

## 4.2 Recomendaciones

1. Realizar más combinaciones en el rango de 2 a 3% de Sylvaroad para obtener una solución más precisa, usar variaciones de porcentajes de 0.5% y considerar también ciertos porcentajes de aceite. Es decir, un nuevo diseño experimental.
2. Ampliar el estudio utilizando otros rejuvenecedores con la finalidad de comparar y analizar el comportamiento del asfalto al implementar distintos productos.
3. Complementar el estudio con otros ensayos y parámetros adicionales que permitan obtener un análisis más profundo. Se podrían considerar los criterios de Glover-Rowe y Kandhal entre otros.
4. Valorar el impacto de las variaciones de calidad del asfalto en las soluciones finales que se propongan.

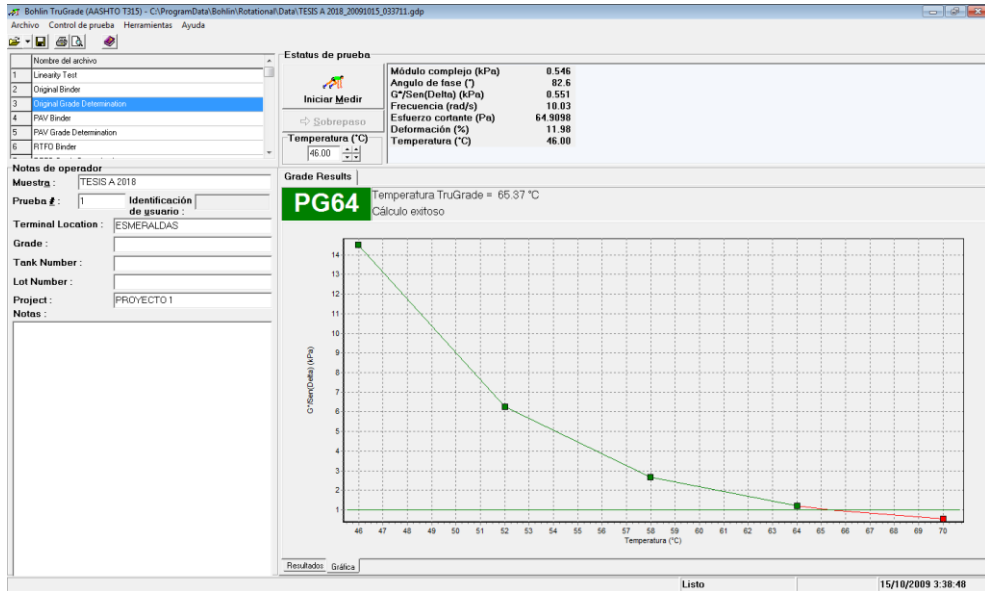
## BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Arenas Lozano, H. L. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico* (Quinta ed.).
- Asfalto En La Ingeniería Civil. (2012, Noviembre 12). *Asfalto En La Ingeniería Civil*. Retrieved Julio 2018, from <http://asfaltoingenieriacivil.blogspot.com/2012/11/composicion-quimica-y-fisica-del-asfalto.html>
- Asociación Mexicana del Asfalto. (2010). *Emulsiones Asfálticas*. México: AMMAC A.C.
- Cova, S. (2015, Noviembre 18). *Construcción y Arquitectura en Venezuela*. Retrieved Agosto 2018, from <http://cyavzla.blogspot.com/2015/11/asfalto.html>
- EcuRed. (n.d.). *EcuRed*. Retrieved Julio 26, 2018, from <https://www.ecured.cu/Asfalto>
- Equipment, A. M. (2005). *E-asphalt.com*. Retrieved 08 2018, from <https://www.e-asphalt.com/espectecnicas/esptecnica.htm>
- Fernandez Del Campo, J. (1983). *Pavimentos bituminosos en frío*. Barcelona, España: ETA (EDITORES TÉCNICOS ASOCIADOS S.A.).
- Fernandez-Gómez, W. D., Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2011). *Scribd*. Retrieved Agosto 2018, from <https://es.scribd.com/doc/112503071/Envejecimiento-de-asfaltos-y-mezclas-asfalticas>
- Instituto del Asfalto. (1995). *ANTECEDENTES de los MÉTODOS de ENSAYO de LIGANTES ASFÁLTICOS DE SUPERPAVE*. Estados Unidos.
- INSTITUTO DEL ASFALTO. (n.d.). *ANTECEDENTES de los MÉTODOS de ENSAYO de LIGANTES ASFÁLTICOS DE SUPERPAVE*. Estados Unidos.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014, Mayo 20). NTE INEN 2515 Enmienda 1. *PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD) REQUISITOS*. Quito, Ecuador.

- Jaramillo Briceño, J. G., & Vila Romaní, R. (2015). “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS ANTE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LAS DIFERENTES REGIONES DEL ECUADOR”. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- KRATON. (2017, Septiembre 18). *KRATON*, 3.0. Retrieved Agosto 2018, from <http://kraton.com/products/sylvaroad.php>
- Laime, G. (2012). *SCRIBD*. Retrieved Julio 24, 2018, from <https://es.scribd.com/document/359087922/Viscosidad-Del-Asfalto>
- Loor, J. (2012, Julio 07). *Blogger.com*. Retrieved Julio 26, 2018, from <http://asfaltoenobracivil.blogspot.com/2012/07/definicion.html>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia: ECOE.
- Salazar Delgado , J. (2011, Diciembre). *UCR*. Retrieved Julio 208, from UNIVERSIDAD DE COSTA RICA: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/download/8392/7926>
- Salazar Delgado, Q. (2011, Septiembre). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). Costa Rica.
- Sanabria, L., Correa, J., Hernández, L., & Morales, P. (2015). EVALUACION DEL ADITIVO REJUVENECEDOR DE ASFALTOS Y PAVIMENTOS. Colombia. Retrieved Agosto 2018, from [http://artemisa.unicauca.edu.co/~jornadasfalto/RESUMENES%20EN%20PDF/Evaluacion\\_Aditivo\\_Rejuvenecedor\\_Asfaltos\\_Pavimentos.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~jornadasfalto/RESUMENES%20EN%20PDF/Evaluacion_Aditivo_Rejuvenecedor_Asfaltos_Pavimentos.pdf)
- STATPOINT, Inc. (2006, July). STATGRAPHICS Centurion XV.
- STATPOINT, Inc. (2006, July). STATGRAPHICS Centurion XV.
- USOM. (2002). *Universidad de Sonora*. Retrieved Agosto 2018, from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>
- Valdéz, G., Calabi, A., Sanchez, E., Miró, & Reyes, O. (2015, Diciembre 09). Aggregate-asphalt binder matrix: factors involved in the adhesive and cohesive capacities of asphalt binder. *RIOC*, 05/2015.
- Wauquier, J.-P. (2004). *EL REFINO DEL PETRÓLEO* (Español ed.). París, France: Díaz de Santos .

# Anexos

## Anexo 1. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR para PG 64-22



Gráfica del Asfalto 1 (Original)

**Estados de prueba**

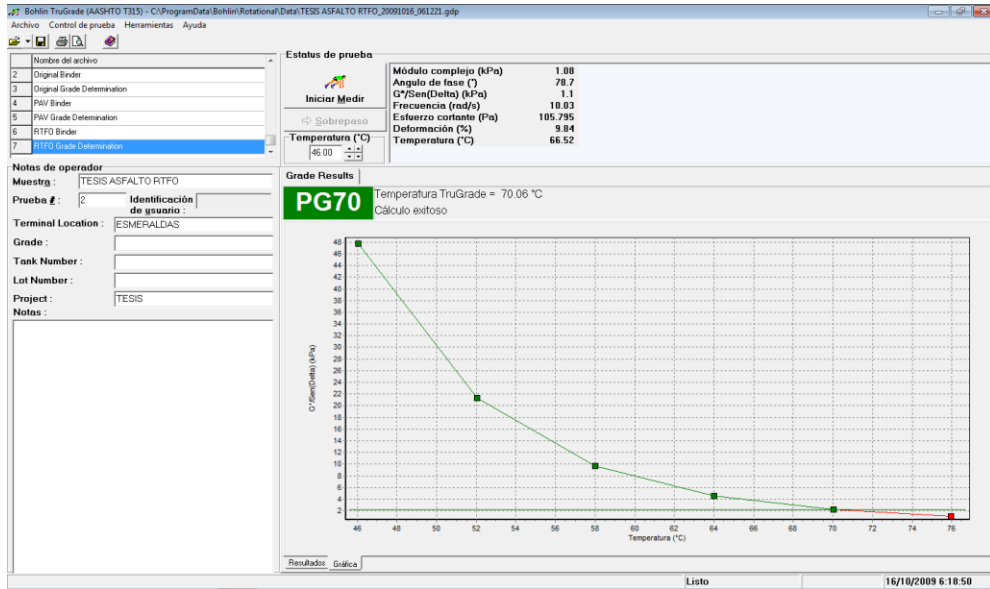
Módulo complejo (kPa)	0.546
Angulo de fase (°)	82.6
G*Sen(Delta) (kPa)	0.551
Frecuencia (rad/s)	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	64.9098
Deformación (%)	11.98
Temperatura (°C)	46.01

**Grade Results**

**PG64** Temperatura TruGrade = 65.37 °C  
Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	14.5	6.25	2.68	1.19	0.551
Notas					
Angulo de fase (°)	72.0	75.6	78.7	81.3	82.6
Módulo complejo (kPa)	13.8	6.05	2.63	1.18	0.546
Temperatura (°C)	45.99	52.00	57.99	64.00	70.01
Deformación (%)	12.09	11.89	11.99	12.06	11.98
Esfuerzo cortante (Pa)	1666.52	718.002	314.577	141.359	64.9098
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000

Asfalto 1 (Original)



Gráfica del Asfalto 1 (RTFOT)

Bohlin TruGrade (AASHTO T315) - C:\ProgramData\Bohlin\Rotational\Data\TESIS ASFALTO RTFO\_20091016\_061221.gdp

Nombre del archivo: Original Binder, Original Grade Determination, PAW Binder, PAW Grade Determination, RTFO Binder, RTFO Grade Determination

Notas de operador: Muestra: TESIS ASFALTO RTFO, Prueba #: 2, Identificación de usuario: Terminal Location: ESMERALDAS, Grade: Tank Number: Lot Number: Project: TESIS

Estados de prueba:
 

- Módulo complejo (kPa): 1.08
- Angulo de fase (°): 78.7
- G\*Sen(Delta) (kPa): 1.1
- Frecuencia (rad/s): 10.03
- Esfuerzo cortante (Pa): 105.795
- Deformación (%): 9.84
- Temperatura (°C): 66.74

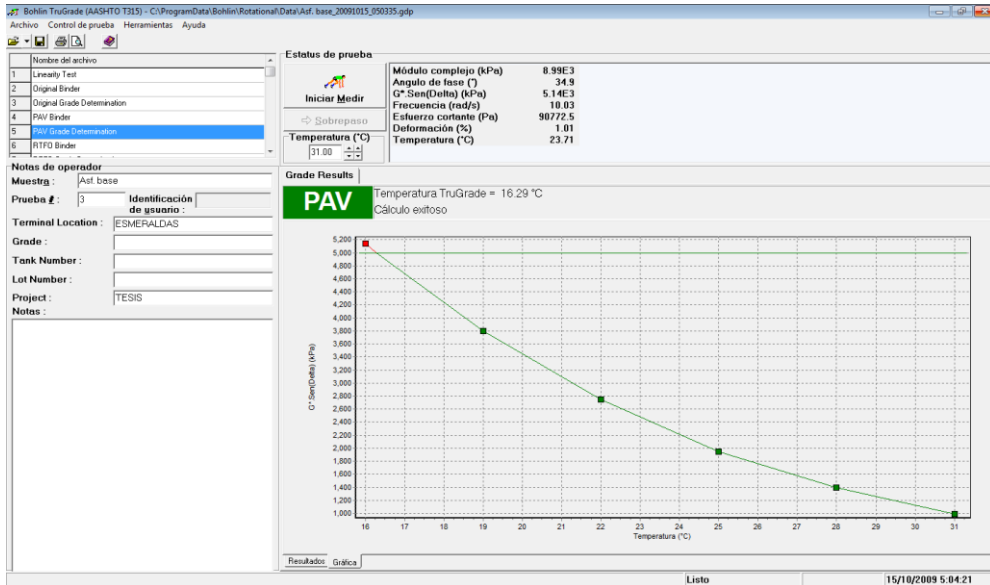
Grade Results: PG70, Temperatura TruGrade = 70.06 °C, Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	47.7	21.3	9.7	4.59	2.21	1.1
Notas	21					
Angulo de fase (°)	81.7	65.3	69.0	72.7	76.1	78.7
Módulo complejo (kPa)	42	19.4	9.06	4.38	2.15	1.08
Temperatura (°C)	46.06	52.05	58.01	64.00	70.02	75.96
Deformación (%)	7.75	10.06	9.69	9.98	9.97	9.84
Esfuerzo cortante (Pa)	3255.73	1945.38	875.966	435.832	212.806	105.795
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	16/10/200	16/10/200	16/10/200	16/10/200	16/10/200	16/10/200

16/10/2009 6:18:17

Asfalto 1 (RTFOT)





Gráfica del Asfalto 1 (PAV)

**Estados de prueba**

Módulo complejo (kPa)	8.99E3
Angulo de fase (°)	34.9
G* Sen(Delta) (kPa)	5.14E3
Frecuencia (rad/s)	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	90772.5
Deformación (%)	1.01
Temperatura (°C)	22.04

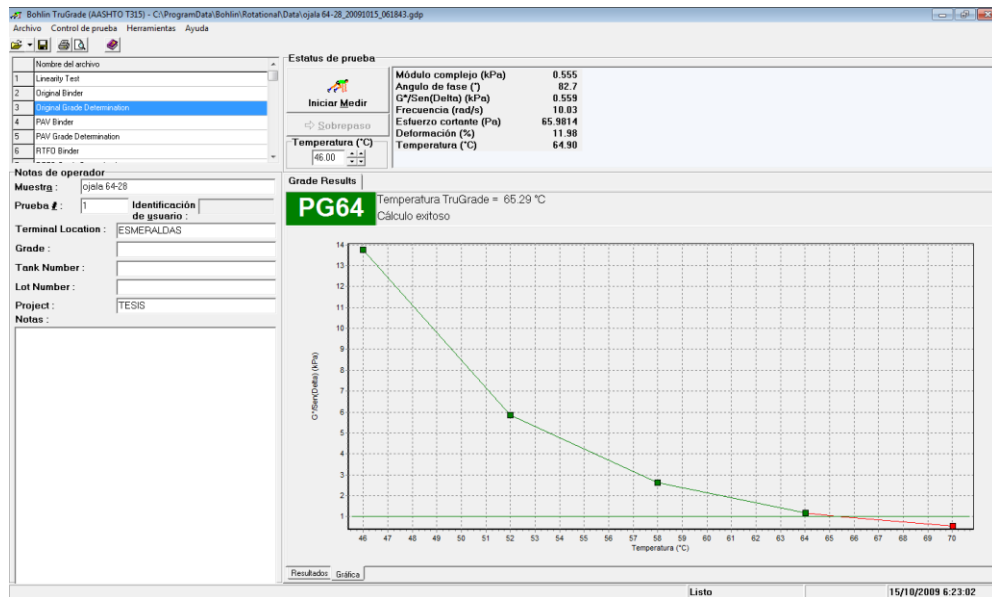
**Grade Results**

PAV Temperatura TruGrade = 16.29 °C  
Cálculo exitoso

Resultado	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G* Sen(Delta) (kPa)	989	1.39E3	1.95E3	2.75E3	3.8E3	5.14E3
Angulo de fase (°)	43.8	42.0	40.2	38.3	36.6	34.9
Módulo complejo (kPa)	1.43E3	2.08E3	3.02E3	4.43E3	6.38E3	8.99E3
Temperatura (°C)	31.01	27.99	24.99	22.00	19.01	16.01
Deformación (%)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Esfuerzo cortante (Pa)	14358.6	20877.3	30355.6	44629.6	64218.2	90772.5
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009

Asfalto 1 (PAV)

## Anexo 2. Resultados del programa Bohlin TruGrade del Equipo DSR para PG 64-28



Asfalto 2 (Original)

Bohlin TruGrade (AASHTO T315) - C:\ProgramData\Bohlin\Rotational\Data\ojala 64-28\_20091015\_061843.gdp

Nombre del archivo: 1 Linearity Test, 2 Original Binder, 3 Original Grade Determination, 4 PAW Binder, 5 PAW Grade Determination, 6 RTFD Binder

Notas de operador: Muestra: ojala 64-28, Prueba #: 1, Identificación de usuario: , Terminal Location: ESMERALDAS, Grade: , Tank Number: , Lot Number: , Project: TESIS, Notas:

Estatus de prueba: Iniciar Medir, Sobrepaso

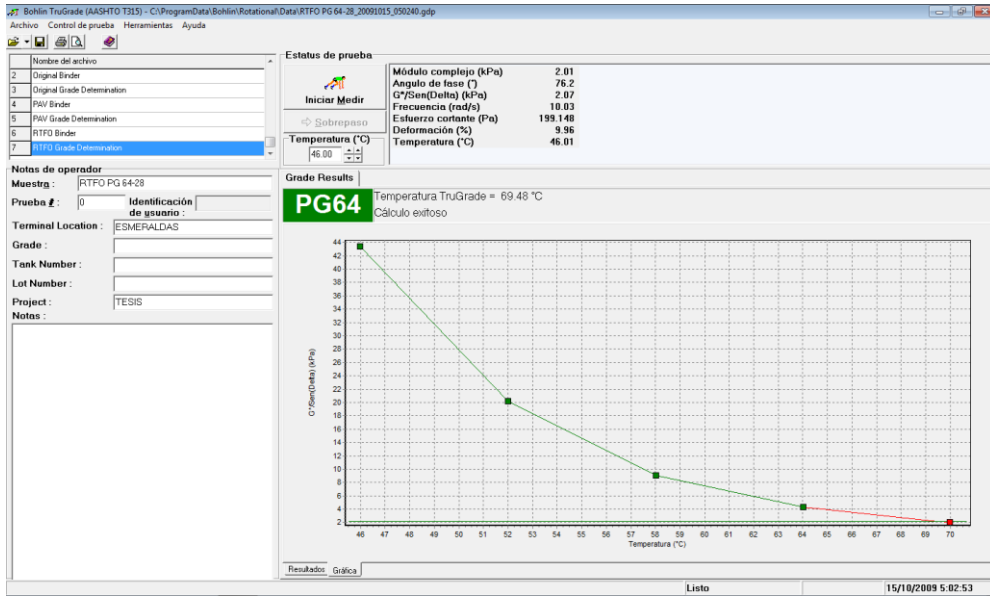
Módulo complejo (kPa): 0.555, Angulo de fase (°): 82.7, G\*Sen(Delta) (kPa): 0.559, Frecuencia (rad/s): 10.03, Esfuerzo cortante (Pa): 85.9814, Deformación (%): 11.98, Temperatura (°C): 65.26

Grade Results: PG64, Temperatura TruGrade = 65.29 °C, Cálculo exitoso

	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	13.7	6.84	2.61	1.17	0.569
Notas					
Angulo de fase (°)	72.0	75.6	78.7	81.3	82.7
Módulo complejo (kPa)	13.1	6.66	2.66	1.16	0.555
Temperatura (°C)	48.00	52.00	58.00	64.01	70.02
Deformación (%)	12.03	11.97	11.98	11.97	11.98
Esfuerzo cortante (Pa)	1570.81	675.669	305.927	137.771	65.9814
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009	15/10/2009

15/10/2009 6:22:40

Asfalto 2 (Original)



Gráfica del Asfalto 2 (RTFOT)

**Estatus de prueba**

Módulo complejo (kPa)	2.01
Angulo de fase (°)	76.2
G*Sen(Delta) (kPa)	2.07
Frecuencia (rad/s)	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	199.148
Deformación (%)	9.96
Temperatura (°C)	45.99

**Grade Results**

Temperatura TruGrade = 69.48 °C  
Cálculo exitoso

**PG64**

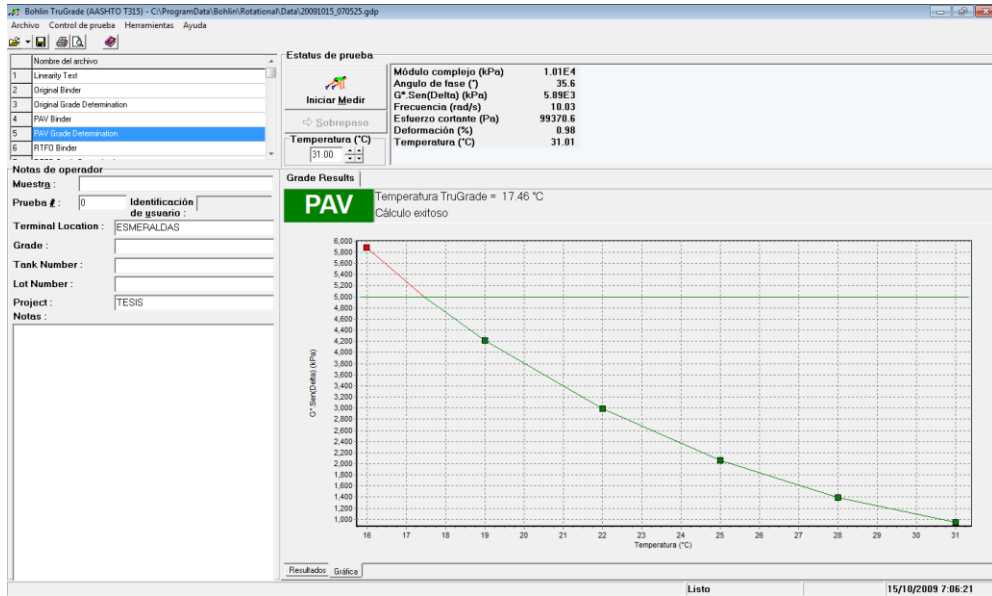
	1	2	3	4	5
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G*Sen(Delta) (kPa)	43.4	20.2	9.03	4.28	2.07
Notas	21				
Angulo de fase (°)	61.8	65.1	69.1	72.7	76.2
Módulo complejo (kPa)	38.2	18.3	8.44	4.08	2.01
Temperatura (°C)	45.99	52.00	58.01	64.01	69.98
Deformación (%)	8.52	10.04	9.88	10.00	9.96
Esfuerzo cortante (Pa)	3265.75	1834.87	831.834	407.084	199.148
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

Guía inteligente para prueba de asfalto

- Iniciar
- Muestra
- Cerrar
- Geometría
- Cargar
- Recortar
- Separación
- Abrir
- Prueba

Prueba completada

Asfalto 2 (RTFOT)



Gráfica del Asfalto 2 (PAV)

**Grade Results**  
**PAV** Temperatura TruGrade = 17.46 °C  
 Cálculo exitoso

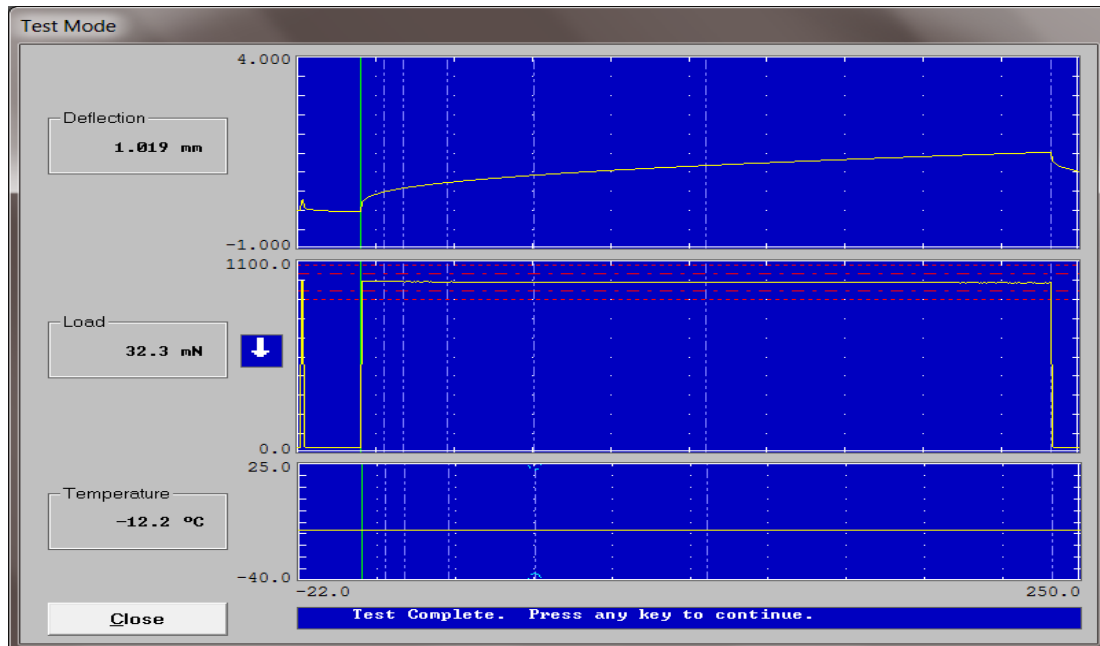
	1	2	3	4	5	6
Resultado	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa
G* Sen(Delta) (kPa)	945	1.4E3	2.06E3	2.99E3	4.21E3	5.89E3
Angulo de fase (°)	45.3	43.2	41.4	39.4	37.5	35.6
Módulo complejo (kPa)	1.33E3	2.04E3	3.12E3	4.7E3	6.92E3	1.01E4
Temperatura (°C)	31.00	27.99	25.00	22.00	19.00	15.99
Deformación (%)	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	0.98
Esfuerzo cortante (Pa)	13463.8	20589.1	31381.7	47413.1	69775	99370.6
Frecuencia (rad/s)	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03
Hora de punto	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000	15/10/2000

**Estatus de prueba**

Módulo complejo (kPa)	1.01E4
Angulo de fase (°)	35.6
G* Sen(Delta) (kPa)	5.89E3
Frecuencia (rad/s)	10.03
Esfuerzo cortante (Pa)	99370.6
Deformación (%)	0.98
Temperatura (°C)	31.00

Asfalto 1 (PAV)

### Anexo 3. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR para PG 64-22



Gráfica del Asfalto 1 (-12°C)

Test Summary Report

=====  
**Test Identification**  
 =====

Operator: Factory  
 Start Time: 24-May-2018 at 18:03:05  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 3A  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.36 mm  
 File Name: TESIS.S3A

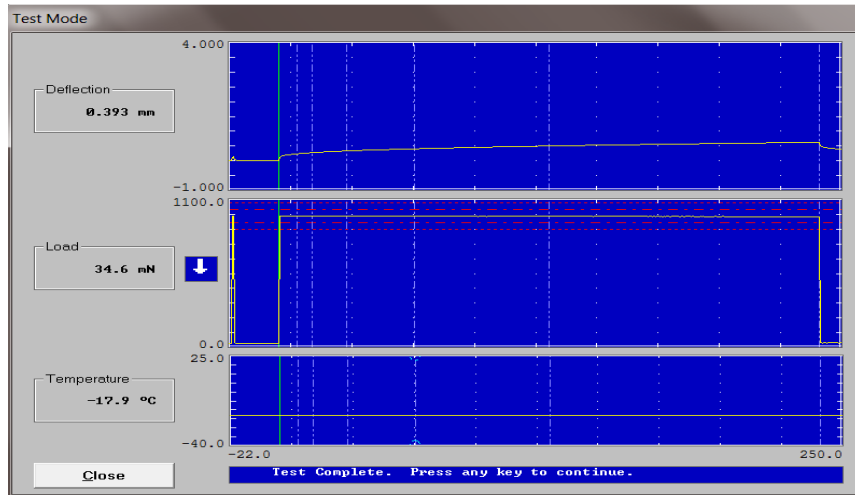
=====  
**Test Results**  
 =====

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	31.2	0.0241	--	--	--	--
0.5	984.8	0.2003	--	--	--	--
8.0	982.0	0.4875	164.2171	164.0043	-0.129568	0.289231
15.0	981.0	0.5894	135.6915	135.9913	0.220912	0.306694
30.0	979.7	0.7311	109.2484	109.2166	-0.029114	0.325950
60.0	978.6	0.9218	86.5453	86.5506	0.006110	0.345205 *
120.0	977.1	1.1749	67.7951	67.6791	-0.171199	0.364461
240.0	974.6	1.5230	52.1667	52.2207	0.103392	0.383717
250.0	32.3	1.0190	--	--	--	--

=====  
 Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999943

Print Exit

Asfalto 1 (-12°C)



Gráfica del Asfalto 1 (-18°C)

Test Summary Report

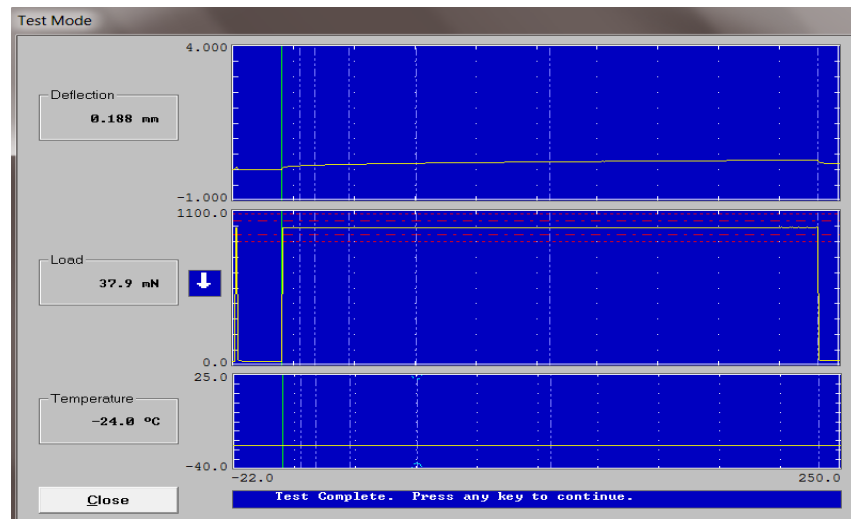
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: ING.
Start Time: 23-May-2018 at 16:16:07
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: TESIS
Specimen Number: 1
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: TESIS.S1
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured   Estimated   Difference   n-value
Time  Load    Defl      Stiffness  Stiffness   (%)          (MPa)
(sec) (mN)    (mm)      (MPa)      (MPa)
-----
0.0   32.7    0.0003    ---        ---         ---         ---
0.5   975.9   0.1215    ---        ---         ---         ---
8.0   976.8   0.2386    336.8887   336.6757   -0.063230   0.239026
15.0  976.7   0.2791    287.9399   288.1491   0.072652   0.256169
30.0  975.3   0.3352    239.4574   239.6940   0.098837   0.275073
60.0  975.5   0.4074    197.0395   196.7917   -0.125767   0.293977 *
120.0 974.9   0.5030    159.5046   159.4650   -0.024812   0.312881
240.0 973.3   0.6283    127.4821   127.5363   0.042506   0.331784
250.0  34.6    0.3925    ---        ---         ---         ---
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999972
=====

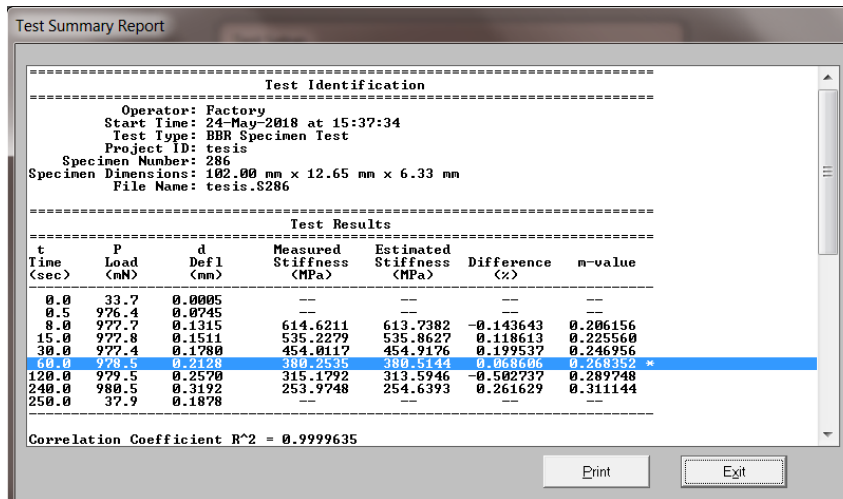
```

Print Exit

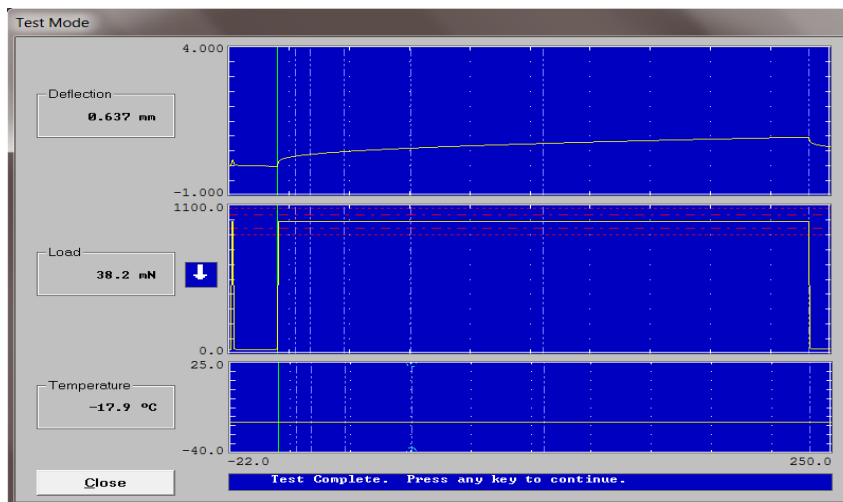
Asfalto 1 (-18°C)



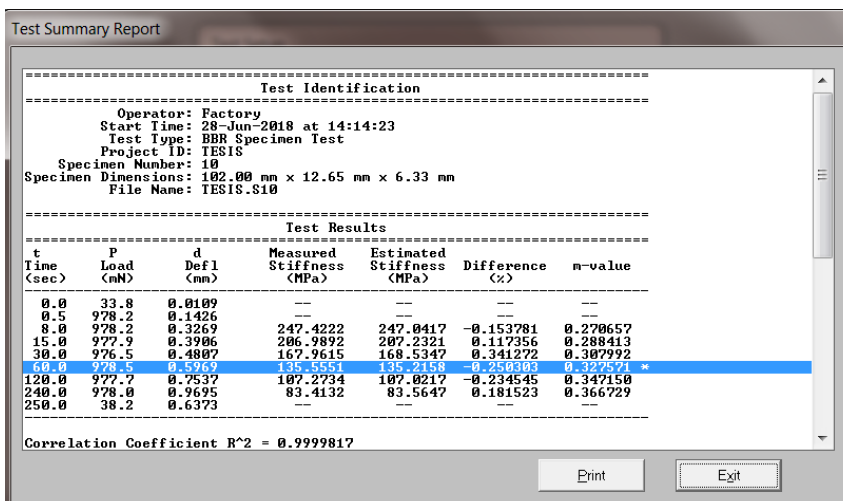
Gráfica del Asfalto 1 (-24°C)



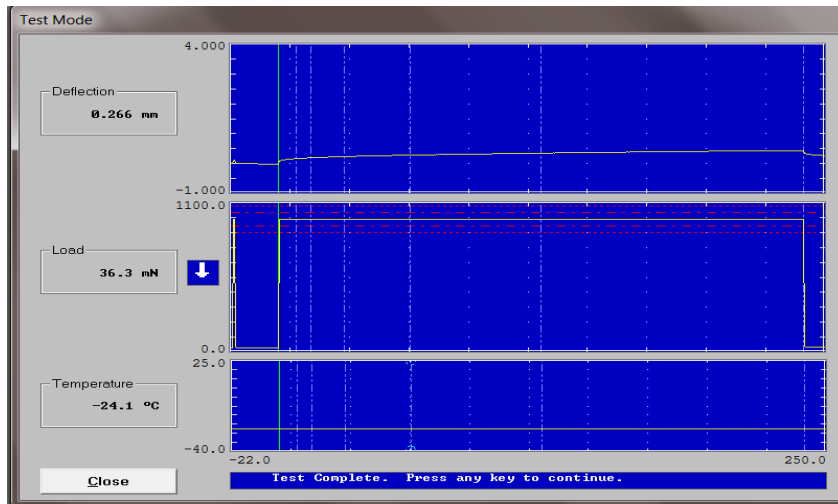
Asfalto 1 (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite (-18°C)



Asfalto 1 con 2% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite (-24°C)

Test Summary Report

-----  
**Test Identification**  
 -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 22-Jun-2018 at 16:43:13  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: IESIS  
 Specimen Number: 5466  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: IESIS.S5466  
 -----

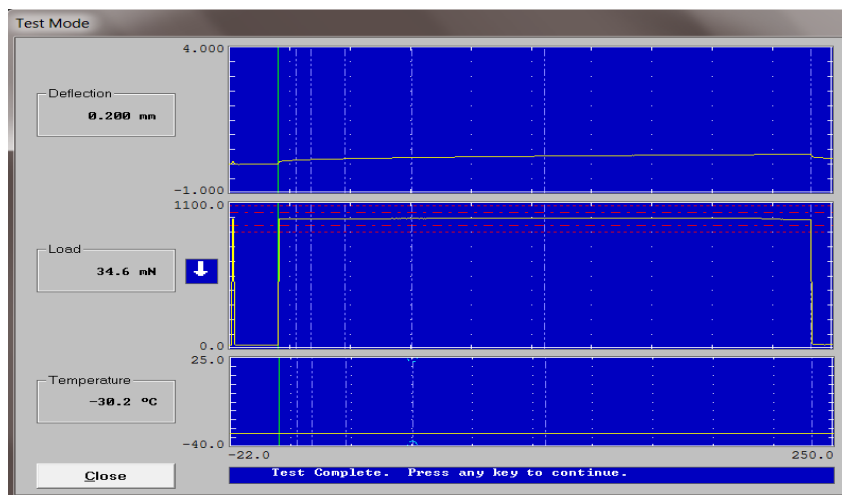
**Test Results**

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	32.8	0.0110	--	--	--	--
0.5	979.0	0.0857	--	--	--	--
8.0	977.9	0.1660	484.7346	484.6944	-0.008308	0.239288
15.0	976.9	0.1940	414.4487	414.7383	0.069886	0.256635
30.0	976.5	0.2328	345.1511	344.8581	-0.084884	0.275762
60.0	976.1	0.2816	288.9131	288.9435	0.010251	0.294071
120.0	976.3	0.3513	228.7142	229.1391	0.185792	0.314017
240.0	977.3	0.4389	183.2434	183.1014	-0.077454	0.333144
250.0	36.3	0.2663	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999955

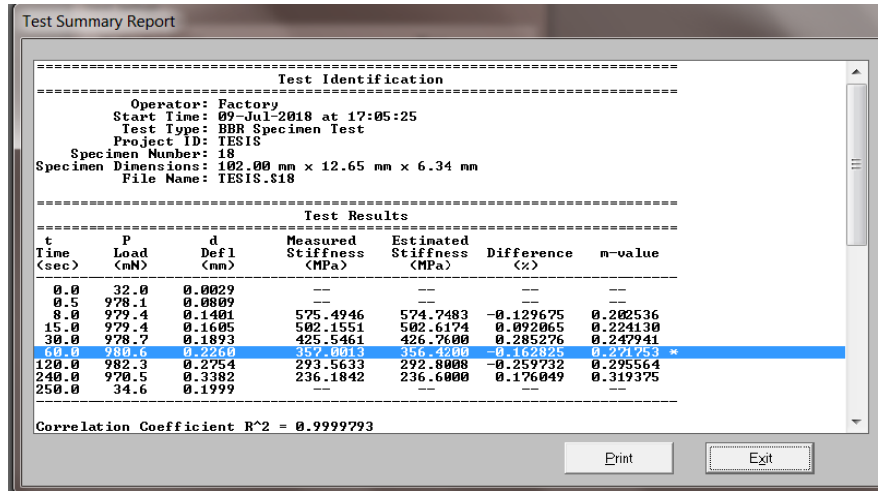
Print Exit

Asfalto 1 con 2% de Aceite (-24°C)

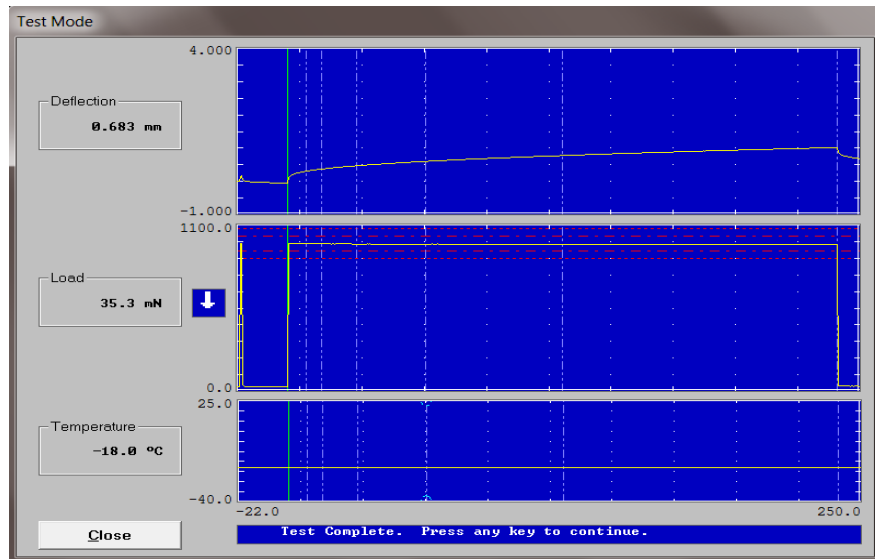


Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite (-30°C)

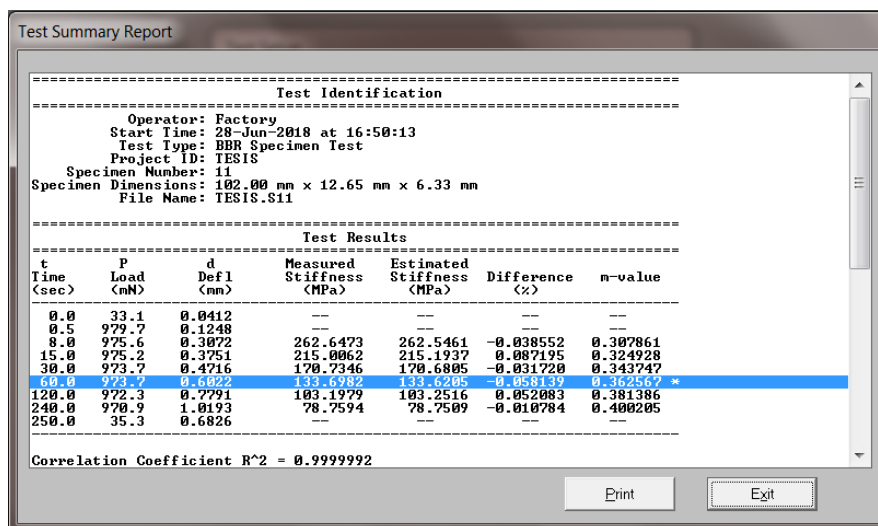




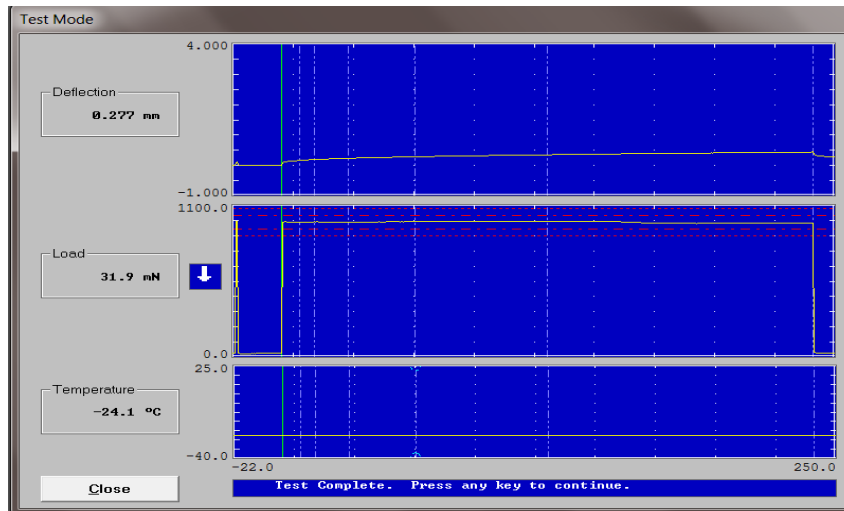
Asfalto 1 con 2% de Aceite (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-18°C)



Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 22-Jun-2018 at 16:01:13  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 4  
 Specimen Dimensions: 182.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S4

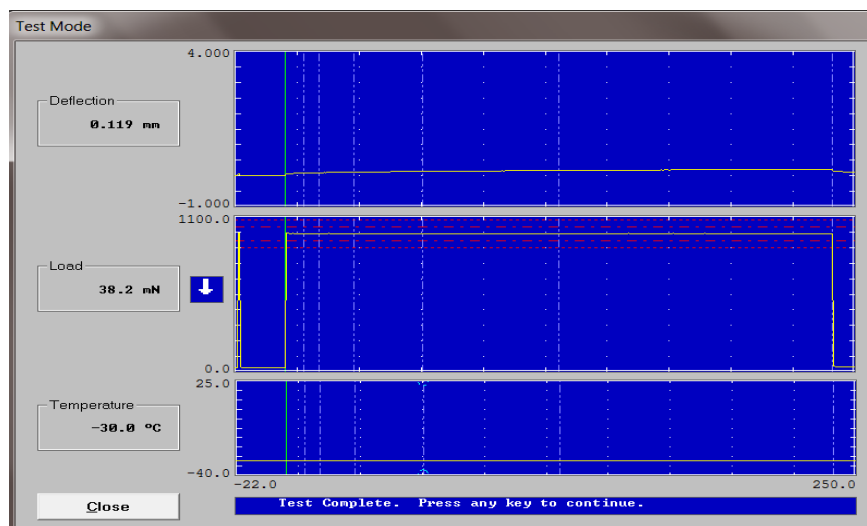
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	28.5	0.0027	---	---	---	---
0.5	979.7	0.0912	---	---	---	---
8.0	980.1	0.1694	476.1477	475.2106	-0.196818	0.228862
15.0	980.5	0.1979	407.6728	408.9790	0.320424	0.248682
30.0	979.7	0.2361	341.4920	341.6257	0.039148	0.270538
60.0	970.92	0.2474	231.6314	231.0941	-0.230354	0.242208 *
120.0	981.9	0.3543	228.0822	227.7781	-0.133335	0.314250
240.0	971.4	0.4402	181.5947	181.8125	0.119919	0.336105
250.0	31.9	0.2768	---	---	---	---

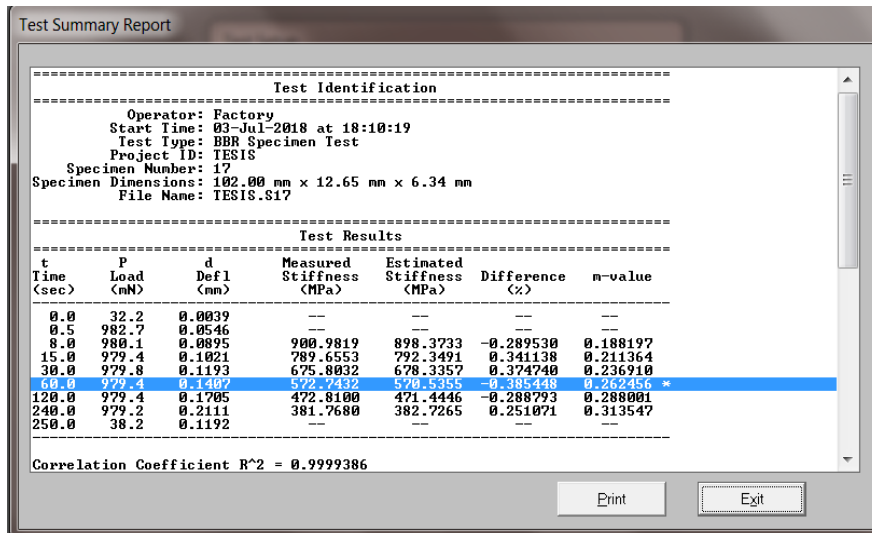
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.999985

Print Exit

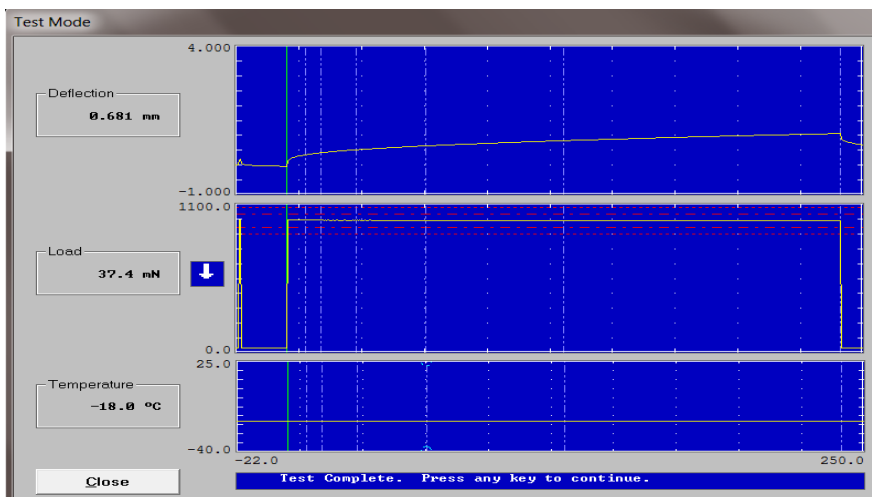
Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-24°C)



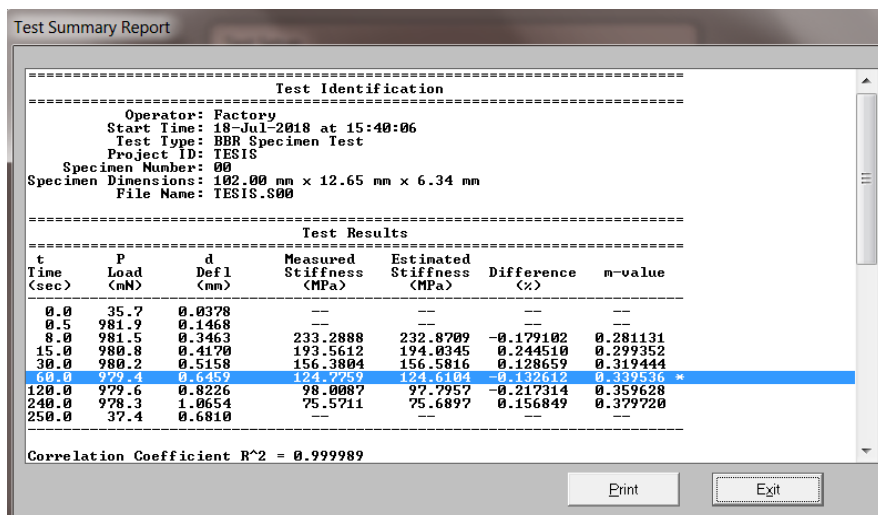
Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-30°C)



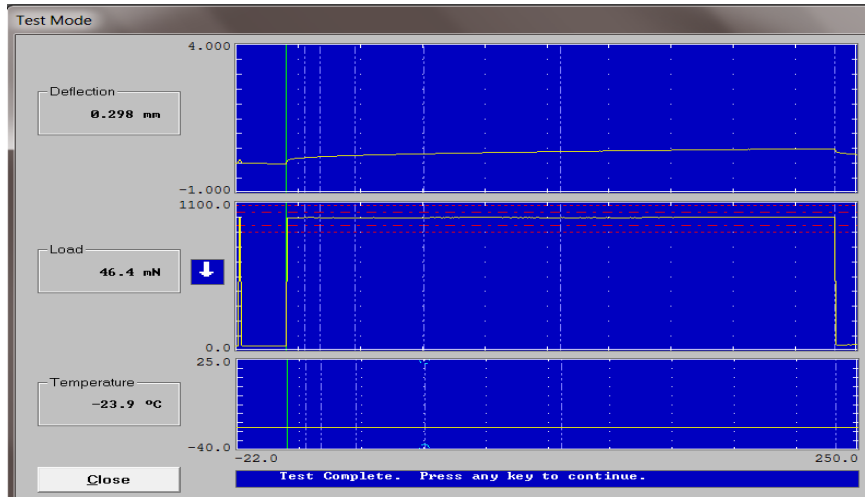
Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite (-18°C)



Asfalto 1 con 3% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 16-Jul-2018 at 17:00:55  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 36  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S36

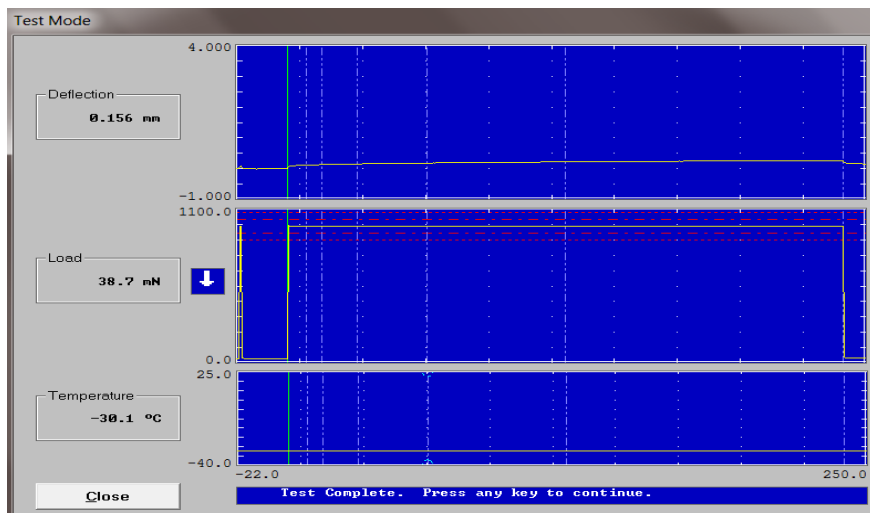
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	38.3	0.0110	--	--	--	--
0.5	984.6	0.0977	--	--	--	--
8.0	986.8	0.1904	426.4542	426.2492	-0.048055	0.224911
15.0	985.9	0.2209	367.3666	367.6705	0.002746	0.245452
30.0	985.5	0.2634	307.8515	307.7240	-0.041409	0.268102
60.0	986.4	0.3205	253.3147	253.5395	0.008750	0.290752 *
120.0	985.6	0.3938	205.9467	205.6418	-0.148052	0.313402
240.0	987.6	0.4953	164.0860	164.1947	0.006245	0.336051
250.0	46.4	0.2978	--	--	--	--

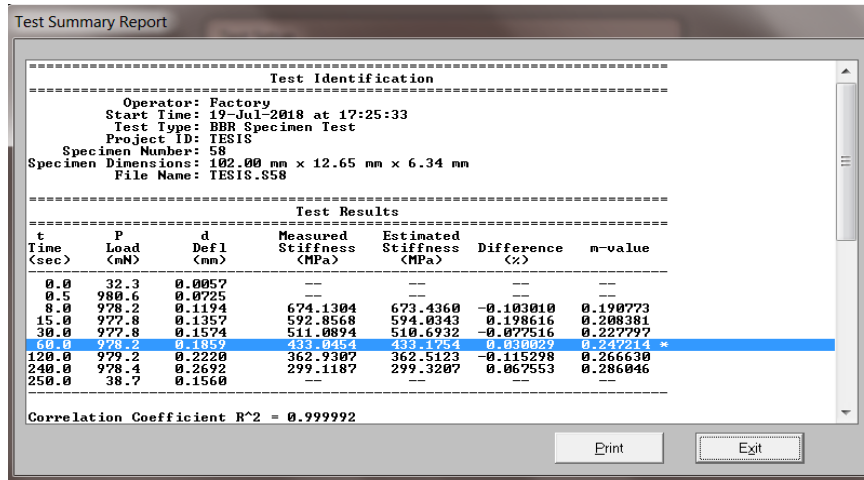
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999965

Print Exit

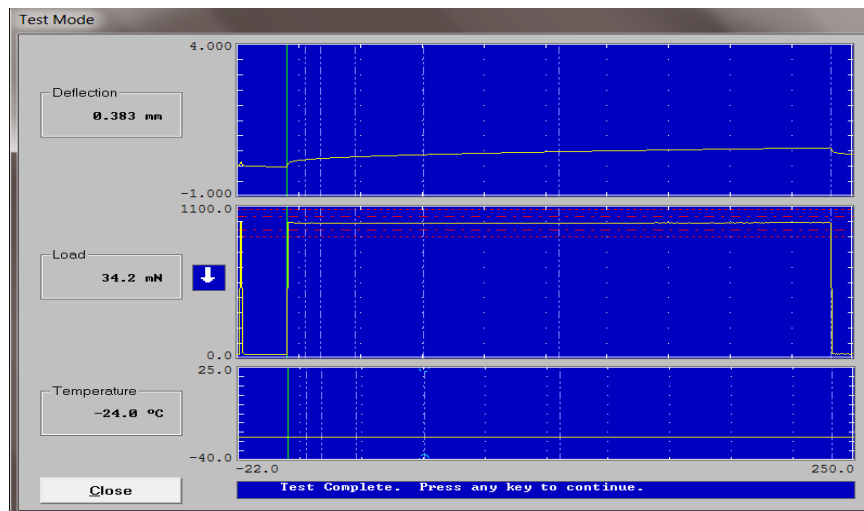
Asfalto 1 con 3% de Aceite (-24°C)



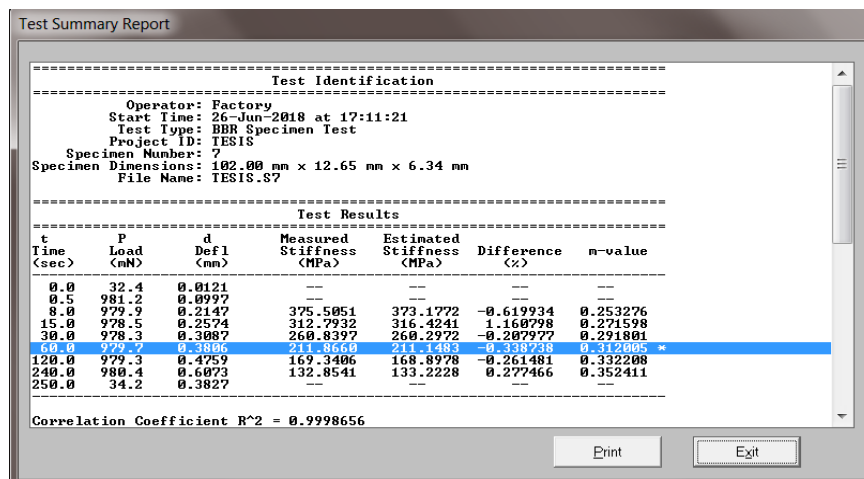
Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite (-30°C)



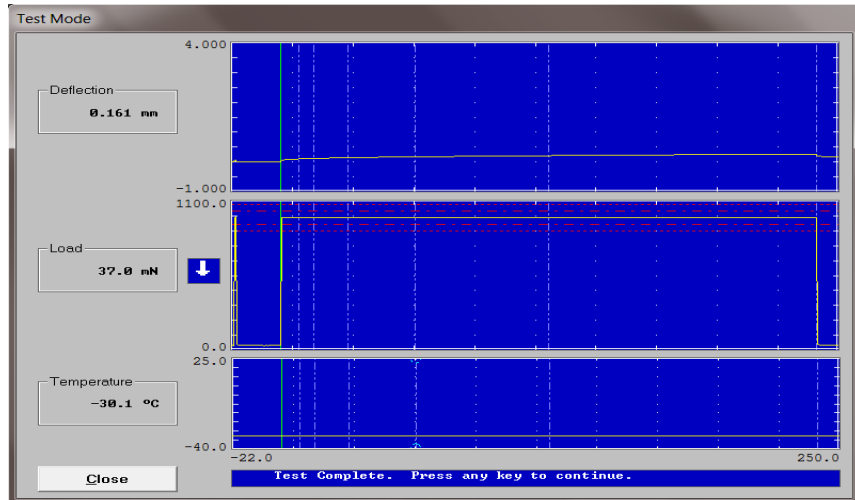
Asfalto 1 con 3% de Aceite (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 27-Jun-2018 at 17:06:35  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 9545  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.32 mm  
 File Name: TESIS.9545

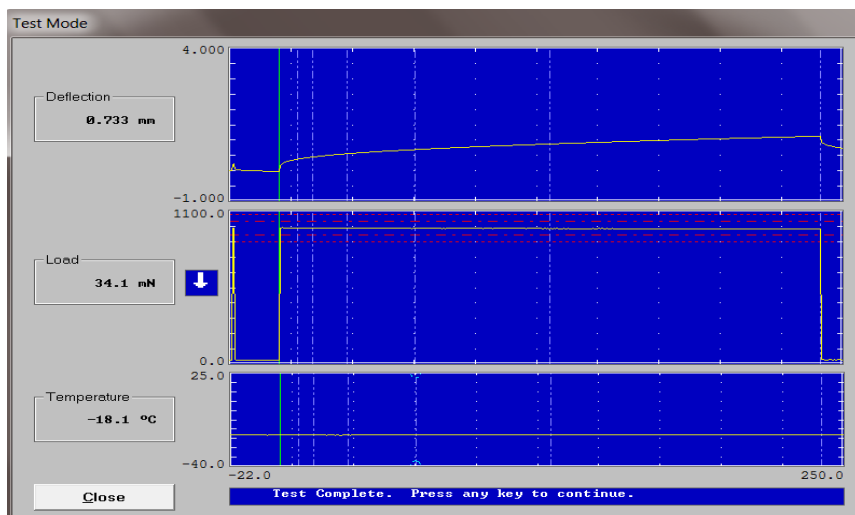
Test Results

Time (sec)	Load (nN)	Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	34.8	0.0066	--	--	--	--
0.5	979.1	0.0577	--	--	--	--
8.0	977.2	0.1053	771.2223	773.0730	0.239968	0.215643
15.0	976.9	0.1206	673.2010	670.0677	-0.465428	0.239313
30.0	976.7	0.1443	562.2949	562.5351	0.042714	0.265414
45.0	976.2	0.1745	462.0625	462.221	0.374243	0.271515 *
120.0	975.7	0.2155	376.2221	375.5259	-0.185071	0.317616
240.0	976.6	0.2717	298.6189	298.6064	-0.004178	0.343718
250.0	37.0	0.1615	--	--	--	--

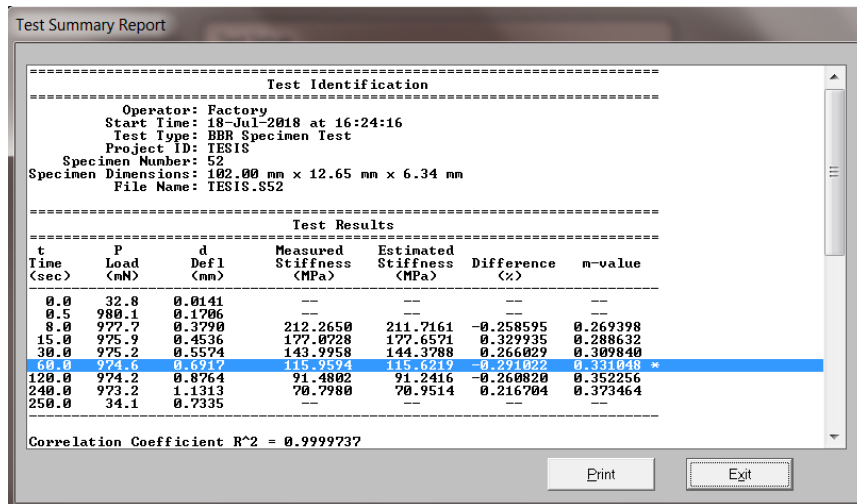
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999649

Print Exit

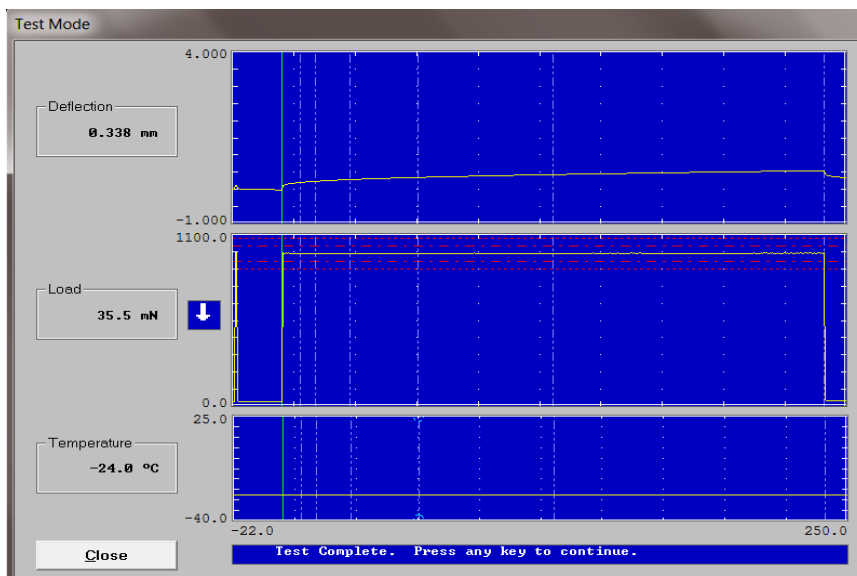
Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)



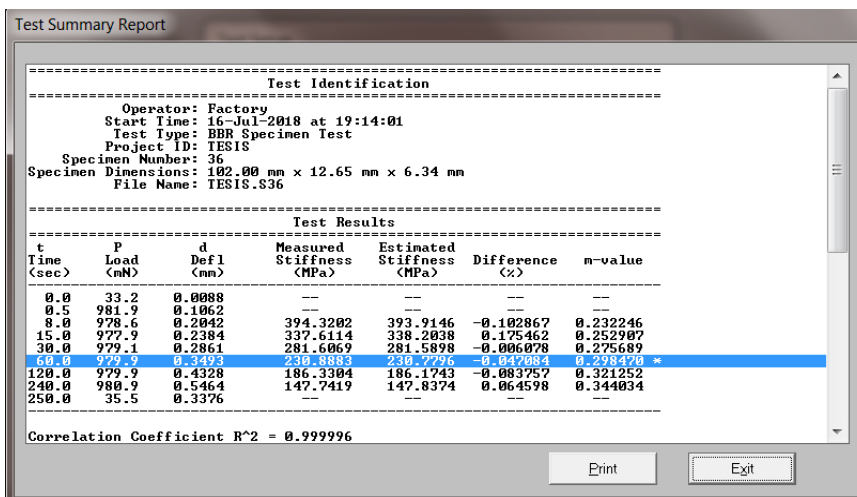
Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-18°C)



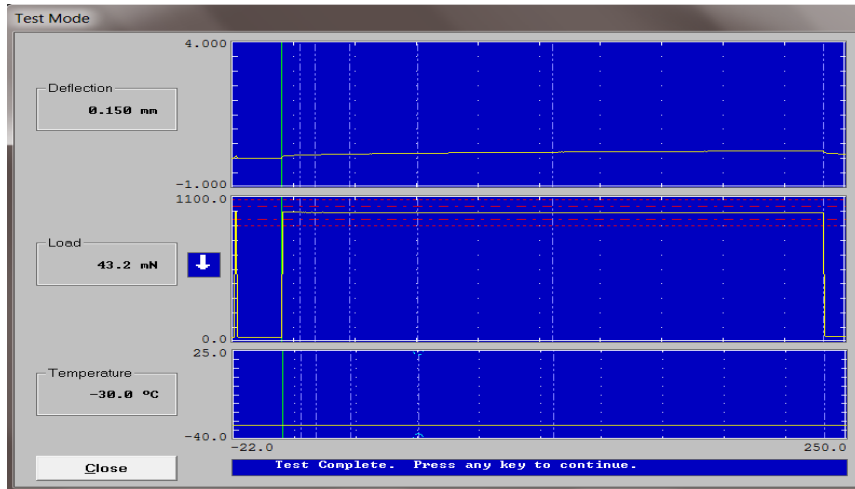
Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

=====  
**Test Identification**  
 =====

Operator: Factory  
 Start Time: 19-Jul-2018 at 18:35:46  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TES18  
 Specimen Number: 62  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TES18.S62

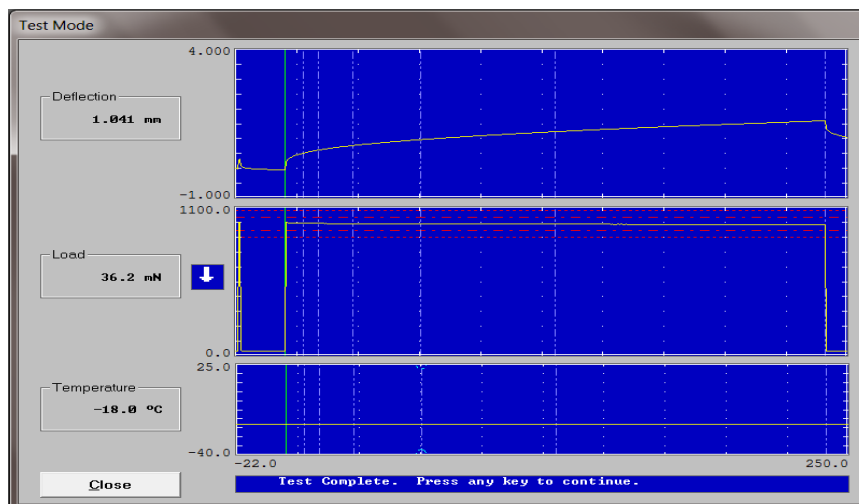
=====  
**Test Results**  
 =====

t Time <sec>	P Load <nN>	d Defl <mm>	Measured Stiffness <MPa>	Estimated Stiffness <MPa>	Difference <%>	n-value
0.0	37.3	0.0029	---	---	---	---
0.5	983.7	0.0700	---	---	---	---
8.0	980.4	0.1128	715.0548	714.8549	-0.027961	0.199309
15.0	979.9	0.1204	627.8505	627.1113	-0.117737	0.217343
30.0	979.0	0.1510	533.5545	535.7037	0.402807	0.237229
40.0	977.0	0.1711	492.4993	481.6352	-0.220315	0.259115 *
120.0	978.1	0.2143	375.5898	375.0819	-0.135250	0.277001
240.0	977.6	0.2620	307.0922	307.4308	0.110279	0.296886
250.0	43.2	0.1502	---	---	---	---

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999743

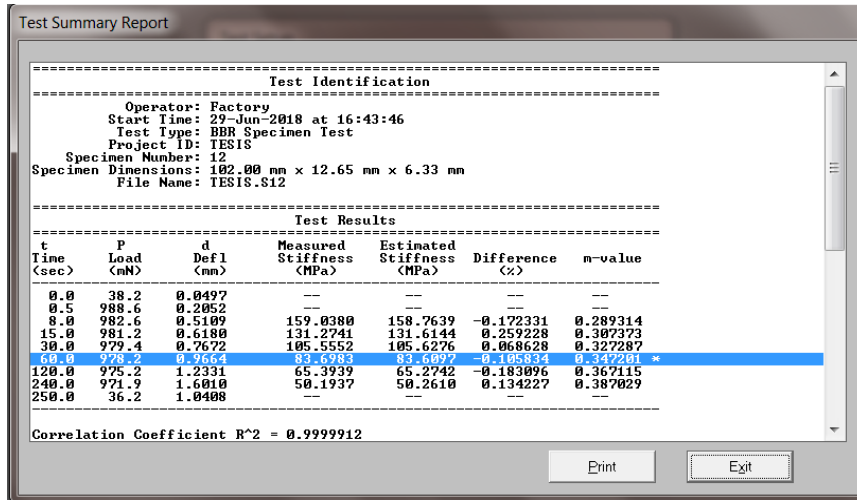
Print Exit

Asfalto 1 con 3% de Sylvaroad (-30°C)

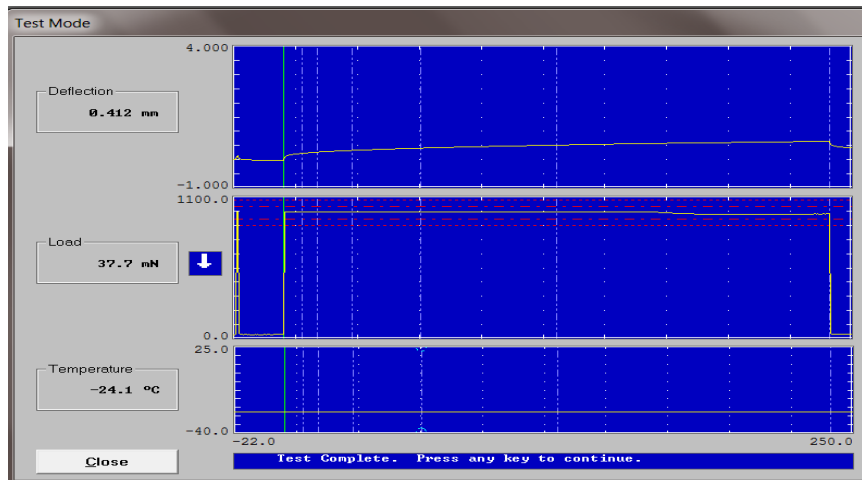


Gráfica del Asfalto 1 con 5% de Aceite (-18°C)

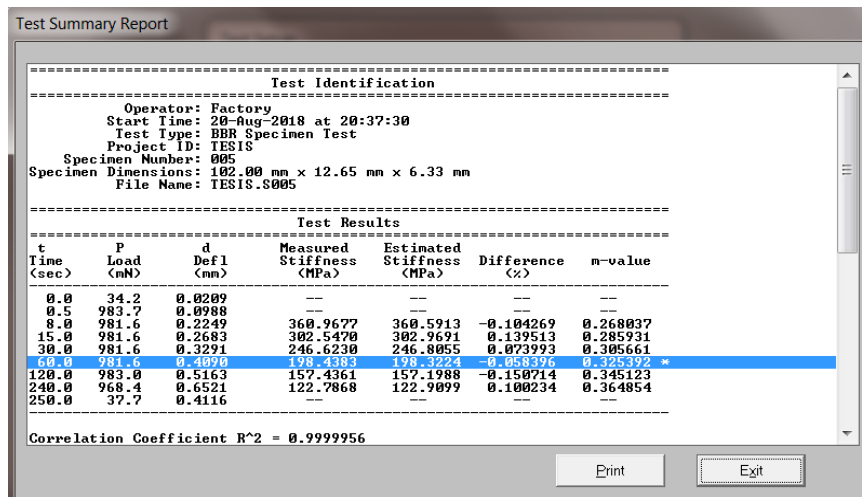




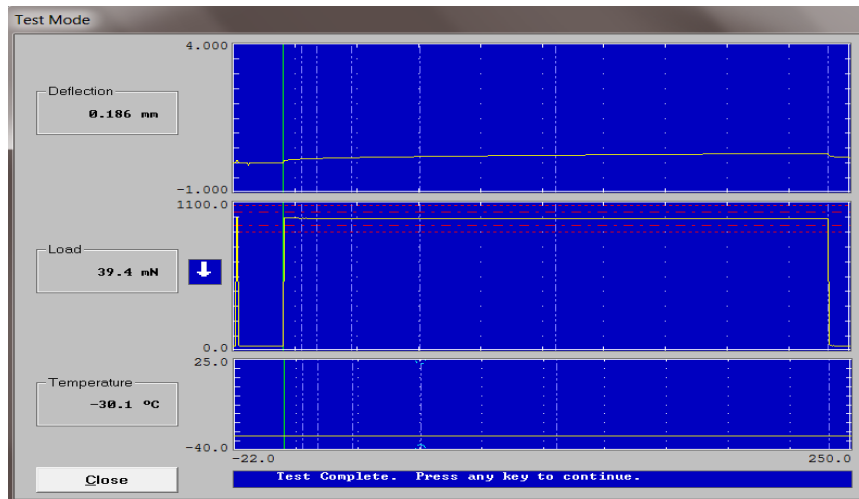
Asfalto 1 con 5% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 5% de Aceite (-24°C)



Asfalto 1 con 5% de Aceite (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 5% de Aceite (-30°C)

Test Summary Report

-----  
**Test Identification**  
 -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 21-Aug-2018 at 18:47:10  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 016  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S016  
 -----

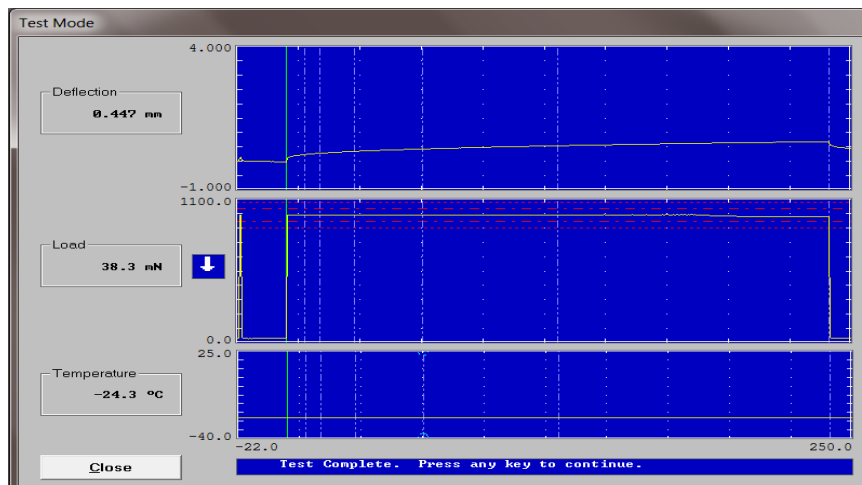
**Test Results**

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (nm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	36.6	0.0062	--	--	--	--
0.5	981.2	0.0779	--	--	--	--
8.0	980.1	0.1360	596.0782	596.1965	0.019853	0.205155
15.0	979.8	0.1553	521.5190	520.9205	-0.114749	0.224279
30.0	977.9	0.1830	441.9498	442.6729	0.163613	0.245366
60.0	977.2	0.2104	370.6711	370.8204	0.003973	0.266493
120.0	977.7	0.2639	306.4020	305.9583	-0.144825	0.287540
240.0	977.5	0.3250	248.6758	248.8456	0.068265	0.308628
250.0	39.4	0.1859	--	--	--	--

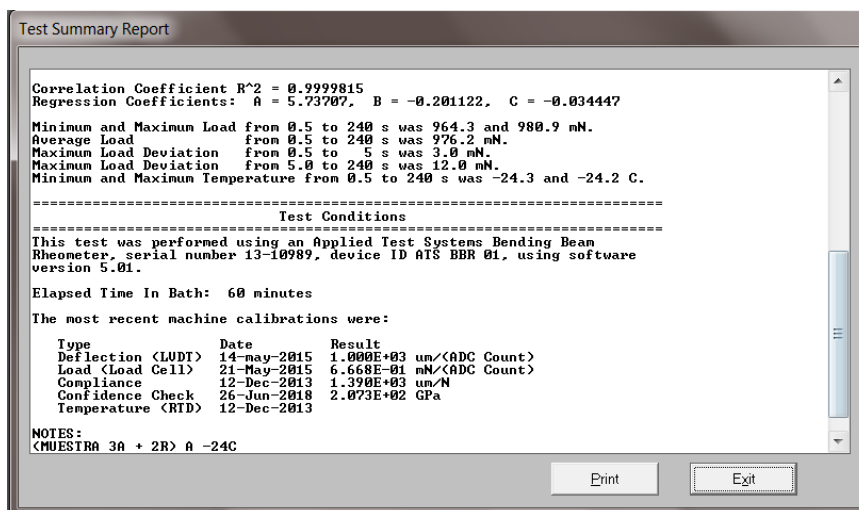
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999939

Print Exit

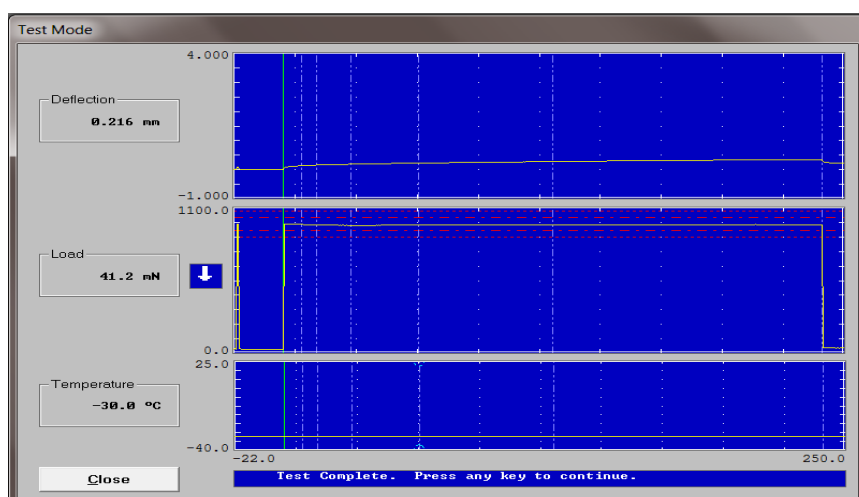
Asfalto 1 con 5% de Aceite (-30°C)



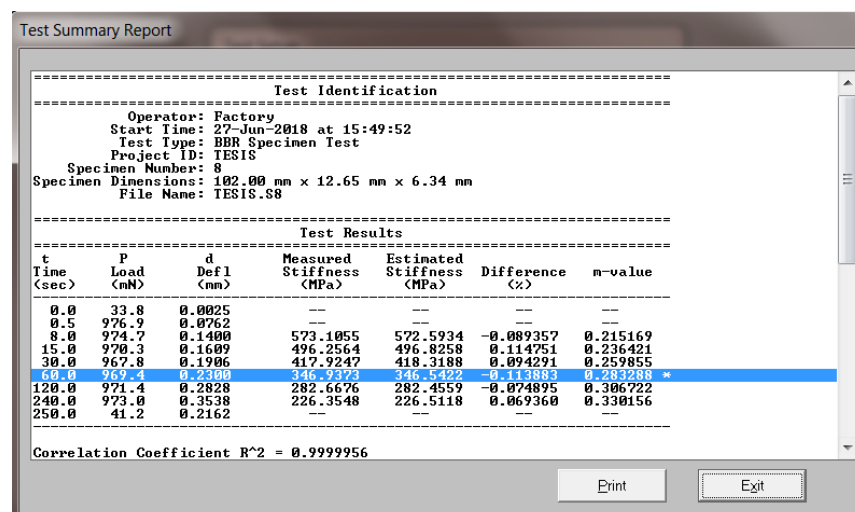
Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



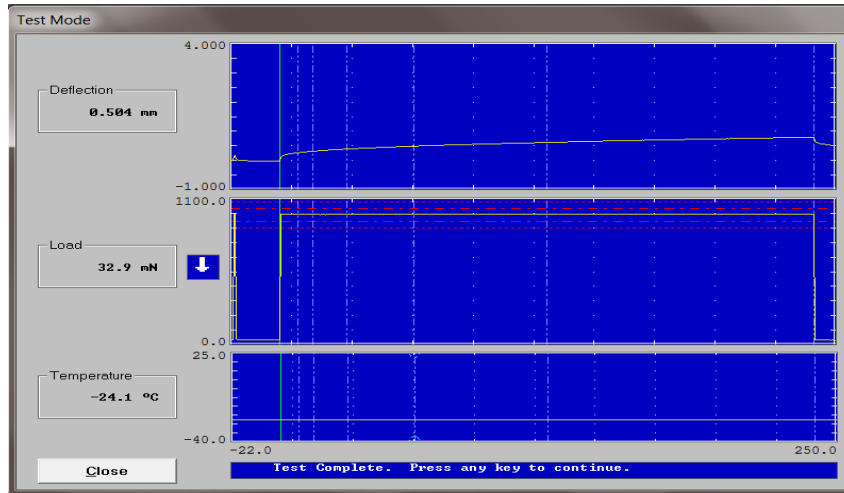
Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)



Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 17-Jul-2018 at 15:05:35  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 42  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S42

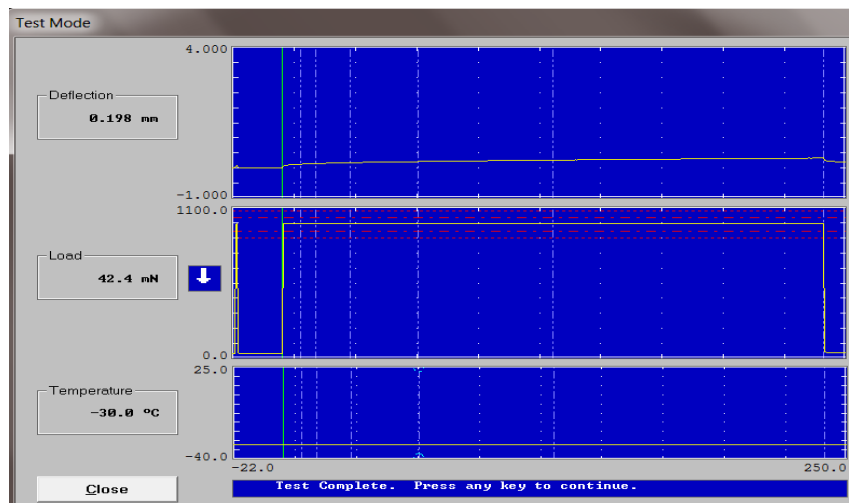
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	36.7	0.0263	--	--	--	--
0.5	981.6	0.1128	--	--	--	--
8.0	980.8	0.2663	303.1153	303.1412	0.008555	0.269724
15.0	980.9	0.3171	254.6129	254.3251	-0.113025	0.288924
30.0	980.5	0.3913	206.2162	206.6465	0.208660	0.310094
60.0	981.3	0.4879	165.5080	165.4603	-0.028795	0.331265 *
120.0	982.5	0.6184	130.7586	130.5530	-0.157230	0.352435
240.0	980.6	0.7957	101.4260	101.5095	0.008278	0.373606
250.0	32.9	0.5037	--	--	--	--

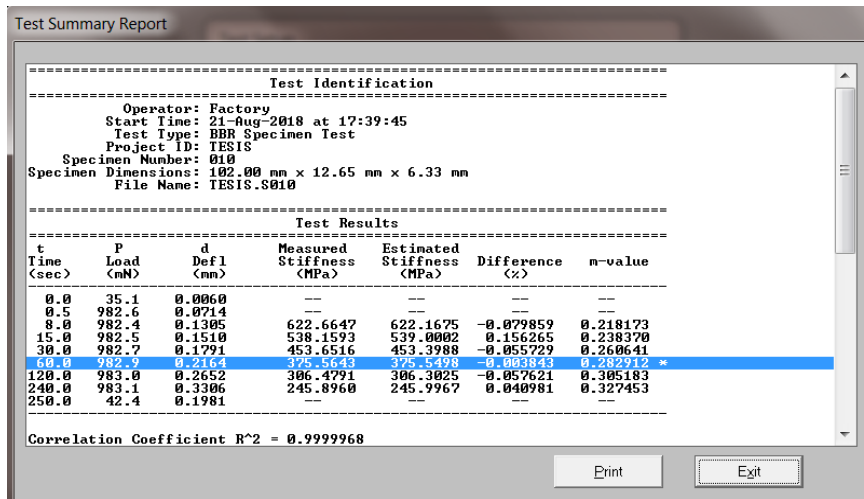
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999948

Print Exit

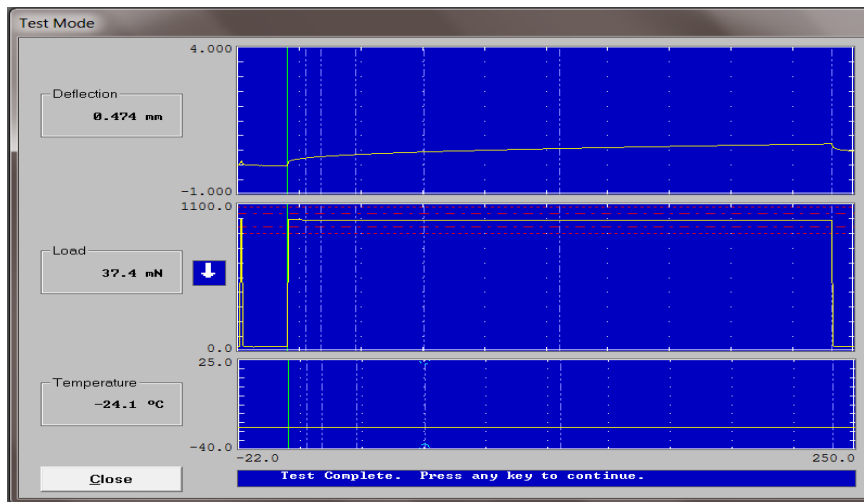
Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-24°C)



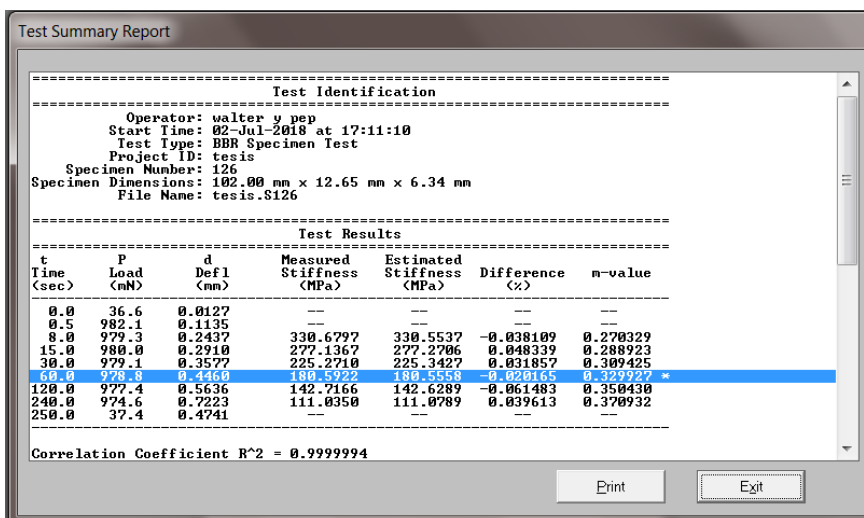
Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)



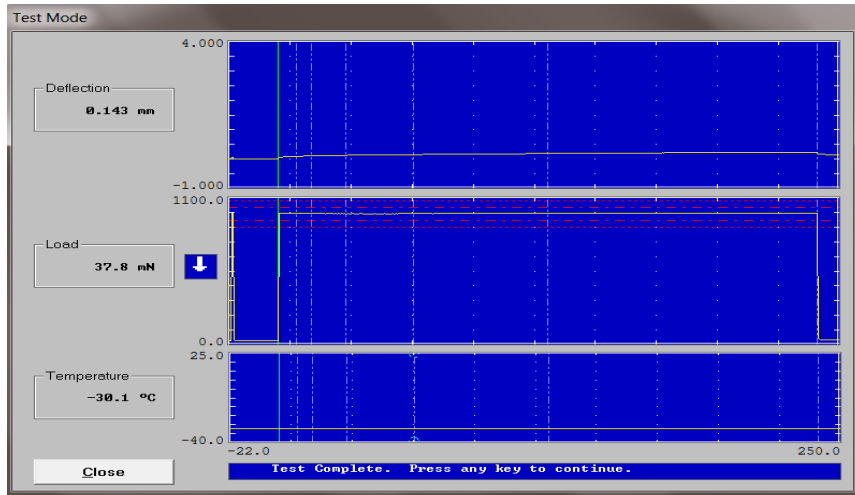
Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 5% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 1 con 5% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 5% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 09-Jul-2018 at 18:07:39  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 20  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S20

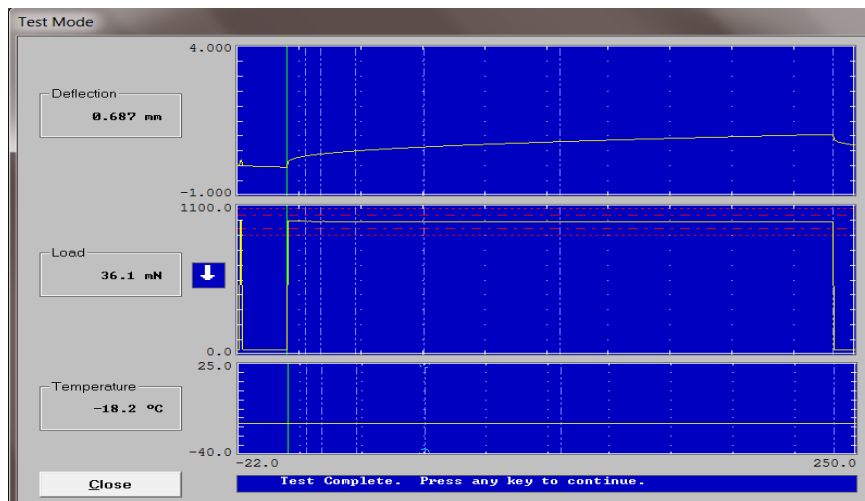
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	33.5	0.0034	---	---	---	---
0.5	983.1	0.0558	---	---	---	---
8.0	981.9	0.0972	831.6042	828.5590	-0.366198	0.198913
15.0	981.0	0.1120	720.6842	725.4042	0.654926	0.224113
30.0	980.4	0.1311	615.5717	615.0818	-0.079592	0.251900
60.0	981.3	0.1576	512.4145	511.5886	-0.161167	0.279688 *
120.0	982.1	0.1932	418.4347	417.3920	-0.249195	0.307475
240.0	981.0	0.2422	333.3607	334.0432	0.204715	0.335262
250.0	37.8	0.1434	---	---	---	---

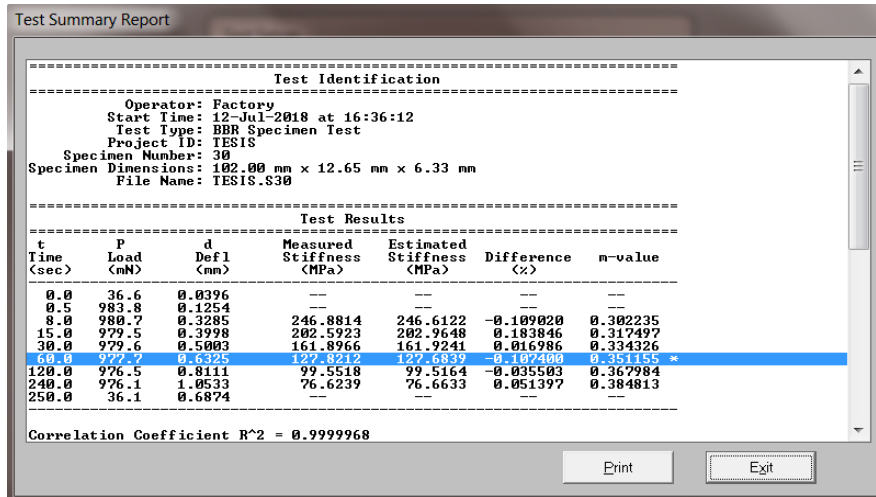
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999406

Print Exit

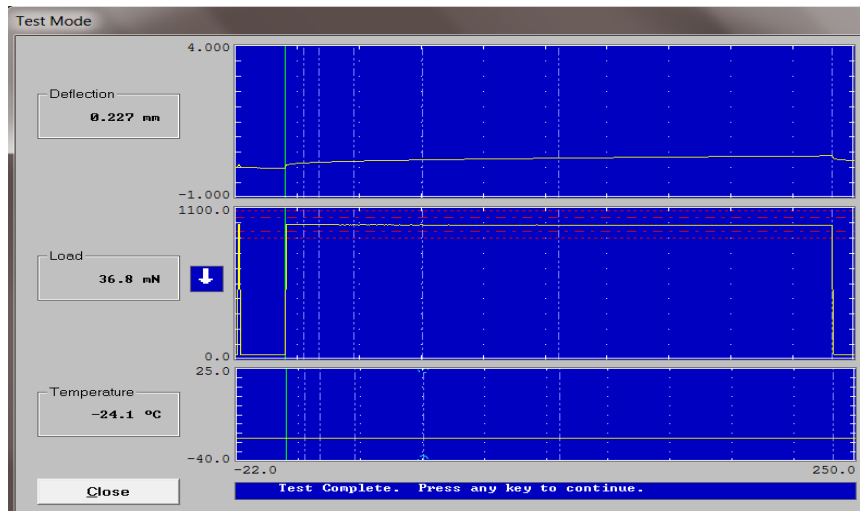
Asfalto 1 con 5% de Sylvaroad (-30°C)



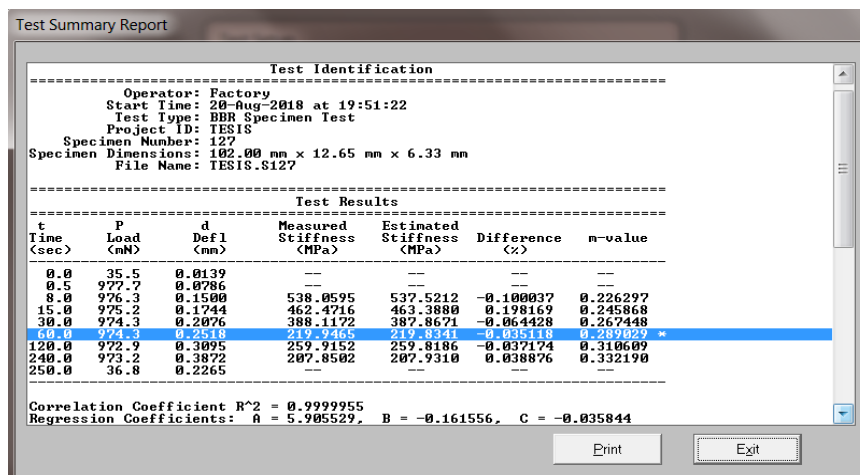
Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-18°C)



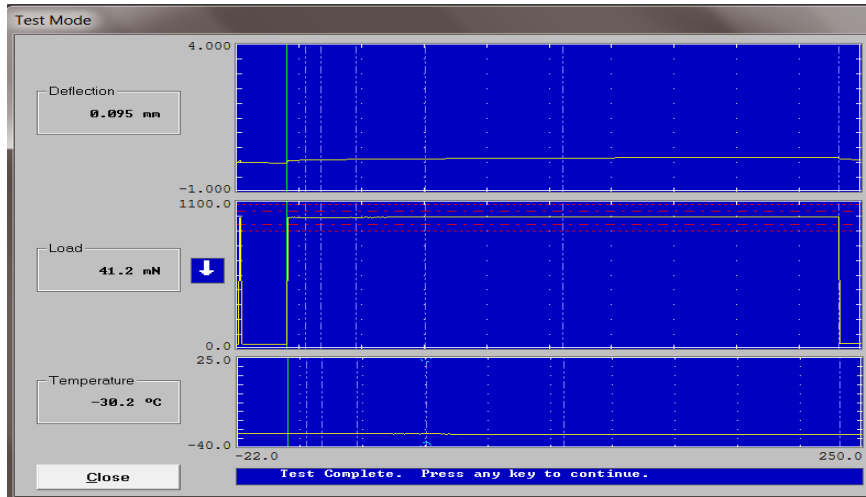
Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-24°C)



Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-30°C)

Test Summary Report

-----  
**Test Identification**  
 -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 21-Aug-2018 at 16:33:00  
 Test Type: DBB Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 004  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S004  
 -----

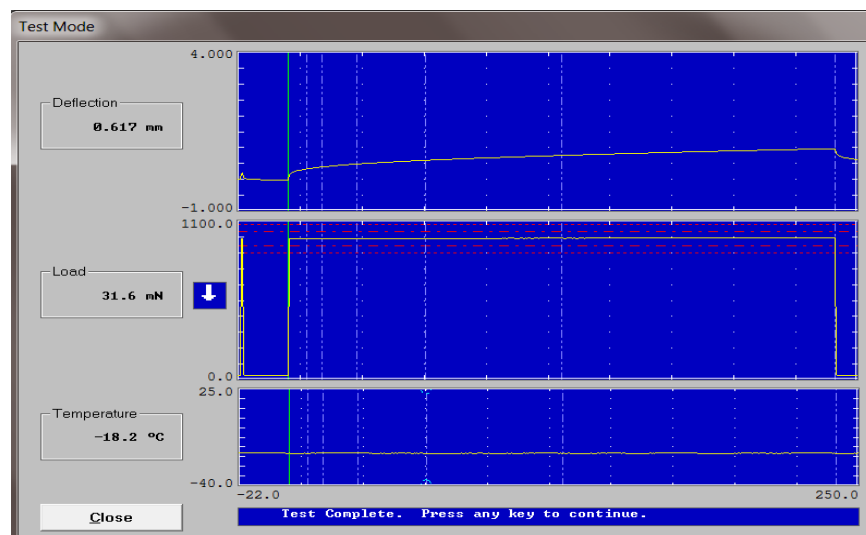
**Test Results**

t (Sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	37.0	0.0093	--	--	--	--
0.5	978.8	0.0504	--	--	--	--
8.0	979.7	0.0829	977.6577	976.8251	-0.085165	0.174353
15.0	979.7	0.0934	867.5744	868.9155	0.154578	0.198894
30.0	980.1	0.1080	750.4771	750.5938	0.015550	0.224273
60.0	981.8	0.1273	537.7235	536.7249	-0.156596	0.250452 *
120.0	983.2	0.1534	530.0624	530.4178	0.067051	0.276630
240.0	984.6	0.1876	433.8929	433.9141	0.004884	0.302809
250.0	41.2	0.0953	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999935

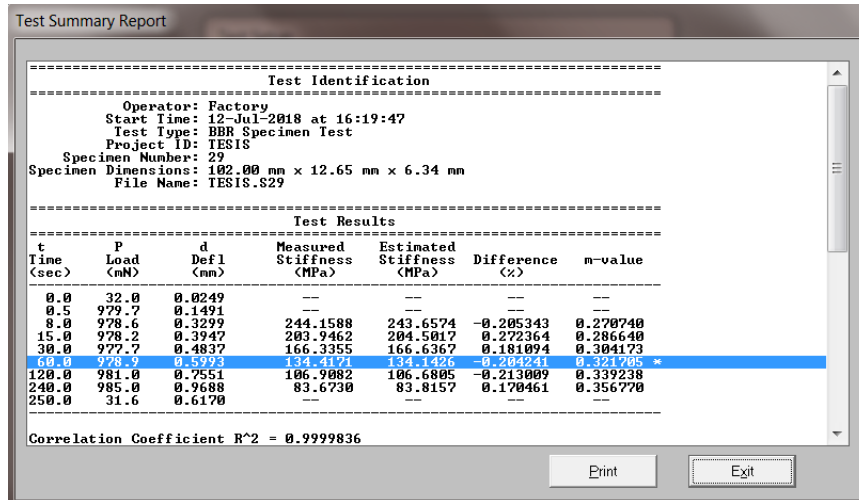
Print Exit

Asfalto 1 con 2% de Aceite, Réplica (-30°C)

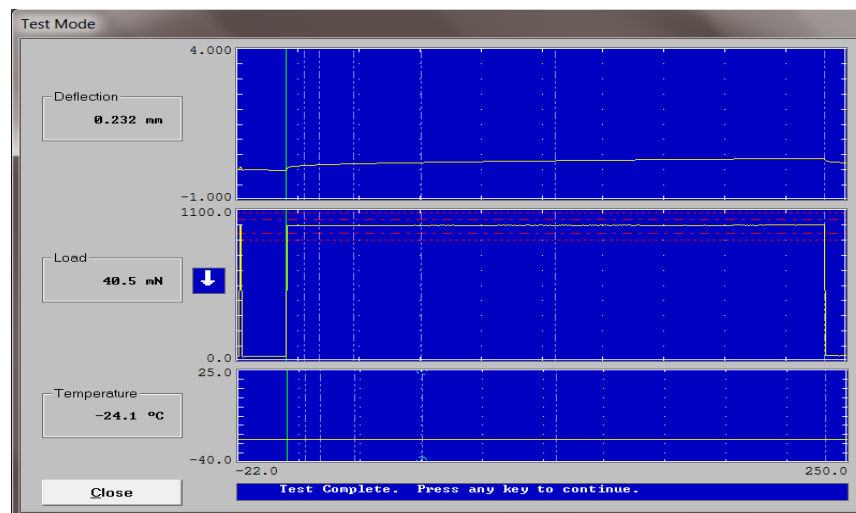


Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)

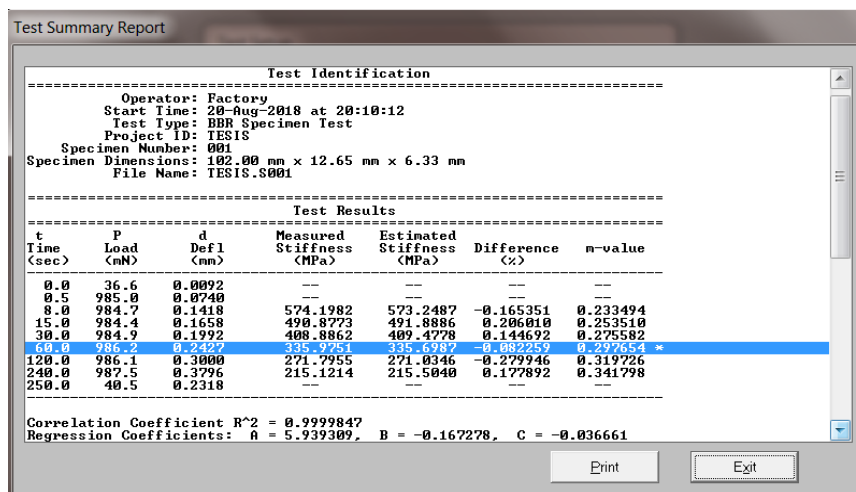




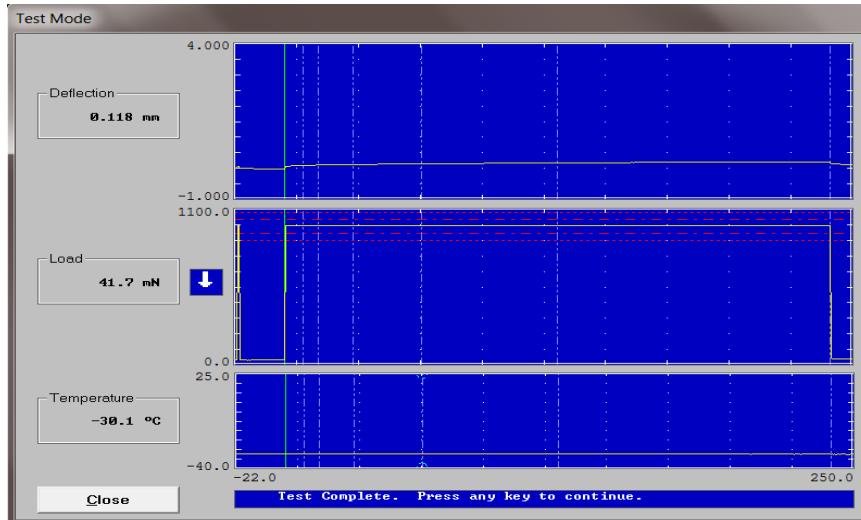
Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 10-Jul-2018 at 15:53:09  
 Test Type: BBB Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 27  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S27

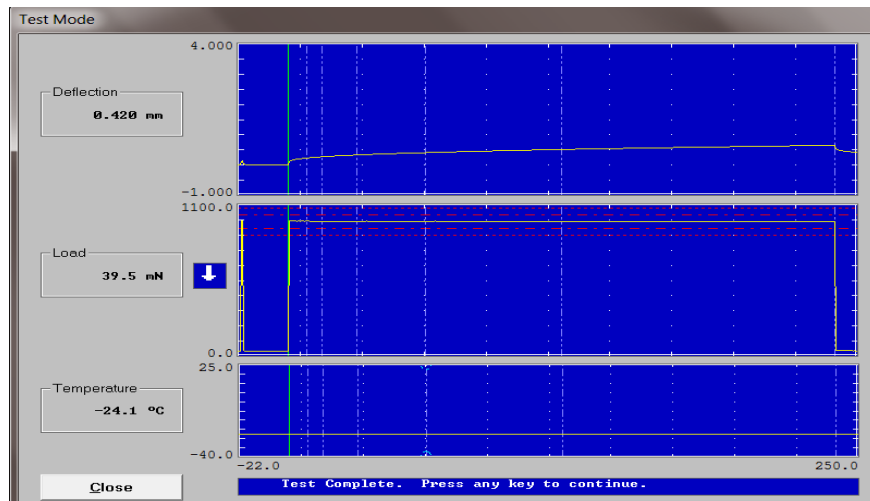
Test Results

Time (sec)	Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	35.6	0.0130	---	---	---	---
0.5	981.8	0.0577	---	---	---	---
8.0	982.3	0.0929	870.5864	868.9493	-0.188038	0.187394
15.0	981.9	0.1058	763.8708	767.1949	0.435162	0.208858
30.0	982.5	0.1225	660.2217	658.3711	-0.280297	0.232526
30.0	982.7	0.1459	555.5638	553.2974	-0.408330	0.235824 *
120.0	983.6	0.1753	461.8030	461.5583	-0.052978	0.279862
240.0	985.0	0.2151	376.8896	377.0661	0.046819	0.303530
250.0	41.7	0.1183	---	---	---	---

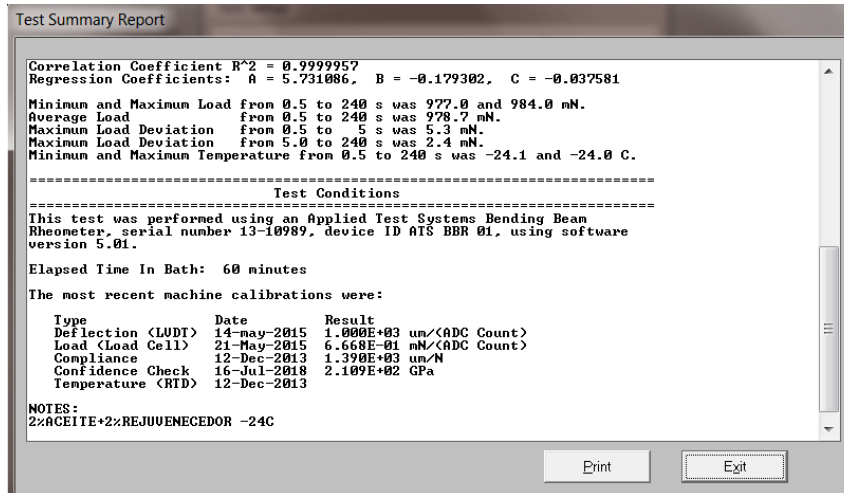
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999688

Print Exit

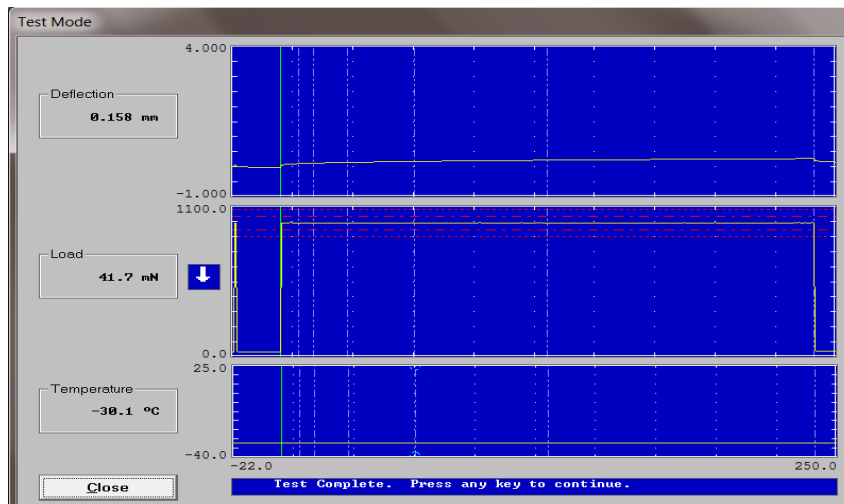
Asfalto 1 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



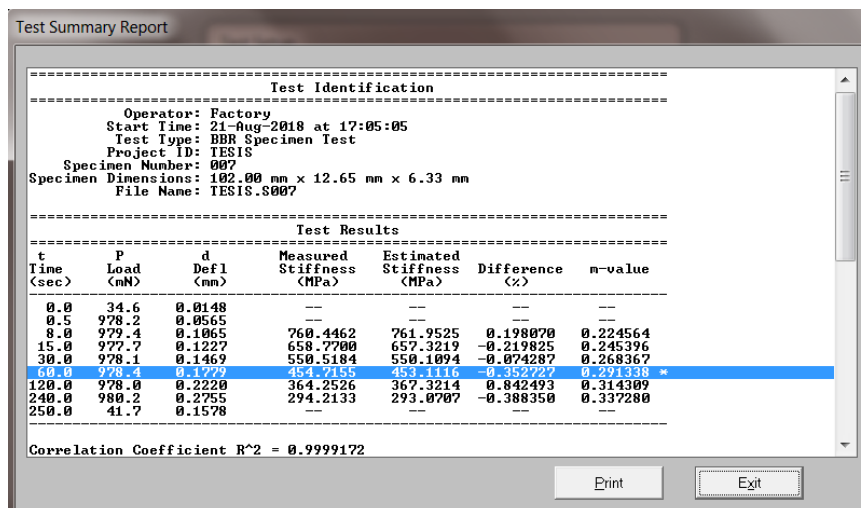
Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



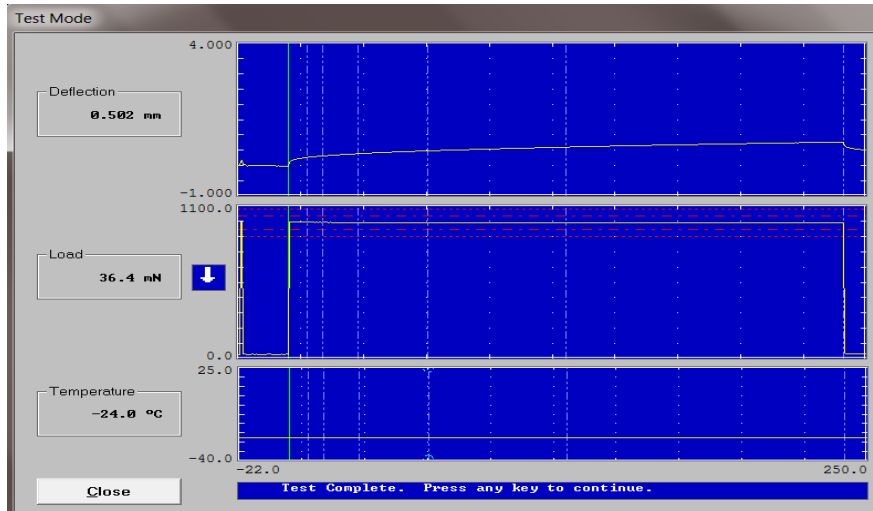
Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Asfalto 1 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 17-Jul-2018 at 18:04:11  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 48  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S48

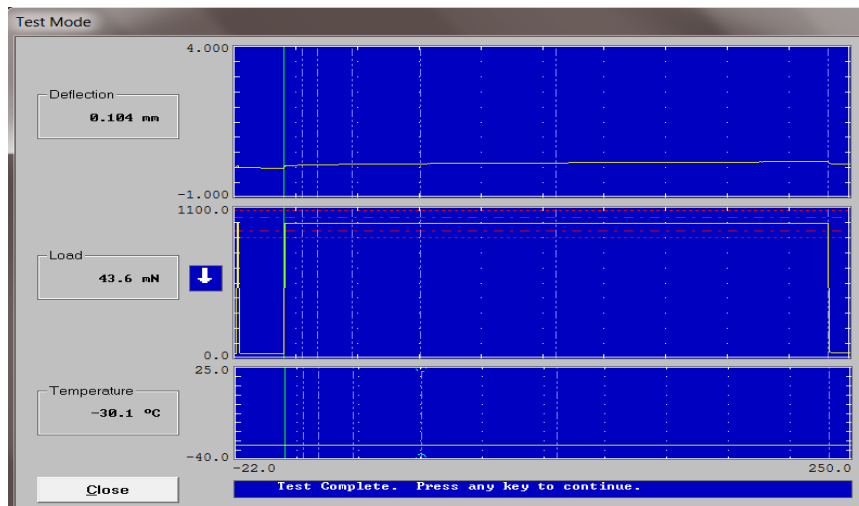
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	33.4	0.0101	--	--	--	--
0.5	983.1	0.1309	--	--	--	--
8.0	981.8	0.2673	302.2304	301.8245	-0.134287	0.265048
15.0	980.8	0.3183	253.5969	254.0972	0.197295	0.282602
30.0	979.6	0.3890	207.2628	207.4984	0.113702	0.301958
60.0	978.3	0.4804	167.5014	167.1322	-0.235100	0.321314 *
120.0	977.8	0.6055	132.9109	132.9122	0.000977	0.340669
240.0	975.9	0.7708	104.1951	104.2557	0.058136	0.360025
250.0	36.4	0.5017	--	--	--	--

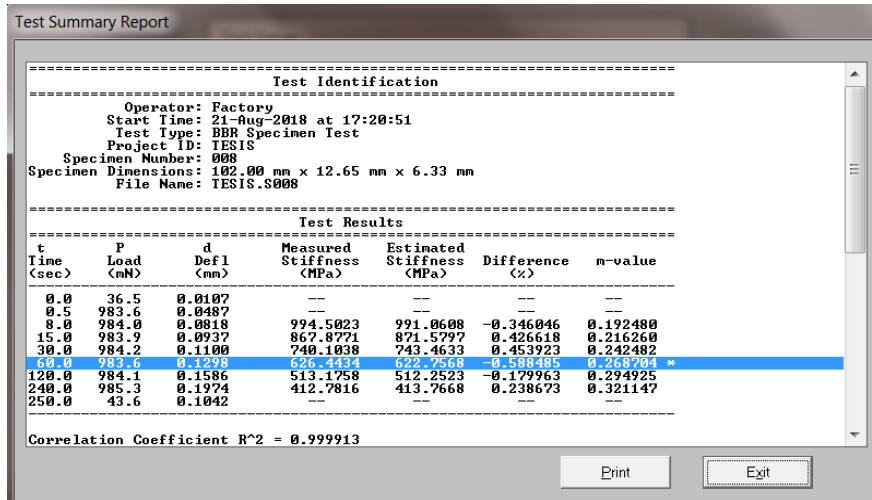
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.999992

Print Exit

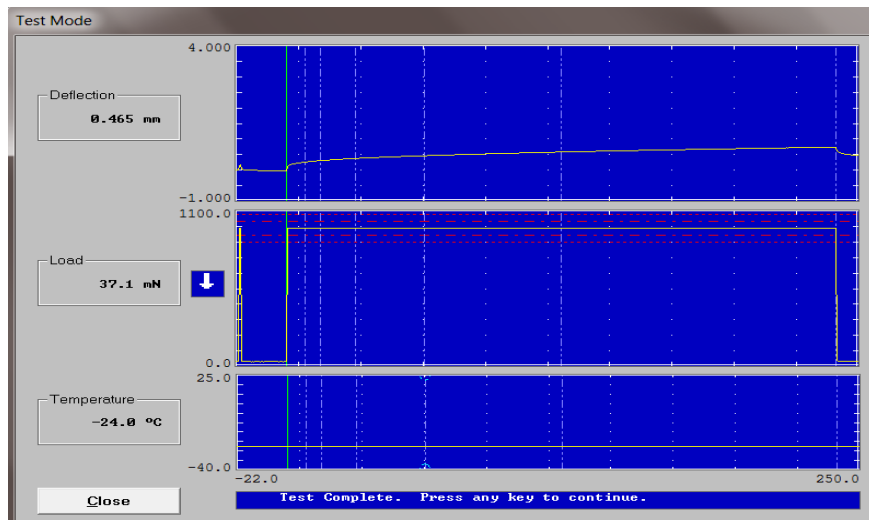
Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



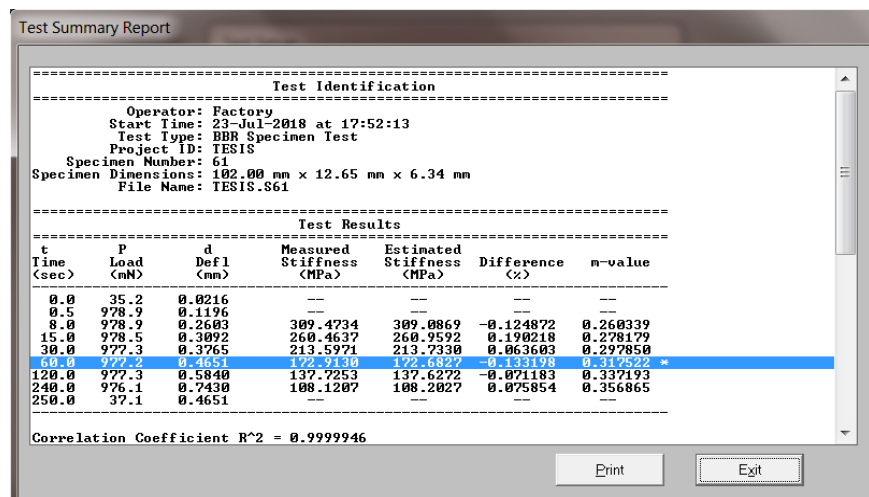
Gráfica del Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



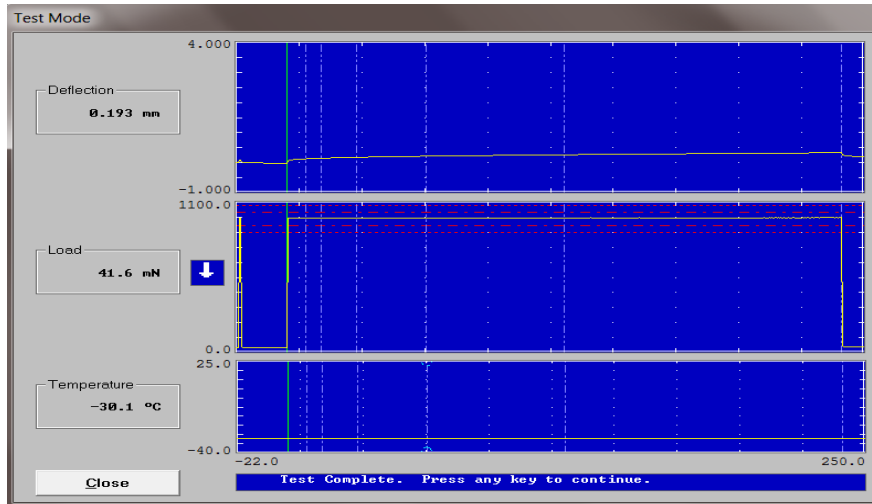
Asfalto 1 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)

Test Summary Report

-----

Test Identification

-----

Operator: Factory  
 Start Time: 24-Jul-2018 at 15:28:47  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 64  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S64

-----

Test Results

-----

t (sec)	P (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	37.0	0.0120	--	--	--	--
0.5	983.7	0.0721	--	--	--	--
8.0	983.6	0.1310	617.7375	617.1086	-0.101802	0.221766
15.0	982.5	0.1519	532.4571	533.5720	0.209383	0.241005
30.0	982.3	0.1803	448.4250	448.1774	-0.055208	0.262220
45.0	981.7	0.2110	371.3761	370.7546	-0.164946	0.288435 *
120.0	984.6	0.2600	302.3899	302.5557	0.054835	0.304649
240.0	986.8	0.3340	243.1516	243.1664	0.006104	0.325864
250.0	41.6	0.1927	--	--	--	--

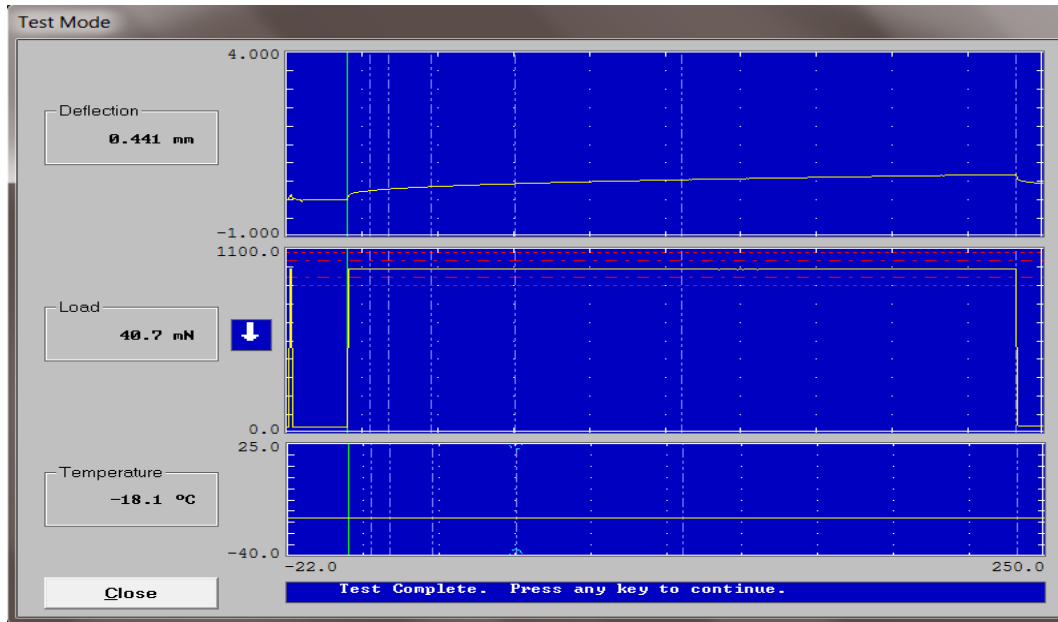
-----

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999941

Print Exit

Asfalto 1 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)

## Anexo 4. Resultados de calibración del programa Bohlin del Equipo BBR para PG 64-28



Gráfica del Asfalto 2 (-18°C)

Test Summary Report

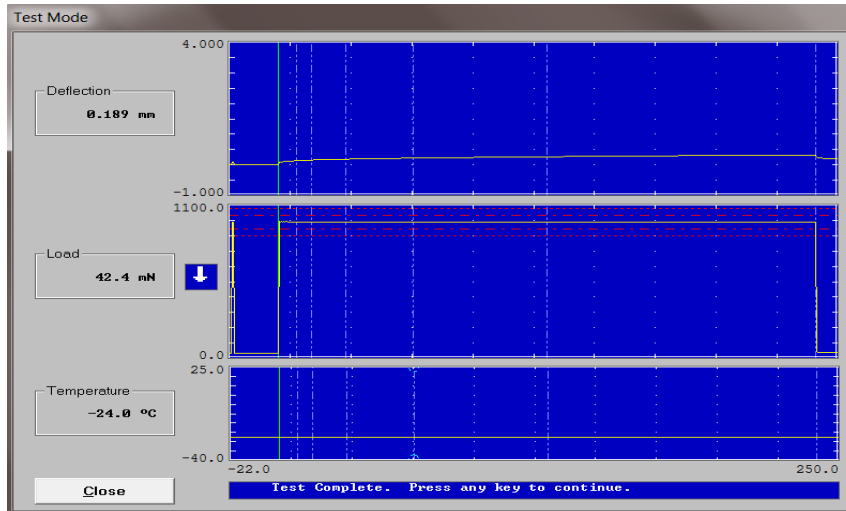
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: walter
Start Time: 29-Jun-2018 at 15:40:17
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: tesis
Specimen Number: 108
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: tesis.S108
=====

                        Test Results
=====
t      P      d      Measured   Estimated
Time  Load  Defl  Stiffness  Stiffness
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)      (MPa)      Difference  m-value
                                     (%)
-----
0.0    37.1    0.0062  ---        ---
0.5    975.9    0.1264  ---        ---
8.0    974.9    0.2519  318.5025   318.4889   -0.004268   0.248291
15.0   976.6    0.2966  270.9534   270.9484   -0.001851   0.266048
30.0   975.9    0.3588  223.8317   223.7953   -0.016271   0.285629
60.0   976.0    0.4409  182.1726   182.3563   0.100878    0.305209 *
120.0  975.8    0.5471  146.7700   146.5874   -0.124417   0.324790
240.0  975.9    0.6912  116.1924   116.2459   0.046068    0.344371
250.0  40.7     0.4415  ---        ---
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999981
    
```

Print Exit

Asfalto 2 (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 (-24°C)

Test Summary Report

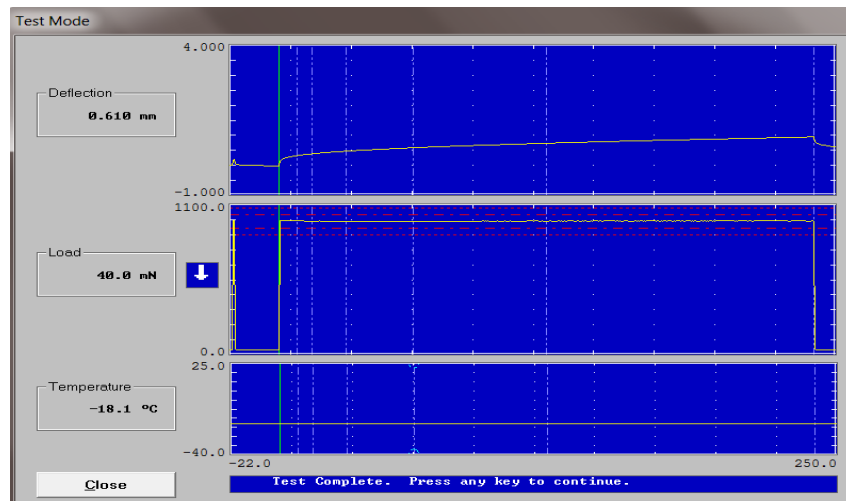
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: Factory
Start Time: 23-Jul-2018 at 18:25:15
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: TESIS
Specimen Number: 63
Specimen Dimensions: 182.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm
File Name: TESIS.S63
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured  Estimated  Difference  n-value
Time  Load  Defl  Stiffness  Stiffness  (%)         (s)
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)     (MPa)
-----
0.0    35.6   0.0057  ---        ---        ---        ---
0.5    980.6  0.0795  ---        ---        ---        ---
8.0    980.0  0.1378  588.1662   587.3715  -0.135119  0.208897
15.0   978.4  0.1582  511.5346   512.3505  0.159492  0.225869
30.0   978.6  0.1863  434.4201   435.2683  0.195236  0.244583
60.0   977.4  0.2211  302.3664   302.0141  -0.976083  0.278993 *
120.0  977.6  0.2673  302.3664   302.1592  -0.068532  0.282013
240.0  977.4  0.3276  246.6685   246.9021  0.094690  0.300727
250.0  42.4   0.1885  ---        ---        ---        ---
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999854
=====

```

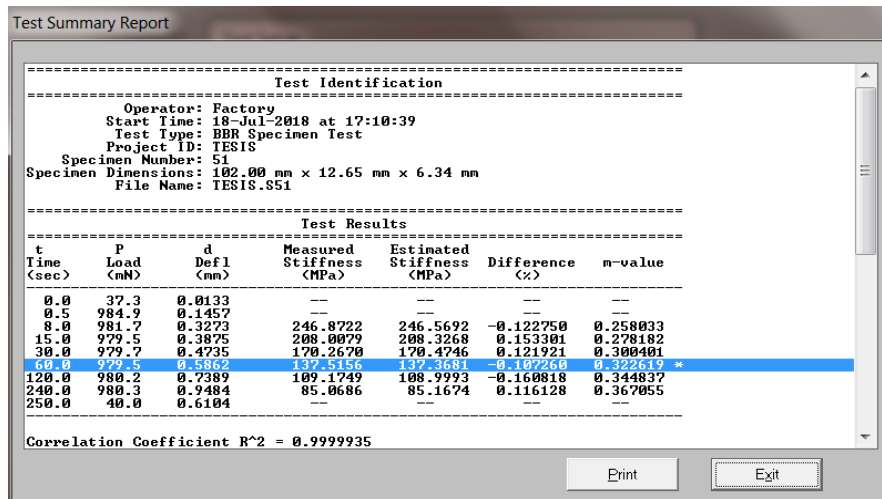
Print Exit

Asfalto 2 (-24°C)

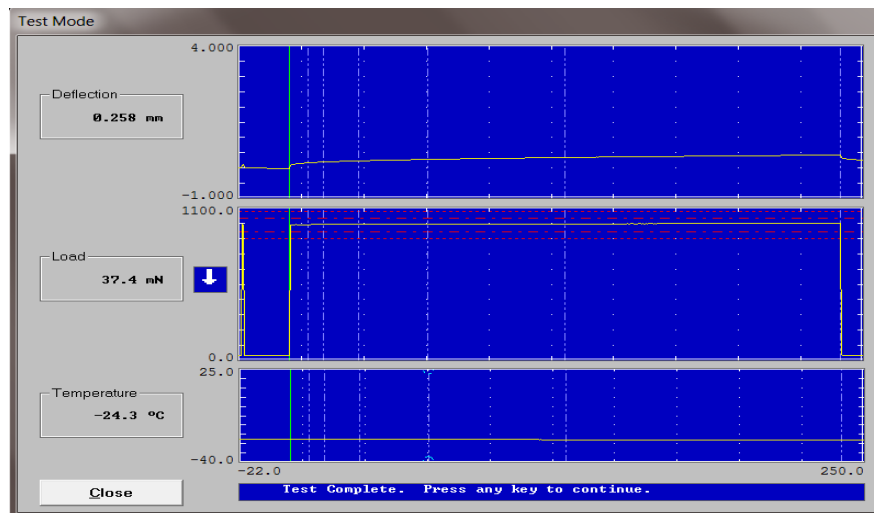


Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite (-18°C)

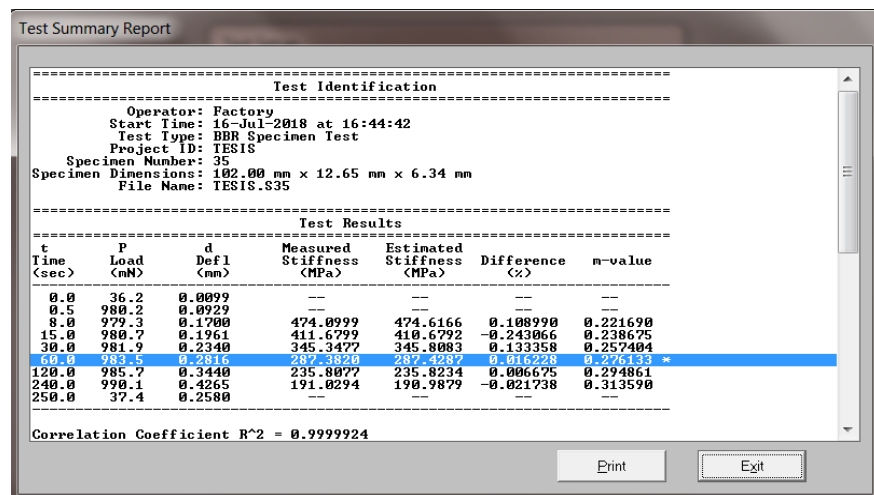




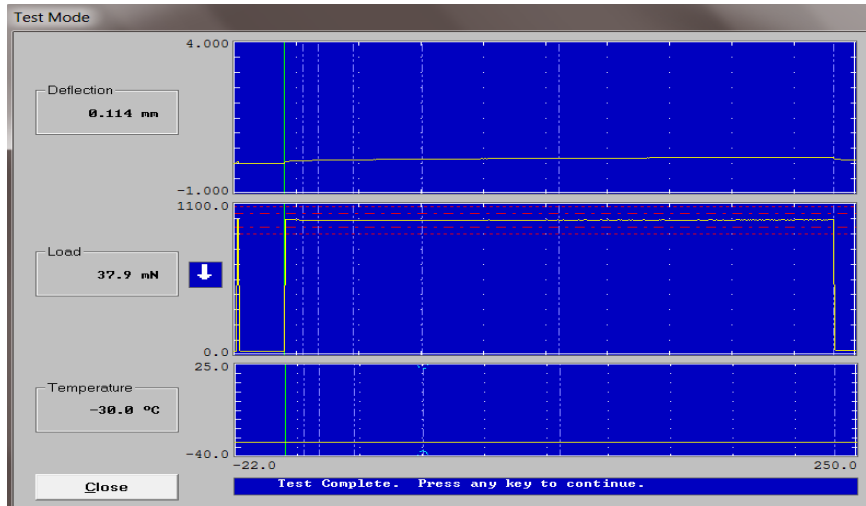
Asfalto 2 con 2% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite (-24°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite (-30°C)

Test Summary Report

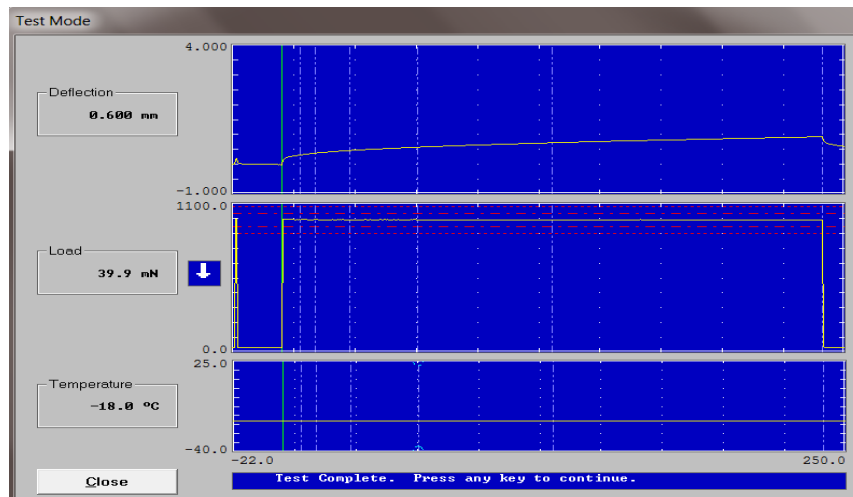
```

=====
                        Test Identification
=====
Operator: Factory
Start Time: 19-Jul-2018 at 18:00:33
Test Type: BBR Specimen Test
Project ID: IESIS
Specimen Number: 59
Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm
File Name: IESIS.859
=====
                        Test Results
=====
t      P      d      Measured   Estimated   Difference   n-value
Time  Load  Defl  Stiffness  Stiffness   (%)          (MPa)
(sec) (mN)  (mm)  (MPa)     (MPa)
-----
0.0    33.0    0.0056  ---        ---         ---         ---
0.5    981.8    0.0590  ---        ---         ---         ---
8.0    979.6    0.0959  840.3825   837.6019   -0.330880   0.179248
15.0   979.2    0.1091  738.9378   743.7722   0.654237   0.198755
30.0   979.3    0.1250  644.6232   643.2373   -0.215000   0.220264
60.0   979.3    0.1459  548.6592   548.6592   -0.000000   0.219294 *
120.0  980.1    0.1750  460.7735   460.0540   -0.156146   0.263283
240.0  981.0    0.2125  379.9296   380.4654   0.141011   0.284793
250.0  37.9    0.1141  ---        ---         ---         ---
=====
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999284
=====

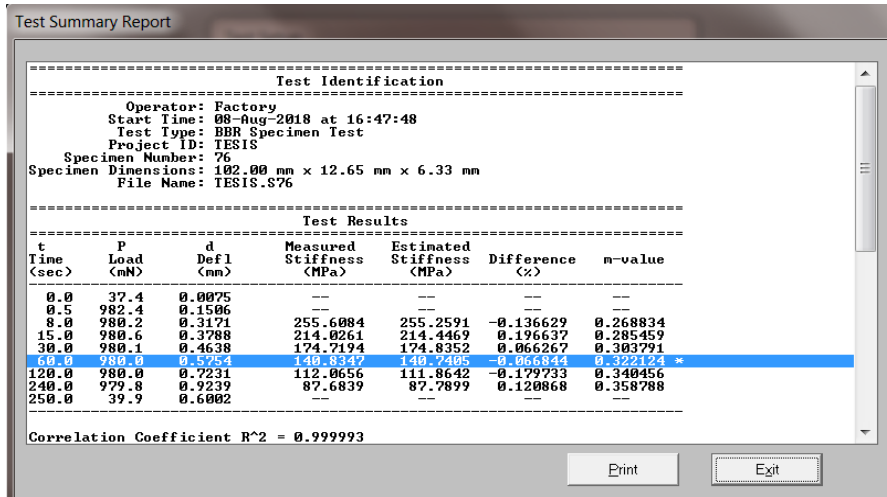
```

Print      Exit

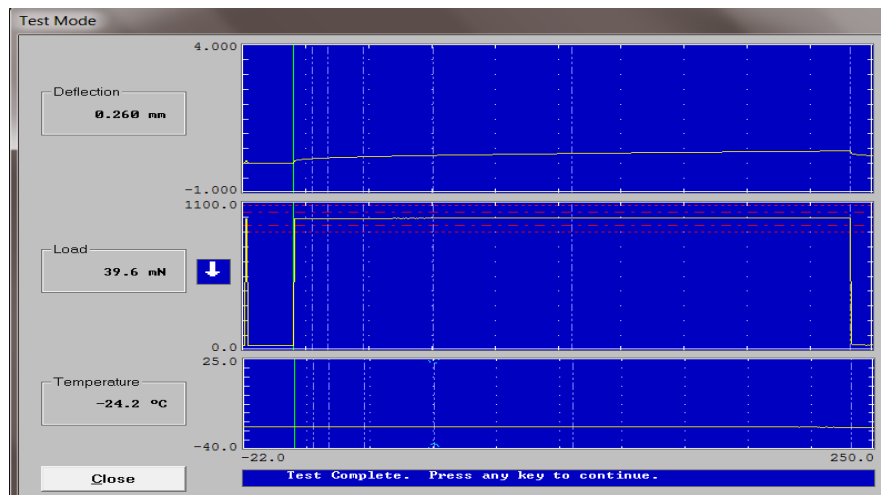
Asfalto 2 con 2% de Aceite (-30°C)



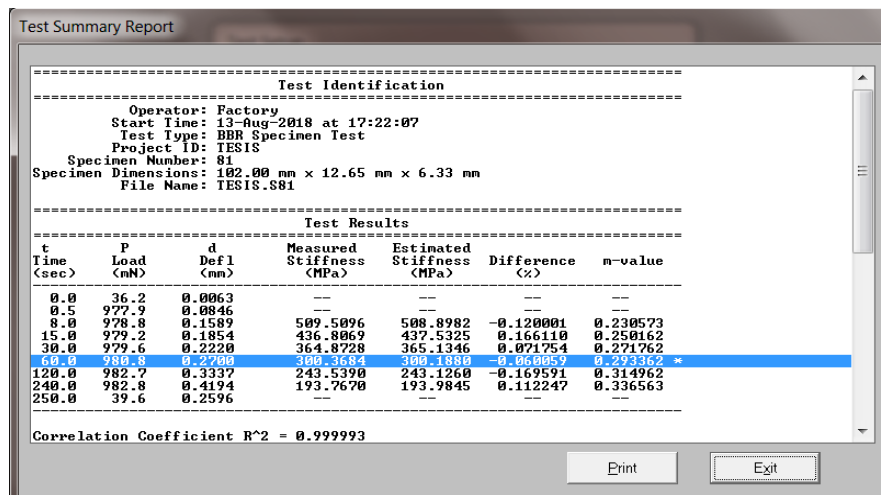
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-18°C)



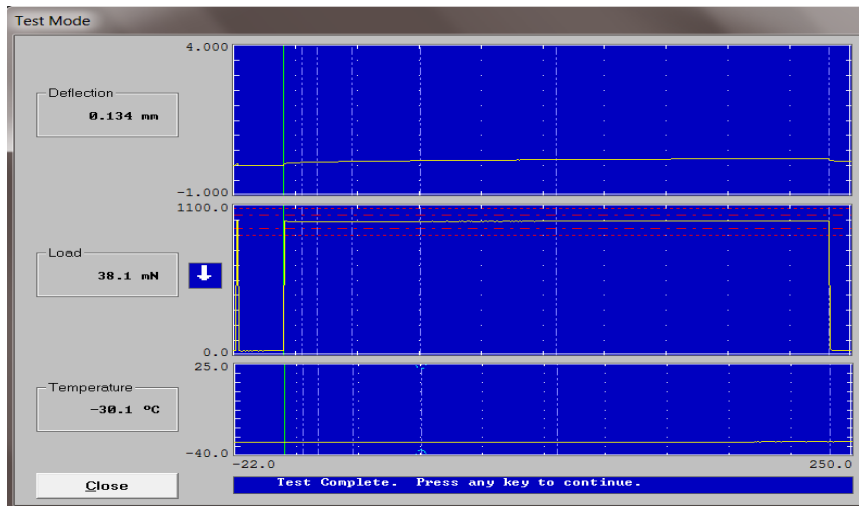
Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 06-Aug-2018 at 19:12:20  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 71  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S71

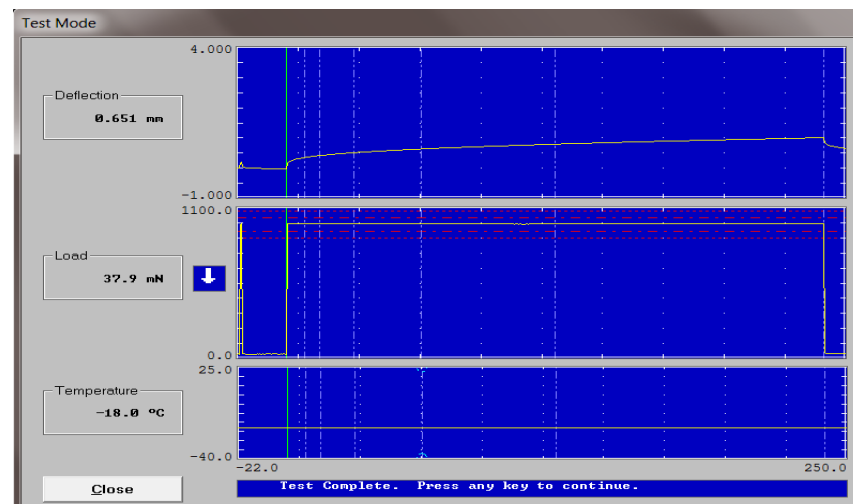
Test Results

t Time (sec)	P Load (nN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	34.6	0.0013	--	--	--	--
0.5	981.1	0.0672	--	--	--	--
8.0	979.4	0.1067	755.2332	755.0864	-0.019430	0.174377
15.0	979.3	0.1198	672.5700	671.7582	-0.120695	0.197663
30.0	979.1	0.1392	578.6565	580.5583	0.328657	0.223339
60.0	979.9	0.1635	493.2515	492.8891	-0.073454	0.249016 *
120.0	981.2	0.1959	412.1430	411.0770	-0.258633	0.274693
240.0	982.5	0.2404	336.3102	336.7966	0.144636	0.300369
250.0	38.1	0.1343	--	--	--	--

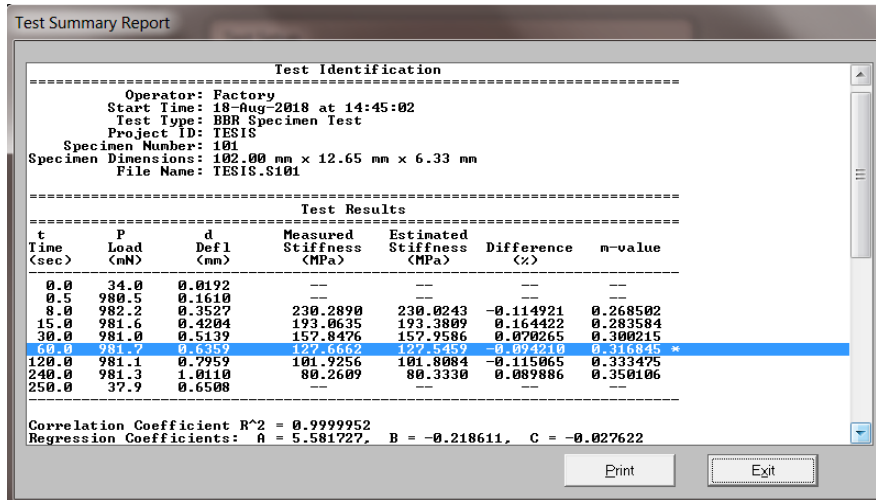
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999767

Print Exit

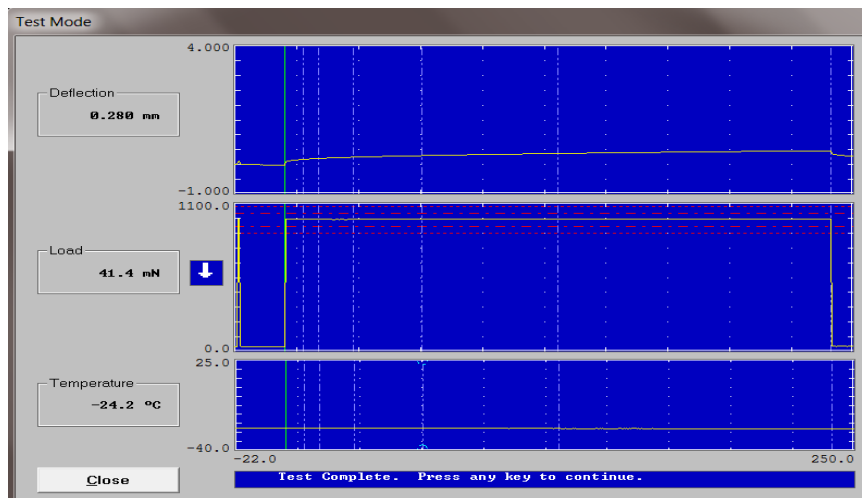
Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad (-30°C)



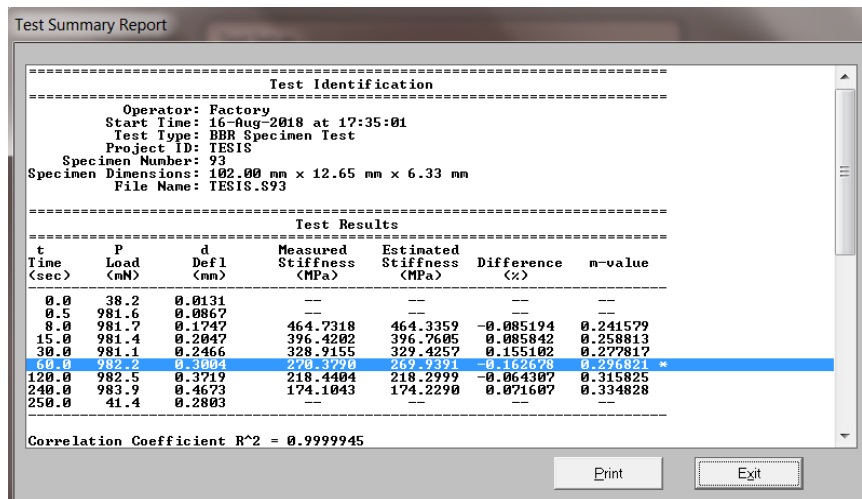
Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite (-18°C)



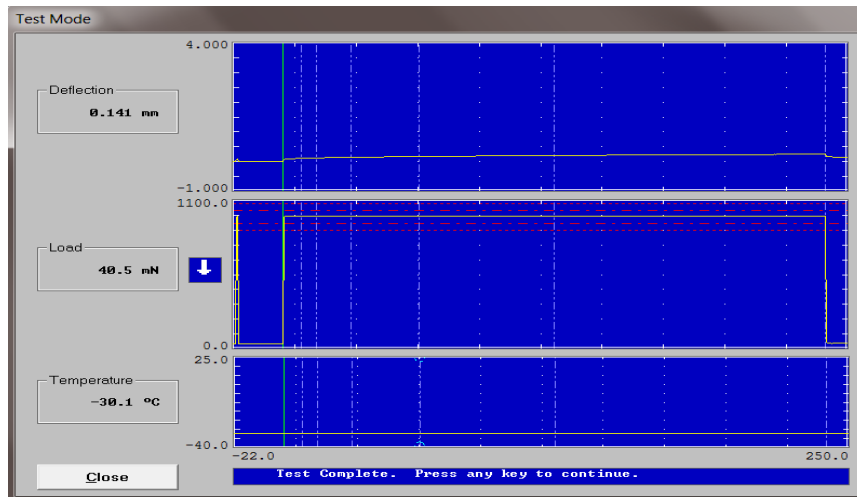
Asfalto 2 con 3% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite (-24°C)



Asfalto 2 con 3% de Aceite (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite (-30°C)

Test Summary Report

-----  
**Test Identification**  
 -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 19-Aug-2018 at 16:28:06  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 107  
 Specimen Dimensions: 162.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S107  
 -----

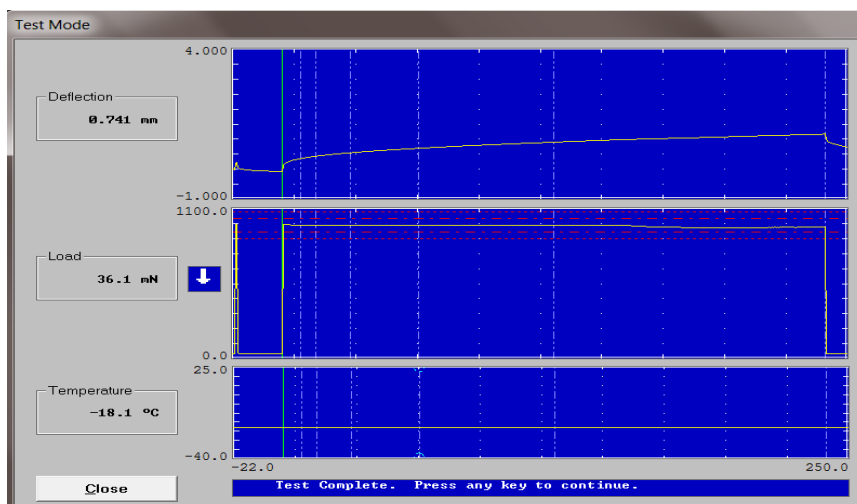
**Test Results**  
 -----

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	36.2	0.0054	--	--	--	--
0.5	980.3	0.0698	--	--	--	--
8.0	982.1	0.1128	719.7899	719.1618	-0.087258	0.174503
15.0	981.6	0.1269	639.5524	640.0123	0.071910	0.196471
30.0	982.1	0.1467	552.7943	553.8583	0.192492	0.220694
60.0	982.7	0.1921	492.8610	491.8048	-0.195318	0.241013 *
120.0	983.3	0.2060	394.7737	394.4061	-0.093133	0.269141
240.0	984.3	0.2510	324.2627	324.5474	0.087785	0.293364
250.0	40.5	0.1407	--	--	--	--

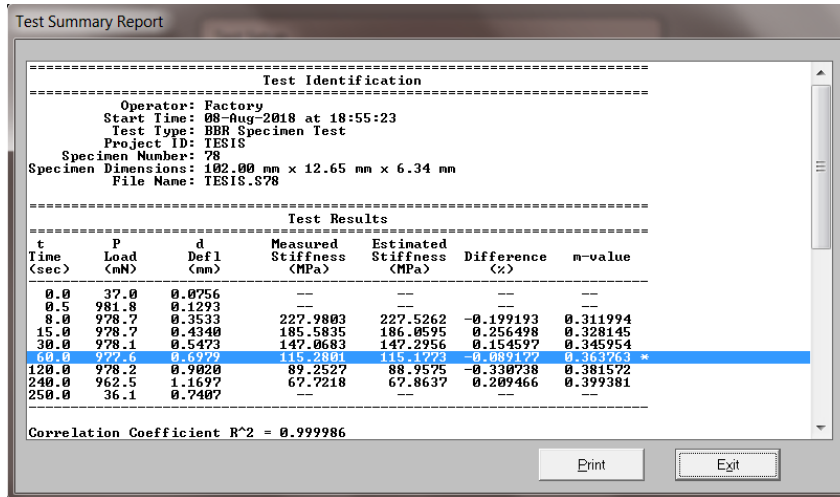
-----  
 Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999894  
 -----

Print Exit

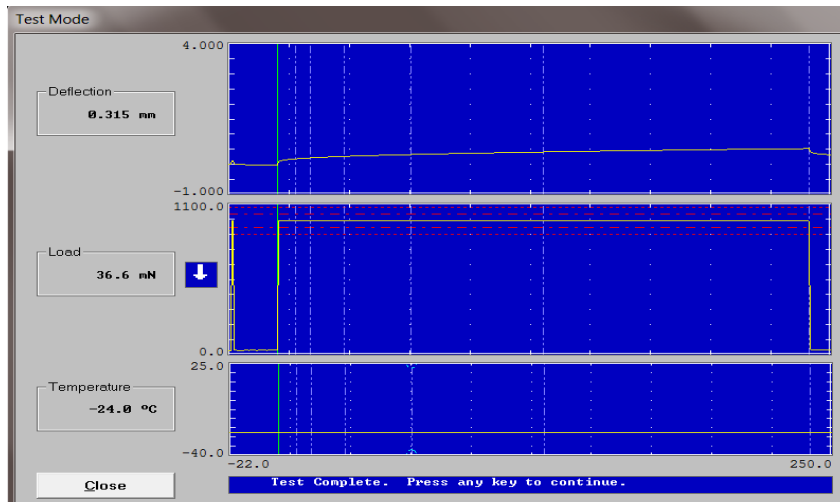
Asfalto 2 con 3% de Aceite (-30°C)



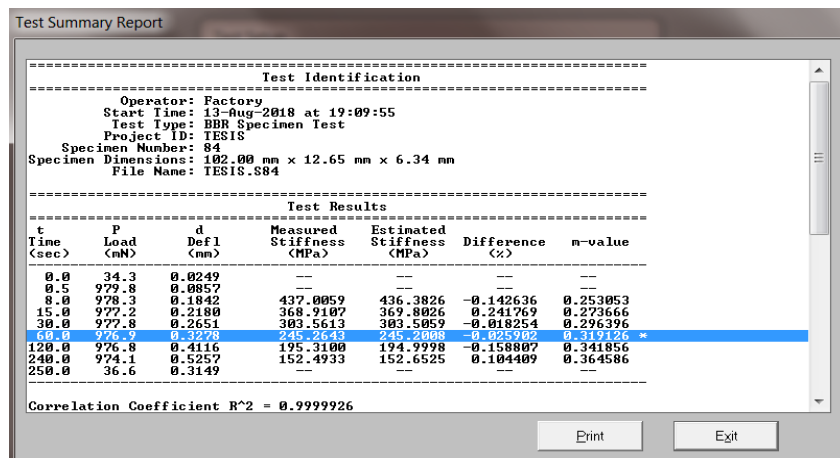
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-18°C)



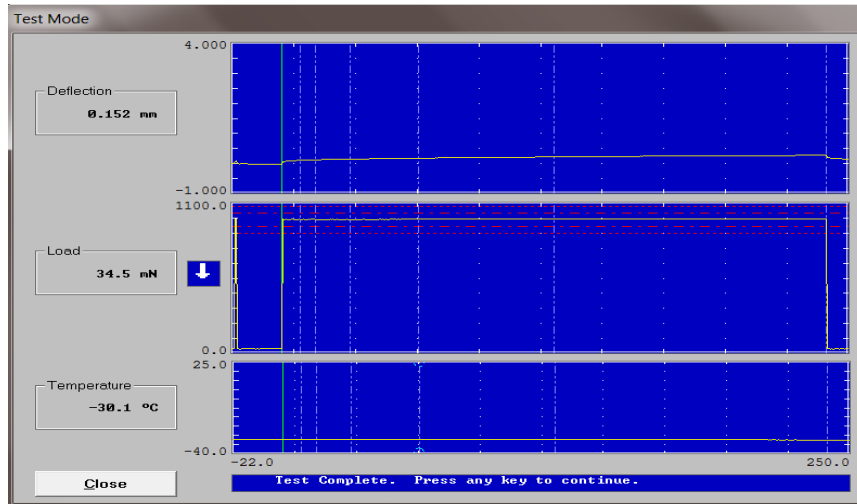
Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

=====  
**Test Identification**  
 Operator: Factory  
 Start Time: 07-Aug-2018 at 17:47:27  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 73  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: TESIS.S73  
 =====

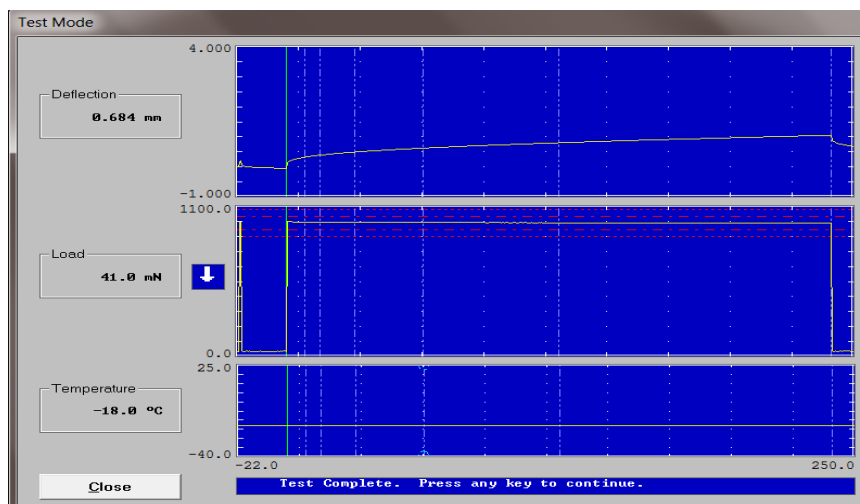
**Test Results**

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	34.1	0.0177	---	---	---	---
0.5	981.0	0.0600	---	---	---	---
8.0	980.2	0.1108	727.7788	726.2408	-0.211321	0.212393
15.0	980.0	0.1280	630.0912	631.4711	0.218985	0.232493
30.0	979.2	0.1516	531.6856	533.3722	0.317213	0.254655
60.0	980.8	0.1819	444.6833	446.6350	-0.446366	0.276318 *
120.0	983.2	0.2220	364.5418	363.3868	-0.316825	0.298981
240.0	986.1	0.2775	292.4419	293.1103	0.228558	0.321144
250.0	34.5	0.1518	---	---	---	---

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999657

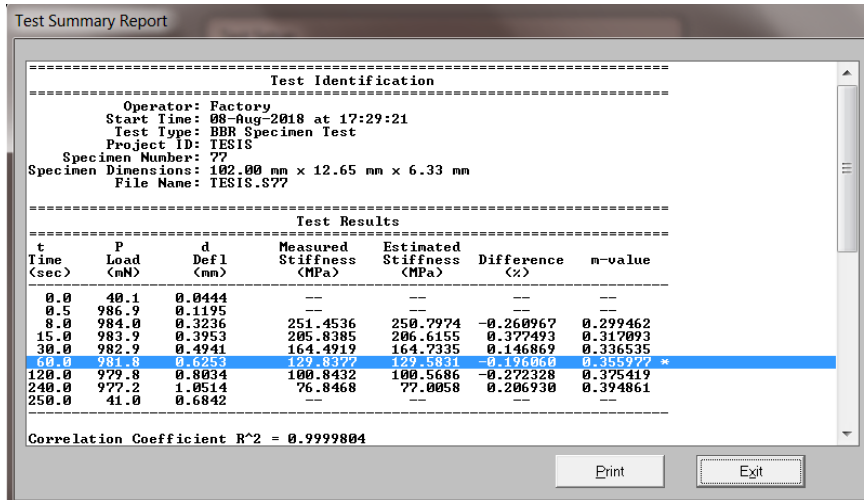
Print Exit

Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)

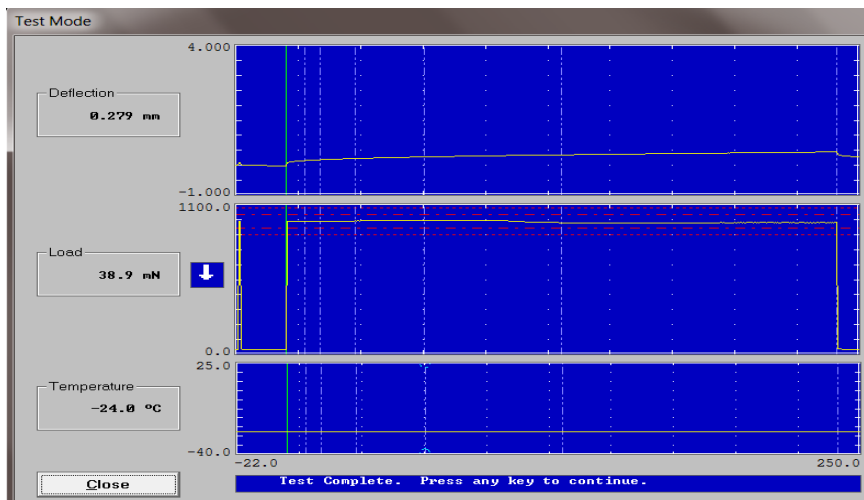


Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-18°C)

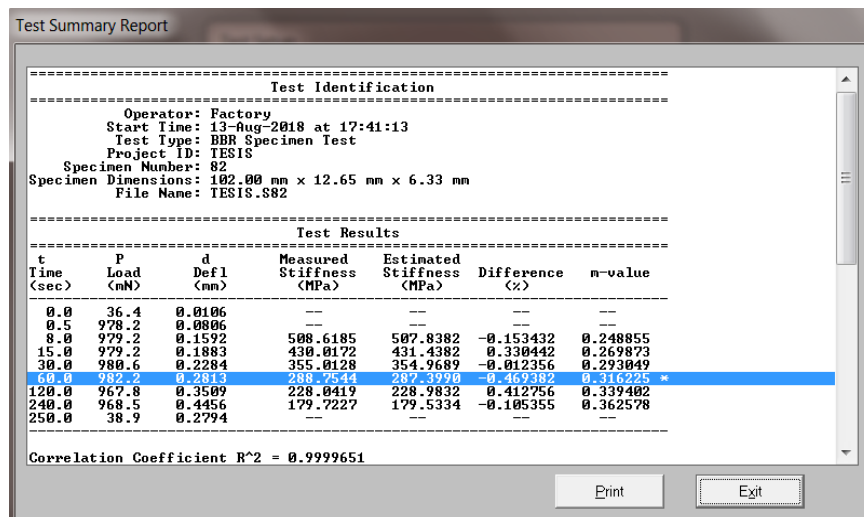




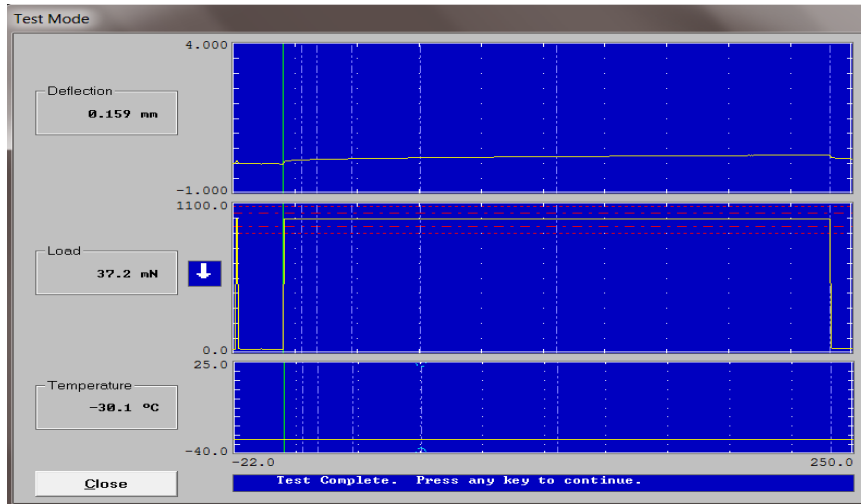
Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 06-Aug-2018 at 17:56:19  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 70  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S70

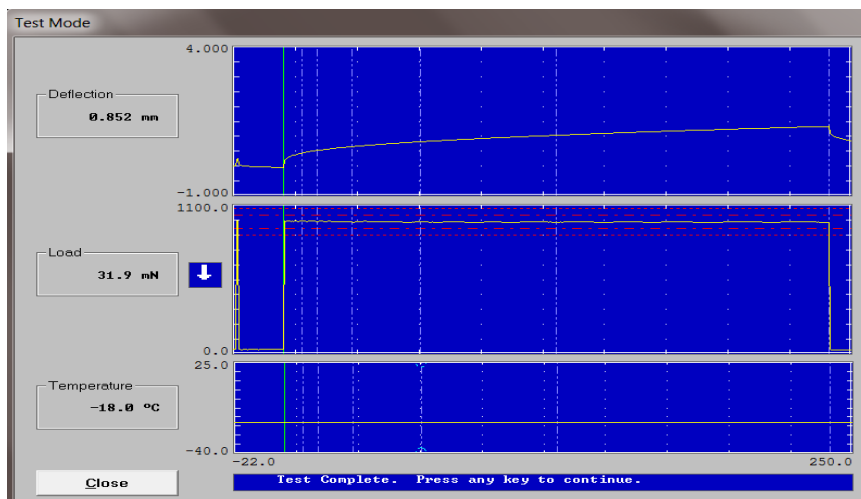
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	33.2	0.0076	--	--	--	--
0.5	981.2	0.0730	--	--	--	--
8.0	981.3	0.1221	664.4079	663.3463	-0.159784	0.190307
15.0	981.1	0.1390	583.5734	584.5128	0.160988	0.212227
30.0	981.7	0.1626	499.1272	500.3446	0.243921	0.236398
60.0	982.0	0.1923	421.0636	421.1310	-0.161797	0.266543
120.0	981.8	0.2322	349.5704	348.6515	-0.262865	0.284739
240.0	981.0	0.2863	283.3015	283.8171	0.182018	0.308909
250.0	37.2	0.1588	--	--	--	--

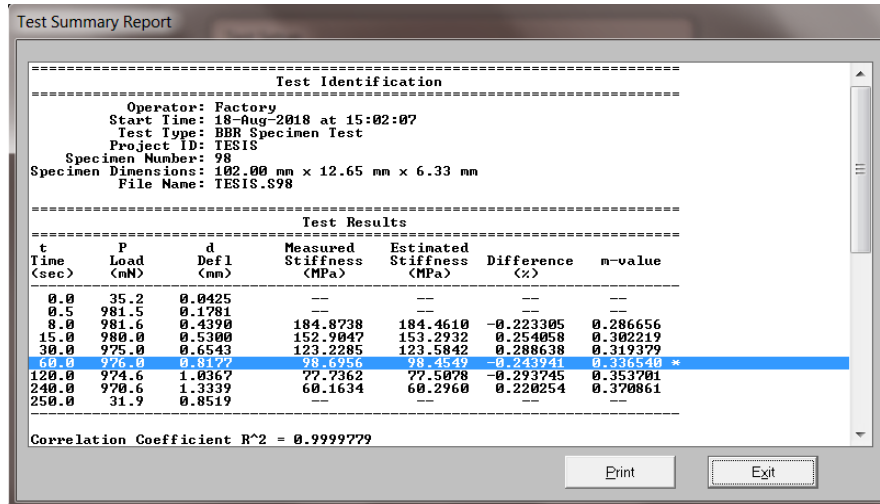
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999766

Print Exit

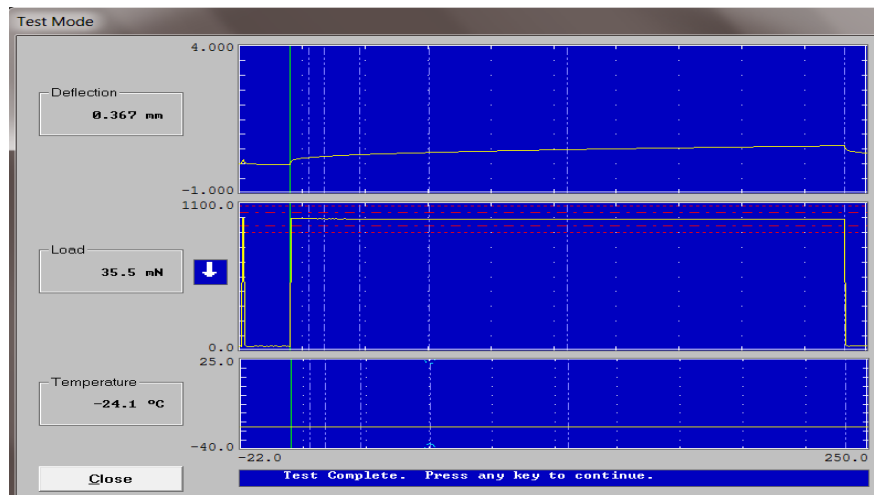
Asfalto 2 con 3% de Sylvaroad (-30°C)



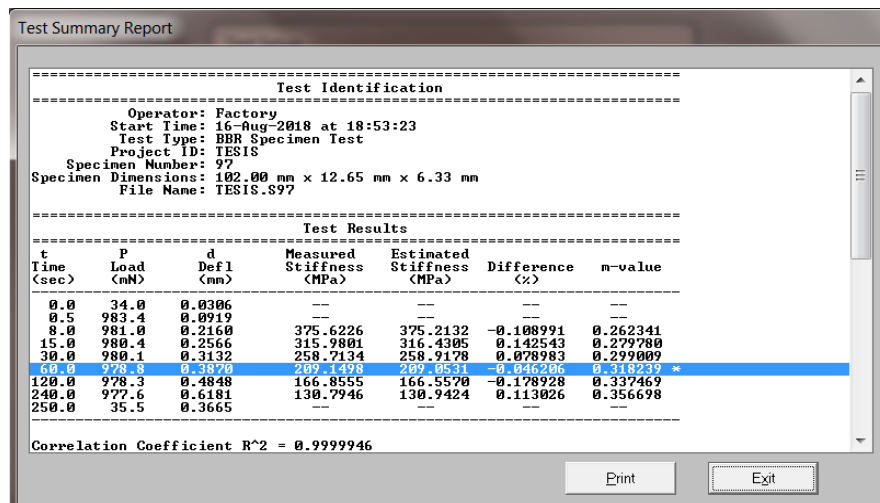
Gráfica del Asfalto 2 con 5% de Aceite (-18°C)



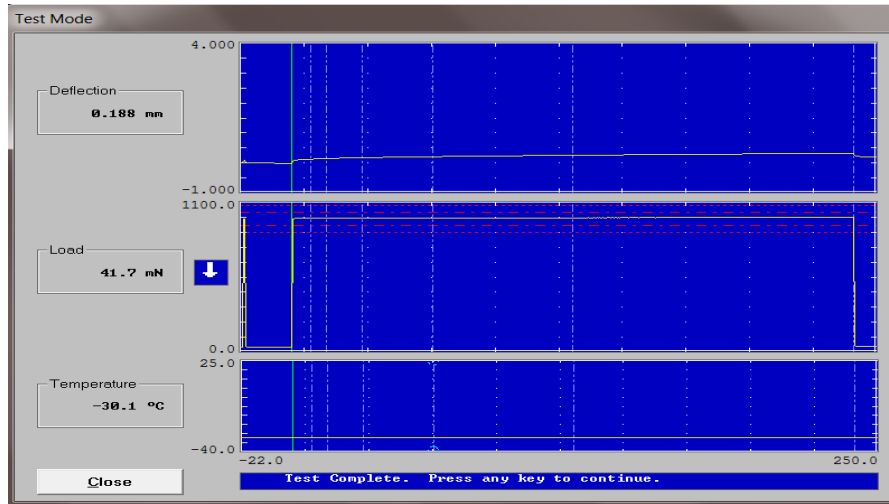
Asfalto 2 con 5% de Aceite (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 5% de Aceite (-24°C)



Asfalto 2 con 5% de Aceite (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 5% de Aceite (-30°C)

Test Summary Report

----- Test Identification -----

Operator: Factory  
 Start Time: 19-Aug-2018 at 17:12:35  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 110  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S110

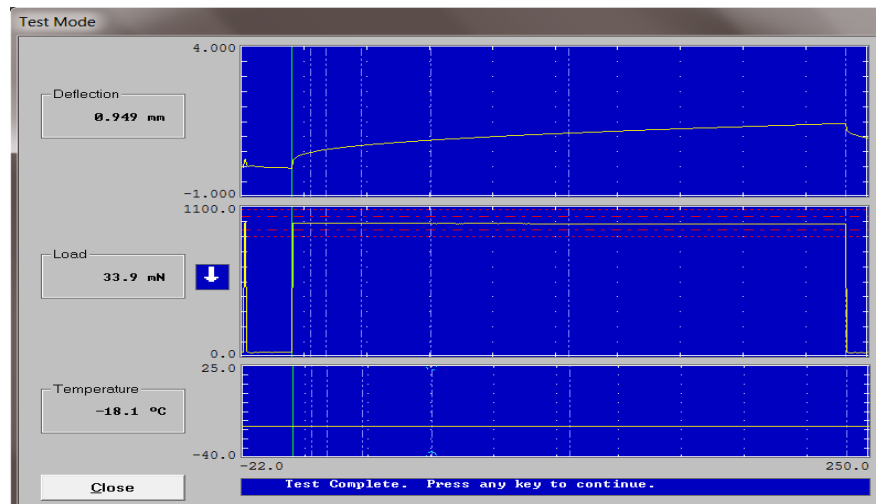
----- Test Results -----

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	37.6	0.0091	--	--	--	--
0.5	979.6	0.0728	--	--	--	--
8.0	981.0	0.1288	629.8837	629.1619	-0.114584	0.216179
15.0	981.5	0.1490	544.0093	546.0313	0.224295	0.234697
30.0	981.8	0.1761	461.0717	460.7294	-0.063392	0.255117
60.0	983.5	0.2120	383.6844	383.3732	-0.055051	0.275537 *
120.0	986.3	0.2592	314.5920	314.4875	-0.033225	0.295956
240.0	989.7	0.3219	254.2462	254.3538	0.042324	0.316376
250.0	41.7	0.1883	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999937

Print Exit

Asfalto 2 con 5% de Aceite (-30°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 18-Aug-2018 at 15:20:04  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 99  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S99

---

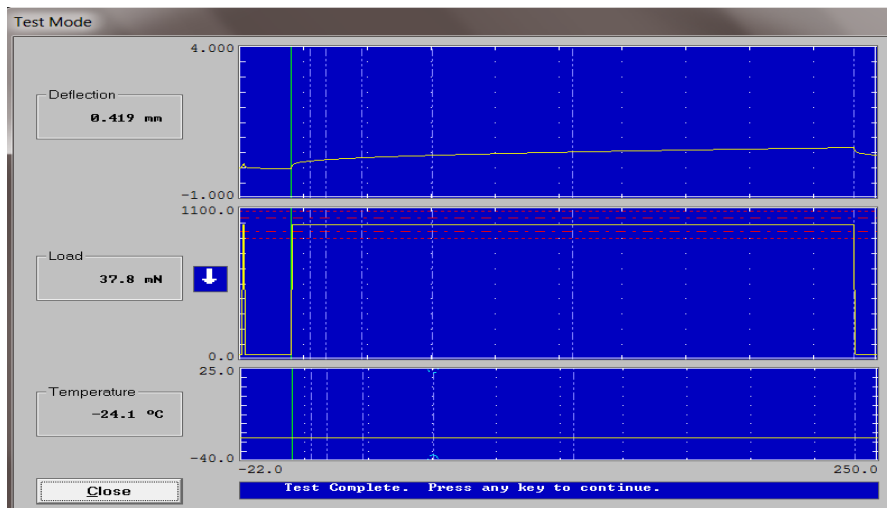
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	35.4	0.0387	---	---	---	---
0.5	979.0	0.1961	---	---	---	---
8.0	975.1	0.4780	168.6869	168.3994	-0.170307	0.278679
15.0	976.7	0.5756	140.3165	140.5813	0.188757	0.295773
30.0	976.2	0.7111	113.5168	113.7769	0.229182	0.314622
60.0	974.6	0.8851	91.0550	90.8880	-0.183452	0.333471 *
120.0	972.7	1.1197	71.8314	71.6613	-0.236769	0.352320
240.0	970.3	1.4411	55.6717	55.7685	0.173855	0.371169
250.0	33.9	0.9486	---	---	---	---

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999863

Print    Exit

Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 16-Aug-2018 at 18:22:45  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 95  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S95

---

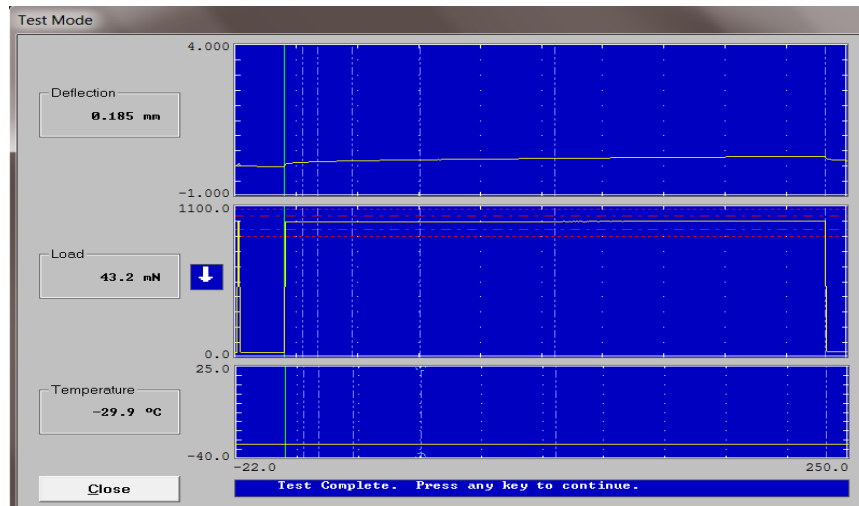
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	37.2	0.0227	---	---	---	---
0.5	979.8	0.0997	---	---	---	---
8.0	977.5	0.2316	348.9822	348.6362	-0.099166	0.262401
15.0	977.3	0.2754	293.3658	293.8577	0.167699	0.281446
30.0	978.2	0.3370	240.0203	240.0228	0.001067	0.302446
60.0	976.5	0.4111	192.2936	192.2194	-0.038203	0.322379 *
120.0	977.6	0.5269	153.4012	153.2915	-0.071495	0.344448
240.0	976.6	0.6741	119.7868	119.8583	0.059666	0.365448
250.0	37.8	0.4194	---	---	---	---

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999969

Print    Exit

Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

----- Test Identification -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 19-Aug-2018 at 17:51:14  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: IESIS  
 Specimen Number: 109  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: IESIS.S109  
 -----

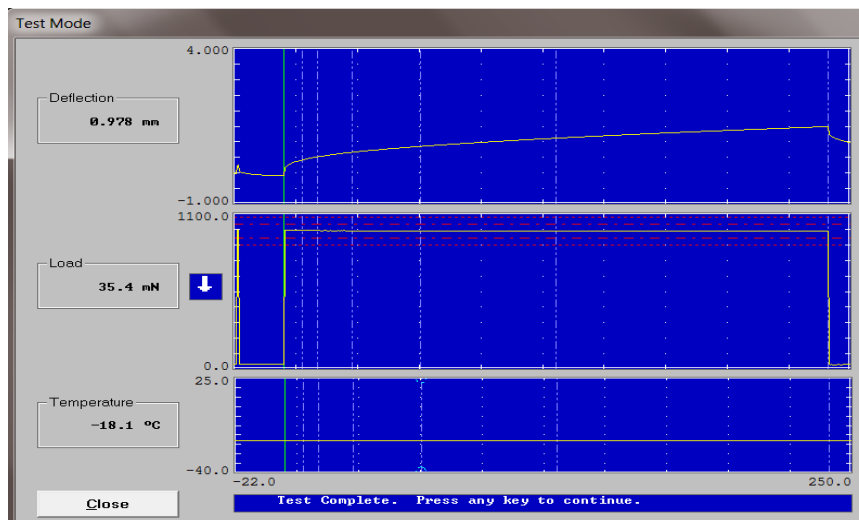
----- Test Results -----

t Time (sec)	P Load (nN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	36.9	0.0139	--	--	--	--
0.5	981.7	0.0653	--	--	--	--
8.0	982.3	0.1237	656.7610	655.8134	-0.144289	0.223130
15.0	982.4	0.1436	565.6659	566.3148	0.114720	0.243698
30.0	983.8	0.1719	473.2731	474.5523	0.270296	0.266377
60.0	982.4	0.2000	391.8014	371.4592	-0.141514	0.269054*
120.0	985.7	0.2556	318.9331	317.8742	-0.332017	0.311735
240.0	990.3	0.3229	253.5744	254.0974	0.206249	0.334414
250.0	43.2	0.1855	--	--	--	--

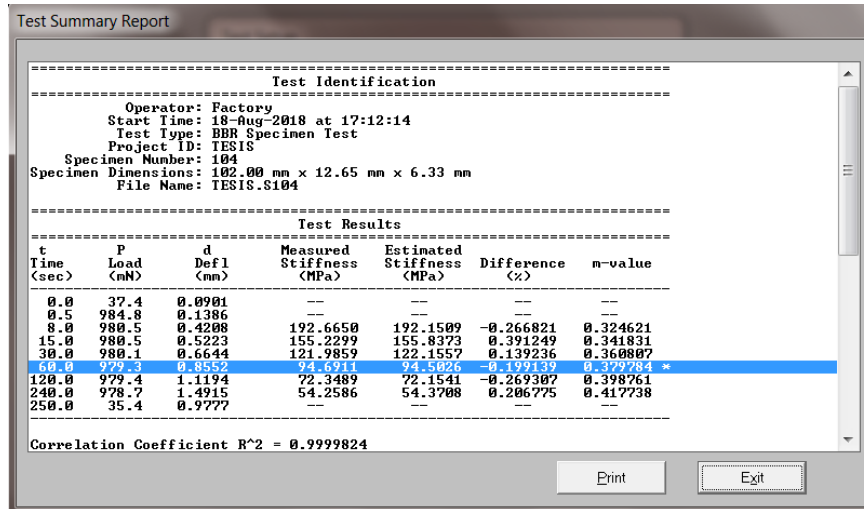
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999786

Print Exit

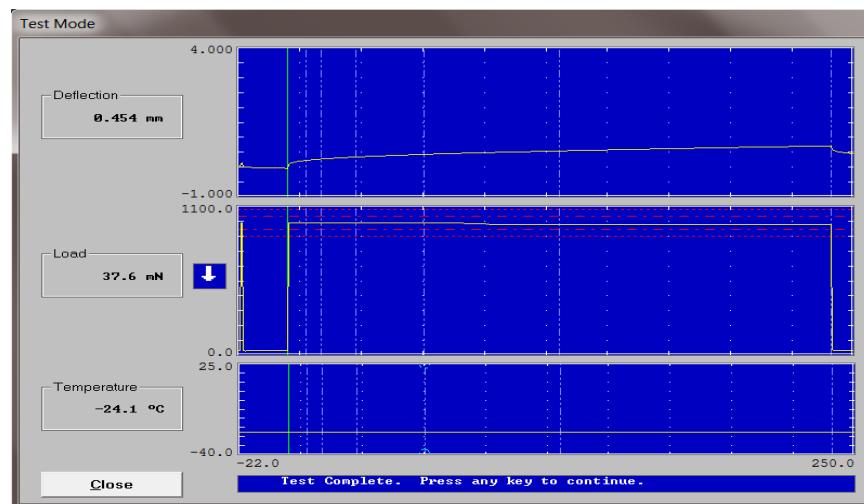
Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad (-30°C)



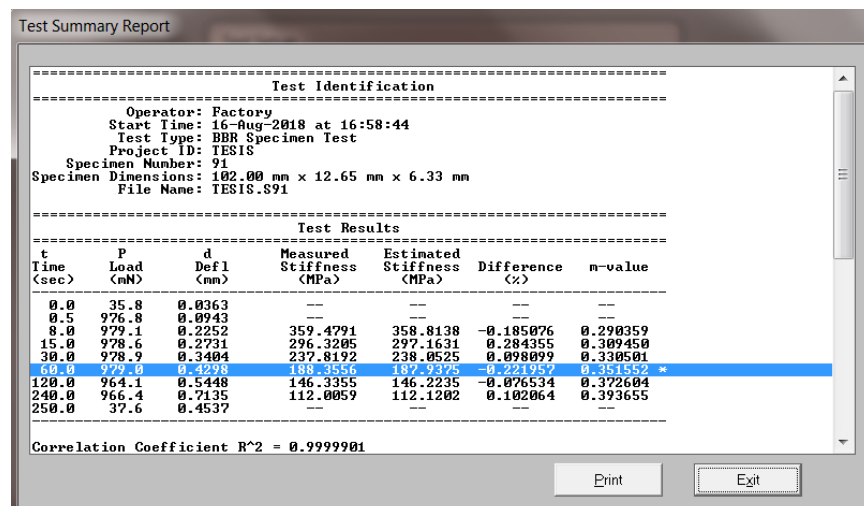
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-18°C)



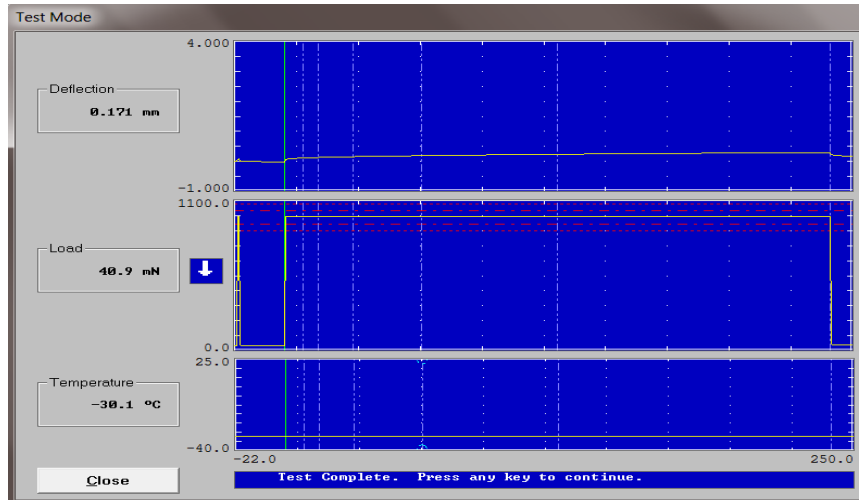
Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-24°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 19-Aug-2018 at 18:55:20  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 112  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S112

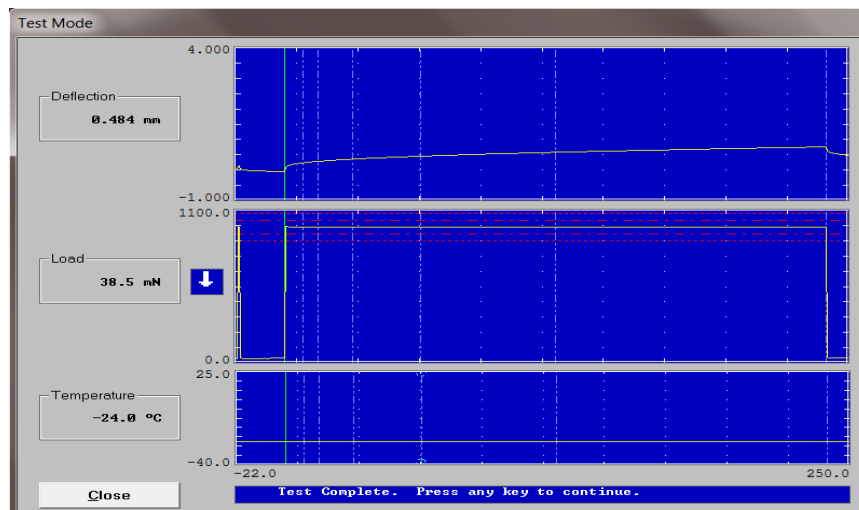
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	36.0	0.0127	--	--	--	--
0.5	982.9	0.0616	--	--	--	--
8.0	981.7	0.1148	706.8464	708.5654	0.243188	0.224037
15.0	981.5	0.1318	615.9234	611.5315	-0.713062	0.244540
30.0	981.5	0.1596	508.5610	512.1559	0.706871	0.267148
60.0	981.5	0.1919	422.8840	422.2600	-0.147560	0.289755 *
120.0	982.2	0.2366	343.2349	342.7300	-0.147092	0.312363
240.0	985.5	0.2977	273.6807	273.8538	0.063228	0.334971
250.0	40.9	0.1709	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999131

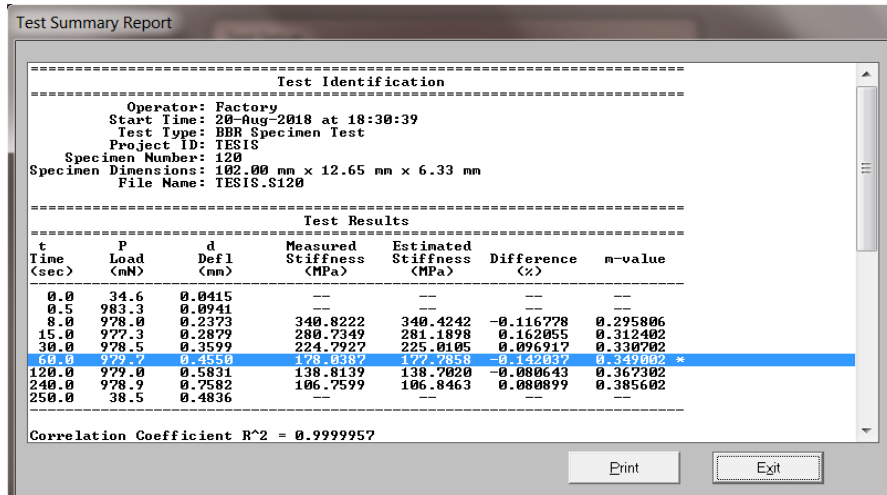
Print Exit

Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)

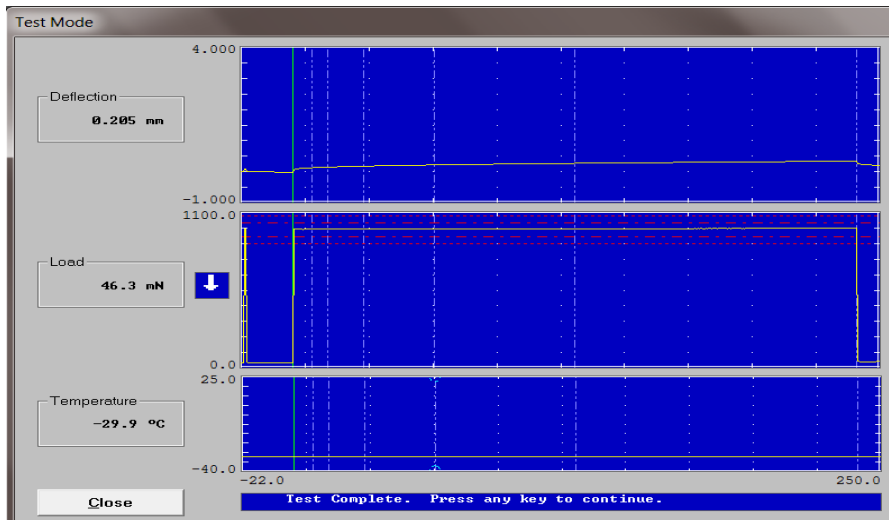


Gráfica del Asfalto 2 con 5% de Sylvaroad (-24°C)

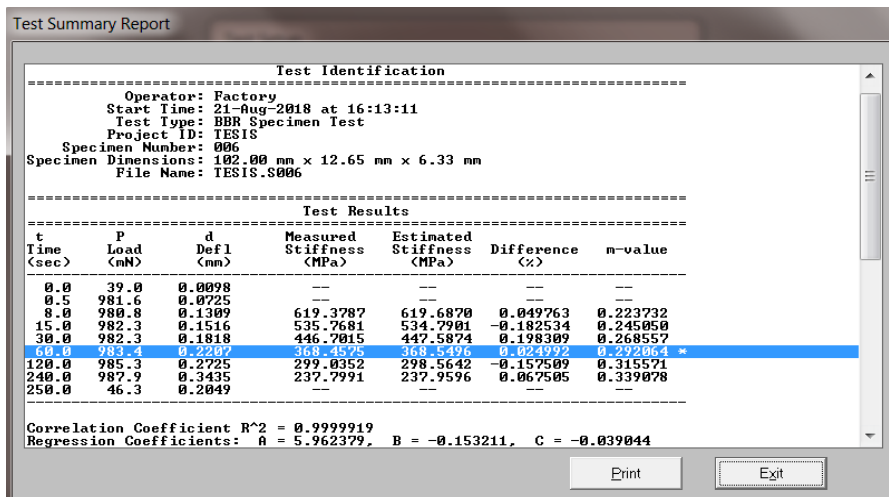




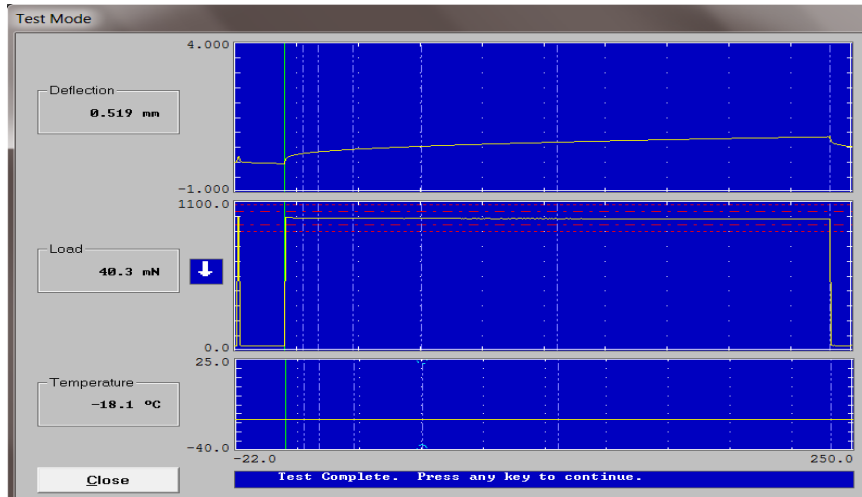
Asfalto 2 con 5% de Sylvaroad (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad (-30°C)



Gráfica del Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-18°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 18-Jul-2018 at 19:03:16  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: IESIS  
 Specimen Number: 55  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.34 mm  
 File Name: IESIS.S55

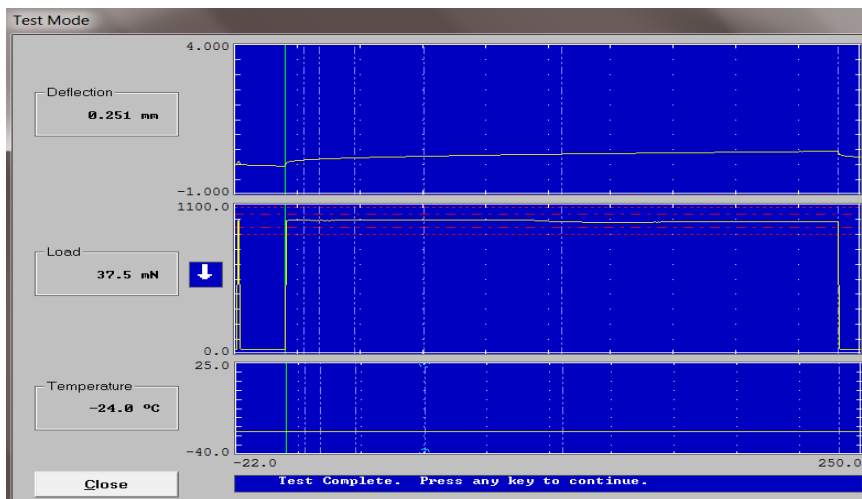
Test Results

Time (sec)	Load (nN)	Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	39.0	0.0405	---	---	---	---
0.5	982.4	0.1213	---	---	---	---
8.0	978.9	0.2972	271.1020	270.8733	-0.084341	0.273769
15.0	977.0	0.3546	226.7430	226.9814	0.105177	0.288689
30.0	975.5	0.4350	184.5803	184.7610	0.097884	0.305140
60.0	974.8	0.5389	148.8604	148.6887	-0.115398	0.321591 *
120.0	974.2	0.6772	118.3840	118.3023	-0.069019	0.338042
240.0	972.1	0.8602	92.9972	93.0585	0.065947	0.354493
250.0	40.3	0.5193	---	---	---	---

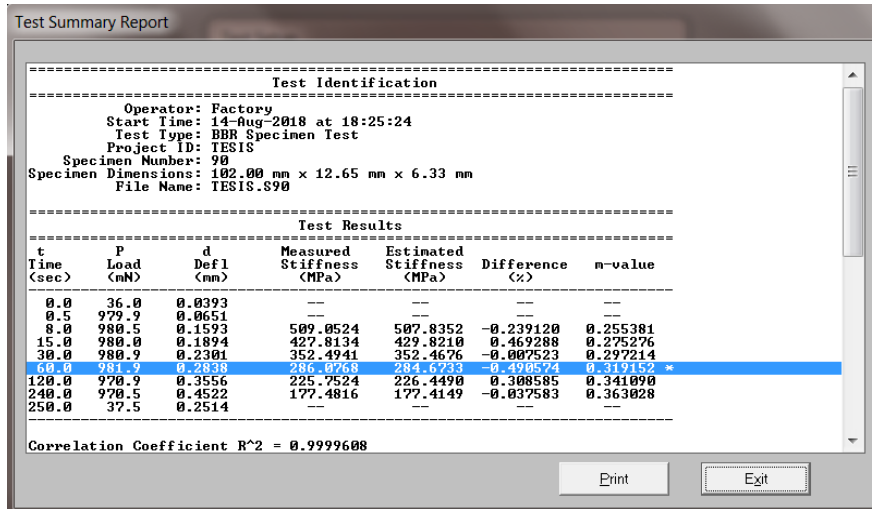
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999969

Print Exit

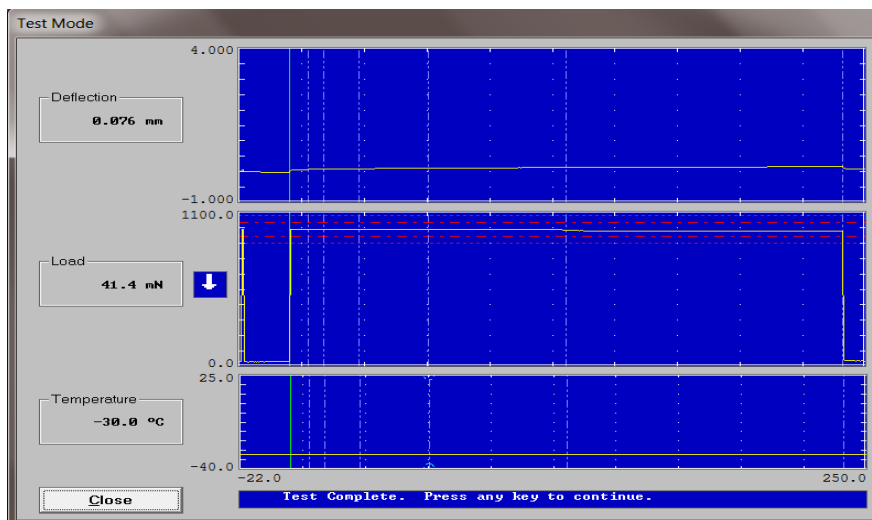
Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-18°C)



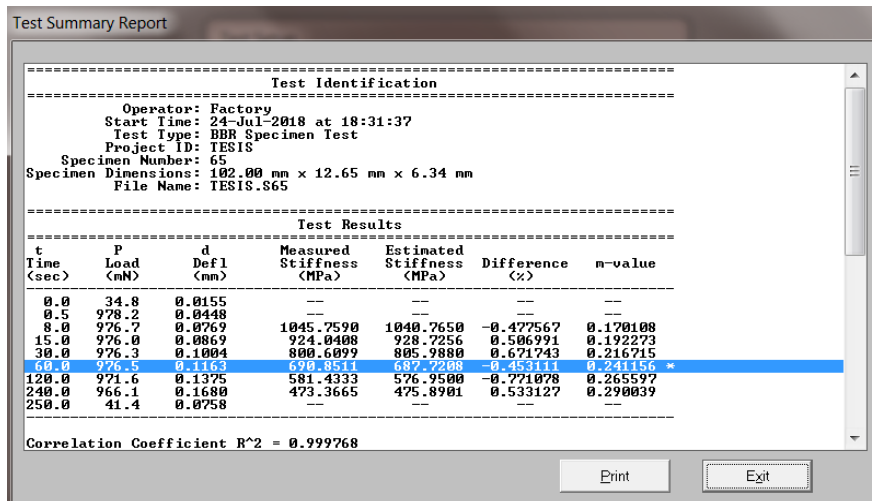
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-24°C)



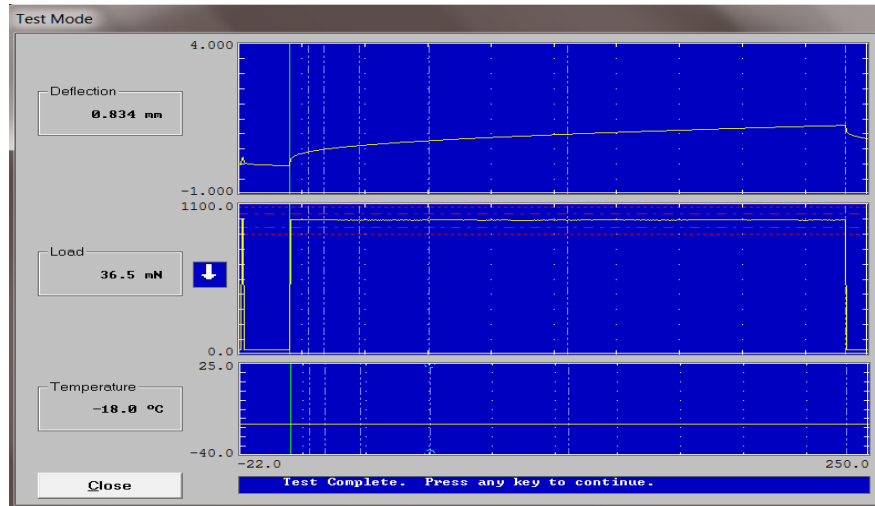
Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-30°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)

Test Summary Report

-----  
**Test Identification**  
 -----  
 Operator: Factory  
 Start Time: 10-Aug-2018 at 15:41:50  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 80  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S80  
 -----

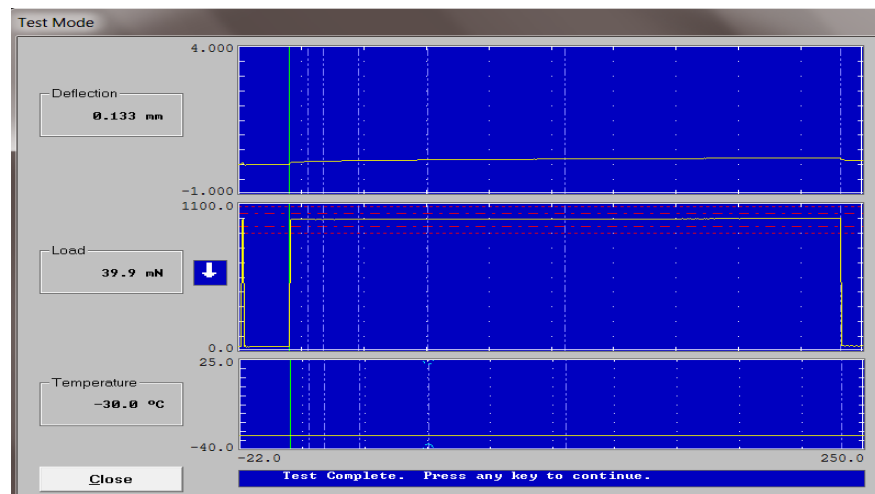
**Test Results**

t (sec)	P (mN)	d (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	36.7	0.0455	--	--	--	--
0.5	982.0	0.1654	--	--	--	--
8.0	982.0	0.4056	200.1698	199.8871	-0.141282	0.299218
15.0	981.3	0.4932	164.5048	164.8481	0.208690	0.313972
30.0	980.6	0.6154	131.7642	131.8621	0.074320	0.330241
60.0	980.3	0.7253	104.4176	104.2289	-0.180445	0.346510 *
120.0	980.1	0.9223	81.6671	81.5643	-0.125910	0.362780
240.0	980.5	1.2867	63.0080	63.0730	0.103175	0.379049
250.0	36.5	0.8345	--	--	--	--

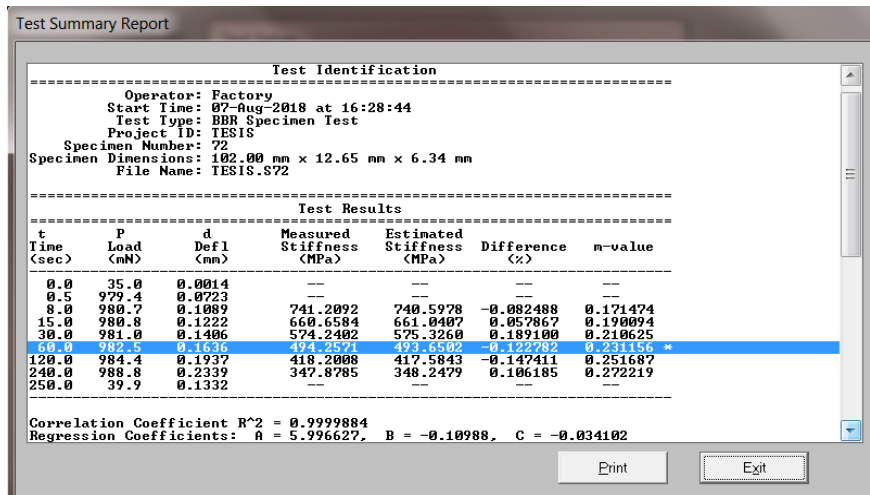
Correlation Coefficient R^2 = 0.9999942

Print Exit

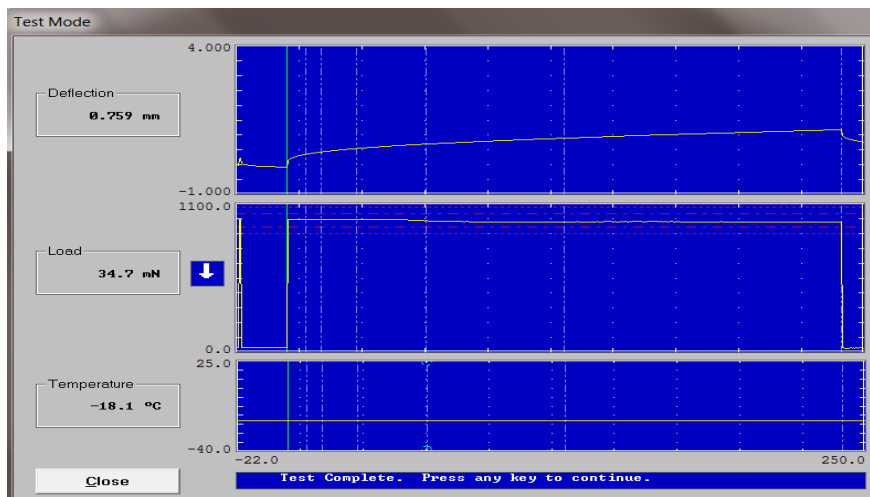
Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



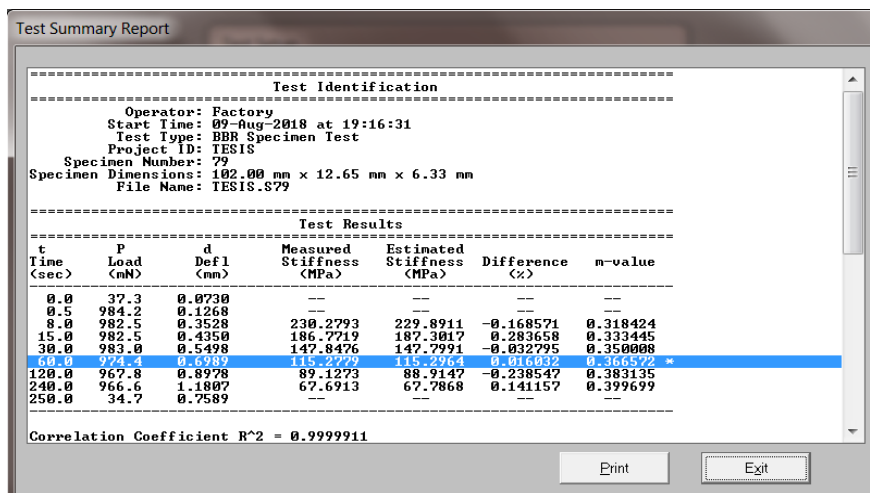
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



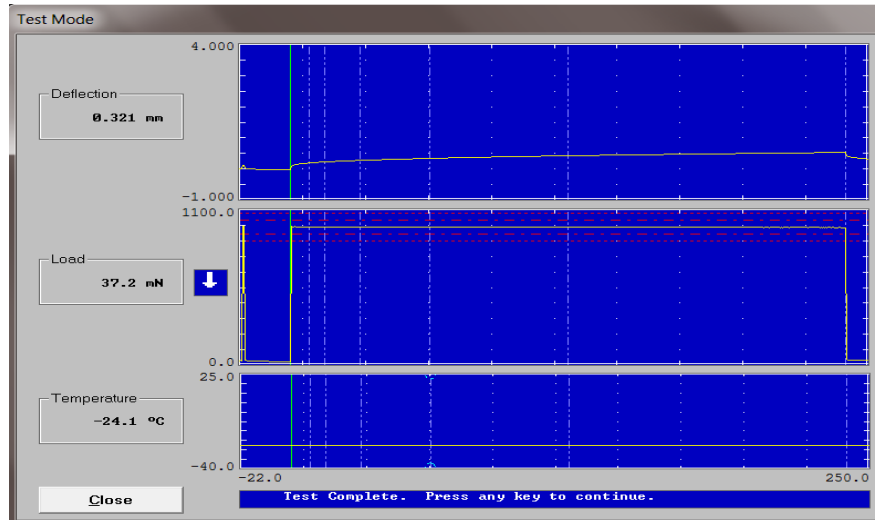
Asfalto 2 con 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 20-Aug-2018 at 19:14:22  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 125  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S125

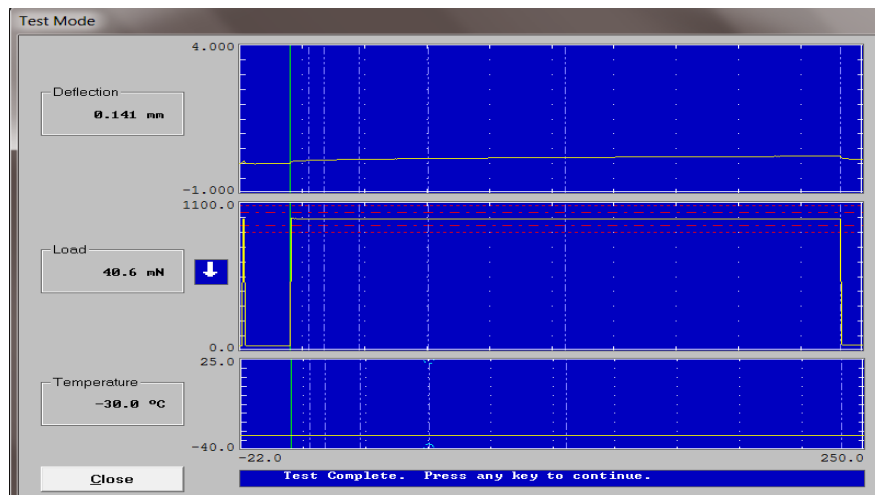
Test Results

Time (sec)	P (mN)	d (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	24.2	0.0245	---	---	---	---
0.5	981.4	0.0919	---	---	---	---
8.0	975.6	0.1932	417.5821	416.9631	-0.148229	0.258184
15.0	975.2	0.2293	351.6971	352.8218	0.319800	0.273259
30.0	975.8	0.2775	290.7471	290.2648	-0.165900	0.289881
60.0	976.4	0.3420	236.0597	236.0638	0.004252	0.306504 *
120.0	976.2	0.4251	189.8976	189.7844	-0.059649	0.323127
240.0	973.6	0.5340	150.7538	150.8299	0.050515	0.339750
250.0	37.2	0.3207	---	---	---	---

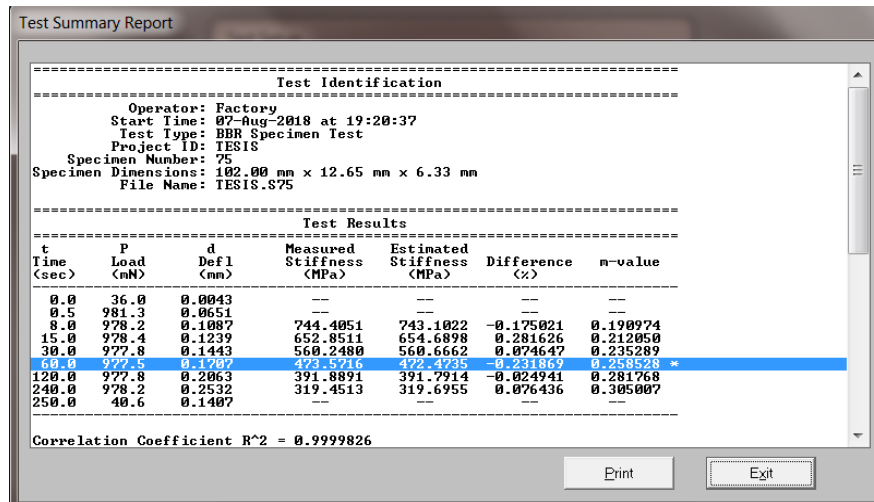
Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999892  
 Regression Coefficients: A = 5.830743, B = -0.208316, C = -0.02761

Print Exit

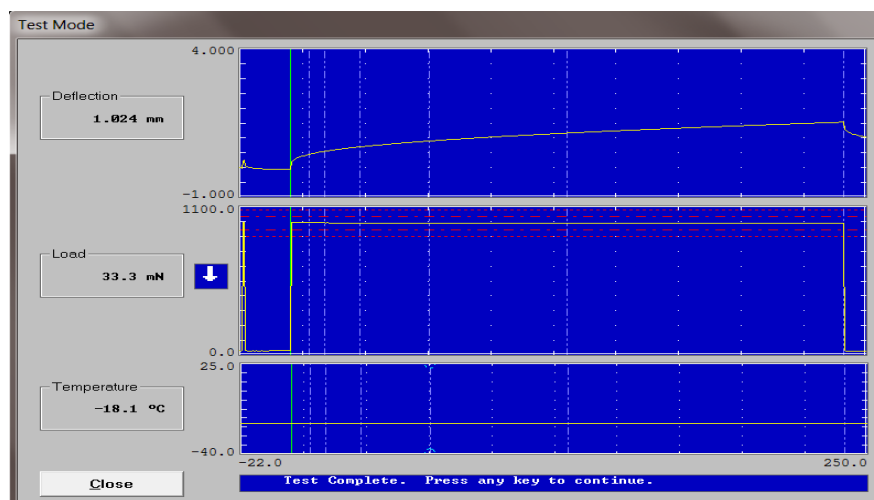
Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



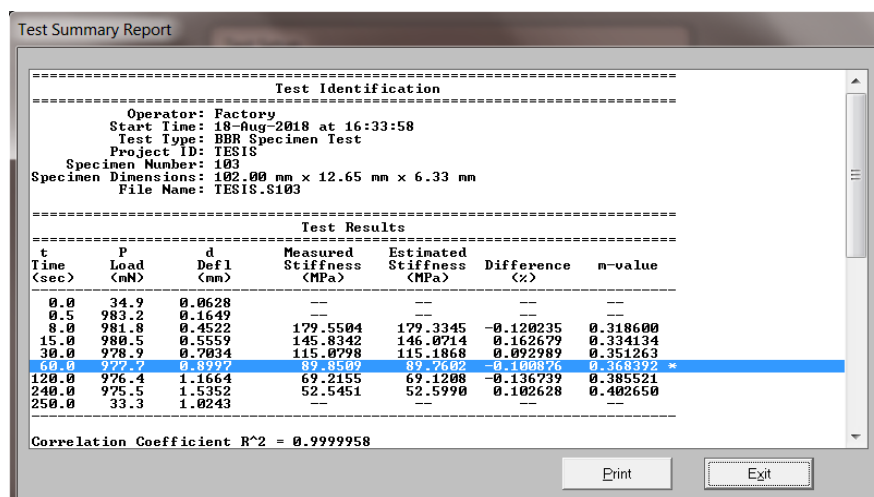
Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



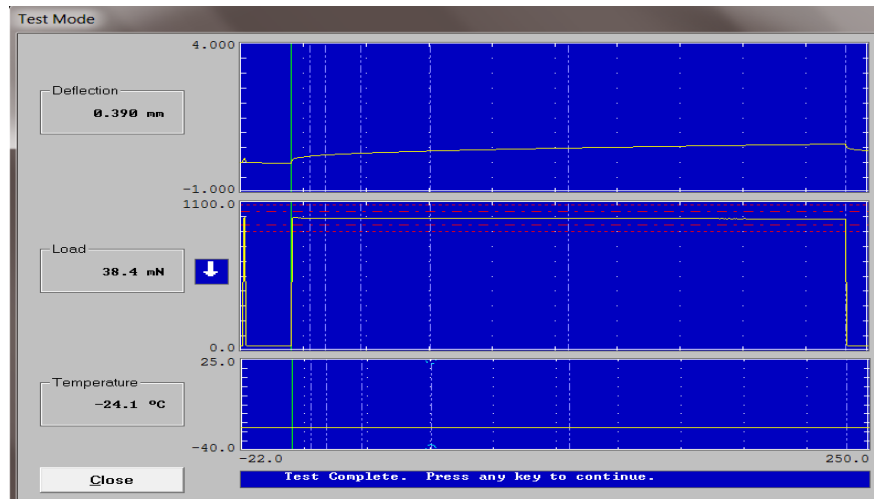
Asfalto 2 con 2% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 16-Aug-2018 at 18:37:50  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 96  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S96

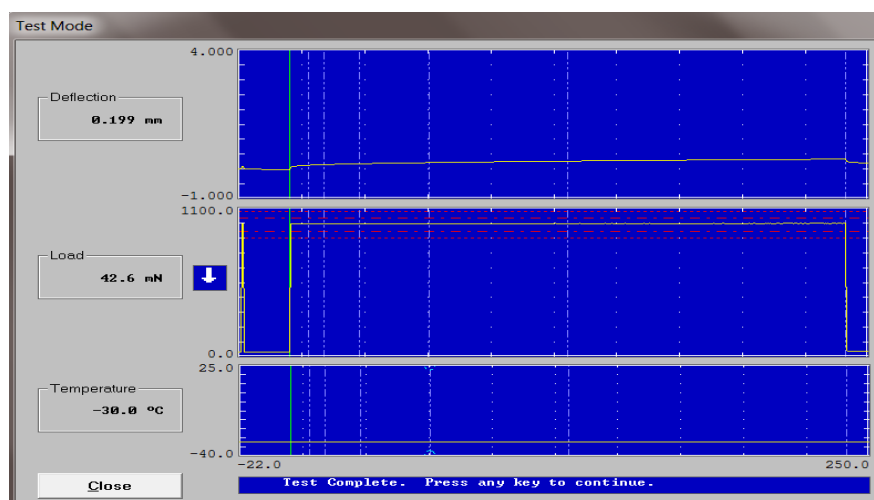
Test Results

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	n-value
0.0	37.1	0.0181	--	--	--	--
0.5	980.1	0.0928	--	--	--	--
8.0	978.9	0.2130	380.0175	379.3181	-0.184021	0.268763
15.0	978.4	0.2547	317.6035	318.5907	0.310826	0.286330
30.0	978.2	0.3118	259.3845	259.4918	0.041354	0.305701
60.0	978.43	0.3303	200.9974	200.5669	-0.209663	0.302501 *
120.0	976.1	0.4880	165.3865	165.3526	-0.020459	0.344442
240.0	973.3	0.6226	129.2673	129.3624	0.073564	0.363813
250.0	38.4	0.3899	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999886

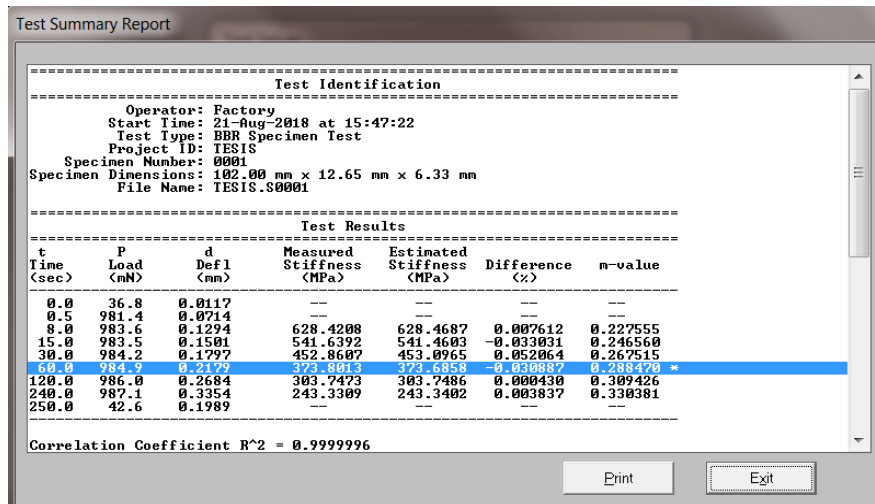
Print Exit

Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)

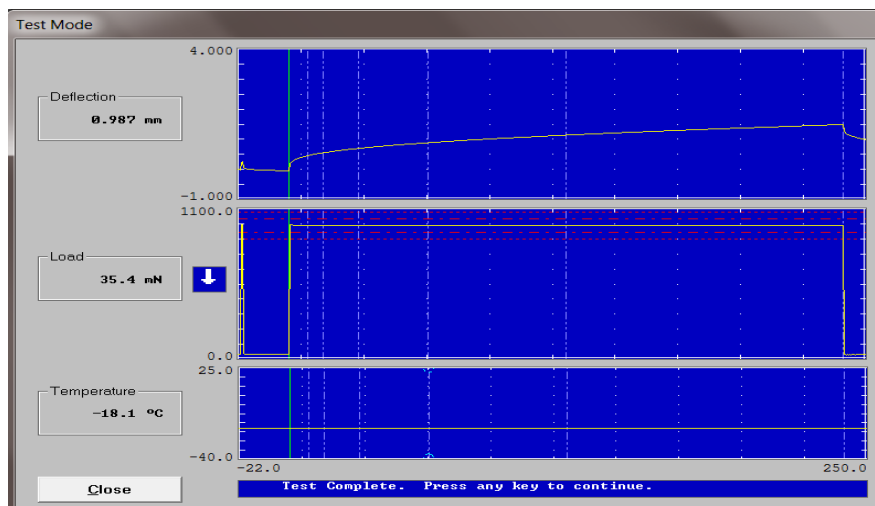


Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)

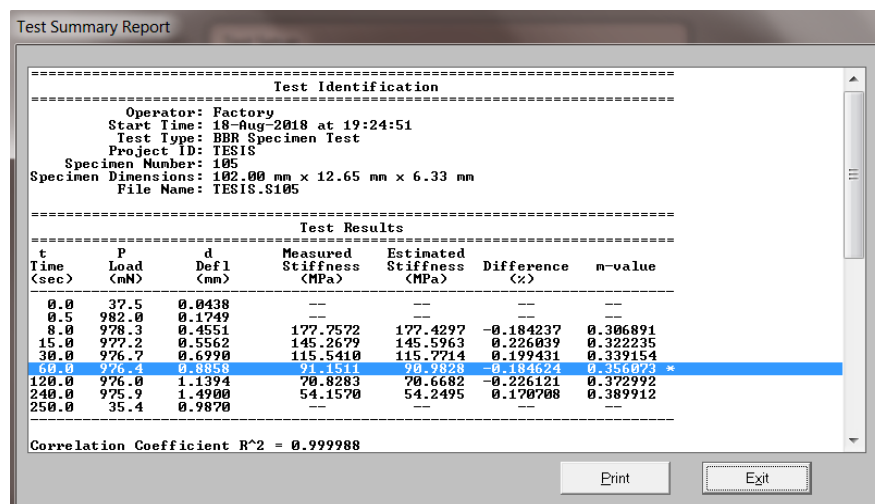




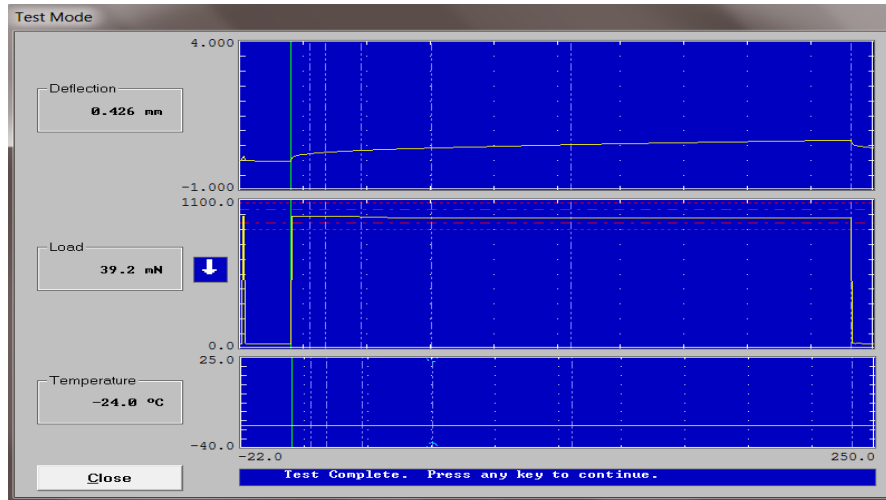
Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Asfalto 2 con 2% de Aceite + 3% de Sylvaroad, Réplica (-18°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)

Test Summary Report

Test Identification

Operator: Factory  
 Start Time: 16-Aug-2018 at 17:19:06  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 92  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S92

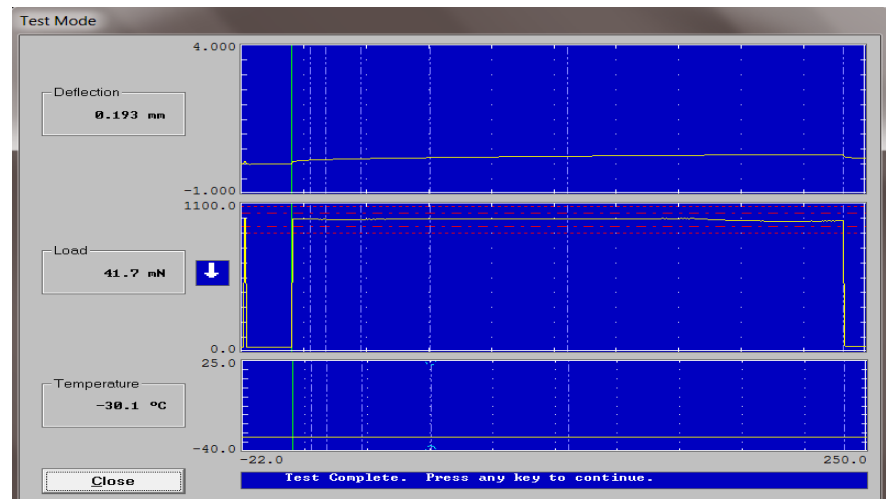
Test Results

t (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	38.4	0.0329	--	--	--	--
0.5	978.4	0.0950	--	--	--	--
8.0	978.4	0.2303	351.2836	350.4018	-0.251023	0.273040
15.0	978.3	0.2769	292.1875	293.4148	0.420040	0.291677
30.0	973.5	0.3382	238.0252	238.0045	-0.008696	0.312228
60.0	965.7	0.4119	191.9949	190.8273	-0.627570	0.332770
120.0	966.0	0.5310	150.4363	150.0489	-0.257523	0.353329
240.0	965.1	0.6855	116.4132	116.6211	0.178591	0.373879
250.0	39.2	0.4257	--	--	--	--

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.99998

Print Exit

Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-24°C)



Gráfica del Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)

Test Summary Report

---

**Test Identification**

---

Operator: Factory  
 Start Time: 19-Aug-2018 at 19:28:23  
 Test Type: BBR Specimen Test  
 Project ID: TESIS  
 Specimen Number: 113  
 Specimen Dimensions: 102.00 mm x 12.65 mm x 6.33 mm  
 File Name: TESIS.S113

---

**Test Results**

---

t Time (sec)	P Load (mN)	d Defl (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
0.0	38.2	0.0021	--	--	--	--
0.5	981.5	0.0787	--	--	--	--
8.0	980.6	0.1344	603.1711	602.0021	-0.193800	0.204184
15.0	980.5	0.1546	524.5258	525.9642	0.274217	0.225425
30.0	980.6	0.1819	445.6370	446.2426	0.135909	0.248847
60.0	981.1	0.2142	372.8293	372.3107	-0.136802	0.232253
120.0	984.8	0.2657	306.4656	305.9487	-0.168674	0.295691
240.0	968.4	0.3244	246.8795	247.2357	0.144312	0.319114
250.0	41.7	0.1932	--	--	--	--

---

Correlation Coefficient R<sup>2</sup> = 0.9999807

Print      Exit

Asfalto 2 con 3% de Aceite + 2% de Sylvaroad, Réplica (-30°C)



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Farah Castillo, María Fernanda**, con C.C: # 0950465294 autora del trabajo de titulación: **Mejora de la calidad de los asfaltos ecuatorianos mediante la adición de aceites y rejuvenecedores** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro 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.- Autorizo 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, **14** de Septiembre del **2018**

---

Nombre: **Farah Castillo, María Fernanda**

C.C: **0950465294**



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	MEJORA DE LA CALIDAD DE LOS ASFALTOS ECUATORIANOS MEDIANTE LA ADICIÓN DE ACEITES Y REJUVENECEDORES.		
<b>AUTOR(ES)</b>	María Fernanda Farah Castillo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Rolando Vila Romaní		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago De Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	14 de Septiembre de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	157
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	PAVIMENTOS		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	<i>Rejuvenecedores, Sylvaroad, aditivos, viscosidad, Superpave, ligantes asfálticos, <math>\Delta T_c</math>, temperatura, envejecimiento.</i>		
<p><b>RESUMEN:</b> En el presente trabajo de investigación se evalúa la utilización de un aceite industrial de producción nacional y el aditivo rejuvenecedor Sylvaroad mezclado en diferentes proporciones con los asfaltos que produce la Refinería de Esmeraldas: PG 64-22 y PG 64-28, con vista a mejorar el desempeño de los mismos luego de envejecidos a las temperaturas intermedias.</p> <p>Las proporciones y combinaciones correspondientes se obtuvieron de un diseño experimental de mezclado de acuerdo al programa Statgraphics. Para cada combinación se efectuaron una serie de ensayos de laboratorio: viscosidad del asfalto original, viscosidad y ductilidad del asfalto envejecido en el horno de película delgada y adicionalmente el parámetro <math>\Delta T_c</math> asociado a la durabilidad de las mezclas asfálticas en obra.</p> <p>A partir de los resultados obtenidos de las 15 combinaciones para cada tipo de asfalto, se realizaron comparaciones para determinar el impacto de los aditivos empleados y sus proporciones en la mejora de los asfaltos ecuatorianos envejecidos.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-986433699	E-mail: maferfarah@gmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Clara Glas Cevallos		
	<b>Teléfono:</b> +593-4 -2206956		
	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			