



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Estudio preliminar sobre el uso del material recuperado de pavimento  
asfáltico (RAP) en mezclas calientes.**

**AUTORES**

**Tinoco Vasquez, Darwin Andres**

**Feijóo Malhaber, Jean Carlos**

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

**TUTOR:**

**ING. WALTER MERA INTRIAGO. M.Sc.**

**Guayaquil, Ecuador**

**2023**



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 **Tinoco Vásquez Darwin Andrés** y **Feijóo Malhaber Jean Carlos** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

**Tutor**



WALTER ANTONIO MERA  
INTRIAGO

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

**Ing. Walter Mera Intriago. M.Sc.**

DECAÑO

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

**Ing. Federico von Buchwald de Janon, Ph.D.**

**Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Feijóo Malhaber Jean Carlos** y **Tinoco Vásquez Darwin Andrés**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación: **Estudio preliminar sobre el uso del material recuperado de pavimento asfáltico (RAP) en mezclas calientes**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

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

**Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023**

**EL AUTOR**

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

**Feijóo Malhaber Jean Carlos**

**EL AUTOR**

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

**Tinoco Vásquez Darwin Andrés**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Feijóo Malhaber Jean Carlos** y **Tinoco Vásquez Darwin Andrés**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Estudio preliminar sobre el uso del material recuperado de pavimento asfáltico (RAP) en mezclas calientes**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023**

**EL AUTOR**

**EL AUTOR**

f. 

**Feijóo Malhaber Jean Carlos**

f. 

**Tinoco Vásquez Darwin Andrés**

# URKUND

## Document Information

Analyzed document	TESIS FEIJOO Y TINOCO COMPLETA.docx (D159649326)
Submitted	2/28/2023 12:45:00 AM
Submitted by	
Submitter email	clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / TESIS WALTER MERA INTRIAGO Y KEVIN ICAZA PRECIADO.docx</b> Document: TESIS WALTER MERA INTRIAGO Y KEVIN ICAZA PRECIADO.docx (D41018981) Submitted by: rebeca.gonzalez@cu.ucsg.edu.ec Receiver: rolando.vila.ucsg@analysis.orkund.com	 7
<b>SA</b>	<b>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / Tesis de Omar Peña FINAL.pdf</b> Document: Tesis de Omar Peña FINAL.pdf (D158292861) Submitted by: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec Receiver: clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/amp/147057181-Facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-civil.html">https://docplayer.es/amp/147057181-Facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-civil.html</a> Fetched: 1/13/2020 9:40:35 PM	 9
<b>SA</b>	<b>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / TRABAJO DE TITULACIÓN - EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN SIERRA (GA RCÉS) . final.docx</b> Document: TRABAJO DE TITULACIÓN - EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN SIERRA (GA RCÉS) . final.docx (D21578176) Submitted by: iifiuc.ucatolica@cu.ucsg.edu.ec Receiver: rolando.vila.ucsg@analysis.orkund.com	 3

## Entire Document

INCLUDEPICTURE \*  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo\\_UCSG.svg/2000px-Logo\\_UCSG.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo_UCSG.svg/2000px-Logo_UCSG.svg.png) \\*  
MERGEFORMATINET INCLUDEPICTURE  
\*[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo\\_UCSG.svg/2000px-Logo\\_UCSG.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo_UCSG.svg/2000px-Logo_UCSG.svg.png) \\*  
MERGEFORMATINET INCLUDEPICTURE  
\*[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo\\_UCSG.svg/2000px-Logo\\_UCSG.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo_UCSG.svg/2000px-Logo_UCSG.svg.png) \\*  
MERGEFORMATINET INCLUDEPICTURE  
\*[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo\\_UCSG.svg/2000px-Logo\\_UCSG.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo_UCSG.svg/2000px-Logo_UCSG.svg.png) \\*  
MERGEFORMATINET  
INCLUDEPICTURE \*  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo\\_UCSG.svg/2000px-Logo\\_UCSG.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Logo_UCSG.svg/2000px-Logo_UCSG.svg.png) \\*  
MERGEFORMATINET

## **AGRADECIMIENTO**

Primero que nada quiero agradecer inmensamente a Dios y a mis padres Marco Feijóo y Fabiola Malhaber que confiaron en mi desde un principio y fueron un pilar fundamental en todo este camino, a mi papá que con el esfuerzo y dedicación de su trabajo logro sacarme adelante y estuvo pendiente para que nunca me falte nada, a mi mamá que siempre estaba presente subiéndome los ánimos cuando algo salía mal y aunque ya era un adulto seguía ordenándome la ropa y haciéndome la maleta cada domingo que tenía que regresar a la Universidad, gracias a todo su empeño ahora puedo decir que soy Ingeniero.

También quiero agradecer a mi hermano Marco Fabián por ser tan generoso y haberme dado la mano con mi carrera en ciertos momentos donde más se lo necesitaba, y a mi hermana María Fabiola por siempre estar presente a la distancia más que sea con un mensaje o con un video de nuestra perrita que tanto queremos.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio Andrés Tinoco y Omar Peña por hacer que el trabajo resulte mucho más sencillo y más ameno. A nuestro tutor el Ing. Walter Mera, a la Ing. María Fernanda Márquez y al Dr. Rolando Vila, ya que gracias a sus conocimientos y experiencia pudieron brindarnos su ayuda en todo momento y lograron que cumplamos con nuestro objetivo.

Por último, quiero agradecer a mi novia por haber sido mi compañera y mejor amiga desde que inicie todo este proceso; a todos mis familiares y a todas las personas que me ayudaron a seguir adelante a lo largo de este camino, en especial al Ing. Renato Parodi, que supo guiarme en uno de los momentos más difíciles que pase en la Universidad.

**Jean Carlos Feijóo Malhaber.**

En primer lugar, le agradezco a Dios por permitirme cumplir este objetivo, ya que sin Él nada sería posible.

Agradezco a mis padres por toda la ayuda incondicional que me brindaron, los cuales fueron un ejemplo de superación y motivación, para alcanzar esta meta.

También le agradezco a mis familiares, amigos y todas aquellas personas que hicieron posible este éxito personal.

**Andrés Tinoco Vásquez.**

## **DEDICATORIA**

Este logro va dedicado a mis padres Marco Feijóo y Fabiola Malhaber, ya que desde pequeño han sido la luz que guía mi camino para tomar las decisiones correctas, y sin su constante apoyo y esfuerzo nada de esto sería posible, gracias por darme el privilegio de decir que hoy en día soy Ingeniero.

Pero en especial este trabajo se lo quiero dedicar a mi abuelita mi mamita Enma y a un angelito, mi papito lucho que le toco partir justo cuando yo estaba haciendo este trabajo de tesis, y aunque fue un golpe muy duro para mí ya que siempre le prometí que estaría en primera fila cuando sea el día de mi graduación, sé que desde el cielo cuida cada uno de mis pasos y que se sentirá muy orgulloso de este logro, al igual que mis abuelitos Bolívar Feijóo y Marina Valarezo. Que Dios los cuide y los tenga en su santa gloria.

**Jean Carlos Feijóo Malhaber.**

Este logro es dedicado a mis padres, ya que hicieron todo lo posible para que me convierta en profesional.

**Andres Tinoco Vasquez.**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TUTOR**



WALTER ANTONIO MERA  
INTRIAGO

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

Ing. Walter Mera Intriago. M.Sc.

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**DECAÑO**

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

**Ing. Federico von Buchwald de Janon, Ph.D.**

**DOCENTE DE LA CARRERA**



COLON GILBERTO  
MARTINEZ REHPANI

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

**Ing. Gilberto Martínez Rehpani, M.Sc.**

**OPONENTE**

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

**PhD. Rolando Vila Romani.**



# Índice

1	Capítulo.....	2
1.1	Introducción .....	2
1.1.1	Antecedentes.....	2
1.1.2	Justificación e importancia del tema.....	3
1.1.3	Objetivos.....	3
1.1.4	Alcance .....	4
1.1.5	Metodología.....	4
2	Marco Teórico .....	6
2.1	Mezclas Asfálticas .....	6
2.1.1	Generalidades.....	6
2.1.2	Características del asfalto .....	6
2.1.3	Características de los agregados en mezclas asfálticas .....	7
2.1.4	Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.....	9
2.1.5	Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura.....	12
2.2	RAP (Pavimento asfáltico reciclado).....	13
2.2.1	Generalidades.....	13
2.2.2	Aplicaciones.....	14
2.3	Rejuvenecedores.....	15
2.3.1	Generalidades.....	15
2.3.2	Características.....	16
2.3.3	Proceso de mezclado .....	16
2.3.4	Parámetros volumétricos de mezclas asfálticas .....	17
2.3.5	Parámetros de resistencia .....	20
2.4	Pruebas de desempeño con el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester).....	23
2.4.1	Generalidades.....	23
2.4.2	Ensayos con el NAT (Nottingham Asphalt Tester).....	23
3	Capítulo.....	25
3.1	Estudio experimental.....	25
3.1.1	Metodología de trabajo .....	25
3.1.2	Elaboración de especímenes.....	33
3.1.3	Distribución de Especímenes.....	40
3.1.4	Metodología de Saturación .....	41
4	Capítulo.....	43

4.1	Análisis de resultados.....	43
<b>4.1.1</b>	<b>Pruebas de desempeño</b> .....	43
<b>4.1.2</b>	<b>Daño en agua mediante TSR</b> .....	66
5	Capítulo.....	71
5.1	Conclusiones y Recomendaciones.....	71
<b>5.1.1</b>	<b>Conclusiones</b> .....	71
<b>5.1.2</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	72
6	Capítulo.....	73
6.1	Referencias.....	73
7	Capítulo.....	75
7.1	Anexos.....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación por Viscosidad .....	7
<b>Tabla 2.2</b> Porcentaje de pasantes para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador .....	18
<b>Tabla 3.1</b> Combinaciones de las mezclas asfálticas.....	25
<b>Tabla 3.2</b> Características de asfalto utilizado-Clasificación por viscosidad .....	26
<b>Tabla 3.3</b> Granulometría de los agregados.....	27
<b>Tabla 3.4</b> Granulometría combinada.....	28
<b>Tabla 3.5</b> Características del rejuvenecedor.....	29
<b>Tabla 3.6</b> Características del asfalto + rejuvenecedor.....	30
<b>Tabla 3.7</b> Chequeo granulométrico en agregados extraídos .....	30
<b>Tabla 3.8</b> Cálculo mediante el método del NCHRP 495 para la mezcla con el 10% de RAP.....	32
<b>Tabla 3.9</b> Cálculo mediante el método del NCHRP 495 para la mezcla con el 20% de RAP.....	33
<b>Tabla 3.10</b> Dosificación de materiales en mezcla patrón.....	38
<b>Tabla 3.11</b> Mezcla con el 10% de RAP .....	39
<b>Tabla 3.12</b> Contenido de Asfalto para el 10% de RAP .....	39
<b>Tabla 3.13</b> Mezcla con el 20% de RAP .....	40
<b>Tabla 3.14</b> Contenido de Asfalto para el 20% de RAP .....	40
<b>Tabla 4.1</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 1 .....	43
<b>Tabla 4.2</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 2 .....	44
<b>Tabla 4.3</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 3 .....	45
<b>Tabla 4.4</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 4 .....	46
<b>Tabla 4.5</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 5 .....	47
<b>Tabla 4.6</b> Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 6 .....	48
<b>Tabla 4.7</b> Valores promedio en las pruebas de Módulo de Rigidez .....	49
<b>Tabla 4.8</b> Resultados del ensayo Creep en la Combinación 1 .....	51
<b>Tabla 4.9</b> Resultados del ensayo Creep en la Combinación 2 .....	52
<b>Tabla 4.10</b> Resultados del ensayo Creep en la Combinación 3 .....	53
<b>Tabla 4.11</b> Resultados del ensayo Creep en la Combinación 4 .....	54

<b>Tabla 4.12</b>	Resultados del ensayo Creep en la Combinación 5 .....	55
<b>Tabla 4.13</b>	Resultados del ensayo Creep en la Combinación 6 .....	56
<b>Tabla 4.14</b>	Tabla de comparación del promedio en el ensayo Creep .....	57
<b>Tabla 4.15</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 1 .....	58
<b>Tabla 4.16</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 2 .....	59
<b>Tabla 4.17</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 3 .....	60
<b>Tabla 4.18</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 4 .....	61
<b>Tabla 4.19</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 5 .....	62
<b>Tabla 4.20</b>	Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 6 .....	63
<b>Tabla 4.21</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 1 .....	66
<b>Tabla 4.22</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 2 .....	66
<b>Tabla 4.23</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 3 .....	67
<b>Tabla 4.24</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 4 .....	67
<b>Tabla 4.25</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 5 .....	67
<b>Tabla 4.26</b>	Resultados de daño en agua en la Combinación 6 .....	68
<b>Tabla 4.27</b>	Comparación de las mezclas mediante el ensayo TSR .....	69

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 3.1</b> Curva de granulometría combinada .....	27
<b>Figura 3.2</b> Toma de agregados minerales de la cantera del Río Chimbo .....	28
<b>Figura 3.3</b> Curva granulométrica del RAP .....	31
<b>Figura 3.4</b> Cuarteo del RAP .....	31
<b>Figura 3.5</b> Curva granulométrica para la mezcla con el 10% de RAP .....	32
<b>Figura 3.6</b> Curva granulométrica para la mezcla con el 20% de RAP .....	33
<b>Figura 3.7</b> Agregados minerales en el horno .....	34
<b>Figura 3.8</b> Molde y bandeja con los agregados en el horno .....	34
<b>Figura 3.9</b> Calentamiento del asfalto a 150 °C .....	35
<b>Figura 3.10</b> Mezcla de los agregados con el asfalto .....	35
<b>Figura 3.11</b> Mezcla asfáltica en el horno a 135° C .....	36
<b>Figura 3.12</b> Elaboración de la briqueta .....	36
<b>Figura 3.13</b> Compactación de la briqueta .....	37
<b>Figura 3.14</b> Desmolde de briquetas .....	37
<b>Figura 3.15</b> Distribución de briquetas para cada ensayo .....	41
<b>Figura 3.16</b> Peso de la briqueta en seco .....	41
<b>Figura 3.17</b> Saturación de briquetas .....	42
<b>Figura 3.18</b> Baño maría de las briquetas.....	42
<b>Figura 4.1</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 1 .....	44
<b>Figura 4.2</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 2 .....	45
<b>Figura 4.3</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 3 .....	46
<b>Figura 4.4</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 4 .....	47
<b>Figura 4.5</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 5 .....	48
<b>Figura 4.6</b> Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 6 .....	49
<b>Figura 4.7</b> Gráfico de barras de los valores promedio de Módulo de Rigidez .....	50
<b>Figura 4.8</b> Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 1 .....	51
<b>Figura 4.9</b> Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 2.....	52
<b>Figura 4.10</b> Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 3.....	53
<b>Figura 4.11</b> Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 4.....	54

<b>Figura 4.12</b>	Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 5 .....	55
<b>Figura 4.13</b>	Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 6 .....	56
<b>Figura 4.14</b>	Gráfico comparativo de promedios en el ensayo Creep .....	57
<b>Figura 4.15</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 1 .....	59
<b>Figura 4.16</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 2 .....	60
<b>Figura 4.17</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 3 .....	61
<b>Figura 4.18</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 4 .....	62
<b>Figura 4.19</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 5 .....	63
<b>Figura 4.20</b>	Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 6 .....	64
<b>Figura 4.21</b>	Curva de fatiga de las diferentes combinaciones .....	65
<b>Figura 4.22</b>	Gráfico de barras de la resistencia a compresión .....	69
<b>Figura 4.23</b>	Comparación de los porcentajes de resistencia retenido .....	70

## RESUMEN

En los últimos años se ha generado conciencia sobre generar una economía circular, debido a esto, se promueve la reutilización de los pavimentos asfálticos deteriorados y retirados mediante fresado una vez que hayan cumplido con su periodo de servicio.

El objetivo del siguiente trabajo es evaluar el comportamiento a la fatiga y las deformaciones de mezclas asfálticas calientes confeccionadas con contenidos de RAP variables, mediante el empleo de pruebas dinámicas con el equipo NAT, así como el impacto del daño en agua mediante la resistencia a la tracción indirecta retenida, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.

Para el estudio, utilizamos un asfalto base ecuatoriano clasificado como AC-20, con y sin rejuvenecedor. Además, para la presente investigación se utilizó un diseño Marshall de mezcla asfáltica otorgado por una empresa local y que sus agregados son triturados y de origen aluvial. Al diseño se lo mezcló en porcentajes de 10 y 20% con una muestra de RAP con características conocidas. A las 6 mezclas se le aplicaron pruebas dinámicas de desempeño con el equipo NAT; módulo de rigidez, compresión cíclica uniaxial (Creep), fatiga y se evaluó el daño en agua (TSR).

La adición de RAP en bajas cantidades en mezclas asfálticas en caliente no alteró considerablemente el comportamiento de las mismas, siendo exclusivamente el parámetro del daño por agua aquel que sufrió un impacto negativo, las exigencias evaluadas están planteadas para mezclas convencionales por lo que el incumplimiento no condiciona la aplicación de este tipo de mezclas.

**Palabras Claves:** Asfalto, Mezcla asfáltica en caliente, RAP, Rejuvenecedor, NAT y Pruebas de desempeño

## ABSTRACT

In recent years, there has been a growing awareness of the need to generate a circular economy with regard to road construction materials. Because of this, the reuse of deteriorated asphalt pavements removed by milling the roads once they have completed their service life is promoted.

The objective of the following work is to evaluate the fatigue and deformation behavior of hot asphalt mixtures made with variable RAP contents, by means of dynamic tests with NAT equipment, as well as the impact of water damage by means of retained indirect tensile strength, which will allow comparisons to be made and their possible behaviors to be assessed.

For the study, an Ecuadorian base asphalt classified as AC-20, with and without rejuvenator, was used. In addition, as a starting point for the present investigation, a Marshall asphalt mix design provided by a local company was used, with crushed aggregates of alluvial origin. This design was mixed in percentages of 10 and 20% with a sample of RAP with known characteristics. Dynamic performance tests were applied to the 6 mixtures made with NAT equipment; stiffness modulus, uniaxial cyclic compression (Creep), fatigue and finally, water damage was evaluated by means of the TSR test.

From the results obtained, it can be highlighted that the addition of RAP in low quantities in hot asphalt mixtures did not considerably alter their behavior, being exclusively the water damage parameter the one that suffered a negative impact. However, it should be mentioned that most of the requirements evaluated were established for conventional mixes, so that failure to comply with them does not condition the application of this type of mixes, for example, in second-order roads.

**Key words:** Asphalt, Hot Mix Asphalt, RAP, Rejuvenator, NAT and Performance Tests.



# **1 Capítulo**

## **1.1 Introducción**

### **1.1.1 Antecedentes**

En los últimos años se va tomando conciencia sobre generar una economía circular en lo que respecta a los materiales de construcción de carreteras. Debido a esto se estimula la reutilización de los pavimentos asfálticos deteriorados y retirados mediante fresado de las vías una vez que hayan cumplido con su periodo de servicio. Estos contienen áridos y ligante asfáltico que están en condiciones de utilizarse nuevamente. Alternativas de reciclado ya habían sido planteadas desde 1981, por el MS-20 del Instituto del Asfalto, existiendo en la actualidad varios manuales y muchas experiencias al respecto (Mohajeri, 2015). Este proceso básicamente consiste en retirar las capas de la mezcla asfáltica que se encuentren envejecidas o en mal estado, mediante el fresado o demolición y posteriormente se lo trata al material hasta que cumpla con ciertas condiciones. Ya que en una mezcla asfáltica aproximadamente el 70% del costo corresponde a los materiales, la posibilidad de aprovechar el RAP es muy conveniente desde un punto de vista económico. Sin embargo, aquí en el Ecuador este tipo de práctica no se la ha tenido en cuenta.

La implementación del RAP va directamente relacionada con una serie de beneficios como es la mitigación del impacto ambiental, que es producto de la reutilización del material y también con la reducción del minado de las diferentes canteras. Por otro lado, la reducción de costos en el ámbito económico, debido a que este material reutilizado reemplazaría un porcentaje de aquel material virgen que se utilizaría en las mezclas asfálticas, así dando una reducción en el presupuesto final.

En países desarrollados casi todo el RAP recuperado es reutilizado en caliente o en frío. Sin embargo, esta situación difiere sustancialmente de nuestro aprovechamiento. En las mezclas en caliente la adición hasta un 20% de RAP no requiere de grandes alteraciones. Sin embargo, para implementar este material se requiere de una buena práctica, en lo que corresponde a las diferentes preparaciones del material, como es el caso del triturado, proceso de recuperación, incorporación del material; obteniendo como resultado un material el cual contenga las propiedades necesarias y óptimas para la elaboración de una mezcla asfáltica en condiciones.

## **1.1.2 Justificación e importancia del tema.**

Se propone el uso de materiales reciclados que son extraídos de pavimentos asfálticos, y que gracias a su reutilización se abaratarían los costos de producción. Adicionalmente, también se estaría contribuyendo con el medio ambiente al adoptar un tipo de economía circular mediante la reutilización de recursos. Varias experiencias internacionales indican que la utilización de RAP en mezclas en caliente y en proporciones bajas no requieren tratamientos avanzados ni consideraciones adicionales. Por tal razón, es necesario probar en mezclas asfálticas ecuatorianas en caliente la adición del RAP en pequeños porcentajes (hasta 20%).

## **1.1.3 Objetivos**

### **1.1.3.1 Objetivo general**

Evaluar el comportamiento a la fatiga y a las deformaciones de mezclas asfálticas calientes confeccionadas con contenidos de RAP variables, mediante el empleo de pruebas dinámicas con el equipo NAT, así como el impacto del daño en agua mediante la resistencia a la tracción indirecta retenida, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.

### **1.1.3.2 Objetivos específicos**

1. Estudiar los basamentos teóricos y procedimientos experimentales para el uso del RAP en mezclas asfálticas.
2. Diseñar una mezcla asfáltica patrón o de referencia.
3. Desarrollar las pruebas dinámicas en el NAT a las combinaciones de mezclas elaboradas con RAP: módulo de rigidez, compresión cíclica y fatiga; así como la prueba de daño en agua por resistencia retenida. Ver Tabla 1
4. Analizar y comparar el efecto de los porcentajes de RAP en las propiedades de las mezclas según sus distintas combinaciones.
5. Hacer recomendaciones para el empleo del RAP en las mezclas producidas en caliente en Ecuador.

### **1.1.4 Alcance**

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MTOP, consultores y técnicos en general vinculados a la temática

### **1.1.5 Metodología**

El trabajo de titulación que se presenta consta de una parte teórica y una parte experimental, que consiste en realizar distintos ensayos sobre mezclas asfálticas con la misma base, pero incluyendo un aceite rejuvenecedor y agregando RAP en algunas de ellas. Todo el proceso se lo detallará en cuatro etapas diferentes, las cuales se describen a continuación:

1. Marco teórico.
2. Elaboración de las muestras a ensayar (especímenes).
3. Desarrollo experimental.
4. Análisis de resultados.

Cada capítulo cuenta con temas y procedimientos definidos, dentro de los cuales se pueden encontrar los siguientes:

1. Marco teórico:
  - Estudio bibliográfico.
  - Descripción de los ensayos a realizar
  
2. Elaboración de especímenes:
  - Dosificación a utilizar
  - Proceso de mezclado.
  - Fabricación de los testigos correspondientes a las diferentes mezclas asfálticas.
  - Determinación de las densidades de los diferentes cilindros realizados.

3. Desarrollo experimental:

- Evaluación de daño en agua mediante ensayo de Tracción Indirecta.
- Realización de las pruebas de desempeño (módulo de rigidez fatiga y creep)

4. Análisis de resultados:

- Correlación entre los resultados obtenidos
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

## **2 Marco Teórico**

### **2.1 Mezclas Asfálticas**

#### **2.1.1 Generalidades**

La mezcla asfáltica es el material más común para la construcción de carreteras, aeropuertos, vías urbanas y estacionamientos. La mezcla asfáltica es una mezcla de asfalto (aglutinante de carbonato) y materiales minerales en la proporción adecuada, que consiste en agregados de diferentes tamaños y partículas finas. Aunque las capas granulares resisten los efectos del tráfico, la tarea de la mezcla asfáltica es evitar la fricción, mantener la superficie impermeable y proporcionar a los usuarios una capa superficial cómoda y segura, además de distribuir esfuerzos y brindar soporte estructural.

#### **2.1.2 Características del asfalto**

El cemento asfáltico es un material cementoso con tonalidades negras o café oscuras que consiste primordialmente de bitúmenes. Este se encuentra de manera natural o producido por el refinamiento del petróleo crudo (Asphalt Institute, 2014).

Para el control y clasificación de los cementos asfálticos en el Ecuador se debe considerar la normativa del Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014).

**Tabla 2.1** Clasificación 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>a</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>d</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)

### 2.1.3 Características de los agregados en mezclas asfálticas

En la elaboración de una mezcla asfáltica un papel fundamental lo presentan los agregados minerales, que constituyen entre el 88% y el 96% del peso de la mezcla y siendo el porcentaje de asfalto entre el 3 y el 7 %. Los agregados minerales son un aglomerado de partículas inertes procedentes fundamentalmente de rocas trituradas o fragmentadas que deben presentar ciertas características como son: tamaño, forma, dureza, limpieza, capacidad de adherencia con el asfalto para su empleo adecuado en mezclas asfálticas (Icaza y Mera, 2018).

### **2.1.3.1 Tamaño**

Los agregados utilizados en las mezclas asfálticas se clasifican por tamaño de la siguiente manera:

- Agregado grueso: Son todos los agregados que se conservan en el tamiz #4 es decir con un diámetro de más de 4,75 mm. En una mezcla asfáltica, estos agregados gruesos suelen tener un tamaño máximo 1 1/2”
- Agregado fino: Aquellos agregados que pasan el tamiz #4 (4,75mm) y se mantienen en el tamiz #200 con un diámetro de 0,075mm.
- Fillers: Son los pasantes del tamiz #200 y para que sean considerados fillers deben tener un índice de plasticidad de 0 (IP=0), lo que significa que no experimentan plasticidad cuando están en contacto con el agua.

### **2.1.3.2 Forma**

Este es un parámetro importante que debe tenerse en cuenta, ya que la forma del agregado puede afectar positivamente a la mezcla o, si esto no es posible, empobrecerla. Entre las diferentes formas de los áridos se encuentran: redondos, angulares, oblongos e irregulares, y los ensayos a determinar son: superficies quebradas, angulares, planas y alargadas.

### **2.1.3.3 Dureza**

Los agregados son resistentes a la abrasión y descomposición, es decir que dan la vida útil de los pavimentos luego de ser colocados. Por lo tanto, el agregado de mayor dureza proporcionara un mejor rendimiento. Este parámetro se determina mediante pruebas de abrasión de los ángeles y sulfatos.

### **2.1.3.4 Limpieza**

Para que la interacción entre el agregado y el asfalto sea buena, debe estar libre de polvo y partículas orgánicas. Se pueden usar pruebas de índice de plasticidad, arena equivalente y deletéreos para determinar la idoneidad de los agregados.

### **2.1.3.5 Adherencia**

Depende de una serie de propiedades que a continuación se detallará.

- **Capacidad de absorción**

De ella depende la cantidad de asfalto que se requiere adicionar a la mezcla para obtener el resultado deseado. El asfalto forma una película ligante sobre los agregados una vez producida la mezcla asfáltica, de tal manera que si los agregados son muy porosos se va a necesitar mayor cantidad de asfalto. Esto se debe a que el agregado absorbe el asfalto quedando menos partículas de ligadura, lo que puede llevar a una mezcla frágil. Además, se requiere de un proceso selectivo en donde se prefiere evitar la utilización de agregados porosos ya que comúnmente evitan la producción de la película de ligadura entre partículas. Se puede comprobar por medio de los ensayos de 14 resistencia retenida ante el agua en prueba de tracción indirecta y ensayo de peladura de la mezcla en agua hirviendo (Icaza y Mera, 2018).

#### **2.1.4 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.**

Son algunas propiedades las que influyen en la calidad de una mezcla asfáltica en caliente y que pueden ser controladas durante las etapas de diseño, producción y colocación, para así evitar una variación de propiedades. Según Asphalt Institute (2001), estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. Independientemente del método de diseño, su principal objetivo deberá ser garantizar que la mezcla asfáltica cumpla con cada una de estas propiedades.

##### **2.1.4.1 Durabilidad**

La durabilidad de la mezcla se refiere a la capacidad de resistir los cambios causados por la degradación de los agregados, alteración de las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación) o la separación de las membranas asfálticas causada por factores como el tráfico o el clima.

Las mezclas asfálticas son más duraderas si los agregados empleados tienen buena dureza y resistencia, las cuales son necesarias para soportar las presiones provocadas por las cargas del tráfico en sus bordes, otra consideración, es reducir el riesgo de peladuras evaluando la capacidad de los agregados para retener la película asfáltica que puede desprenderse por culpa del agua o el tráfico. Por otro lado, el espesor de la película



asfáltica afecta significativamente en la durabilidad de la mezcla, si esta es gruesa habrá menos vacíos, impidiendo de esta forma la entrada de oxígeno al pavimento, con esto retrasará el envejecimiento del asfalto y conservará sus propiedades originales por más tiempo, en cambio, si la película de asfalto es delgada, se oxidará mucho más. De esta forma el contenido de asfalto máximo permitido sellará la mayor parte de vacíos de aire, evitando también la intrusión de agua, pero se debe tener cuidado de no reducirlos en exceso, porque el asfalto necesita vacíos mínimos para expandirse.

#### **2.1.4.2 Impermeabilidad**

La impermeabilidad es la resistencia de una mezcla compactada al paso del aire y del agua y es directamente proporcional al porcentaje de vacíos en la mezcla compactada y su acceso a la superficie, por lo que si bien es cierto que los vacíos indican la capacidad de adición de aire y agua que ingresan al pavimento, el grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, independientemente de si están conectados o no, y en función de su acceso a la superficie.

Evidentemente todas las mezclas compactadas presentan su cierto nivel de permeabilidad, y son aceptables si están dentro de los límites permisibles, establecidos en base al tipo de mezcla asfáltica. Por ejemplo, las mezclas porosas por sus condiciones de diseño, tienen la finalidad de permitir que el agua proveniente de las lluvias drene rápidamente a través de ellas, presentan alto porcentaje de vacíos de aire y alto grado de permeabilidad (Minaya y Ordóñez, 2006).

#### **2.1.4.3 Estabilidad**

La estabilidad se refiere a la capacidad del asfalto para soportar deformaciones y desplazamientos causados por las cargas del tráfico, por lo tanto, un pavimento de carretera estable deberá mantener su forma y textura bajo cargas repetidas, mientras que un pavimento de carretera inestable se presentaran ondulaciones y arrugas.

La estabilidad, depende de la fricción y cohesión interna de la mezcla. La textura y geometría de los agregados influyen en la fricción, mientras que la cohesión interna deriva de las características del asfalto. Los agregados con caras fracturadas o angulares y con textura áspera, permiten obtener estabilidades más altas, debido a la fricción y trabazón

interna de los agregados. La cohesión o fuerza ligante, se relaciona con el contenido de asfalto, es así que la estabilidad crece conforme se aumenta el porcentaje del asfalto, hasta un cierto límite, luego la estabilidad empieza a decrecer. A medida que se incrementa el porcentaje de asfalto en la mezcla, la película de asfalto que rodea los agregados permite que estos se acomoden, y si la película de asfalto es muy gruesa impide la trabazón entre las partículas (Minaya y Ordóñez, 2006).

#### **2.1.4.4 Trabajabilidad**

La trabajabilidad de la mezcla asfáltica se refiere a la facilidad de colocación y compactación de la mezcla. Las mezclas con una gran cantidad de agregado grueso tienden a separarse durante el procesamiento y causan dificultades de compactación, por lo que se puede elegir la adición de agregado mineral para mejorar su trabajabilidad siempre y cuando los contenidos de vacíos y estabilidad estén controlados. Por el contrario, las mezclas con muchos finos son difíciles de manejar porque son más viscosas, lo que dificulta la compactación.

Como lo establece el Asphalt Institute (2011), “cuando las mezclas son fácilmente trabajables y deformables, se las conoce como mezclas tiernas, porque resultan ser demasiado inestables para ser compactadas y colocadas, generalmente se producen cuando en la mezcla existe exceso de arena de tamaño mediano, insuficiente relleno mineral, las partículas de agregado no tiene rugosidad (lisas) o sin aristas (redondeadas), o cuando la mezcla se encuentra excesivamente húmeda. La temperatura a la que se encuentre la mezcla influye en el grado de trabajabilidad debido a que esta afecta a la viscosidad de asfalto, de manera que una mezcla con baja temperatura complica ser manipulada, mientras que demasiada temperatura puede hacerla una mezcla tierna (Asphalt Institute, 2001).

#### **2.1.4.5 Flexibilidad**

Es la capacidad del pavimento de deformarse elásticamente sin agrietarse debido a cargas cíclicas que provocan la flexión continua del pliegue, o deformaciones debidas a la subrasante cuando se asienta gradualmente bajo cargas de servicio o empuje después de un cierto período de uso. cuando el pavimento se expande, estos movimientos son visibles en la superficie, por lo que el pliegue exterior deberá acomodarse sin agrietarse. Las

mezclas de granulometría abierta se consideran más flexibles que las mezclas cerradas con bajo contenido de 51 asfalto, lo que a veces puede causar problemas para equilibrar la estabilidad y la flexibilidad (Asphalt Institute, 2001).

#### **2.1.4.6 Resistencia a la fatiga**

Es la resistencia de la capa asfáltica a la flexión por exposición repetida por cargas de tráfico, que depende en gran medida de las propiedades del asfalto, el porcentaje de vacíos de la mezcla, la calidad de la subrasante y el espesor del pavimento. El asfalto envejecido y endurecido provoca una menor resistencia del pavimento, mientras que los pavimentos gruesos construidos sobre una subrasante de alta resistencia no se flexionan tanto. De manera similar, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye si la proporción de vacíos en el pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación (Asphalt Institute, 2001).

#### **2.1.4.7 Resistencia al deslizamiento**

La resistencia al deslizamiento es la capacidad de reducir el desplazamiento o el resbalamiento de las ruedas en la superficie de la carretera, especialmente cuando está mojada. Los pavimentos hechos de agregados rugosos y ásperos son más antideslizantes, mientras que una superficie lisa o redondeada reduce la tracción. La resistencia al deslizamiento se puede reducir si la mezcla asfáltica se compacta en exceso, creando un porcentaje insuficiente de vacíos, lo que hace que el asfalto se desprenda (exudación asfáltica). La mejor resistencia al deslizamiento se logra en mezclas a escala abierta utilizando agregados con una estructura de textura áspera (Asphalt Institute, 2001).

### **2.1.5 Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura**

#### **2.1.5.1 Mezcla asfáltica en caliente**

Sin lugar a dudas son las mezclas asfálticas más utilizadas y consisten en una combinación de ligante, agregados y también aditivos en ciertos casos. Su proceso de elaboración se realiza con asfalto a una temperatura aproximada de 150-160 °C, dependiendo de la viscosidad, para asegurar la trabajabilidad de la mezcla y la cobertura de todas las partículas de árido.

Estas mezclas asfálticas se utilizan tanto en las capas superiores como en las capas

inferiores de la estructura vial. Su instalación se realiza a altas temperatura.

### **2.1.5.2 Mezcla asfáltica en frío**

Son mezclas producidas con emulsión asfáltica, trabajadas e instaladas a temperatura ambiente. Estas bajas temperaturas se deben a que el ligante permanece largo tiempo con viscosidad baja, ya que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado, y no se necesitan altas temperaturas para darle trabajabilidad a la mezcla y recubrimiento total a las partículas de agregados. Estas mezclas se caracterizan por su trabajabilidad, incluso durante semanas, y se utilizan principalmente para vías secundarias en las cuales no se presente mucho tráfico (Buitrago y González, 2016).

### **2.1.5.3 Mezcla asfáltica en tibio**

La mezcla asfáltica en tibio es muy similar a la mezcla asfáltica en caliente excepto que se produce e instala a temperaturas más bajas. Para conseguirlo se utilizan aditivos en la mezcla, que permiten una reducción de la viscosidad a temperaturas más bajas y una óptima cobertura de los agregados. El uso de estas mezclas tiene como objetivo reducir el consumo energético y las emisiones de gases en los procesos de producción e instalación de mezclas asfálticas en caliente.

## **2.2 RAP (Pavimento asfáltico reciclado)**

### **2.2.1 Generalidades**

El Pavimento Asfáltico Reciclado, más conocido como RAP, consiste en el material que ha sido reciclado de un pavimento elástico que ha llegado al final de su vida útil. Sin embargo, sus características permiten su reutilización como parte de estructuras nuevas o rehabilitadas. La adición de este material a las mezclas asfálticas ayuda a reducir la cantidad de material nuevo, ahorra costos y, a su vez, ayuda a conservar los recursos naturales.

El propósito principal de implementar RAP como parte integral de la mezcla asfáltica es apuntar a la sostenibilidad, como medida para mitigar el impacto ambiental de la reutilización de materiales con alto potencial mecánico y reducir el desperdicio de la extracción en fuente de áridos. Por otro lado, en el ámbito económico, la sustitución de una determinada proporción de mezcla asfáltica supone un ahorro en el consumo y menor

agregado virgen necesarios para producir la mezcla, lo que afecta el costo del producto final.

Las propiedades mecánicas del RAP y su función como mezcla asfáltica económica potencial representan solo algunas de las ventajas del material. Sin embargo, la implementación de esta técnica requiere una buena práctica, que debe existir durante el reciclaje, trituración y aglutinación del material, asegurando así un correcto recubrimiento y distribución de las partículas de árido para garantizar las propiedades de la mezcla asfáltica final.

## **2.2.2 Aplicaciones**

La Federal Highway Administration (FHWA, por sus siglas en inglés) define las principales aplicaciones del uso de RAP en la construcción y mantenimiento de carreteras, según se muestra a continuación (Han et al., 2011):

### **2.2.2.1 Agregado de una base**

El agregado del RAP es procesado y mezclado con material virgen para producir agregado para bases o subbases granulares como componentes de la estructura de pavimento (Huntington et al., 2013).

### **2.2.2.2 Agregado de bases estabilizadas**

EL RAP es procesado y mezclado con agentes estabilizadores y compactado de manera que obtenga una mayor capacidad mecánica en la mezcla final (Al-Harty et al., 2002).

### **2.2.2.3 Mezcla asfáltica**

La aplicación en la mezcla asfáltica se puede lograr a través de dos métodos: procesamiento en fábrica y reciclaje en el sitio. El primero consiste en mezclar RAP con material de la nueva mezcla asfáltica. Para ello, se procesa el material RAP hasta obtener las características deseadas, luego se procesa al añadirlo con árido y betún virgen, y en algunos casos con rejuvenecedores, hasta obtener una mezcla. El segundo método involucra el reciclaje en sitio, donde el material RAP es utilizado con las características que poseía en campo. En este caso, el pavimento es fresado y luego se mezcla con la emulsión asfáltica. Posteriormente es vertido y compactado utilizando los procedimientos

convencionales. En ambos casos, se deben considerar el aporte de asfalto que posee el RAP.

El método del NCHRP 495 se lo implementó para determinar la cantidad de agregados y asfalto necesarios para realizar la mezcla asfáltica en caliente. El cálculo se lo realiza mediante la siguiente expresión:

$$TAC = F_{RAP} (RAP AC) \times (RAP \%) + Virgin AC\%$$

Donde:

$F_{RAP}$  = Factores de disponibilidad de asfalto para RAP.

RAP AC = Contenido de asfalto de RAP, forma decimal.

RAP % = Porcentaje de RAP en mezcla, %.

TAC = Contenido total de asfalto

Empleando  $F_{RAP}$  igual a 0,75 de acuerdo a la recomendación del estado de Georgia (Hines, 2015).

## **2.3 Rejuvenecedores**

### **2.3.1 Generalidades**

Los rejuvenecedores son aditivos que tienen como función proveer al asfalto envejecido los componentes perdidos para que recupere sus propiedades originales, y provocar reordenamientos en el asfalto que reduzcan la permeabilidad al agua y al aire (Márquez y Ureta, 2018).

Como se mencionó anteriormente, la oxidación es un fenómeno que se produce en el asfalto lo cual puede generar microfisuras en las superficies de las carreteras originadas por el clima, la temperatura y otros factores. Este fenómeno genera exceso de asfaltenos, carbenos y carboides; por ende, conducen a una pérdida de las propiedades iniciales del betún asfáltico, lo que afecta directamente su durabilidad. La principal función de los aditivos rejuvenecedores está destinada a suministrar los componentes perdidos de

asfaltos envejecidos, y además de peptizar y dispersar los asfaltenos que se encuentran de manera excesiva, para así garantizar la mayor durabilidad.

En la actualidad, los rejuvenecedores se utilizan en el reciclaje de mezclas asfálticas, con el objetivo de restaurar su consistencia y propiedades reológicas, e incluso mejorar sus propiedades como ligante en condiciones similares a las originales. Además, se puede establecer un posible control sobre el grado de rendimiento del asfalto en función del porcentaje de rejuvenecedor a utilizar y la cantidad de RAP.

### **2.3.2 Características**

Los diferentes rejuvenecedores responden de manera distinta al envejecimiento del asfalto y, a medida que disminuye el rendimiento de ahuellamiento, la dosis de rejuvenecedor debe elegirse con más cuidado para equilibrar el rendimiento de agrietamiento y formación de surcos. Por esta razón, se requiere un diseño de mezcla balanceado para determinar el contenido óptimo de asfalto y el contenido óptimo de rejuvenecedor para cumplir con los requisitos de formación de surcos y grietas en la mezcla.

Los rejuvenecedores también reducen el desgaste, impermeabilizan las superficies, rejuvenecen las superficies y las protegen del envejecimiento de los rayos UV y sellan las micro fisuras antes de que tengan la oportunidad de crecer, protegiendo la estructura del pavimento de la intrusión de humedad.

### **2.3.3 Proceso de mezclado**

Las cantidades añadidas de rejuvenecedor que van a ser utilizadas en este trabajo fueron obtenidas mediante investigaciones anteriores, las cuales escogían porcentajes que contribuían al cumplimiento de los valores mínimos de viscosidad y ductilidad del asfalto, después de su envejecimiento en el horno de película delgada rotatorio (RTFO, sus siglas en inglés).

#### **2.3.3.1 Secuencia de Mezclado**

1. Se selecciona la cantidad de asfalto a mezclar.
2. Se calcula la cantidad de rejuvenecedor a añadir.
3. Se calienta el rejuvenecedor y el asfalto a una temperatura entre 145°C-150°C.

4. Se procede a añadir en el asfalto la cantidad calculada de rejuvenecedor.
5. Para finalizar, se mezcla durante 15 minutos, manteniendo una temperatura constante de 150°C.

Para el mezclado se debe de considerar ciertas medidas de seguridad. Se requiere utilizar guantes y así evitar contacto directo, también el uso de máscaras para vapor orgánico, utilizadas con el fin de no inhalar sustancias tóxicas y dañinas para la salud.

#### **2.3.4 Parámetros volumétricos de mezclas asfálticas**

Se debe tomar en cuenta un factor importante en el comportamiento de las mezclas asfálticas y es que sus parámetros volumétricos están relacionados con el contenido de asfalto y material agregado utilizado en el diseño; los parámetros más importantes son gravedad específica bulk, gravedad específica máxima (Rice), porcentaje de vacíos de aire, porcentaje de vacíos en minerales, porcentaje de huecos vacíos rellenos con asfalto. Todos los parámetros mencionados se describen brevemente a continuación.

En Ecuador, los pavimentos asfálticos se rigen por la norma granulométrica para mezclas asfálticas. Por lo general, se utiliza la norma correspondiente a la de agregado máximo nominal de 1/2" de las especificaciones MOP-001, F-2002, TABLA 405-5.1 (Nuñez, 2014).



**Tabla 2.2** Porcentaje de pasantes para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: (MOP, 2002)

### 2.3.4.1 Gravedad específica bulk (Gmb)

En el caso de una mezcla compacta, es la relación de la masa volumétrica de la mezcla considerando los vacíos que quedan entre las partículas cubiertas con asfalto y la masa de agua de un volumen igual correspondiente a la temperatura establecida, en cuyo caso el valor obtenido es adimensional.

El Gmb de una mezcla se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 o ASTM D2726. Para determinar Gmb se considera la siguiente expresión:

$$Gmb = \frac{P_{aire}}{P_{SSS} - P_{agua}}$$

$P_{aire}$  = Masa de la muestra en aire

$P_{SSS}$  = Masa de la muestra saturada superficialmente seca en el aire.

$P_{agua}$  = Masa de la muestra en agua

### 2.3.4.2 Gravedad específica máxima (Gmm)

En una mezcla no compactada, es la relación entre la masa del volumen de la mezcla suelta sin considerar los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto ( $V_a = 0$ ) y la masa de agua de un volumen igual equivalente a la temperatura establecida. Este valor es determinado generalmente por la prueba denominada “RICE”, empleando las normas ASTM D 2041 y AASHTO T 209. Para calcular Gmm se considera la siguiente expresión:

$$Gmb = \frac{C}{A - (B - C)}$$

$A$  = Peso del picnómetro

$B$  = Peso del picnómetro + agua + material

$C$  = Peso del material

### 2.3.4.3 Vacíos de aire (Va)

Estos son los espacios de aire entre las partículas de agregado recubiertas de asfalto en la mezcla asfáltica compactada. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la muestra. El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en el laboratorio permite un 3% a 5% de vacíos, mientras que los requisitos de compactación en obra permiten que la densidad de laboratorio suba hasta un 97%.

Para determinar  $V_a$  se considera la siguiente expresión:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

$V_a$  = Vacíos de aire en la mezcla compactada, en porcentaje del volumen total.

$Gmm$  = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

$Gmb$  = Gravedad específica de una mezcla compactada.

### 2.3.4.4 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla asfáltica en caliente compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo).

Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen. Para determinar VAM se considera la siguiente expresión:

$$VAM = 100 * \frac{Gmb - Ps}{Gsb}$$

$Gsb$  = : Gravedad específica bruta del agregado.

$Ps$  = Porcentaje o contenido de agregados.

$Gmb$  = Gravedad específica bruta de la mezcla compactada

### **2.3.4.5 Vacíos rellenos de asfalto (VFA)**

Es la porción de vacíos entre los agregados minerales que componen el ligante asfáltico. Se expresa como el porcentaje de vacíos entre agregados minerales o VAM. Indican la cantidad efectiva de asfalto en la mezcla. Para determinar VAM se considera la siguiente expresión:

$$VFA = 100 * \frac{(VMA - Va)}{VMA}$$

$VFA$  = Volumen lleno de asfalto, en %

$Va$  = Porcentaje de vacíos con aire.

$VMA$  = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

## **2.3.5 Parámetros de resistencia**

### **2.3.5.1 Estabilidad marshall**

Esta es la carga de compresión máxima aplicada a una briqueta de tamaño estandarizado utilizando una configuración específica de mordazas para el ensayo Marshall.

La muestra debe cumplir aproximadamente con las siguientes características: 1200 gramos de masa, un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 2,5 pulgadas. Adicionalmente el ensayo debe realizarse a temperaturas altas de servicio (60°C) (Reyes y Camacho, 2008).

### **2.3.5.2 Flujo marshall**

El flujo Marshall es la deformación a lo largo del diámetro vertical de la briqueta, expresada en centésimas de pulgada, que ocurre entre la carga cero hasta la carga de falla.

Las mezclas asfálticas pueden llegar a tener altos valores de estabilidad Marshall, pero bajos valores de fluidez, esto puede indicar que la mezcla es dura y quebradiza. Por otro lado, las mezclas con una alta fluencia, tienen problemas de deformación y tienden a deformarse fácilmente bajo cargas de tráfico sostenidas. Es decir, son mezclas propensas a la ductilidad.

Estas pruebas de Estabilidad y Fluencia Marshall serán estimadas en el siguiente trabajo de titulación y se especifican en la norma ASTM D6927.

### **2.3.5.3 Pruebas para evaluar el daño en agua**

#### **2.3.5.3.1 Ensayo de agua hirviendo**

Esta prueba se realiza para evaluar la sensibilidad a la humedad de los pavimentos asfálticos hirviendo la mezcla en agua destilada y luego evaluando visualmente el grado de remoción presente en la muestra. Este método se usa en la práctica para evaluar el desempeño de los aditivos anti-desvestimiento en mezclas específicas sensibles al agua.

La prueba en mención consiste en medir visualmente la pérdida de la película de asfalto de la mezcla al someterla a agua en ebullición durante 10 minutos. En este examen visual se dará como resultado el porcentaje de área total del agregado que retiene la cobertura original del ligante (Gamba y Mercado, 2004). En las especificaciones del MOP (2002), se exige que la mezcla no deberá presentar evidencia alguna de peladura. Esta prueba no se considera en el presente trabajo de titulación.

#### **2.3.5.3.2 Pérdida de resistencia por daño en agua mediante tracción indirecta**

El daño en el agua se puede evaluar mediante una prueba de tracción indirecta, un ensayo conocido como TSR (Tensile Strength Ratio), el cual consiste en aplicar un esfuerzo de compresión medido por una dial sobre los ejes diametrales de las briquetas. Se requieren 6 briquetas con una densidad relativa del 97 % (aproximadamente un 7 % de vacío) para

realizar esta prueba. Tres de ellas serán ensayadas en condiciones sin saturar y las tres restantes deben tener una saturación de humedad previa de entre 55% y 80%. Los promedios de los porcentajes de vacíos de las briquetas seleccionadas para cada condición deben ser iguales o aproximados.

#### **2.3.5.3.2.1 Importancia y uso**

Este método de prueba se puede usar para probar mezclas de concreto asfáltico junto con pruebas de diseño de mezclas para determinar el potencial de daño por humedad, para determinar si un aditivo anti desprendimiento es efectivo o no, y para determinar qué dosis de un aditivo se necesita para maximizar la efectividad. Este método de prueba también se puede utilizar para probar mezclas producidas en plantas para determinar la eficacia de los aditivos en las condiciones impuestas en el campo (ASTM, 2004).

Procedimiento:

- Se elaboran briquetas con 97% de la densidad relativa (7% de vacíos como referente)
- Se selecciona cuales briquetas se ensayarán en condición seca y cuales se ensayarán en condición húmeda (saturadas).
- A las briquetas que previamente fueron saturadas se las coloca en baño de maría durante 24 horas a 60°C.
- Pasada las 24 horas las briquetas saturadas se las coloca en un recipiente a 25°C durante 1 hora antes de ensayar.
- Las briquetas que se ensayan en seco se las coloca en un recipiente a 25°C durante 20 minutos antes de ser ensayadas.
- Luego de realizar los ensayos se determina la resistencia retenida y se verifica si es mayor o menor al 80%.
- Según la norma del MOP (2002), si es mayor al 80% no tendrá daño por humedad, si la resistencia retenida es menor al 80% eso significa que la mezcla asfáltica puede presentar problemas o daño por agua.

## **2.4 Pruebas de desempeño con el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester)**

### **2.4.1 Generalidades**

El Nottingham Asphalt Tester se puede utilizar para control de calidad, diseño de mezclas y especificación de productos, investigación de fallas, evaluación de pavimentos, evaluación de nuevos materiales y controles de durabilidad.

Los NAT se han vuelto esenciales para laboratorios, universidades, compañías petroleras, laboratorios regionales, contratistas e ingenieros consultores en todo el mundo. Los ensayos han demostrado que los resultados de las pruebas NAT ofrecen una excelente correlación con otros métodos de prueba.

### **2.4.2 Ensayos con el NAT (Nottingham Asphalt Tester)**

Con el NAT podemos realizar los diferentes ensayos:

#### **2.4.2.1 Módulo de rigidez**

Esto se realiza mediante ensayos de tracción indirecta utilizando un cabezal de carga. Este método aplica una carga a lo largo del diámetro vertical de la briqueta midiendo la tensión y la deformación que se producen por la carga.

##### **2.4.2.1.1 Módulo de rigidez bajo deformación controlada**

En este ensayo se mantiene constante la amplitud de desplazamiento o deformación, es el esfuerzo aplicado en la muestra lo que cambia durante su realización. Se establece un nivel de deformación inicial y el esfuerzo va a ir reduciendo durante el ensayo (Palacios, 2015).

El ensayo se realiza a 20°C a un nivel de deformación de 5 micrones y 0,12 segundos de intervalo de tiempo entre carga y carga máxima en un pulso medio sinusoidal. El cabezal de carga aplica 5 pulsaciones que posteriormente son promediadas aplicando un factor de corrección.

##### **2.4.2.1.2 Módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado**

Esta modalidad de prueba define la cantidad de esfuerzo aplicado a la muestra, el cual permanecerá constante a lo largo de todo el ensayo. Como resultado, las deformaciones

aumentaran, esto se debe a que las repeticiones constantes fatigan la muestra, reduciendo su resistencia y deformándola cada vez más ante una misma sollicitación (Palacios, 2015).

Este módulo guarda estrecha relación con el análisis a fatiga, ya que se encuentra como dato en la fórmula para determinar las deformaciones que presenta la muestra en dicho análisis. El procedimiento es muy similar al del módulo bajo deformación controlada con la diferencia de que la carga aplicada es ajustada y condicionada por el usuario. Cabe recalcar que esta carga impuesta será la misma que predomine durante el ensayo a fatiga.

#### **2.4.2.2 Fatiga**

Este ensayo utiliza tensiones controladas, típicamente en el rango de 100-500 kPa, las cuales determinan el número que se necesita de pulsaciones para que falle la muestra, ya sea agrietándose completamente a lo largo del diámetro vertical o por alcanzar una deformación vertical máxima de 5 mm. Similar a pruebas anteriores, estas pulsaciones se realizan a una temperatura constante de 20°C.

Como se indicó anteriormente, al comienzo de la prueba, el módulo de rigidez ( $S_m$ ) debe determinarse con un esfuerzo controlado ( $\sigma$ ) similar a la prueba de fatiga. Teniendo en cuenta que el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) es 0,35 (Vila, 2017).

#### **2.4.2.3 Deformación permanente bajo compresión cíclica uniaxial (Creep)**

Esta prueba consiste en medir las deformaciones que ocurren en una briqueta cilíndrica de mezcla asfáltica, a cierta temperatura, debido a la acción de una tensión axial constante en un tiempo determinado (López, 2014).

Esta prueba determina la resistencia de una muestra a la deformación permanente bajo cargas cíclicas. Esta prueba mide el cambio en el espesor de la muestra luego de 3600 ciclos de carga. Un ciclo de carga consiste en una aplicación de 100 kPa, seguida de un período de descanso de 1 segundo. La prueba se realiza a una temperatura constante de 40°C y bajo ondas cuadráticas. De acuerdo con el MOP (2002), una mezcla asfáltica que presente deformaciones permanentes menores del 1% va a presentar un comportamiento satisfactorio frente a deformaciones.

### 3 Capítulo

#### 3.1 Estudio experimental

##### 3.1.1 Metodología de trabajo

Se estudiarán las mezclas asfálticas mediante varios ensayos de laboratorio con el fin de poder analizar la influencia que tengan sobre ellas el uso de rejuvenecedores y de RAP. Para estas mezclas se usará un asfalto base con y sin rejuvenecedor mezclado en distintos porcentajes con pavimento asfáltico reciclado. Además, como punto de partida para la presente investigación se utilizó un diseño de mezcla asfáltica otorgado por una empresa local que cumple con las exigencias del diseño Marshall y que utiliza agregados triturados aluviales provenientes de la cantera del Río Chimbo.

A continuación, se presenta la cantidad de briquetas y las distintas combinaciones a evaluarse según los ensayos que se van a realizar:

*Tabla 3.1 Combinaciones de las mezclas asfálticas*

<b>Asfalto sin rejuvenecedor</b>			
<b>No.</b>	<b>Combinación</b>	<b>Pruebas NAT</b>	<b>Daño en agua</b>
1	Sin RAP	7	6
2	10% RAP	7	6
3	20% RAP	7	6
<b>Asfalto con rejuvenecedor</b>			
4	Sin RAP	7	6
5	10% RAP	7	6
6	20% RAP	7	6

**Fuente:** Autores

Diámetro de las briquetas de 4 pulgadas.

Porcentaje de vacíos de 7% para los ensayos de daño en agua.

Porcentaje de vacíos de 4% para los ensayos en el NAT.



### 3.1.1.1 Materiales empleados

#### 3.1.1.1.1 Asfalto

El asfalto proviene de la refinería de Esmeraldas y cumple con las diferentes especificaciones técnicas que se estipulan en el Manual del MTOP Enmienda 1, salvo por las características de asfalto luego de pasar por un envejecimiento primario en el RTFO. A continuación, se presentan las diferentes características del asfalto utilizado.

*Tabla 3.2 Características de asfalto utilizado-Clasificación por viscosidad*

ASTM D-3381-92							
ASFALTO REFINERÍA ESMERALDAS							
Propiedades	Unidad	Método	AC 20		AC 30		Resultado
			mín	máx	mín	máx	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>							
Viscosidad dinámica, 60° C	Pa,s	ASTM D 2171	160	240	240	360	258
Viscosidad cinemática, 135° C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 2170	300	-	350	-	380
Punto de inflamación	°C	NTE INEN 808	232	-	232	-	290
Grav. Específica 25°C/25°C	-	ASTM D 70	-	-	-	-	1,017
Punto de Ablandamiento	°C	ASTM D-5	-	-	-	-	52
Penetración. 25°C, 100g, 5s	00,1mm	ASTM D-36	60	-	50	-	67,2
Índice de penetración	-	ASTM D 5/D5/M	-1,5	1,0	-1,5	1,0	0,0
<b>ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT</b>							
Viscosidad dinámica, 60° C	Pa,s	ASTM D 2171	-	800	-	1200	1500
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	-	1	-	1	-0,03
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	cm	NTE INEN 916	50	-	40	-	35,0

#### 3.1.1.1.2 Agregados Minerales

Para las distintas combinaciones de mezclas a realizar se emplearon 4 tipos de agregados procedentes de la mina de la empresa Equipos y Transportes S.A. establecidas en el Río Chimbo, cerca de Marcelino Maridueña junto al poblado Jesús del Gran Poder, donde cuentan con equipos de trituración. Los agregados minerales utilizados son de origen aluvial triturados.

### 3.1.1.1.2.1 Granulometría

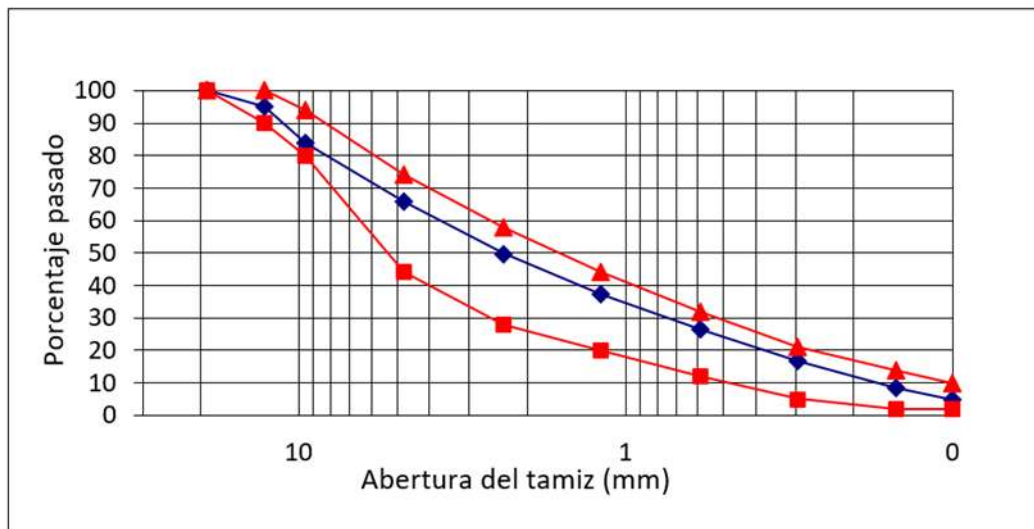
*Tabla 3.3 Granulometría de los agregados*

ABERTURA DE TAMICES		AGREGADOS SEGÚN TAMAÑO MÁXIMO (TM)			
		TM 3/4" (19,1 mm)	TM 1/2" (12,7 mm)	TM 3/8" (9,5 mm)	ARENA RÍO
No.	mm				
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	60,6	94,5	100,0	100,0
3/8"	9,5	17,4	46,9	100,0	100,0
# 4	4,75	0,0	0,0	86,0	100,0
# 8	2,36	0,0	0,0	63,0	88,3
# 16	1,19	0,0	0,0	46,1	72,2
# 30	0,59	0,0	0,0	33,7	46,4
# 50	0,297	0,0	0,0	23,5	14,9
# 100	0,149	0,0	0,0	12,7	2,7
# 200	0,074	0,0	0,0	7,1	1,1

**Fuente:** Autores

Como ya fue mencionado, el estudio partió de un diseño de mezcla asfáltica Marshall, el cual tomó en cuenta una dosificación de agregados para cumplir la granulometría exigida para mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal de 12,7 mm. Esta dosificación se muestra a continuación.

*Figura 3.1 Curva de granulometría combinada*



**Fuente:** Autores

**Tabla 3.4 Granulometría combinada**

ABERTURA DE TAMICES		TM 3/4"	TM 1/2"	TM 3/8"	ARENA RÍO	GRANUL.	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	10,0	15,0	65,0	10,0	COMBINADA	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	10,0	15,0	65,0	10,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	6,1	14,2	65,0	10,0	95,2	90	100
3/8"	9,50	1,7	7,0	65,0	10,0	83,8		
# 4	4,75	0,0	0,0	55,9	10,0	65,9	44	74
# 8	2,36	0,0	0,0	40,9	8,8	49,8	28	58
# 16	1,19	0,0	0,0	30,0	7,2	37,2		
# 30	0,59	0,0	0,0	21,9	4,6	26,5		
# 50	0,30	0,0	0,0	15,3	1,5	16,8	5	21
# 100	0,15	0,0	0,0	8,3	0,3	8,5		
# 200	0,10	0,0	0,0	4,6	0,1	4,7	2	10

**Fuente:** Autores

**Figura 3.2 Toma de agregados minerales de la cantera del Río Chimbo**



**Fuente:** Autores

### 3.1.1.1.3 Rejuvenecedor

El aditivo utilizado es el Sylvaroad RP1000 que mejora considerablemente el rendimiento del asfalto en temperaturas bajas de mezclas en capas superficiales sin comprometer el rendimiento en altas temperaturas. El producto se encarga de recuperar la resistencia a fatiga para las capas de base mientras mantiene un módulo aceptable. Esto mejora el asfalto viejo hacia el grado requerido y permanece activo en la mezcla, asegurando un buen rendimiento.

*Tabla 3.5 Características del rejuvenecedor Sylvaroad RP 1000*

Especificaciones de venta			
Propiedades	Método de prueba ( Método Kratón)	Especificación	
Color, Gardner y Puro	ASTM D6166 (AQCM 002)	Max. 8	
Índice de acidez (mg KOH/g)	ASTM D465 (AQCM 001)	Max. 15	
Viscosidad cinemática, Cannon- Frenske at 40° C (cSt)	ASTM D445 (AQCM 111)	37-47	
Punto de inflamación (°C)	ASTM D92 (AQCM 007)	> 280	
Apariencia	Método Interno (AQCM 040)	Claro y brillante	
Viscosidad cinemática, Cannon- Frenske (cSt)	ASTM D445 (AQCM 111)	-20 °C	1600
		0°C	350
		20°C	100
		40°C	40
		60°C	23
		100°C	10

Al asfalto se le añadió el aditivo en el orden de 2,5% de su peso. El asfalto con rejuvenecedor posee las siguientes características:

**Tabla 3.6 Características del asfalto base + rejuvenecedor**

ASTM D-3381-92							
ASFALTO CON REJUVENECEADOR							
Propiedades	Unidad	Método	AC 20		AC 30		Resultado
			mín	máx	mín	máx	
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>							
Viscosidad dinámica, 60° C	Pa,s	ASTM D 2171	160	240	240	360	122
Viscosidad cinemática, 135° C	mm 2/s	ASTM D 2170	300	-	350	-	292,5
Punto de inflamación	°c	NTE INEN 808	232	-	232	-	295
Grav. Específica 25°C/25°C	-	ASTM D 70	-	-	-	-	1,0114
Punto de Ablandamiento	°c	ASTM D-5	-	-	-	-	47,5
Penetración. 25°C, 100g, 5s	00,1mm	ASTM D-36	60	-	50	-	106,7
Índice de penetración	-	ASTM D 5/D5/M	-1,5	1,0	-1,5	1,0	0,182
<b>ENVEJECIMIENTO PRIMARIO RTFOT</b>							
Viscosidad dinámica, 60° C	Pa,s	ASTM D 2171	-	800	-	1200	652
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	-	1	-	1	0,063
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	cm	NTE INEN 916	50	-	40	-	65,0

### 3.1.1.1.4 RAP

El pavimento asfáltico reciclado (RAP) fue obtenido en el campamento de la compañía Hidalgo E Hidalgo ubicado en el km 22 vía a Milagro. Cabe mencionar que en dicha localidad el RAP recuperado cuenta con agregados similares a los empleados en este proyecto.

Primero se tamizó el RAP y luego paso por un proceso de secado para así realizar la respectiva extracción de asfalto y obtener su porcentaje.

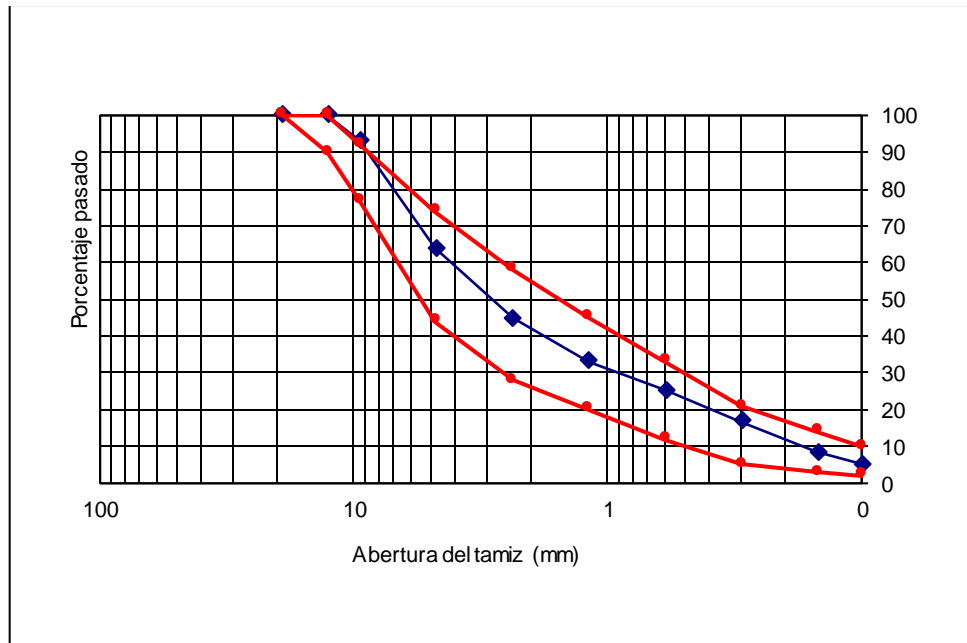
Luego de realizada la prueba de extracción el asfalto el porcentaje calculado es de 5,08%.

**Tabla 3.7 Granulometría de RAP**

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,10	0,0	0,0	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	0,0	0,0	<b>100,0</b>	90	100
3/8"	9,52	69,5	6,7	<b>93,3</b>		
# 4	4,76	371,6	36,1	<b>63,9</b>	44	74
# 8	2,38	569,8	55,3	<b>44,7</b>	28	58
# 16	1,19	688,1	66,8	<b>33,2</b>		
# 30	0,59	771,2	74,8	<b>25,2</b>		
# 50	0,30	858,0	83,3	<b>16,7</b>	5	21
# 100	0,15	943,7	91,6	<b>8,4</b>		
# 200	0,10	976,4	94,8	<b>5,2</b>	2	10
FONDO	FONDO	1030,5				

Fuente: Autores

**Figura 3.3** Curva granulométrica de RAP



Fuente: Autores

**Figura 3.4** Cuarteo del RAP



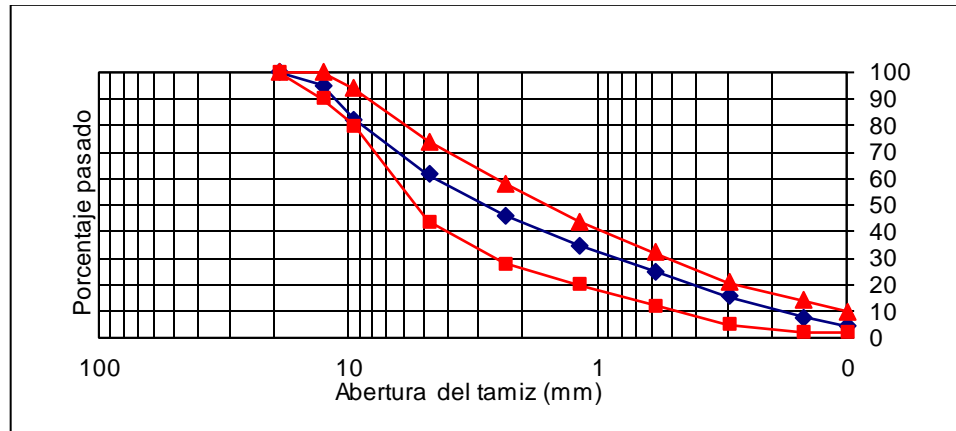
Fuente: Autores

El método del NCHRP 495 se lo implementó para determinar la cantidad de agregados y asfalto necesarios para confeccionar la mezcla asfáltica. El cálculo se lo realiza mediante la siguiente expresión:

$$TAC = F_{RAP} (RAP AC) \times (RAP \%) + Virgin AC\%$$

- Para el 10% de RAP

**Figura 3.5** Curva granulométrica para la mezcla con el 10% de RAP



**Fuente:** Autores

Mediante esta fórmula se calculó el porcentaje de asfalto que llevará la combinación de 10% de RAP:

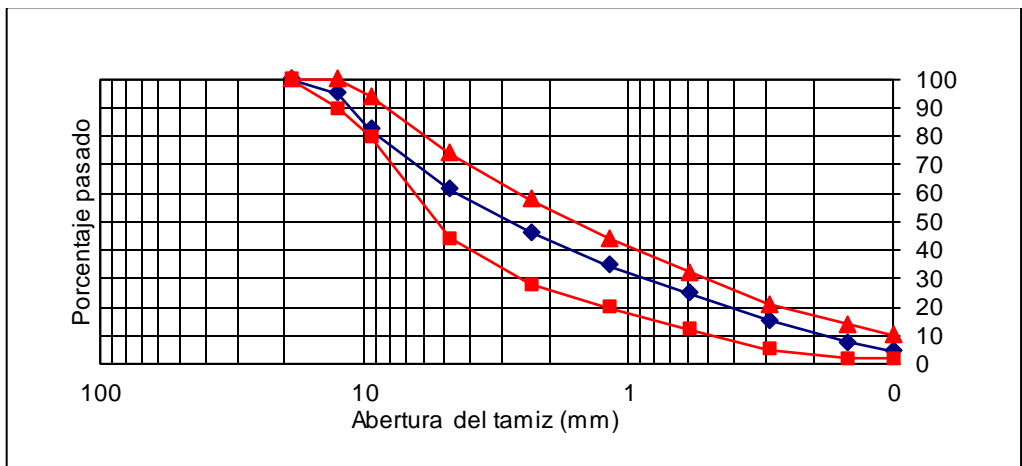
**Tabla 3.8** Cálculo mediante el método del NCHRP 495 para la mezcla con el 10% de RAP

<b>RAP%: 10</b>			
TAC=	(0,75*0,0508*10) + % ASFALTO NUEVO		
Si TAC= 6,2%			
6,2=	0,38 + % ASFALTO NUEVO		
<b>ASFALTO NUEVO: 5,82%</b>			

**Fuente:** Autores

- Para el 20% del RAP

**Figura 3.6** Curva granulométrica para la mezcla con el 20% de RAP



**Fuente:** Autores

Para la combinación del 20 % de RAP tenemos los siguientes valores:

**Tabla 3.9** Cálculo mediante el método del NCHRP 495 para la mezcla con el 20% de RAP

<b>RAP%: 20</b>			
TAC=	(0,75*0,0508*20) + % ASFALTO NUEVO		
Si TAC= 6,2%			
6,2=	0,76 + % ASFALTO NUEVO		
<b>ASFALTO NUEVO: 5,44%</b>			

**Fuente:** Autores

Podemos observar que se encuentra dentro los límites establecidos y así la catalogamos como una curva granulométrica satisfactoria y lista para trabajar, ya sea añadiendo el 10 o 20 porciento de RAP.

### 3.1.2 Elaboración de especímenes

A continuación, se procede a detallar la elaboración de briquetas



- I. Se procede a separar el agregado para alcanzar la granulometría calculada, luego se coloca estos agregados en el horno por un tiempo de 24 horas y a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$ , y antes del mezclado se incrementa la temperatura a  $150^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas.

**Figura 3.7** Agregados minerales en el horno



**Fuente:** Autores

- II. Se coloca los moldes Marshall a  $150^{\circ}\text{C}$  igual que el agregado, para que al momento de colocar la mezcla en el molde esta no pierda temperatura.

**Figura 3.8** Molde y bandeja con los agregados en el horno



**Fuente:** Autores

- III. Calentar el asfalto a  $150^{\circ}\text{C}$ , una vez obtenida esta temperatura se procede a realizar el mezclado con los aditivos a utilizar en caso de ser necesario.

**Figura 3.9** Calentamiento del asfalto a 150 °C



**Fuente:** Autores

- IV. Se mezcla los agregados con el porcentaje de asfalto determinado, todo en base a la dosificación correspondiente, sin que quede ninguna partícula suelta en la mezcla, podemos comprobar que se hizo una buena mezcla al observar que todos los agregados se tiñeron de color negro.

**Figura 3.10** Mezcla de los agregados con el asfalto



**Fuente:** Autores

- V. Luego, esta mezcla es colocada al horno a una temperatura de 135 °C durante un tiempo de 2 a 4 horas. Esto se lo realiza con la finalidad de envejecer la mezcla simular el proceso de mezclado, tendido y compactación que sucede en una obra.

*Figura 3.11 Mezcla asfáltica en el horno a 135° C*



**Fuente:** Autores

- VI. Se coloca la mezcla en los moldes Marshall, los cuales deben ser engrasados con anterioridad para evitar que la mezcla se quede pegada en el molde.

*Figura 3.12 Elaboración de la briqueta*



**Fuente:** Autores

- VII. Colocamos el molde en la base para así empezar la compactación con el martillo Marshall, los golpes necesarios que recibirá la briqueta depende

de su energía de compactación. Se debe de tener muy en cuenta la temperatura al momento de la compactación.

**Figura 3.13** Compactación de la briqueta



**Fuente:** Autores

VIII. Para finalizar, se deja enfriar las briquetas, para posteriormente desmoldarlas con el uso de una gata hidráulica.

**Figura 3.14** Desmolde de briquetas



**Fuente:** Autores

### **3.1.2.1 Mezcla patrón**

La mezcla patrón se trata de un espécimen de aproximadamente 1200 gr, del cual el porcentaje de asfalto óptimo determinado por el diseño es de 6,2%. Para su realización se

sigue los mismos pasos que en la elaboración de especímenes. Aquí presentamos la dosificación utilizada.

**Tabla 3.10** *Dosificación de materiales en mezcla patrón*

	<b>TIPO</b>	<b>CANTERA</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>
AGREGADO 1	Piedra 3/4	Río Chimbo	9,38%
AGREGADO 2	Piedra 1/2	Río Chimbo	14,07%
AGREGADO 3	3/8 + cisco	Río Chimbo	60,97%
AGREGADO 4	Arena de río	Río Chimbo	9,38%
ASFALTO	AC-20	ESMERALDAS	6,2%
<b>TOTAL</b>			<b>100%</b>

**Fuente:** Autores

### **3.1.2.2 Mezcla con Rejuvenecedor**

Para esta mezcla fue utilizado el 2,5 % de Aceite rejuvenecedor Sylvaroad RP1000 y el 97,5% de asfalto.

Para la mezcla asfáltica con rejuvenecedor, la elaboración de las briquetas es similar, el único paso que cambia es el de mezclar durante 15 minutos continuos las cantidades exactas correspondientes de asfalto y rejuvenecedor, siempre procurando que, al momento de realizar esta mezcla, ambos estén a 150 °C.

### **3.1.2.3 Mezcla con RAP**

Este material conlleva asfalto y no puede colocarse 150 °C como es el caso de los agregados vírgenes; el RAP debe ser colocado en el horno a 110 °C durante 1 hora y media para luego poder ser mezclado. Al sacarlo del horno, primero se mezcla el agregado mineral con el RAP por un tiempo de unos 2 a 3 minutos, logrando cierta transferencia de calor, para después proceder a mezclarlo con el asfalto correspondiente. Todas las muestras son de aproximadamente 1200 gr, por lo tanto, la cantidad de RAP que se incluya en la mezcla hará que el contenido de asfalto y de sus agregados varíe.

Para el caso del 10 % de RAP tenemos la siguiente dosificación:

**Tabla 3.11 Mezcla con el 10% de RAP**

	<b>TIPO</b>	<b>CANTERA</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>
AGREGADO 1	Piedra 3/4	Río Chimbo	10,0
AGREGADO 2	Piedra 1/2	Río Chimbo	15,0
AGREGADO 3	3/8 + cisco	Río Chimbo	55,0
AGREGADO 4	Arena de río	Río Chimbo	10,0
AGREGADO 5	RAP	Planta km 26	10,0
<b>TOTAL</b>			<b>100</b>

**Fuente:** Autores

**Tabla 3.12 Contenido de Asfalto para el 10% de RAP**

<b>RAP%: 10</b>			
TAC=	$(0,75 * 0,0508 * 10) + \% \text{ ASFALTO NUEVO}$		
Si TAC= 6,2%			
6,2=	$0,38 + \% \text{ ASFALTO NUEVO}$		
<b>ASFALTO NUEVO: 5,82%</b>			

**Fuente:** Autores.

Por otra parte, para el 20 % de RAP tenemos la siguiente dosificación:

**Tabla 3.13 Mezcla con el 20% de RAP**

	<b>TIPO</b>	<b>CANTERA</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>
AGREGADO 1	Piedra 3/4	Río Chimbo	10,0
AGREGADO 2	Piedra 1/2	Río Chimbo	15,0
AGREGADO 3	3/8 + cisco	Río Chimbo	45,0
AGREGADO 4	Arena de río	Río Chimbo	10,0
AGREGADO 5	RAP	Planta km 26	20,0
<b>TOTAL</b>			<b>100</b>

**Fuente:** Autores

**Tabla 3.14 Contenido de Asfalto para el 20% de RAP**

<b>RAP%: 20</b>			
TAC=	$(0,75 * 0,0508 * 20) + \% \text{ ASFALTO NUEVO}$		
Si TAC= 6,2%			
6,2=	$0,76 + \% \text{ ASFALTO NUEVO}$		
<b>ASFALTO NUEVO: 5,44%</b>			

**Fuente:** Autores

### **3.1.3 Distribución de Especímenes**

En la elaboración de las briquetas se aplicaron 75 golpes por cara con el martillo Marshall, para para obtener un 4% de vacíos, en el caso de las briquetas que serán ensayas para daño en agua se le aplicó 35 golpes por cara (en algunos casos), para así obtener 7 % de vacío. Este valor se lo calculó empíricamente, ya que llegamos a ese valor mediante un tanteo.

**Figura 3.15** Distribución de briquetas para cada ensayo

Distribucion de Briquetas				
<b>Módulo de Rigidez</b>	<b>Fatiga</b>	<b>Creep</b>		<b>Daño en agua por TSR</b>
3 Briquetas con 4% de vacíos.	3 Briquetas con 4% de vacíos.	3 Briquetas con 4% de vacíos.	3 Briquetas saturadas con el 7% de vacíos	3 Briquetas sin saturar con el 7% de vacíos

**Fuente:** Autores

### 3.1.4 Metodología de Saturación

Para este proceso, se siguió la normativa ASTM D4867/D 4867M – 04 con lo que respecta a la resistencia retenida a tracción indirecta, el cual será explicado a continuación.

Con las 6 briquetas elaboradas para daño en agua uno de los parámetros a cumplir es que contengan entre el 6,5 y 7,5% de vacíos.

**Figura 3.16** Peso de la briketa en seco



**Fuente:** Autores

Procedemos a dividir en dos subgrupos, mediante el cual el promedio de porcentaje de vacíos sea igual o lo más aproximado posible. Posteriormente con la ayuda de la bomba de vacíos y un picnómetro, saturamos un subgrupo de briquetas; el cual se busca un nivel de saturación entre el 55 y 80% según (ASTM, 2004). Al finalizar colocamos las briquetas



en baño maría a 60 °C durante 24 horas, una vez concluido este tiempo, sumergimos las briquetas a 25 °C durante una hora, para así poder ensayarlas.

**Figura 3.17** Saturación de briquetas



**Fuente:** Autores

**Figura 3.18** Briquetas en baño maría



**Fuente:** Autores

## 4 Capítulo

### 4.1 Análisis de resultados

#### 4.1.1 Pruebas de desempeño

##### 4.1.1.1 Módulo de rigidez

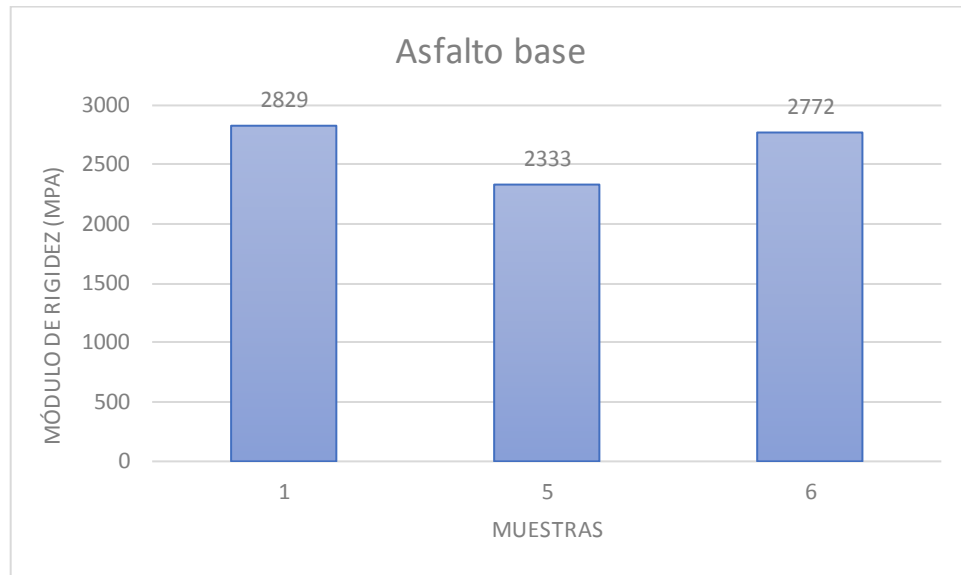
Se puede apreciar desde la figura 4.1 hasta la 4.6 los resultados de módulo de rigidez de cada una de las 3 briquetas ensayadas por cada combinación estudiada. Mientras que en las tablas 4.1 hasta la 4.6 se determina los valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación.

*Tabla 4.1 Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 1*

<b>ASFALTO BASE</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)</b>
1	2829
5	2333
6	2772
<b>PROMEDIO</b>	<b>2645</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>271</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>10,3</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.1** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 1



**Fuente:** Autores

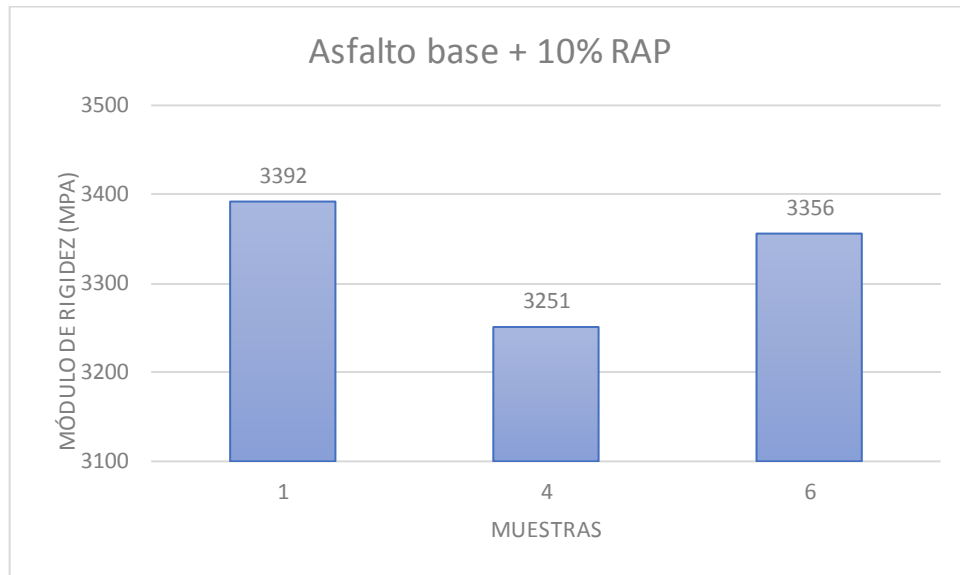
Esta combinación resultó en un módulo de rigidez promedio de 2645 MPa, una desviación estándar de 271 MPa, lo que provocó un coeficiente de variación de 10,3%.

**Tabla 4.2** Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 2

Asfalto + 10% RAP	
MUESTRAS	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1	3392
4	3251
6	3356
<b>PROMEDIO</b>	<b>3333</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>73</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>2,2</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.2** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez, en la Combinación 2



**Fuente:** Autores

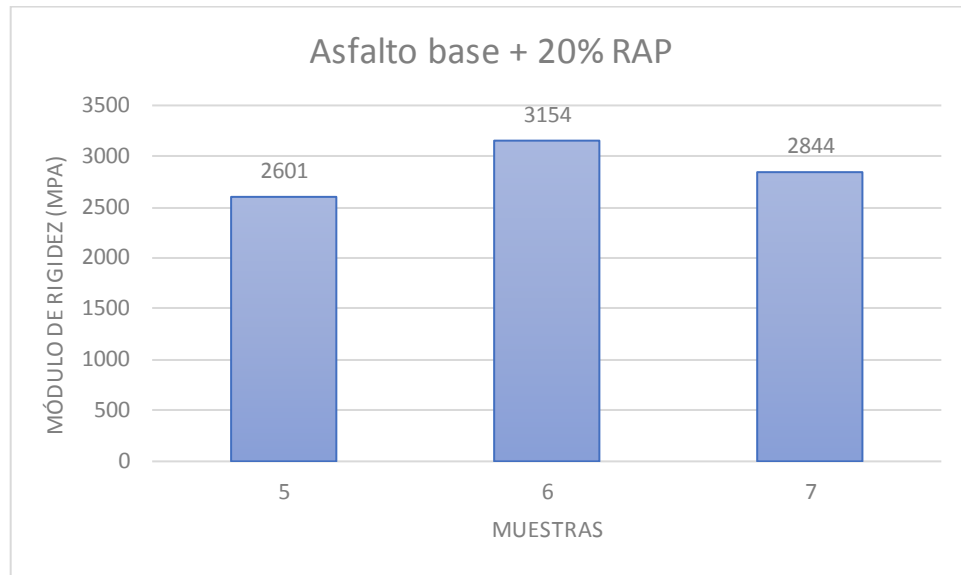
En esta combinación obtuvimos para el módulo de rigidez un valor promedio de 3333 MPa, con una desviación estándar de 73 MPa lo que originó un coeficiente de variación de 2,2%

**Tabla 4.3** Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 3

<b>Asfalto + 20% RAP</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)</b>
5	2601
6	3154
7	2844
<b>PROMEDIO</b>	<b>2866</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>277</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>9,7</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.3** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 3



**Fuente:** Autores

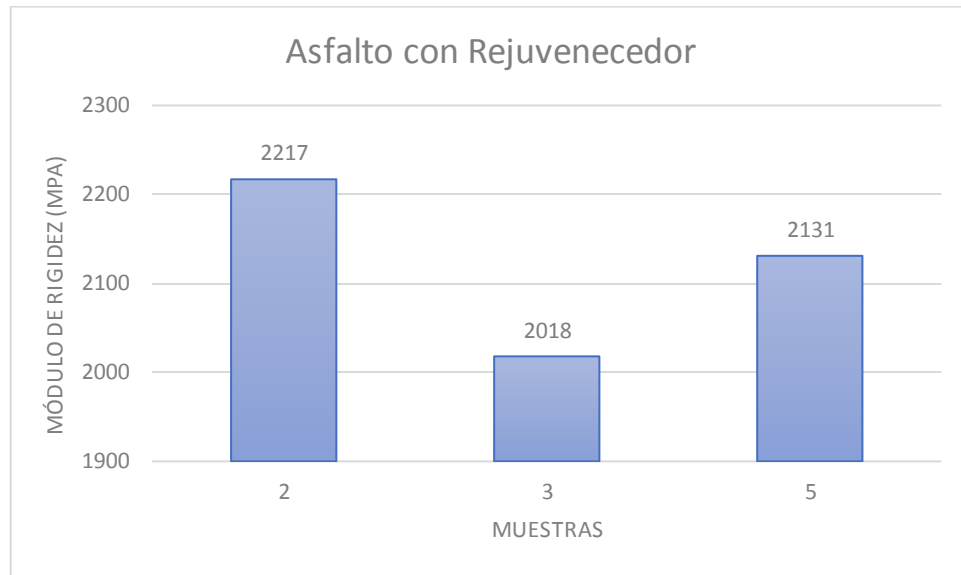
En esta combinación obtuvimos un módulo de rigidez promedio de 2866 MPa con una desviación estándar de 277 MPa, resultando en un coeficiente de variación de 9,7%.

**Tabla 4.4** Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 4

<b>Asfalto con Rejuvenecedor</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)</b>
2	2217
3	2018
5	2131
<b>PROMEDIO</b>	<b>2122</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>100</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>4,7</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.4** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez, en la Combinación 4



**Fuente:** Autores

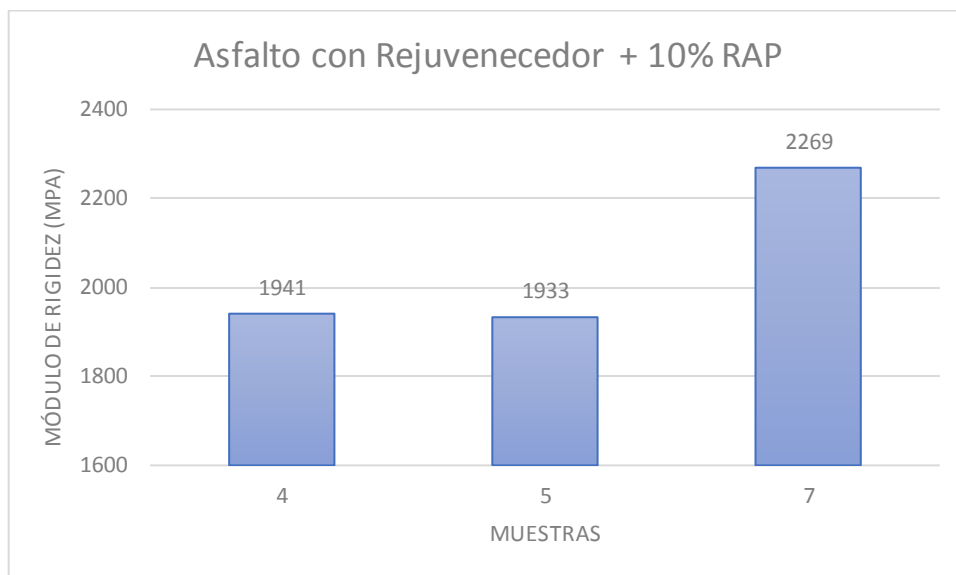
Esta combinación resultó en un módulo de rigidez promedio de 2122 MPa, una desviación estándar de 100, lo que provocó un coeficiente de variación de 4,7%.

**Tabla 4.5** Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 5

<b>Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)</b>
4	1941
5	1933
7	2269
<b>PROMEDIO</b>	<b>2048</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>192</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>9,4</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.5** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez, en la Combinación 5



**Fuente:** Autores

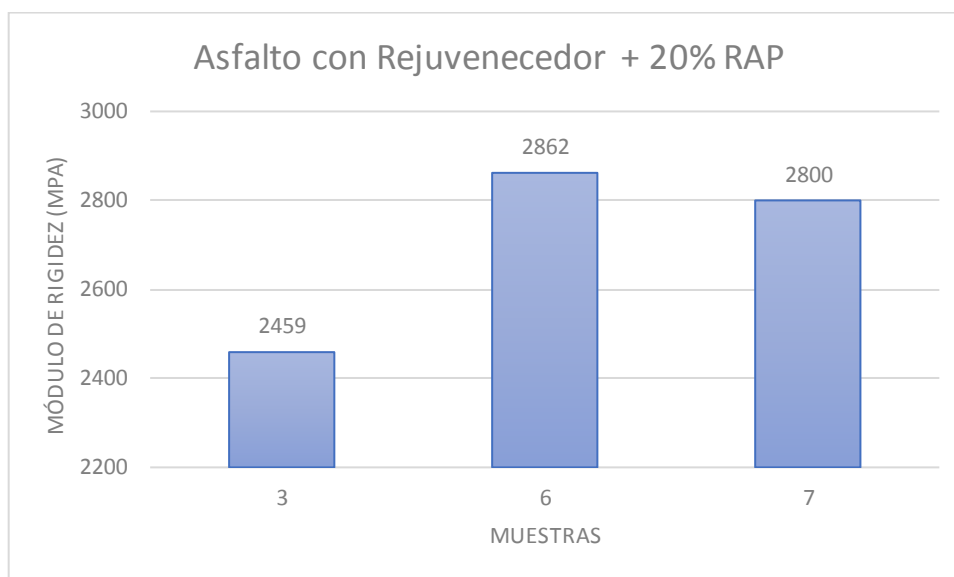
En esta combinación obtuvimos para el módulo de rigidez un valor promedio de 2048 MPa, con una desviación estándar de 192 MPa lo que originó un coeficiente de variación de 9,4%

**Tabla 4.6** Resultados del ensayo Módulo de Rigidez en la Combinación 6

Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP	
MUESTRAS	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
3	2459
6	2862
7	2800
<b>PROMEDIO</b>	<b>2707</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>217</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>8,0</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.6** Gráfico de barras del ensayo Módulo de Rigidez, en la Combinación 6



**Fuente:** Autores

En esta combinación obtuvimos un módulo de rigidez promedio de 2707 MPa con una desviación estándar de 217 MPa, resultando en un coeficiente de variación de 8,0%.

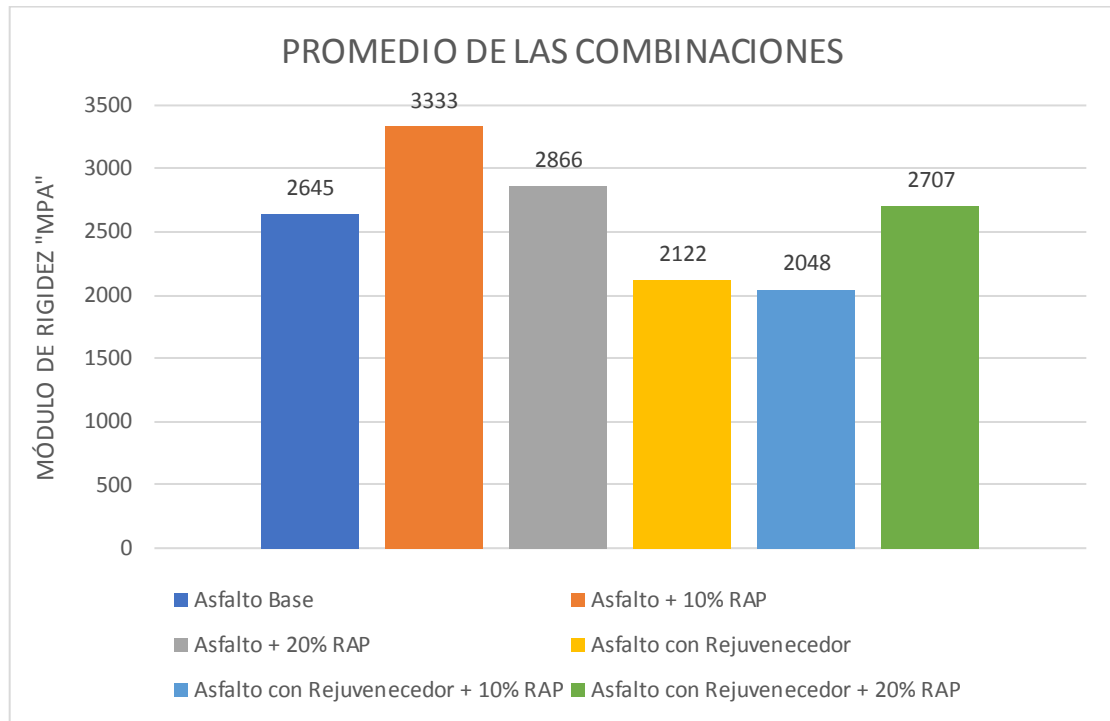
**Tabla 4.7** Valores promedio en las pruebas de Módulo de Rigidez

<b>Combinaciones</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)</b>
<b>Asfalto base</b>	2645
<b>Asfalto + 10% RAP</b>	3333
<b>Asfalto + 20% RAP</b>	2866
<b>Asfalto con Rejuvenecedor</b>	2122
<b>Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP</b>	2048
<b>Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP</b>	2707

**Fuente:** Autores



**Figura 4.7** Gráfico de barras de los valores promedio de Módulo de Rigidez



**Fuente:** Autores

La Tabla 4.7 y la Figura 4.7 reportan los valores promedio para cada combinación, y se destaca la variación de los módulos debido a las diferentes combinaciones que se realizaron con rejuvenecedor y con RAP en comparación con la mezcla asfáltica sin modificar.

Analizando los valores promedio, se puede observar que la mezcla con asfalto base y 10% de RAP es la del valor más alto con 3333 MPa, lo que significa una mezcla “tolerable” considerando los rangos de la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrolladas por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG. Además, se ha observado que la adición del rejuvenecedor reduce el valor del módulo de rigidez, incluso en las que están mezcladas con RAP; pero casi todas las combinaciones todavía se clasifican como mezclas tolerables. Las únicas excepciones son la combinación 4 y la 5, que tienen un valor de 2122 MPa y 2048 MPa respectivamente, estas se clasifican como mezclas inadecuadas.

### 4.1.1.2 Deformación permanente o creep

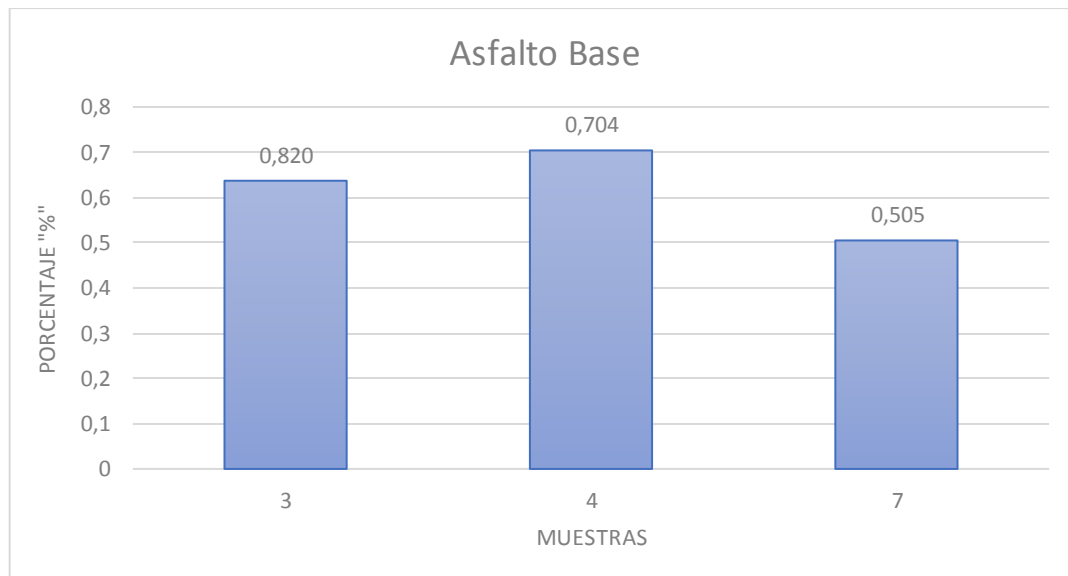
A continuación; puede verse que las Tablas 4.8 a 4.13 y las Figuras 4.8 a 4.13 muestran los resultados de cada una de las briquetas ensayadas para las combinaciones en este estudio con respecto a su deformación bajo compresión cíclica.

**Tabla 4.8** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 1

Asfalto Base	
MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)
3	0,637
4	0,704
7	0,505
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,62</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,047</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>7,7</b>

Fuente: Autores

**Figura 4.8** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 1



Fuente: Autores

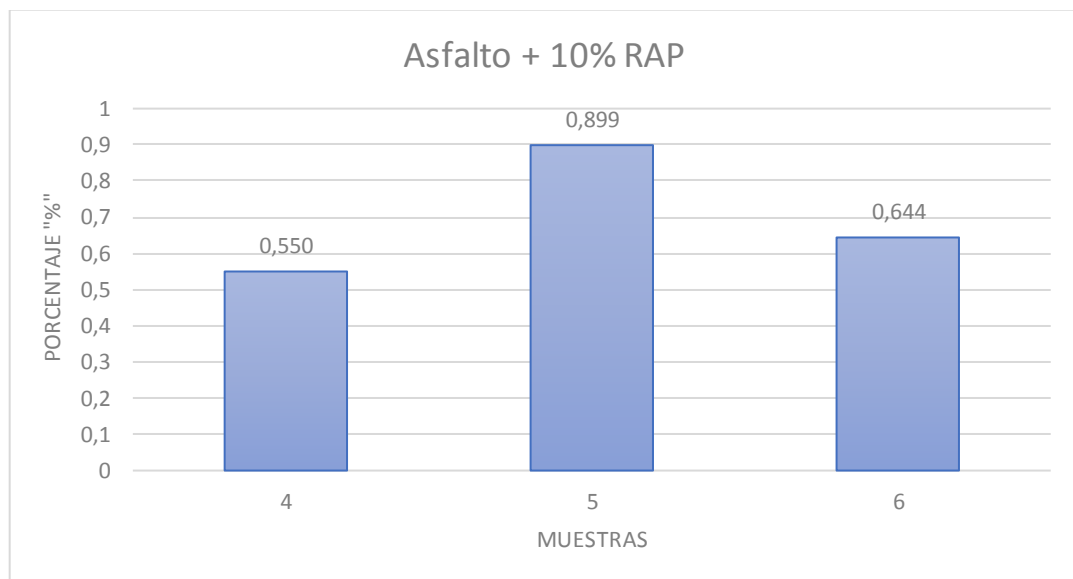
En esta combinación obtuvimos un valor promedio de 0,62% de deformación permanente, con una desviación estándar de 0,047% lo que originó un coeficiente de variación de 7,7%.

**Tabla 4.9** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 2

<b>Asfalto + 10% RAP</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>CREEP DINÁMICO (%)</b>
4	0,550
5	0,899
6	0,644
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,70</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,247</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>35,4</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.9** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 2



**Fuente:** Autores

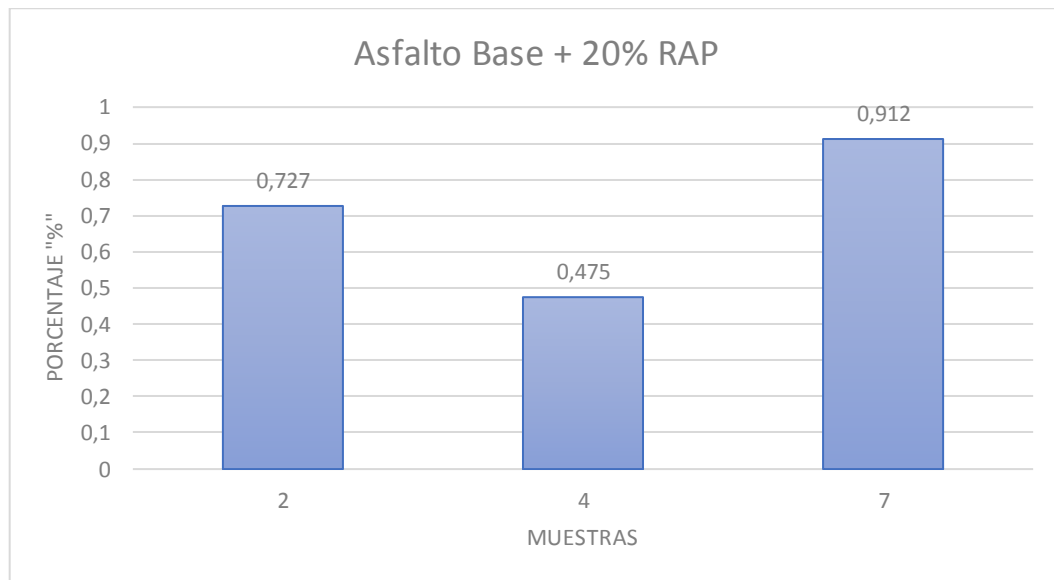
Esta combinación resulto en un valor promedio de 0,70% de deformación permanente, una desviación estándar de 0,247%, lo que provocó un coeficiente de variación de 35,4%.

**Tabla 4.10** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 3

Asfalto + 20% RAP	
MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)
2	0,727
4	0,475
7	0,912
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,70</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,178</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>25,3</b>

Fuente: Autores

**Figura 4.10** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 3



Fuente: Autores

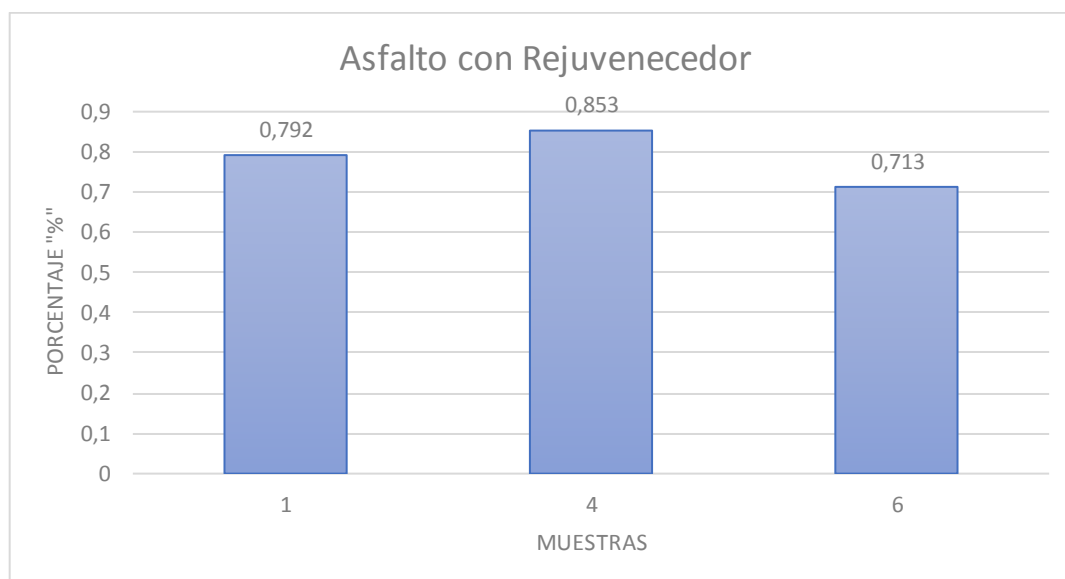
En esta combinación se obtuvo una deformación permanente con un valor promedio de 0,70%, con una desviación estándar de 0,178%, resultando en un coeficiente de variación de 25,3%.

**Tabla 4.11** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 4

Asfalto con Rejuvenecedor	
MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)
1	0,792
4	0,853
6	0,713
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,79</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,043</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>5,5</b>

Fuente: Autores

**Figura 4.11** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 4



Fuente: Autores

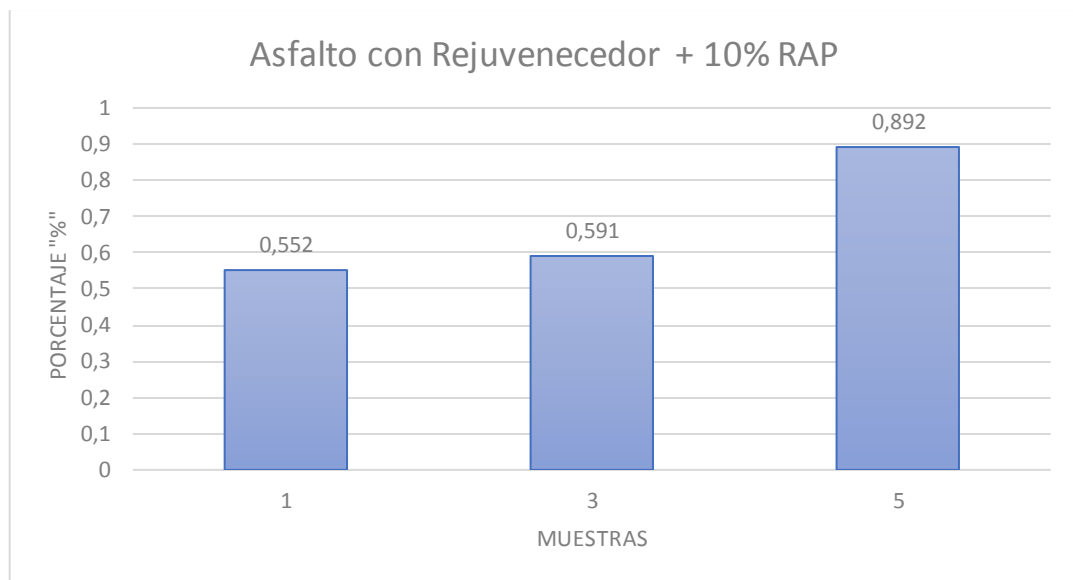
En esta combinación obtuvimos un valor promedio de 0,79% de deformación permanente, con una desviación estándar de 0,043% lo que originó un coeficiente de variación de 5,5%.

**Tabla 4.12** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 5

<b>Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>CREEP DINÁMICO (%)</b>
1	0,552
3	0,591
5	0,892
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,68</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,028</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>4,1</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.12** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 5



**Fuente:** Autores

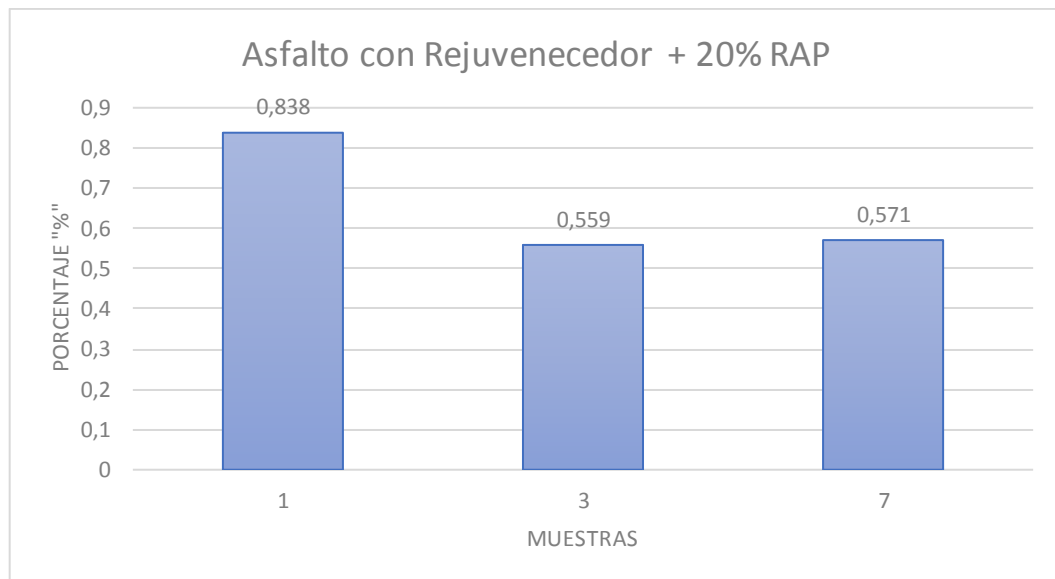
Esta combinación resultó en un valor promedio de 0,68% de deformación permanente, una desviación estándar de 0,028%, lo que provocó un coeficiente de variación de 4,1%

**Tabla 4.13** Resultados del ensayo Creep en la Combinación 6

<b>Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP</b>	
<b>MUESTRAS</b>	<b>CREEP DINÁMICO (%)</b>
1	0,838
3	0,559
7	0,571
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,66</b>
<b>DES. ESTANDAR</b>	<b>0,197</b>
<b>COEF. VARIACIÓN</b>	<b>30,1</b>

**Fuente:** Autores

**Figura 4.13** Gráfica de barras del ensayo Creep en la Combinación 6



**Fuente:** Autores

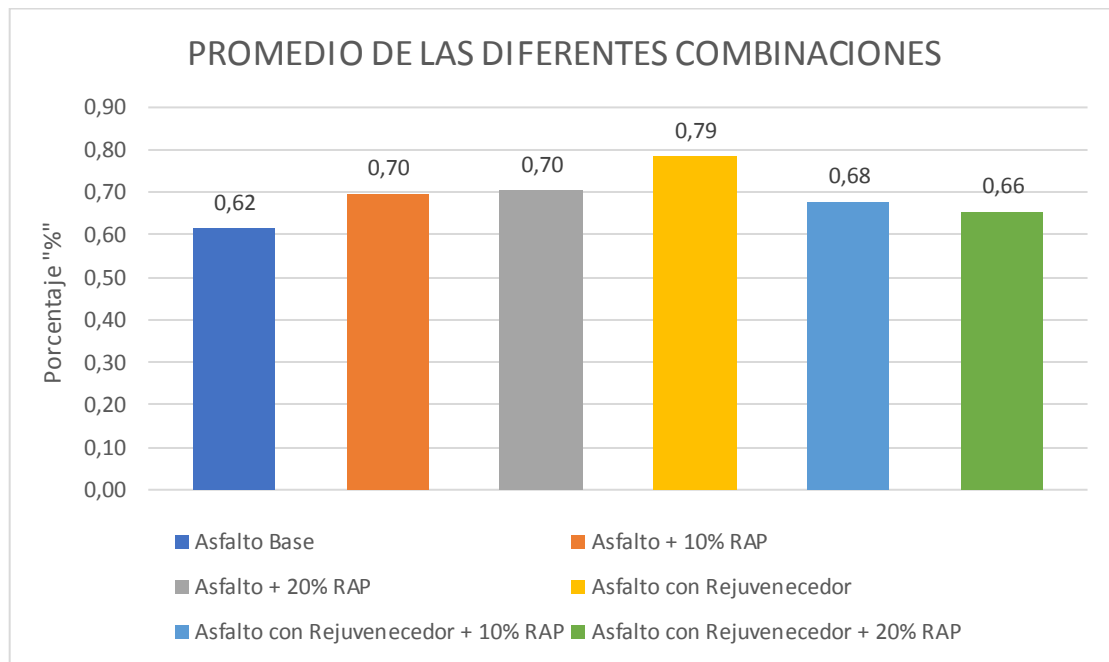
En esta combinación se obtuvo una deformación permanente con un valor promedio de 0,66%, con una desviación estándar de 0,197%, resultando en un coeficiente de variación de 30,1%.

**Tabla 4.14** Tabla de comparación del promedio en el ensayo Creep

Combinaciones	
MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)
ASFALTO BASE	0,62
Asfalto + 10% RAP	0,70
Asfalto + 20% RAP	0,70
Asfalto con Rejuvenecedor	0,79
Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP	0,68
Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP	0,66

Fuente: Autores

**Figura 4.14** Gráfico comparativo de promedios en el ensayo Creep



Fuente: Autores

Analizando los valores promedios de las briquetas, se encontró que los valores de las seis combinaciones están por debajo del 1%, lo que indica que las mezclas se comportan satisfactoriamente frente a la deformación plástica. Este criterio se basa en los requisitos



para pruebas de desempeño para dispositivos NAT desarrollados por el Laboratorio de Carreteras de UCSG.

#### 4.1.1.3 Leyes de fatiga

En las Tablas 4.15 a 4.20 y las Figuras 4.15 a 4.20, se puede apreciar todos los resultados en lo que respecta a los ensayos de fatiga.

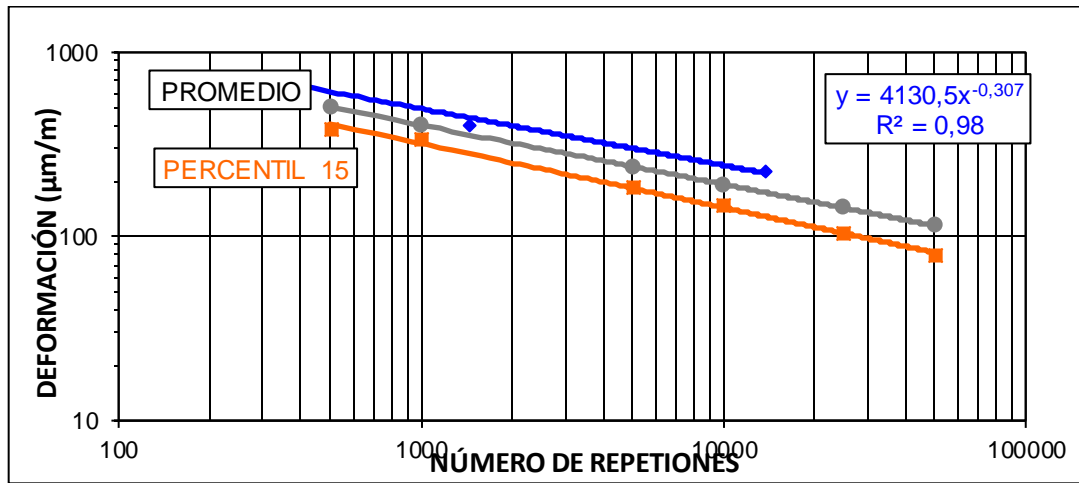
*Tabla 4.15 Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 1*

**ASFALTO BASE**

<b>ESFUERZO (Kpa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)</b>
250	13811	112	2238
350	1431	196	1783
450	321	362	1243

**Fuente:** Autores

**Figura 4.15** Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 1



**Fuente:** Autores

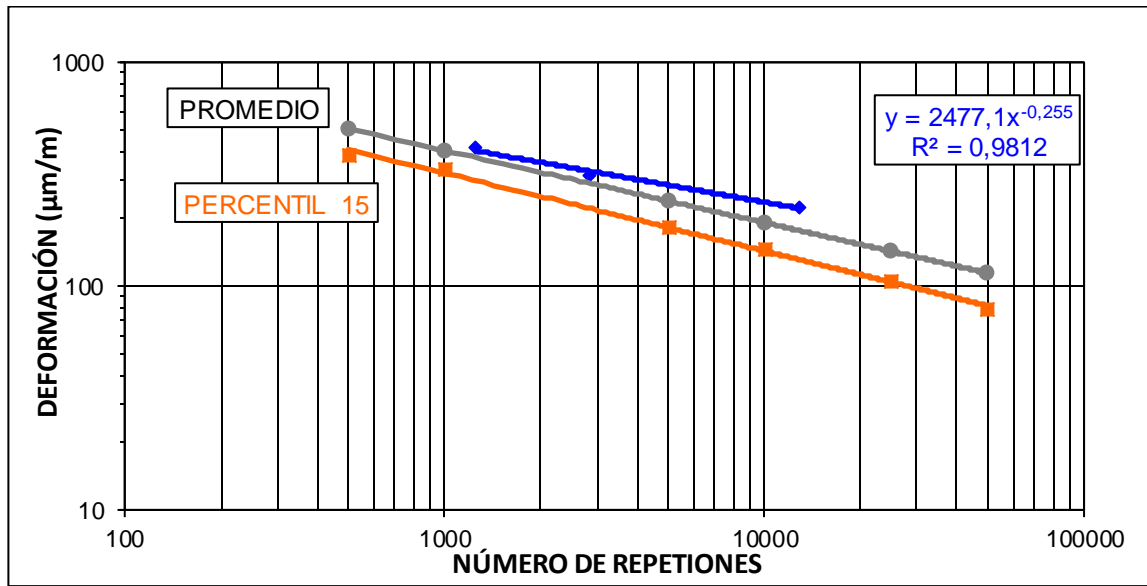
**Tabla 4.16** Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 2

Asfalto + 10% RAP

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
300	12831	0,37	2717
400	2831	1,90	2628
450	1251	0,90	2221

**Fuente:** Autores

**Figura 4.16** Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 2



Fuente: Autores

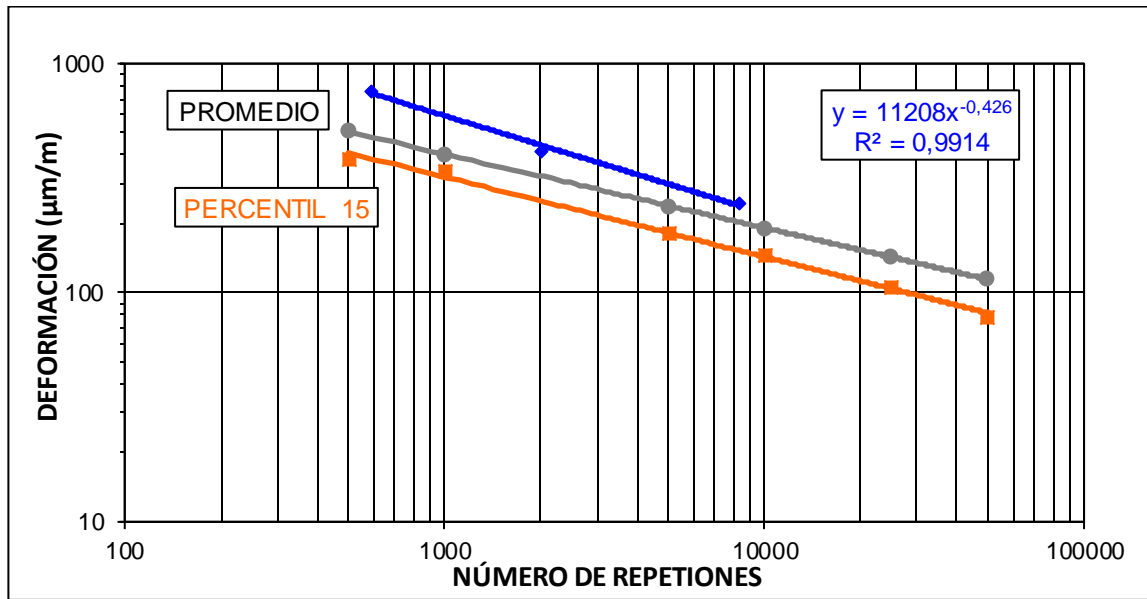
**Tabla 4.17** Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 3

Asfalto + 20% RAP

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
300	8291	0,40	2483
400	2011	2,53	1979
450	591	1,66	1205

Fuente: Autores

**Figura 4.17** Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 3



Fuente: Autores

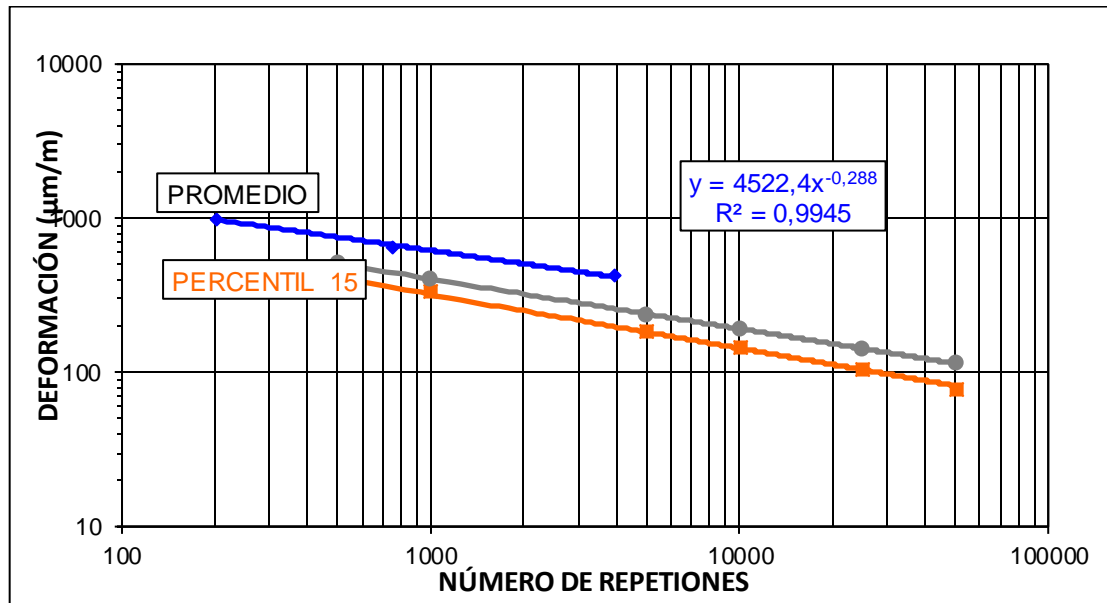
**Tabla 4.18** Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 4

Asfalto con Rejuvenecedor

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
300	3951	1,38	1452
400	751	2,37	1266
450	201	7,61	920

Fuente: Autores

Figura 4.18 Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 4



Fuente: Autores

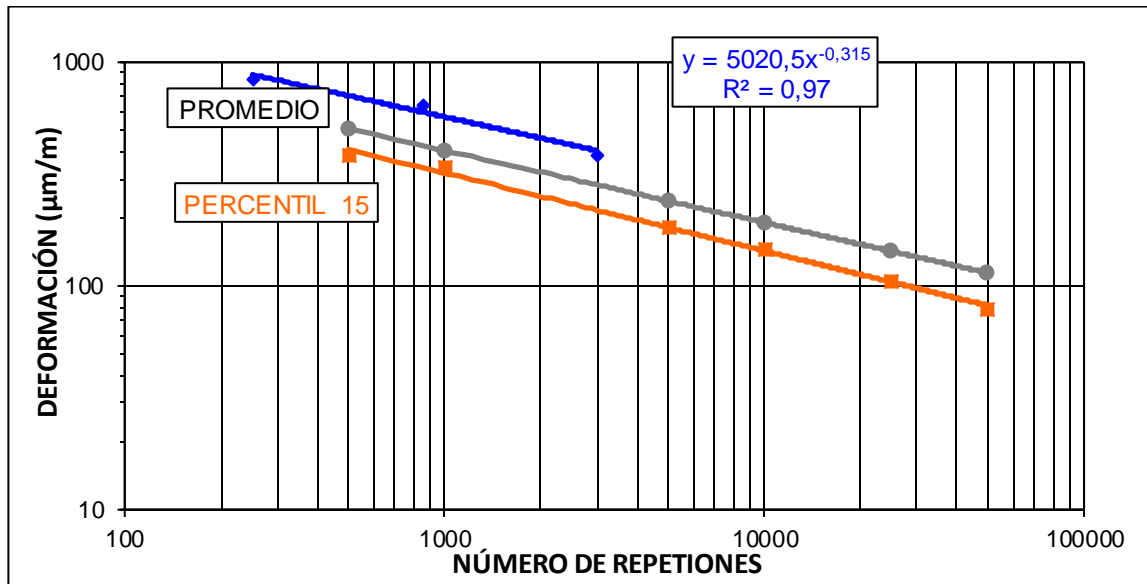
Tabla 4.19 Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 5

Asfalto con Rejuvenecedor +  
10% RAP

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN ( $\times 10^{-6}$ )	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
300	2991	1,26	1584
400	851	2,38	1263
450	251	6,42	1090

Fuente: Autores

**Figura 4.19** Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 5



Fuente: Autores

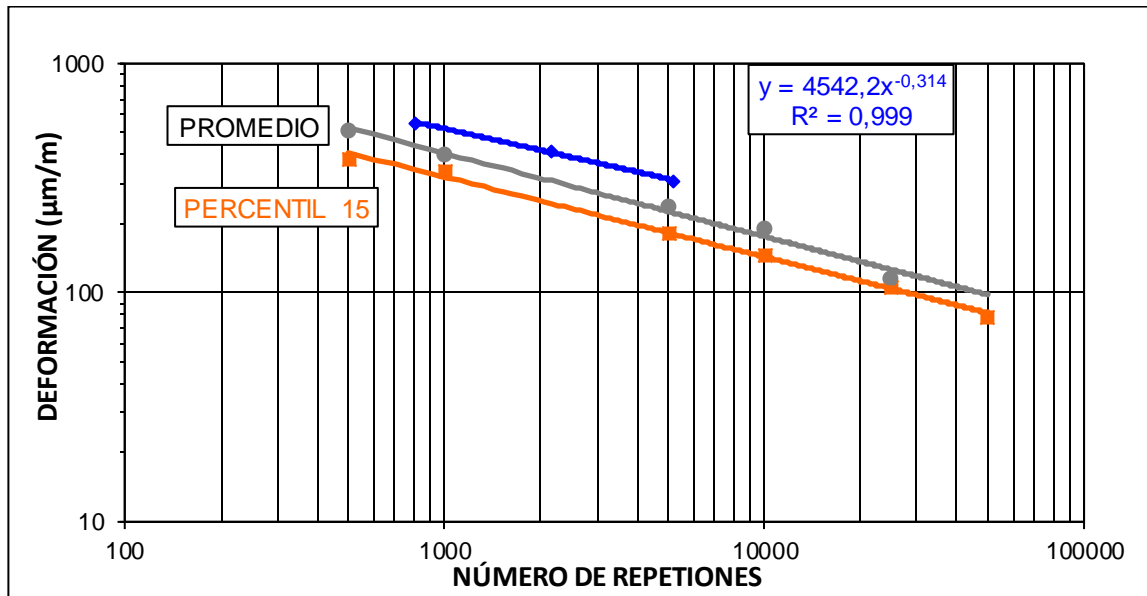
**Tabla 4.20** Resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 6

Asfalto con Rejuvenecedor +  
20% RAP

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
300	5171	1,01	1989
350	2141	1,73	1731
450	811	4,20	1668

Fuente: Autores

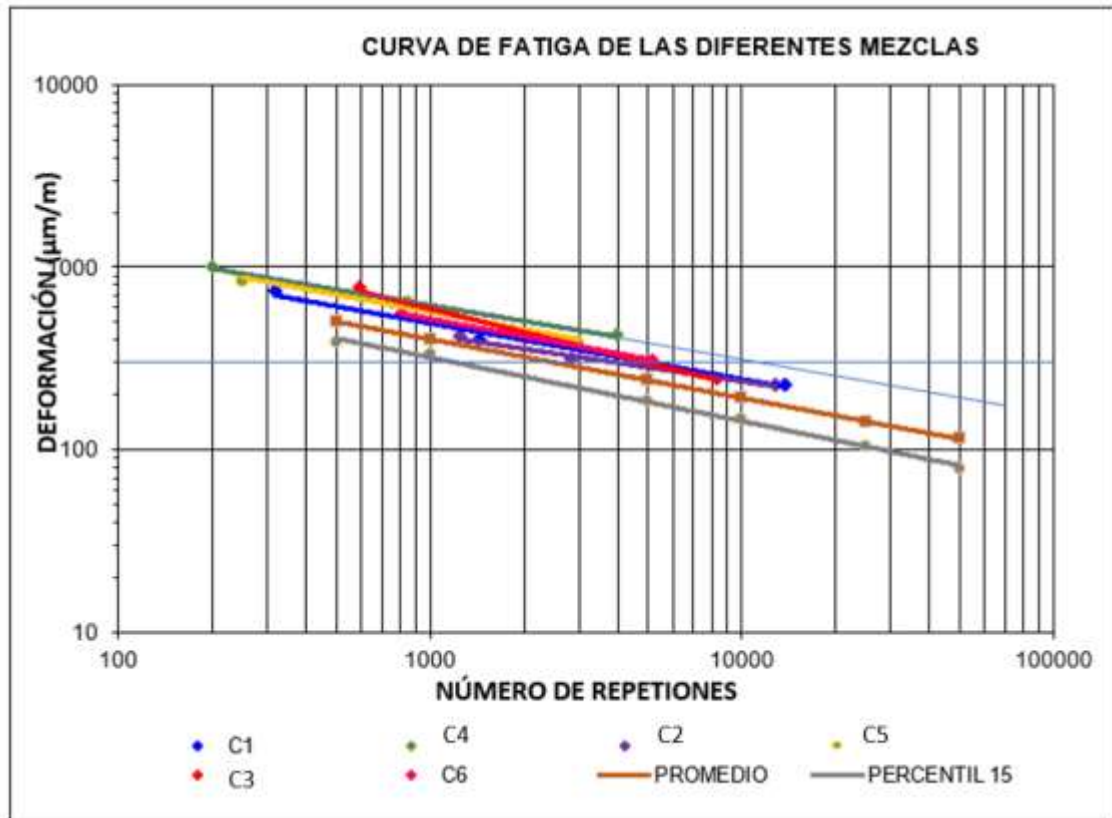
**Figura 4.20** Gráfico de los resultados del ensayo Fatiga en la Combinación 6



**Fuente:** Autores

Para evaluar la resistencia a la fatiga se tiene que analizar las gráficas de número de repeticiones vs deformación de cada mezcla utilizada. La cuarta y quinta mezcla presentan el mejor comportamiento frente a la fatiga ya que la curva promedio se encuentra muy por debajo de la curva de las mezclas antes mencionadas. La mezcla 2 se encuentra muy cercana a la curva promedio por lo que se debe tener un poco de cuidado, no obstante, también cumple con los criterios propuestos por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG para pruebas de desempeño con equipo NAT.

**Figura 4.21** Curva de fatiga de las diferentes combinaciones



**Fuente:** Autores

Como se muestra en la Figura 4.21 todas las combinaciones cumplen con los criterios propuestos por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG para leyes de fatiga con equipo NAT. El criterio exige que las curvas estén por encima de la curva promedio para que su comportamiento frente a la fatiga sea adecuado.



## 4.1.2 Daño en agua mediante TSR

Los resultados obtenidos de esta prueba los podemos observar en las Tablas 4.21 a 4.26.

*Tabla 4.21 Resultados de daño en agua en la Combinación 1*

Asfalto Base								
Briqueta	No.	4	6	5	1	2	3	
Espesor (cm)	t	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,5	
Lectura dial condición seca	LDd	191	203	194				
Carga en condición seca (kg)	P	835	887	848				857
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	8,2	8,7	8,3				8,4
Lectura dial con inmersión	LDm				129	137	120	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				633	622	645	633
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				6,3	6,2	6,2	6,2
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std							74,3

Fuente: Autores

Para esta combinación se determinó un porcentaje de resistencia retenido de 74,3.

*Tabla 4.22 Resultados de daño en agua en la Combinación 2*

Asfalto + 10% RAP								
Briqueta	No.	1	2	6	3	4	5	
Espesor (cm)	t	5,6	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	189	205	208				
Carga en condición seca (kg)	P	826	894	907				876
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	9,2	8,9	9,0				9,1
Lectura dial con inmersión	LDm				147	147	130	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				644	644	572	620
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				6,4	6,3	5,6	6,1
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std							67,4

Fuente: Autores

Esta combinación recibió un porcentaje de resistencia retenida de 67,4%.

**Tabla 4.23 Resultados de daño en agua en la Combinación 3**

Asfalto + 20% RAP								
Briqueta	No.	3	4	6	1	2	5	
Espesor (cm)	t	6,4	6,4	6,4	6,3	6,4	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	218	224	203				
Carga en condición seca (kg)	P	953	980	887				940
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	9,3	9,6	8,7				9,2
Lectura dial con inmersión	LDm				129	107	121	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				622	589	601	604
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				6,2	5,8	5,9	5,9
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std							64,6

**Fuente:** Autores

Para esta combinación se determinó un porcentaje de resistencia retenido de 64,6%.

**Tabla 4.24 Resultados de daño en agua en la Combinación 4**

Asfalto con Rejuvenecedor								
Briqueta	No.	3	4	5	1	2	6	
Espesor (cm)	t	6,5	6,4	6,4	6,4	6,5	6,3	
Lectura dial condición seca	LDd	129	154	158				
Carga en condición seca (kg)	P	567	676	692				645
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	5,5	6,6	6,8				6,3
Lectura dial con inmersión	LDm				124	109	120	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				544	476	526	515
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				5,3	4,6	5,2	5,0
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std							80,3

**Fuente:** Autores

Esta combinación recibió un porcentaje de resistencia retenida de 80,3%, que cumple con los requisitos antes mencionados.

**Tabla 4.25 Resultados de daño en agua en la Combinación 5**

Asfalto con Rejuvenecedor + 10 % RAP								
--------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Briqueta	No.	2	5	6	1	3	4		
Espesor (cm)	t	6,5	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4		
Lectura dial condición seca	LDd	160	160	171					
Carga en condición seca (kg)	P	699	699	748				715	
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	6,7	6,8	7,2				6,9	
Lectura dial con inmersión	LDm				124	129	136		
Carga luego de inmersión (kg)	P'				522	546	576	548	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				5,0	5,3	5,6	5,3	
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std								77,0

Fuente: Autores

Para esta combinación se determinó un porcentaje de resistencia retenido de 77,0%, el cual cumple con las exigencias ya comentadas.

*Tabla 4.26 Resultados de daño en agua en la Combinación 6*

Asfalto con Rejuvenecedor + 20 % RAP									
Briqueta	No.	1	2	3	4	5	6		
Espesor (cm)	t	6,3	6,3	6,3	6,4	6,3	6,4		
Lectura dial condición seca	LDd	179	190	172					
Carga en condición seca (kg)	P	785	830	753				789	
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	7,8	8,3	7,5				7,9	
Lectura dial con inmersión	LDm				135	140	121		
Carga luego de inmersión (kg)	P'				590	612	531	578	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				5,8	6,1	5,2	5,7	
% resistencia retenida	TSR=100Stm/Std								72,4

Fuente: Autores

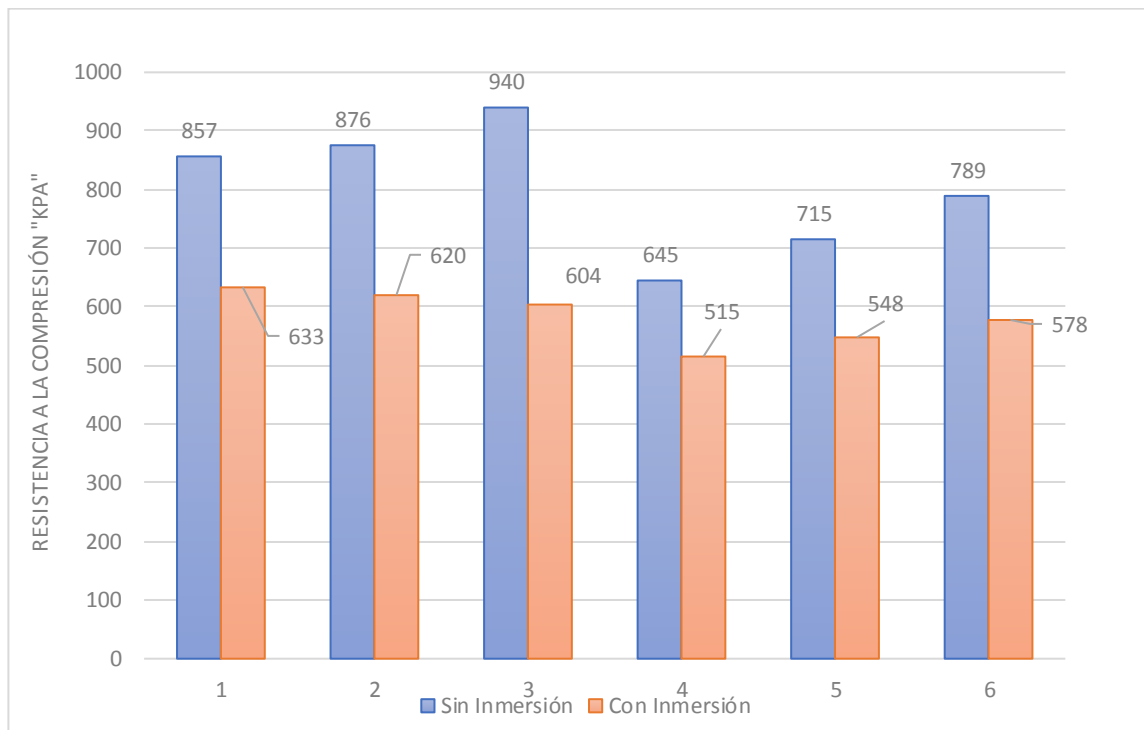
Esta combinación recibió un porcentaje de resistencia retenida de 72,4%.

**Tabla 4.27** Comparación de las mezclas mediante el ensayo TSR

Ensayo TSR			
Combinación	Resistencia sin inmersión (kPa)	Resistencia con inmersión (kPa)	% Retenido
Asfalto Base	857	633	74,3
Asfalto + 10% RAP	876	620	67,4
Asfalto + 20% RAP	940	604	64,6
Asfalto con Rejuvenecedor	645	515	80,3
Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP	715	548	77,0
Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP	789	578	72,4

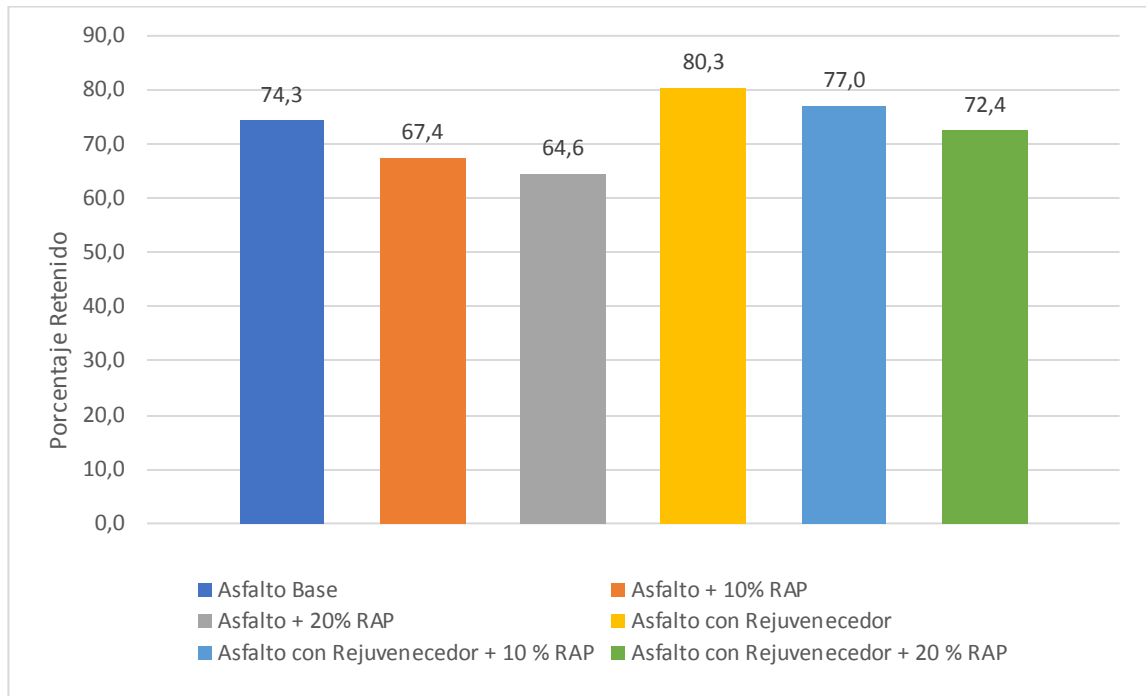
**Fuente:** Autores

**Figura 4.22** Gráfico de barras de la resistencia a compresión



**Fuente:** Autores

**Figura 4.23** Comparación de los porcentajes de resistencia retenido



**Fuente:** Autores

Al considerar la resistencia retenida, cuyo factor es el indicador de un adecuado comportamiento ante el daño en agua, refleja que únicamente la mezcla 4, asfalto + rejuvenecedor, cumple con la exigencia manteniendo un 80% de su resistencia retenida. De las otras mezclas cabe destacar que aquellas de peor rendimiento fueron la 2 y la 3.

## **5 Capítulo**

### **5.1 Conclusiones y Recomendaciones**

#### **5.1.1 Conclusiones**

1.- La mayoría de las pruebas de desempeño a mezclas asfálticas con el equipo NAT dieron valores satisfactorios, ya que cumplen con las exigencias propuestas por el Laboratorio de Asfaltos de la UCSG. Las mezclas correspondientes a la Combinación No. 4 y No. 5 evaluadas mediante el ensayo de módulo de rigidez son los únicos casos que resultaron ser inadecuados.

2.- Todas las combinaciones analizadas cumplieron las exigencias propuestas por el Laboratorio de Asfaltos de la UCSG para pruebas de compresión cíclica uniaxial (Creep).

3.- Al analizar las leyes de fatiga desarrolladas para las seis mezclas se puede concluir que el uso de rejuvenecedores mejora dicho comportamiento ya que las mezclas 4 y 5 presentan un mejor comportamiento frente a la fatiga. La combinación No. 2, confeccionada con asfalto base y 10% de RAP se encuentra muy cercana a la línea límite, curva promedio, superior de la exigencia en el gráfico, aunque por encima de la misma. Las líneas de fatiga de las restantes combinaciones se ubican por encima de las mencionadas y más alejadas de los límites de referencia, es decir, muestran un posible mejor comportamiento a la fatiga.

4.- Al evaluar el daño por agua en las mezclas asfálticas analizadas mediante el ensayo TSR, se observa que la combinación No. 4, cumple la exigencia, con valores calculados de resistencia retenida mayores a 80%, mientras que las demás combinaciones muestran valores inadecuados. Cabe destacar que aquellas de peor rendimiento fueron la 2 y la 3.

5.- A partir de los resultados obtenidos se puede destacar que la adición de RAP en bajas cantidades en mezclas asfálticas en caliente no alteró considerablemente el comportamiento de las mismas, siendo exclusivamente el parámetro del daño por agua aquel que sufrió un impacto negativo. No obstante, se debe mencionar que la mayoría de exigencias evaluadas están planteadas para mezclas convencionales por lo que el incumplimiento de las mismas no condiciona la aplicación de este tipo de mezclas, por ejemplo, en vías de segundo orden.

## **5.1.2 Recomendaciones**

- 1.- Se recomienda continuar con el estudio del uso de RAP en mayor proporción.

## 6 Capítulo

### 6.1 Referencias

- Al-Harty, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., & Taha, R. (2002). Journal of Materials in Civil Engineering. En *Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases* (págs. 239-245). Estados Unidos.
- Asphalt Institute. (1992). *Principios de la Construcción de pavimento de mezclas asfálticas en caliente MS-22*.
- Asphalt Institute. (2001). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Estados Unidos: MS-22 (2ª ed.).
- ASTM. (2004). *Método de prueba estándar para Efecto de la humedad en las mezclas de pavimentación de hormigón asfáltico*. Estados Unidos: D 4867/D 4867M.
- Buitrago, A., & González, B. (2016). *Caracterización del rap e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas*. Bogotá: Bogotá D.C.
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice*. (Publication No. FHWAHRT-11-021).
- Gamba, G., & Mercado, J. (2004). *Concepción de un ensayo para establecer*. Bucaramanga: Colombia: Universidad industrial de.
- Han, J., Thakur, S., Chong, O., & Parsons, R. (2011). *Laboratory Evaluation of Characteristics of Recycled Asphalt Pavement in Kansas*. Kansas: Kansas Department of Transportation.
- Hines, M. (2015). *Método NCHRP 495*. Georgia.
- Huntington, G., Khaled, K., & Koch, S. (2013). *Performance of Reclaimed Asphalt Pavement on Unpaved Roads*. Universidad de Wyoming, Centro de Transferencia de Tecnológica de Wyoming. Obtenido de [https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26087/dot\\_26087\\_DS1.pdf](https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26087/dot_26087_DS1.pdf)
- Icaza, K., & Mera, W. (2018). *Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas*. Guayaquil: Tesis de Pregrado.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Productos derivados del petróleo.cemento asfáltico(clasificación por viscosidad)*. Quito, Ecuador.
- Kennedy, T. W., Roberts, F. L., & Anagnos, J. N. (1984). *Texas Boiling Test*. Estados Unidos: Austin Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- López, A. (2014). Evaluación de mezclas asfálticas mediante. En A. W. López. Guayaquil: Trabajo de Titulación.
- Márquez, M., & Ureta, N. (2018). *Estudio del efecto de rejuvenecedores en el*. Guayaquil: Trabajo de titulación.
- Minaya, S., & Ordóñez, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos*. Lima, Perú: ICG.
- Mohajeri, M. (2015). *Hot Mix Asphalt Recycling*. Practices and principles. ISBN 9789461864215.

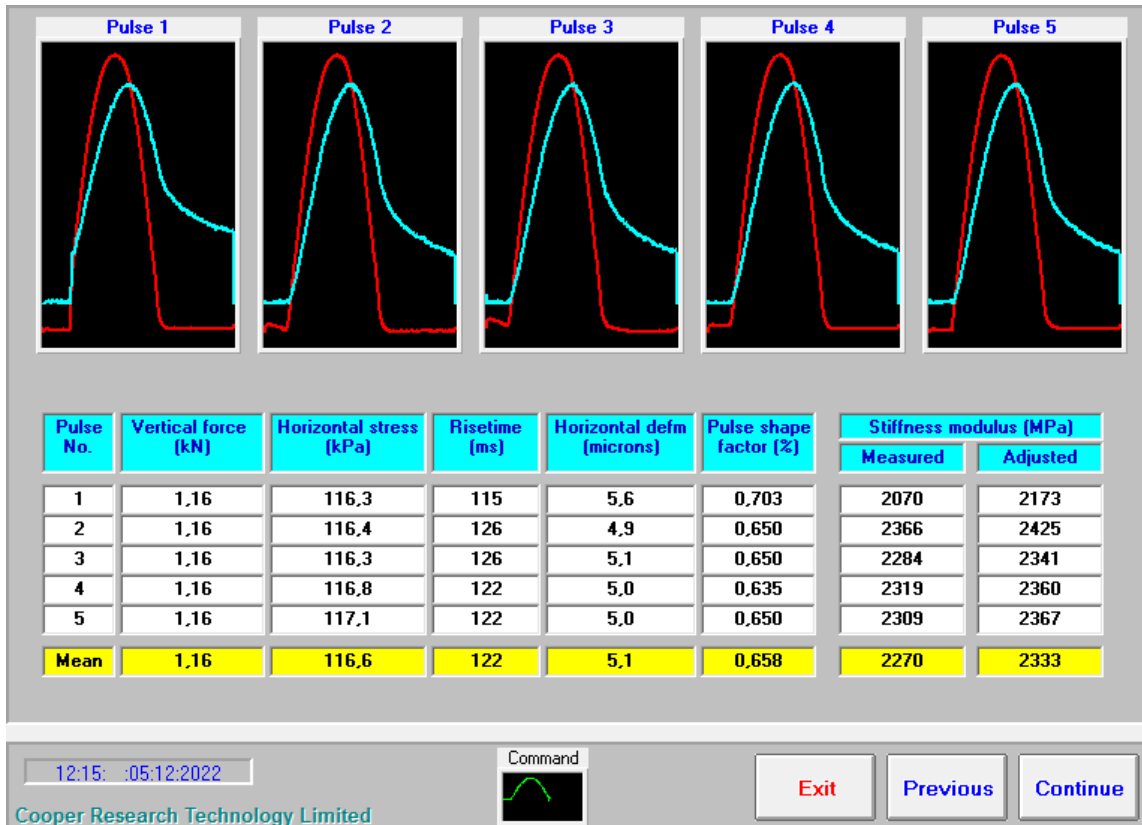


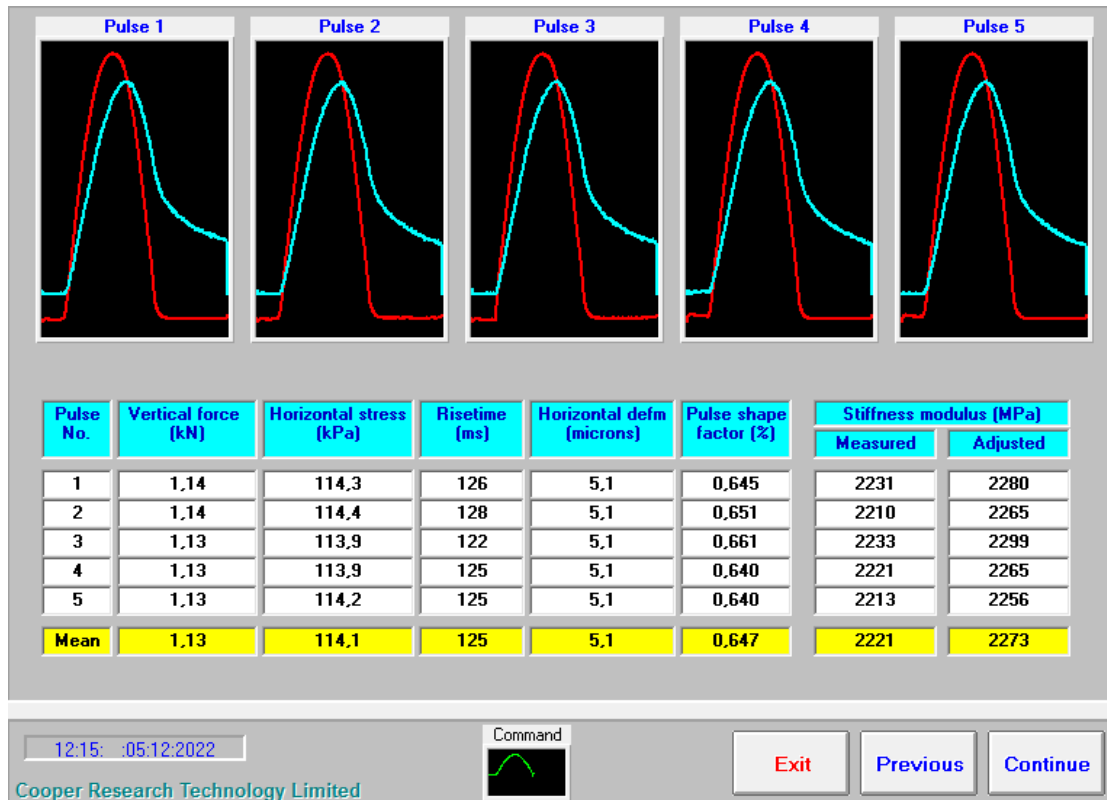
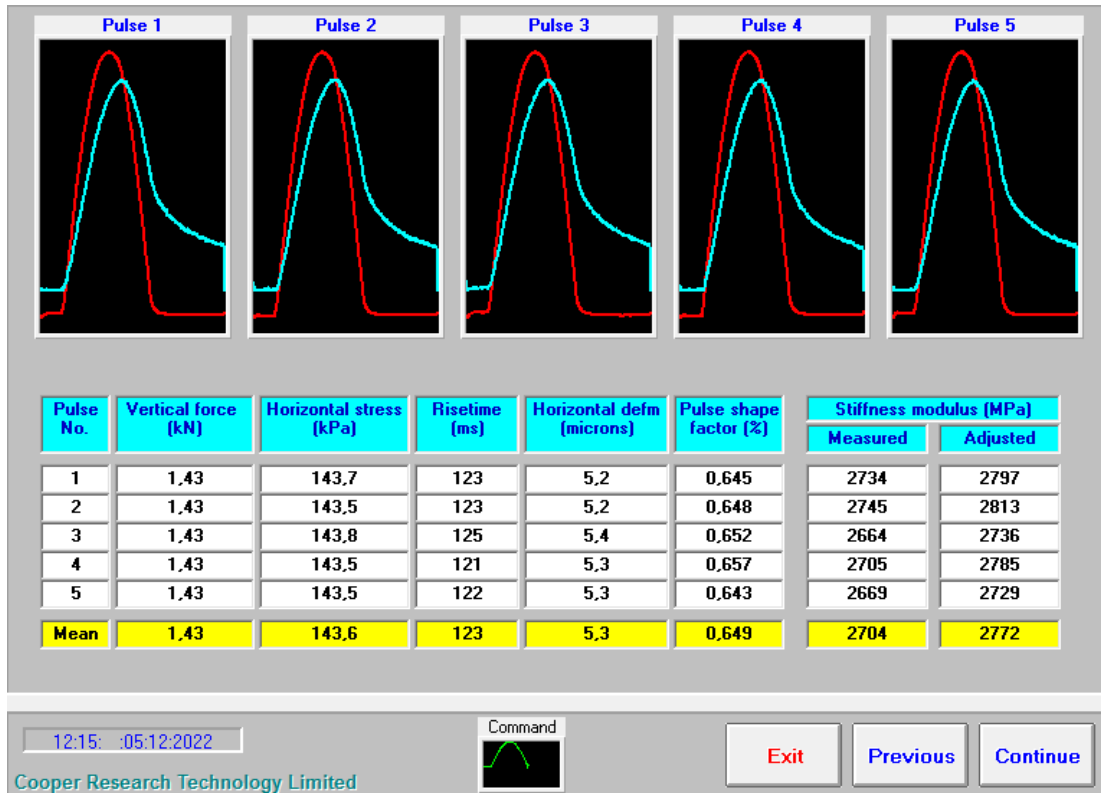
- MOP. (2002). *Especificacion Tecnicas para la construccion de*. Quito: MOP-001-F2002.
- Núñez, K. (2014). *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Sierra del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño*. Guayaquil, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Palacios, J. (2015). "Estudio comparativo de pruebas de fatiga". En J. F. Palacios, "*Estudio comparativo de pruebas de fatiga*" (pág. 52). Guayaquil: Trabajo de titulación.
- Reyes, O., & Camacho, J. (08 de abril de 2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahueamiento de mezclas asfálticas. *Obtenido de Revista científica Ingeniería y Desarrollo, No. 23*,  
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticl>.
- Sanabria, L., Correa, J., Hernandez, L., & Morales, P. C. (2000). *Evaluacion del aditivo rejuvenecedor de asfaltos y pavimentos*. Obtenido de  
[file:///C:/Users/jorge/Downloads/Evaluacion\\_Aditivo\\_Rejuvenecedor-Resumen\(1\).pdf](file:///C:/Users/jorge/Downloads/Evaluacion_Aditivo_Rejuvenecedor-Resumen(1).pdf)
- Vila, R. (2017). *Estudios y Propuestas sobre la calidad de los*. Guayaquil, Ecuador: Dirección de Publicaciones de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

## 7 Capítulo

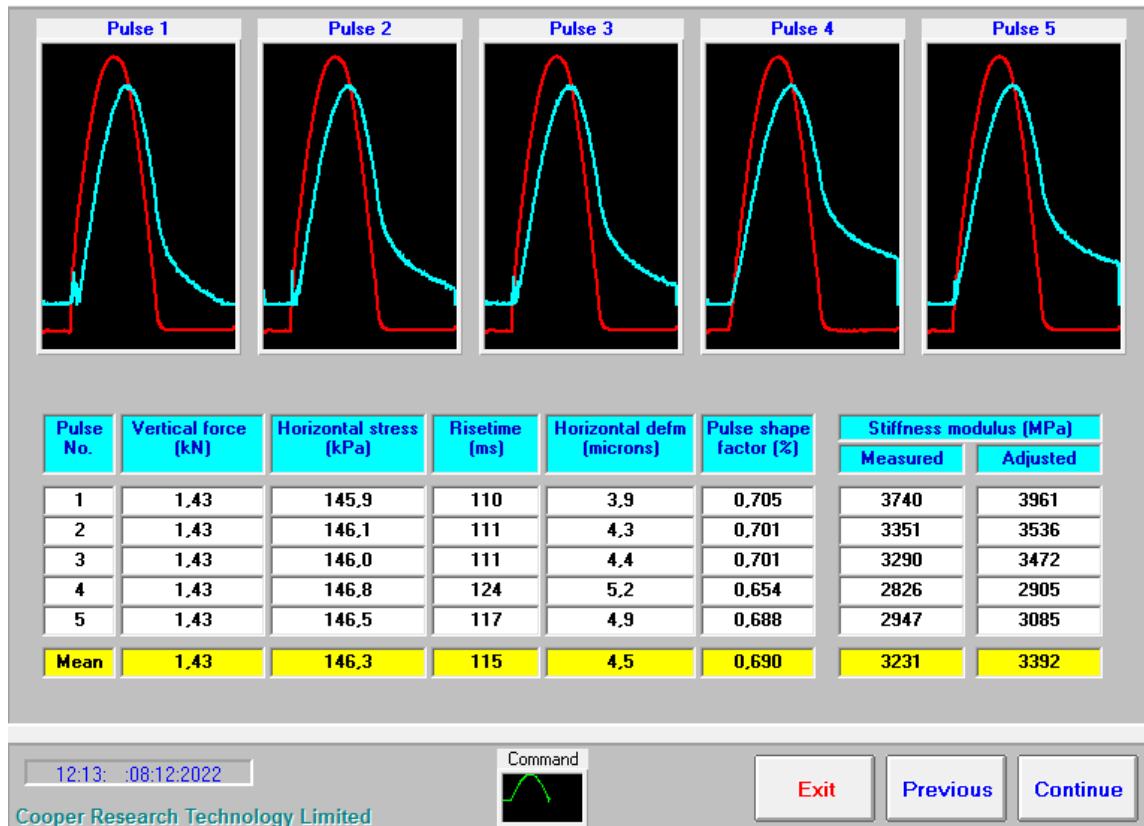
### 7.1 Anexos

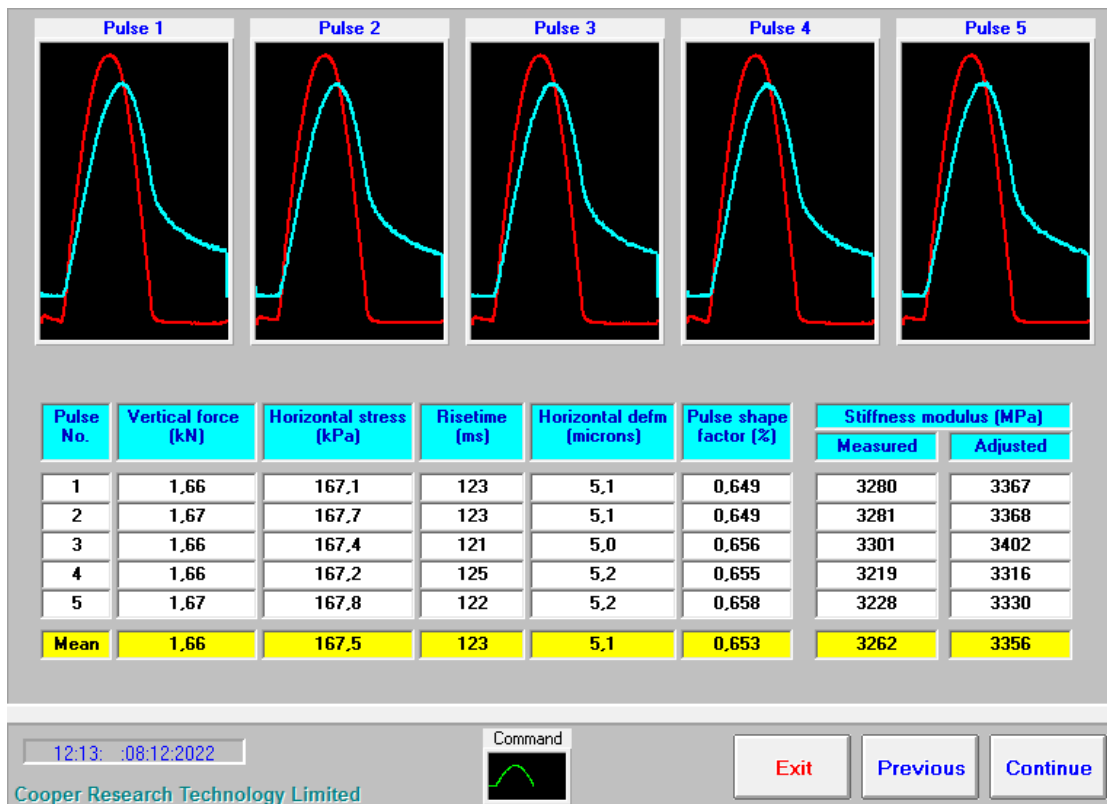
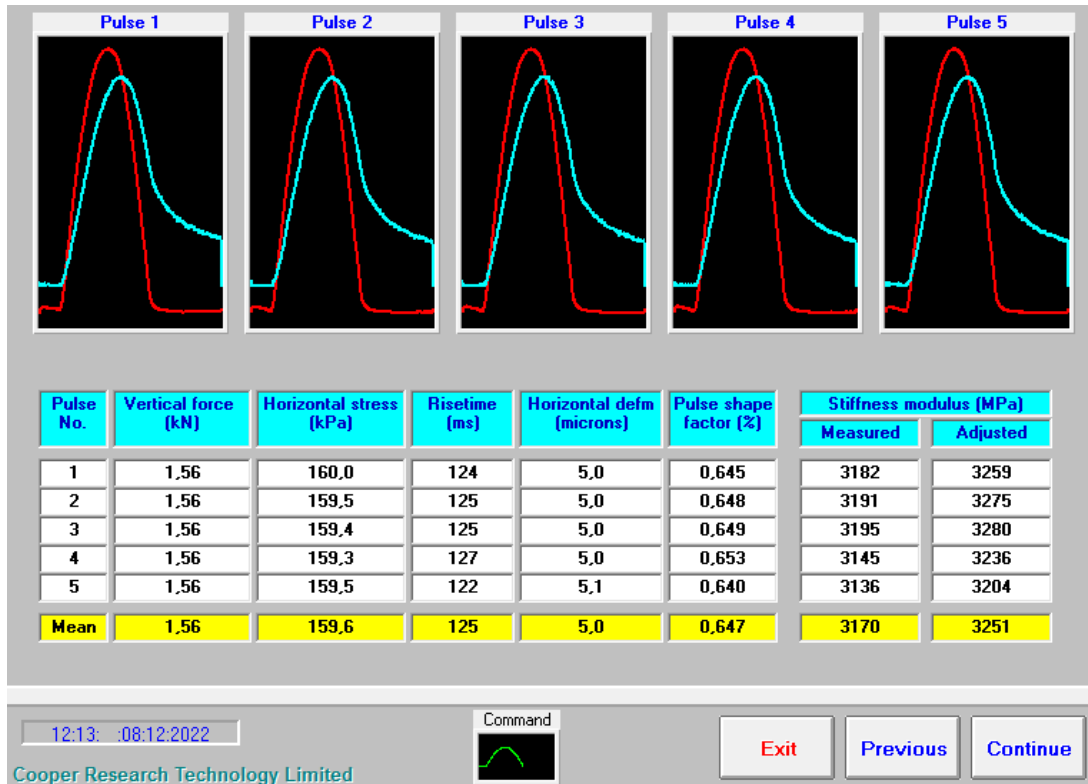
**Anexo 1:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto Base



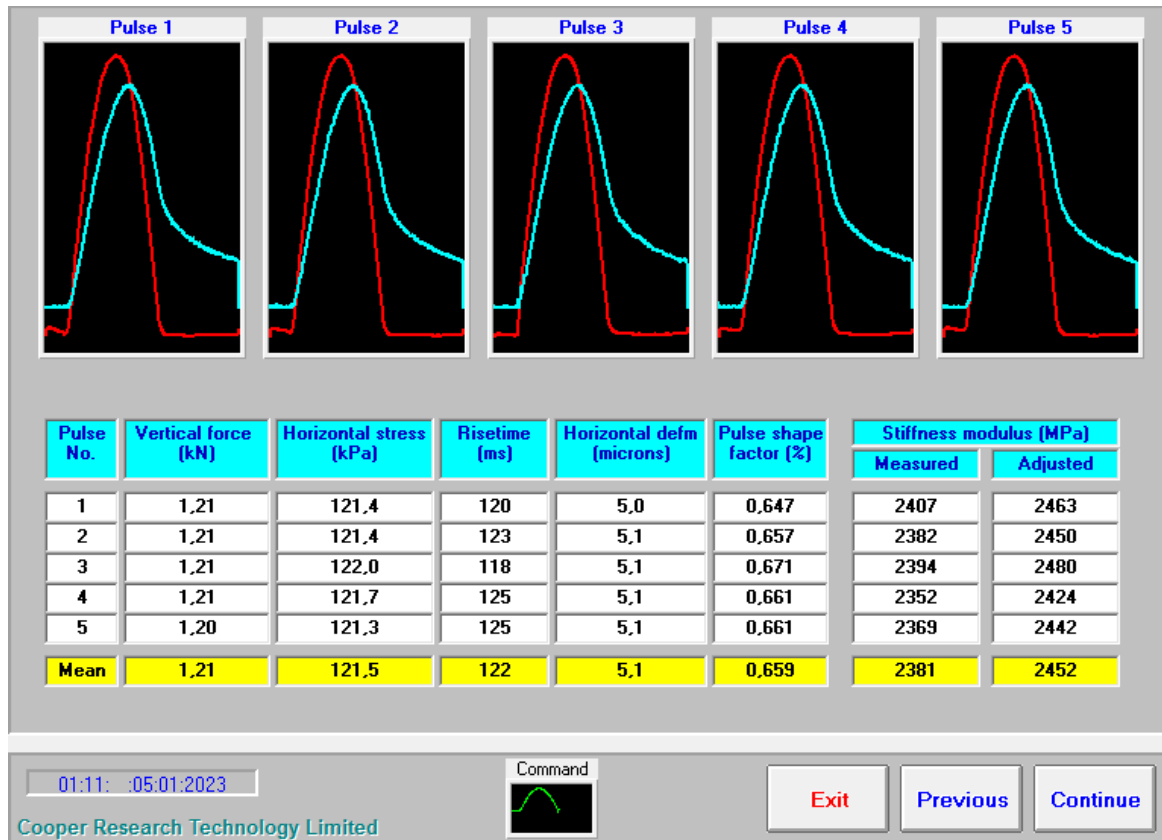


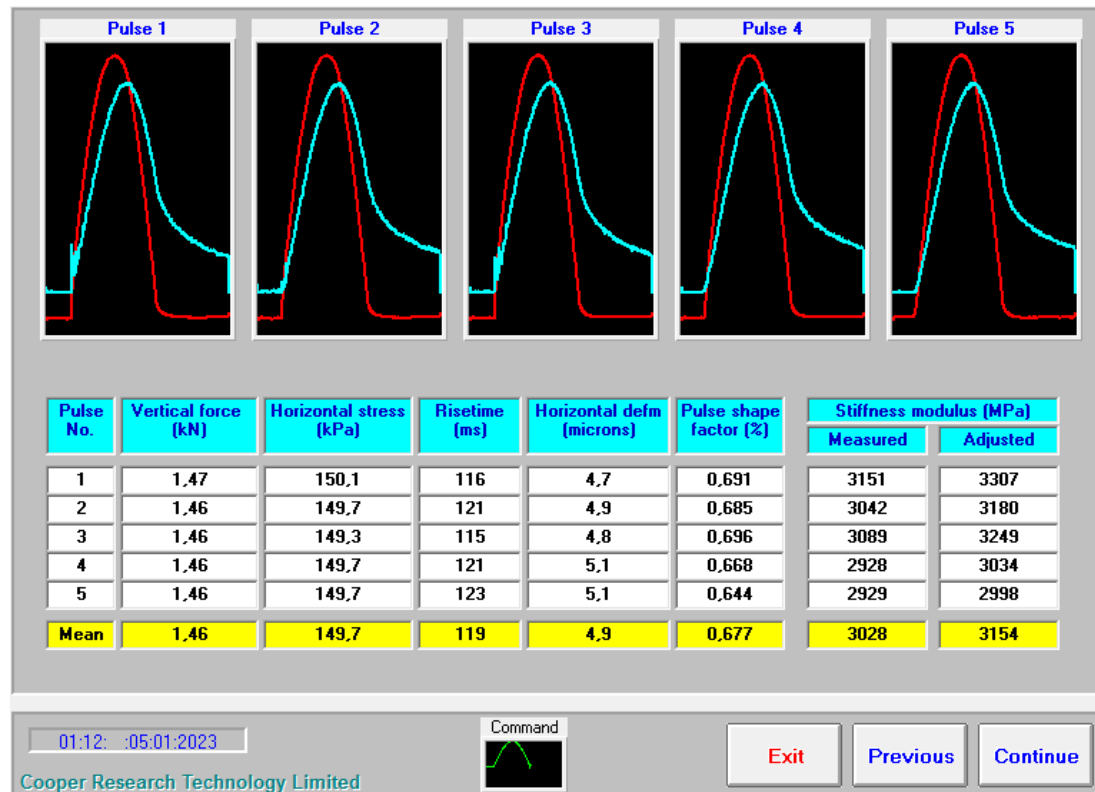
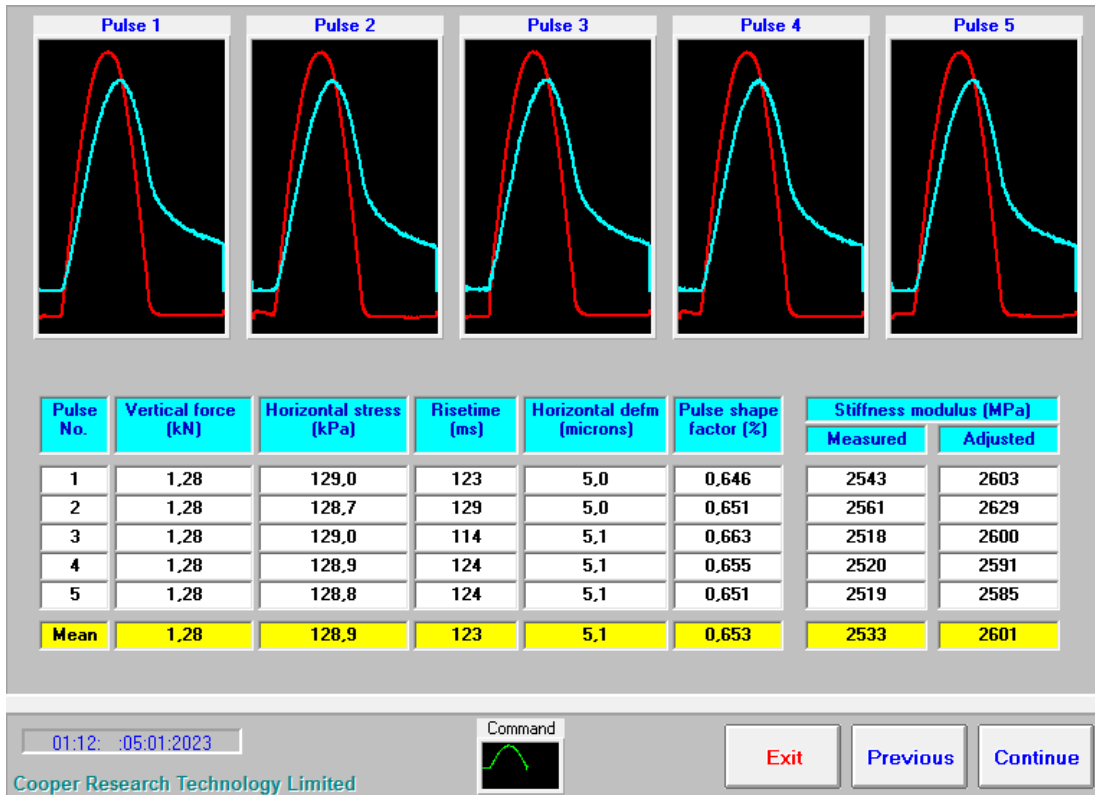
**Anexo 2:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto Base + 10% RAP



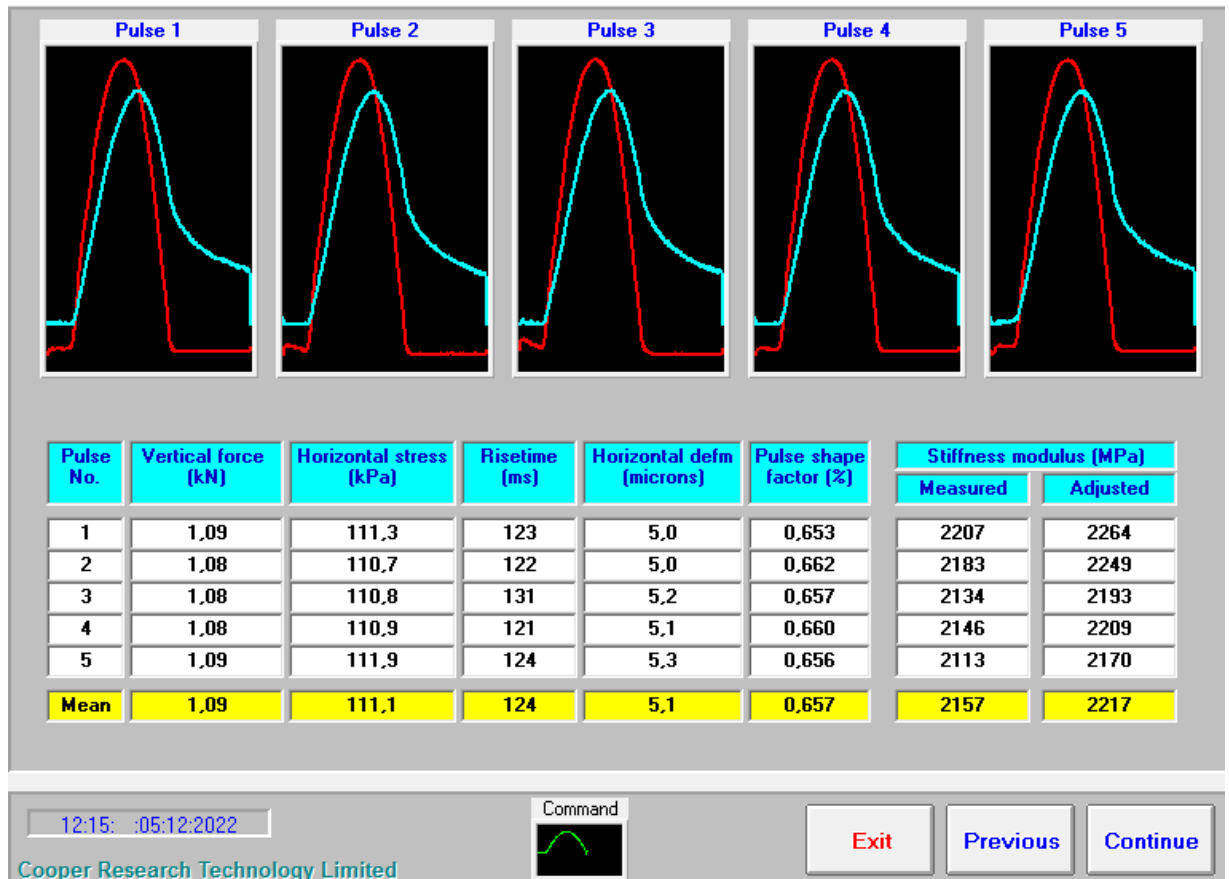


**Anexo 3:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto Base + 20% RAP

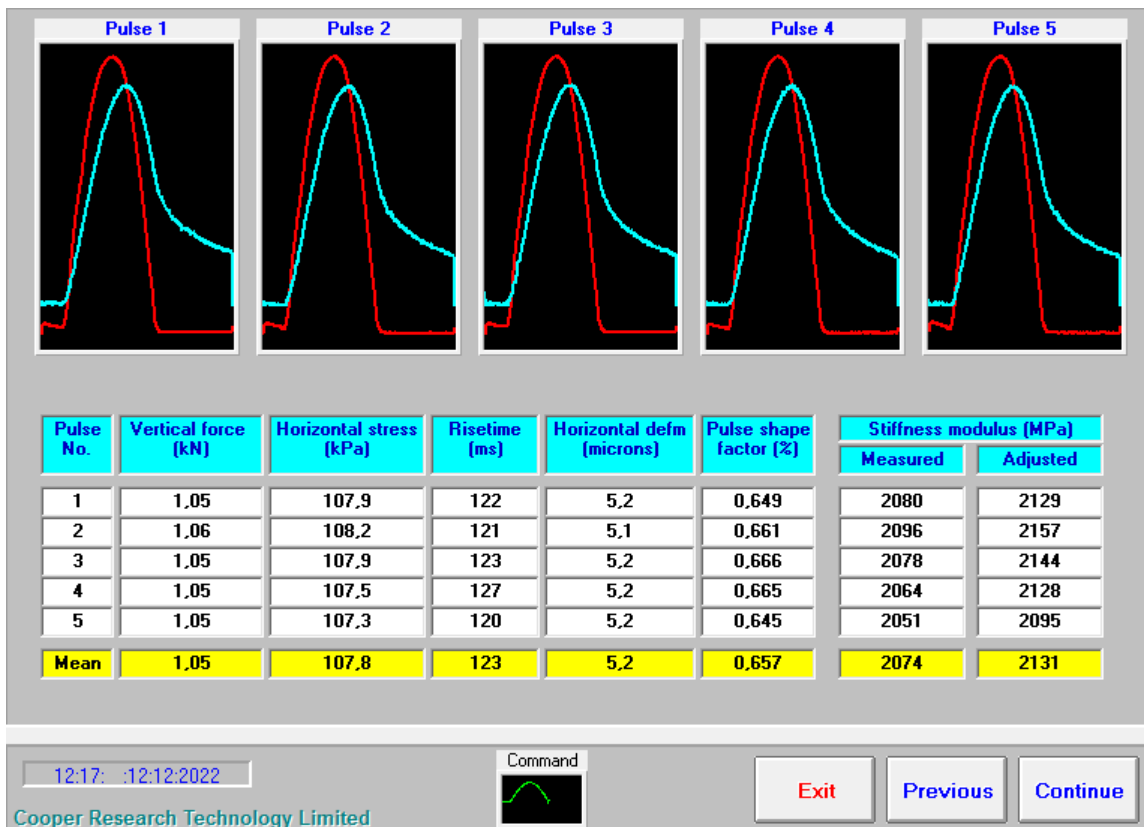
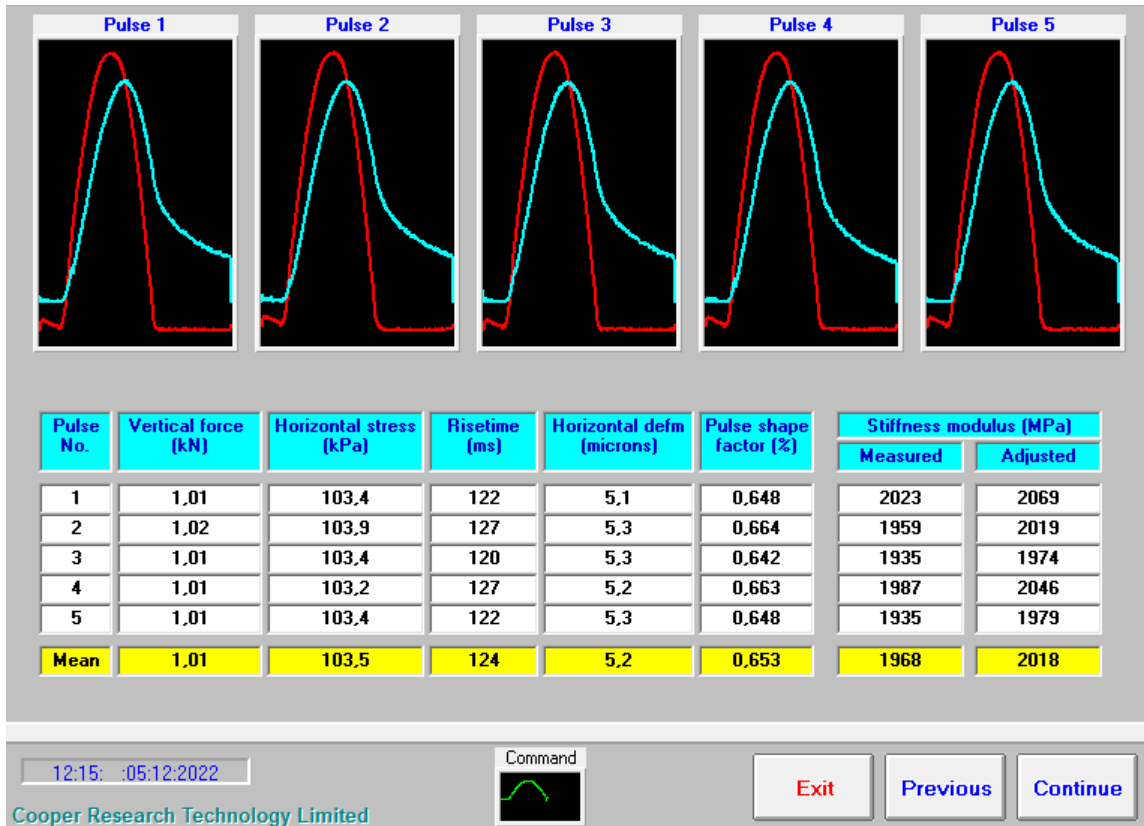




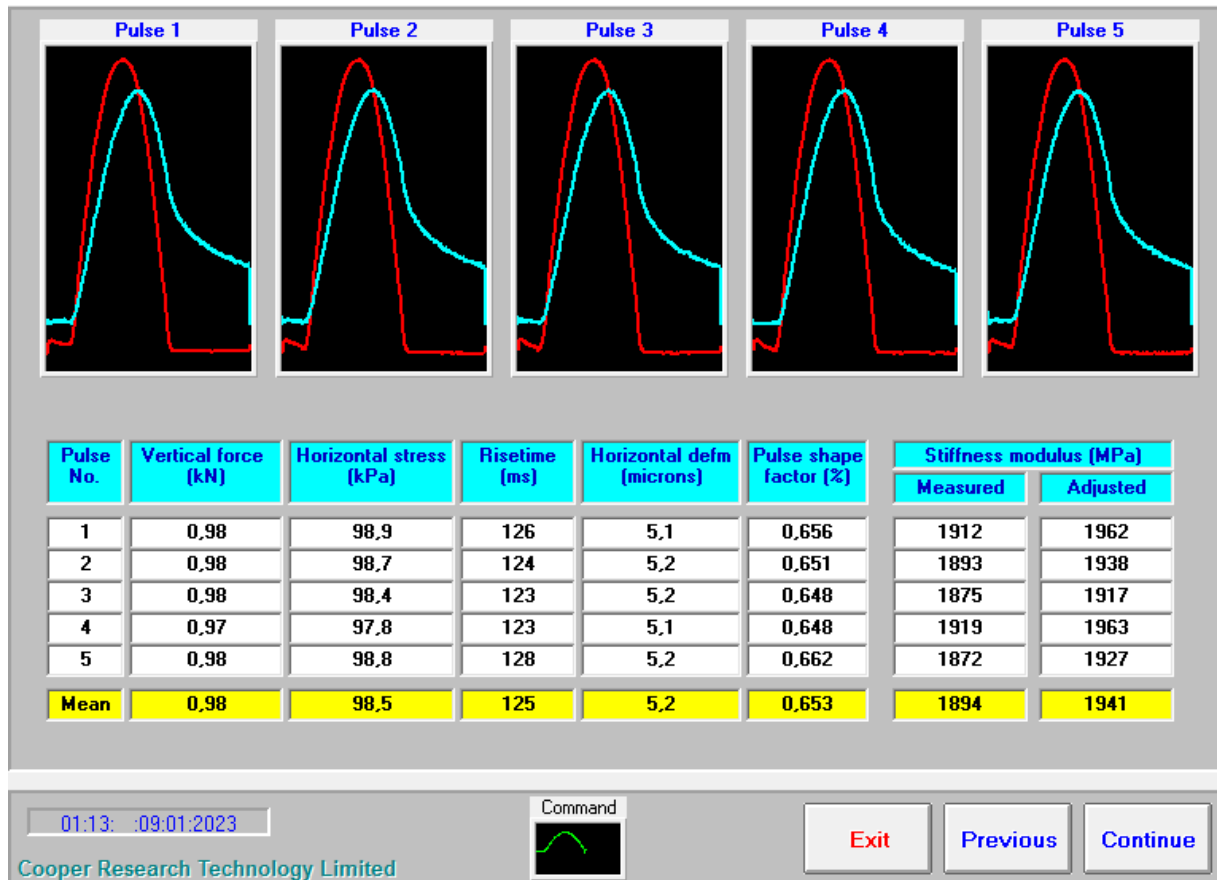
**Anexo 4:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor.

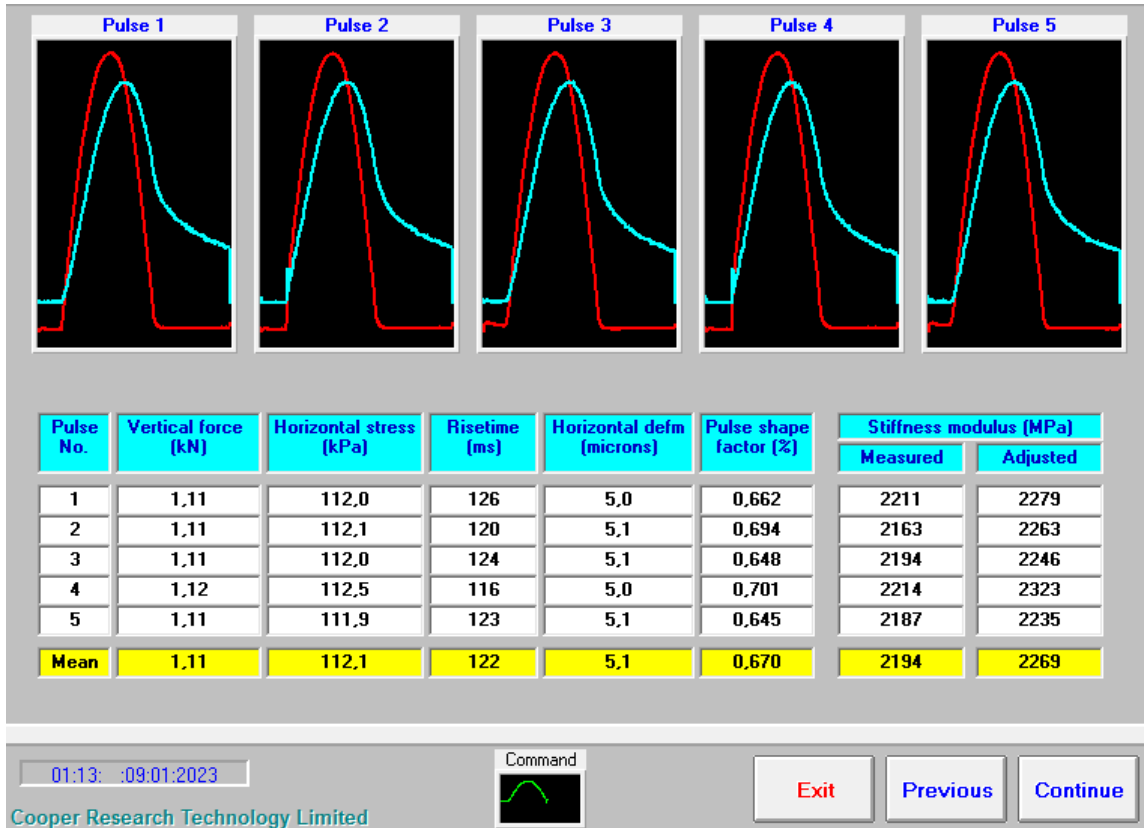
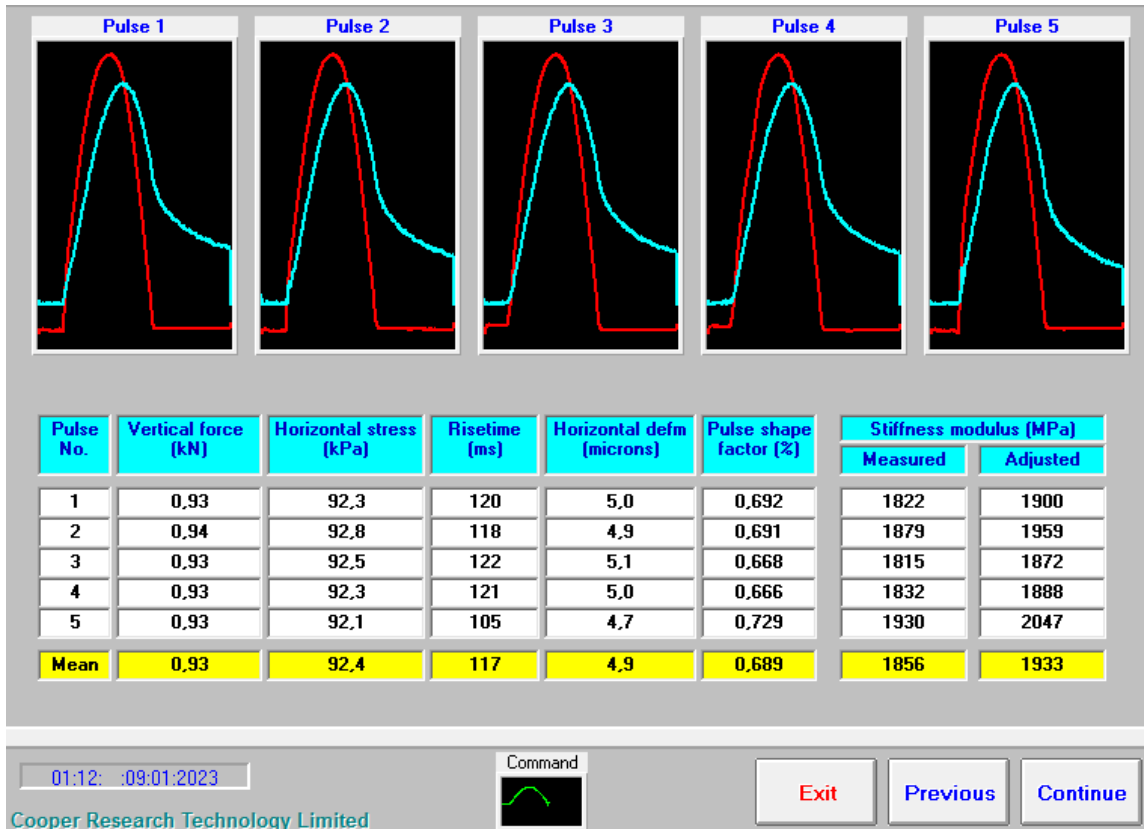




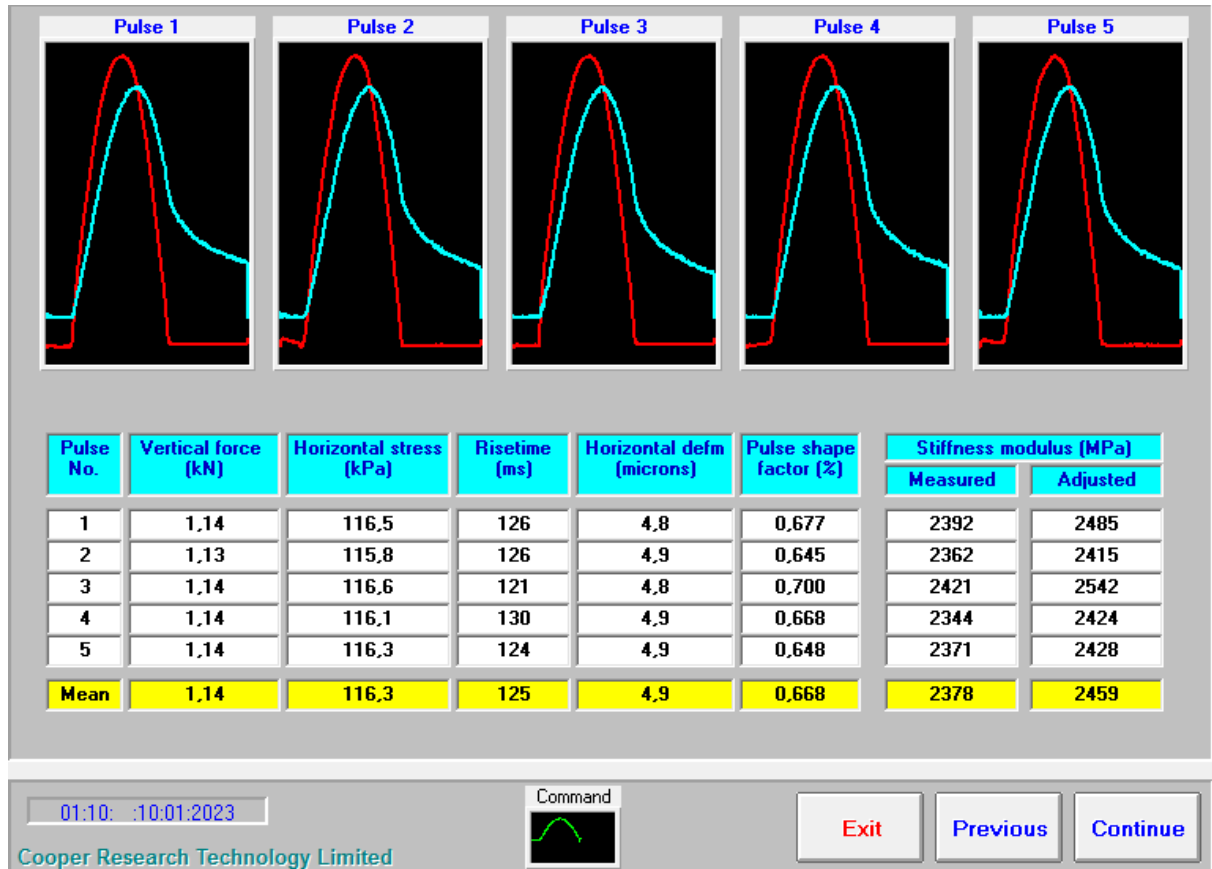


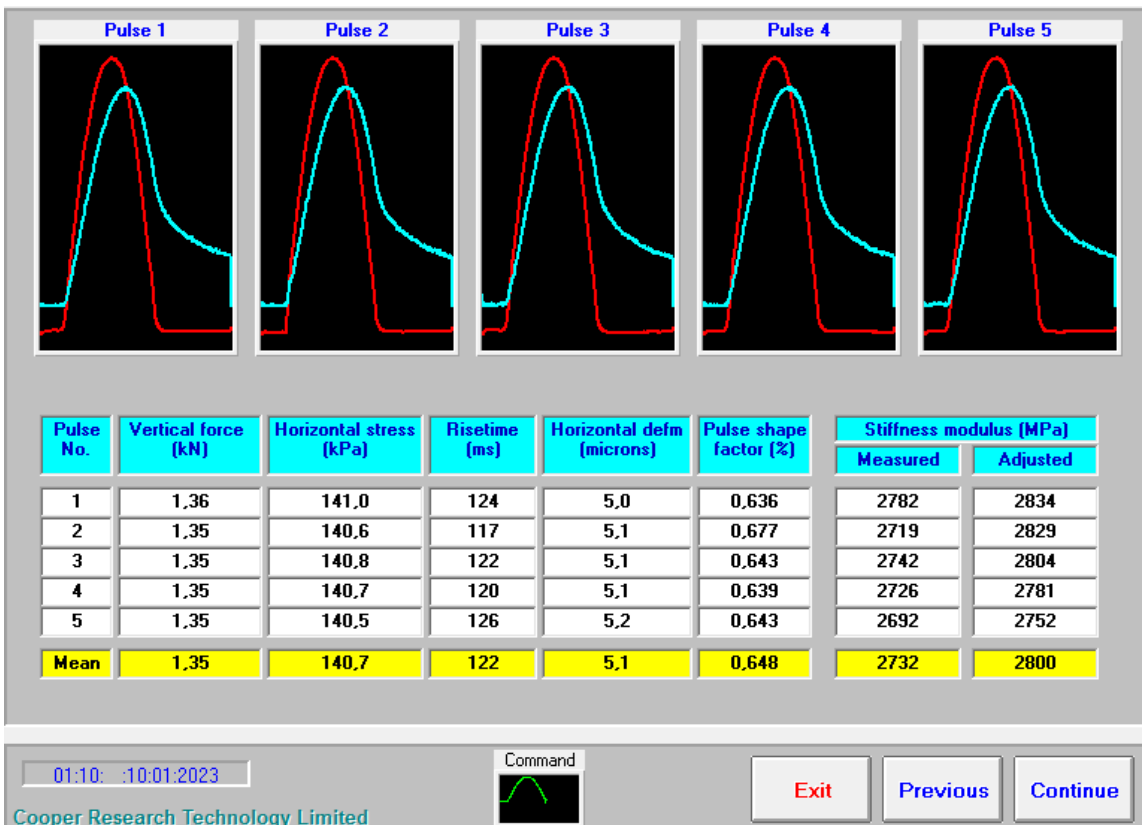
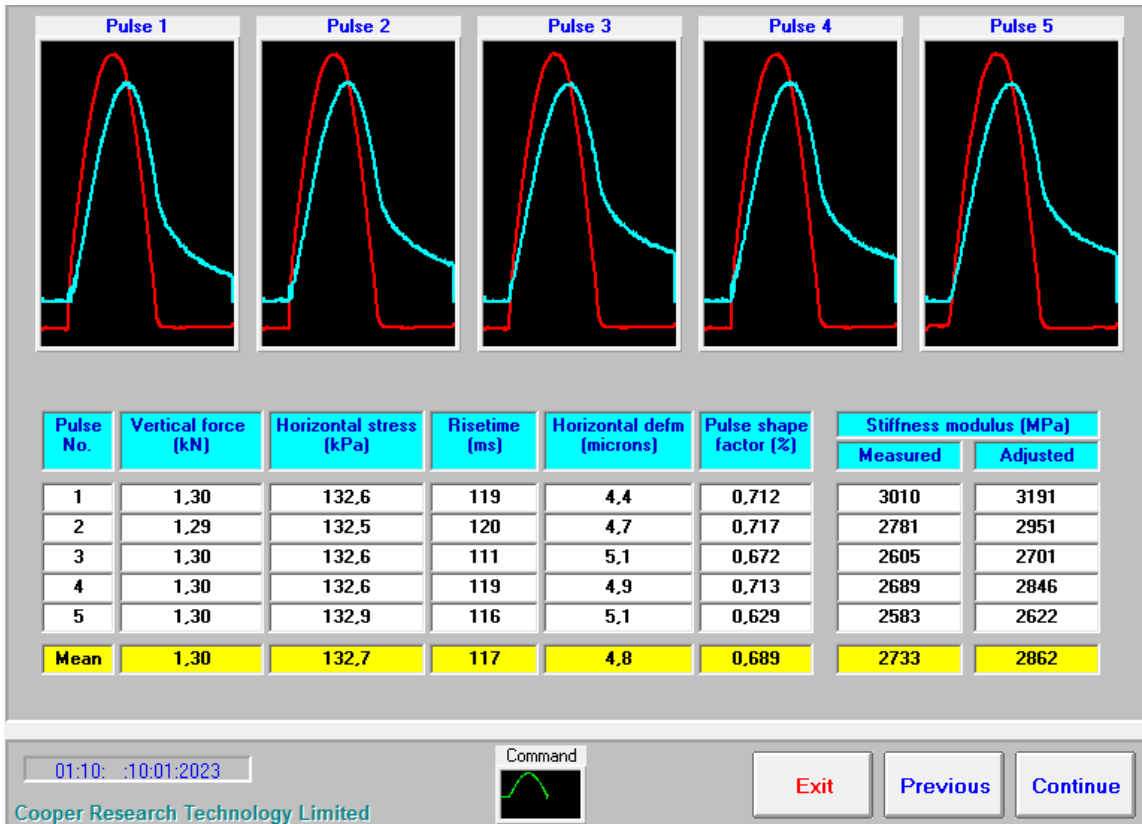
**Anexo 5:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP.



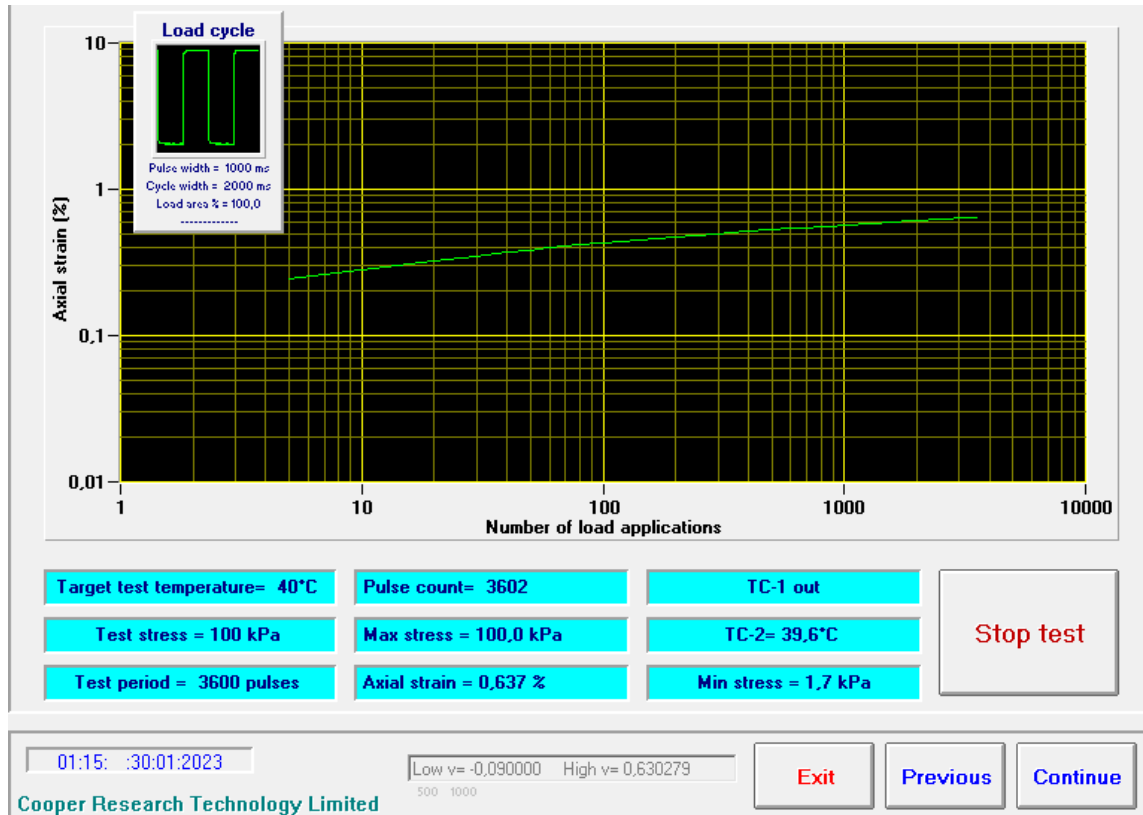


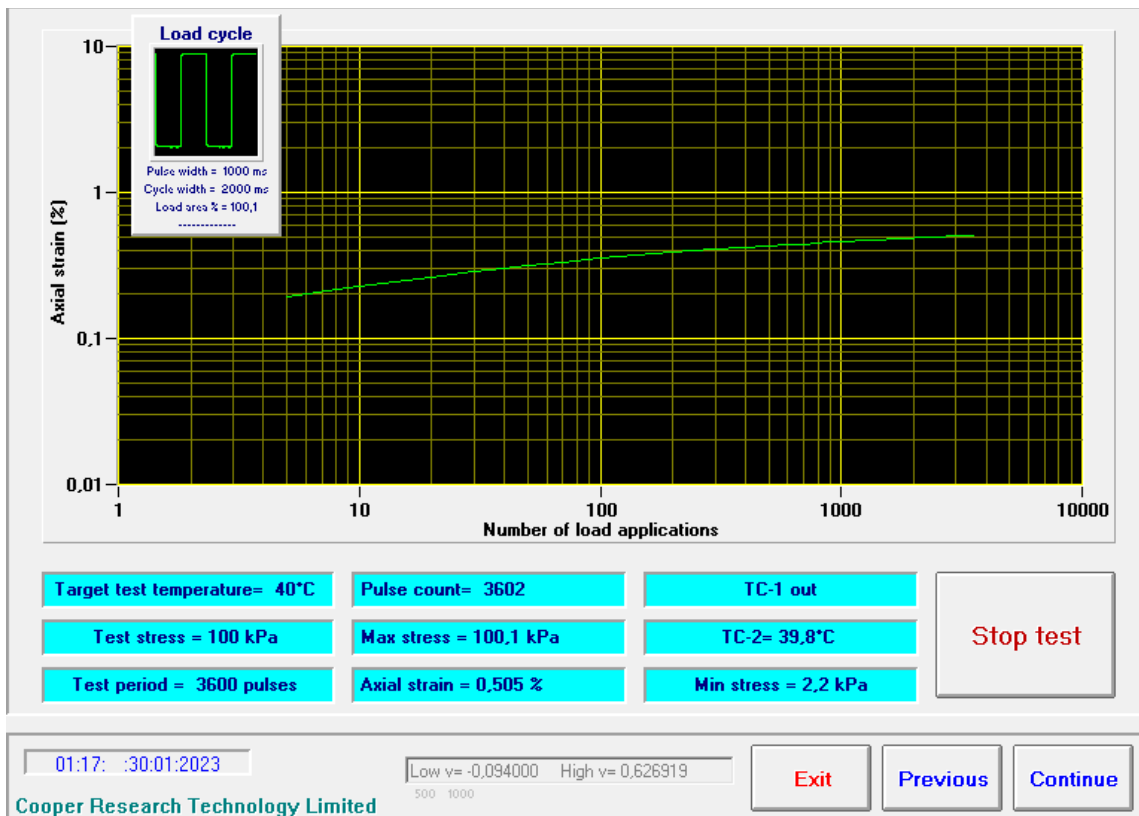
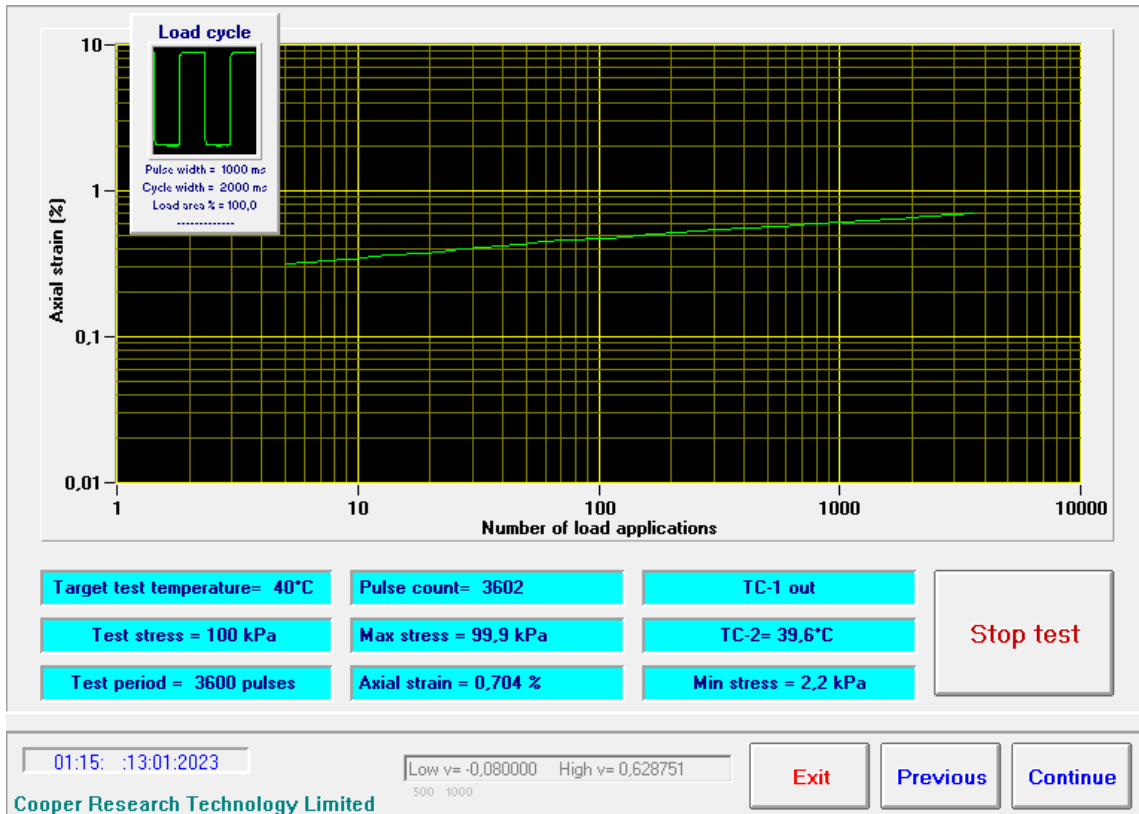
**Anexo 6:** Salida de resultados del equipo NAT para módulo de rigidez en la  
Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP.



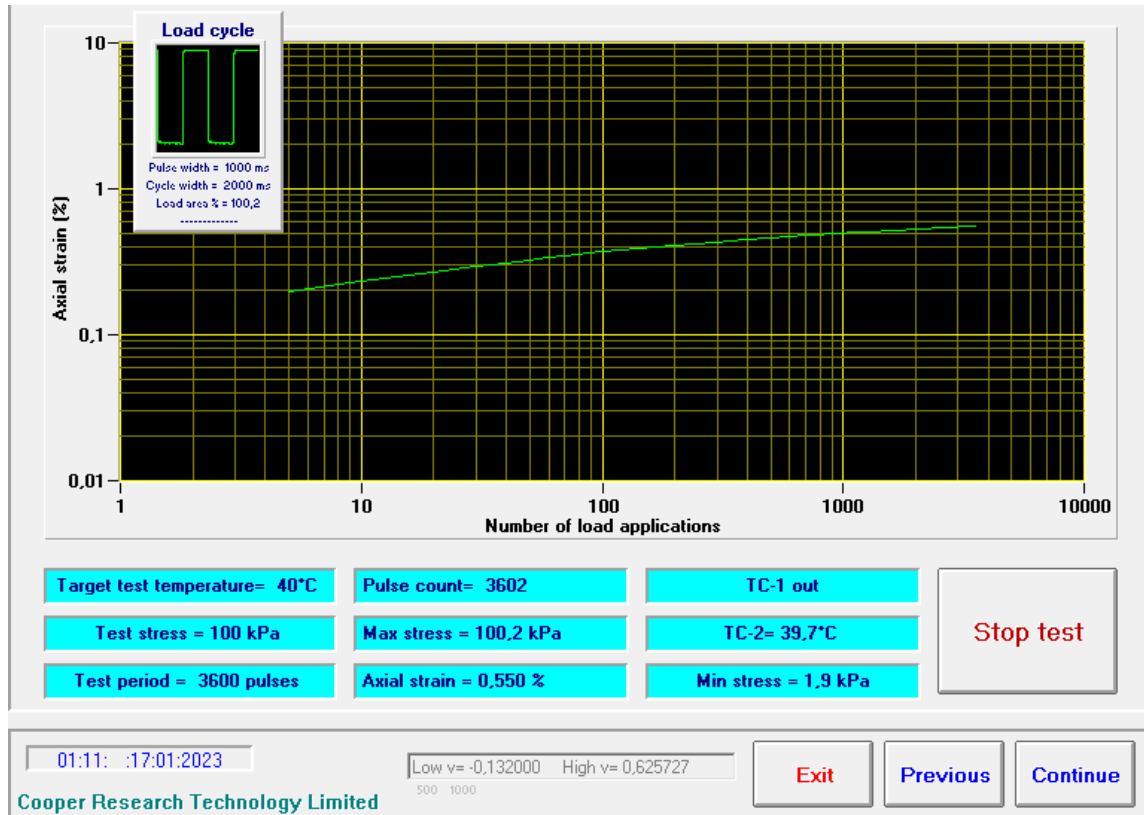


**Anexo 7:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto Base.

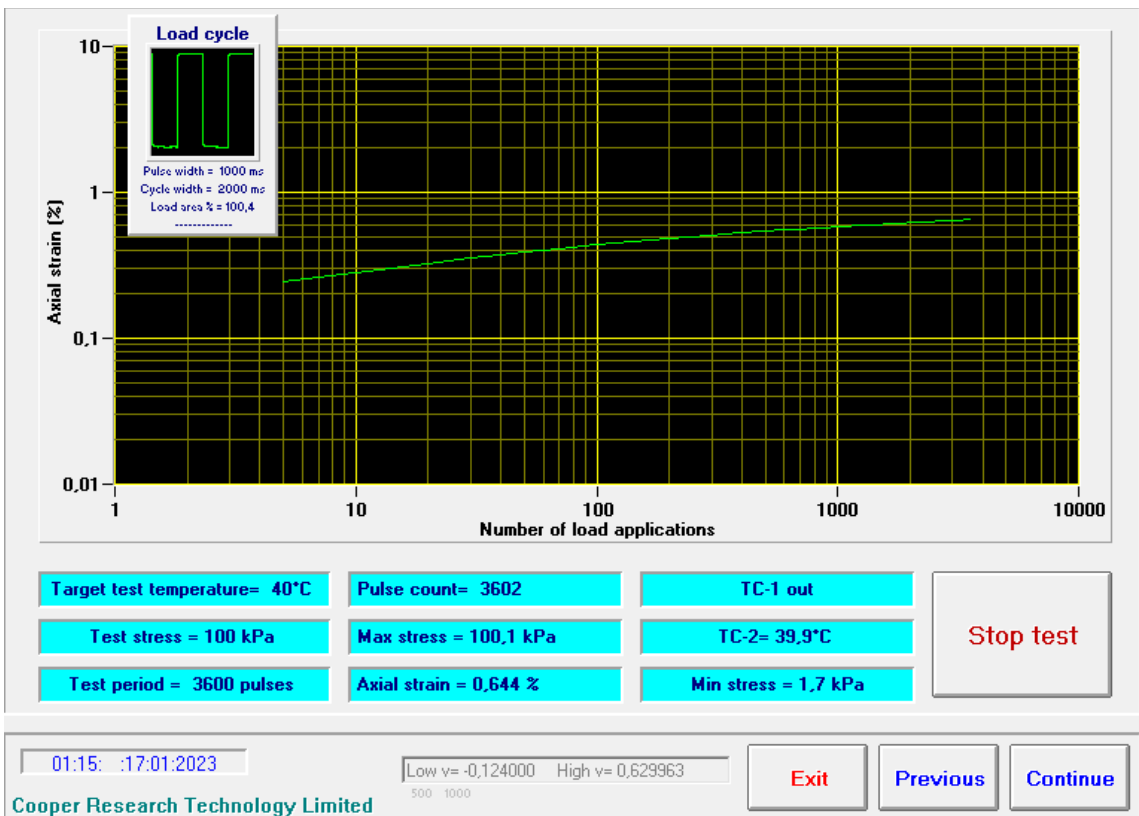
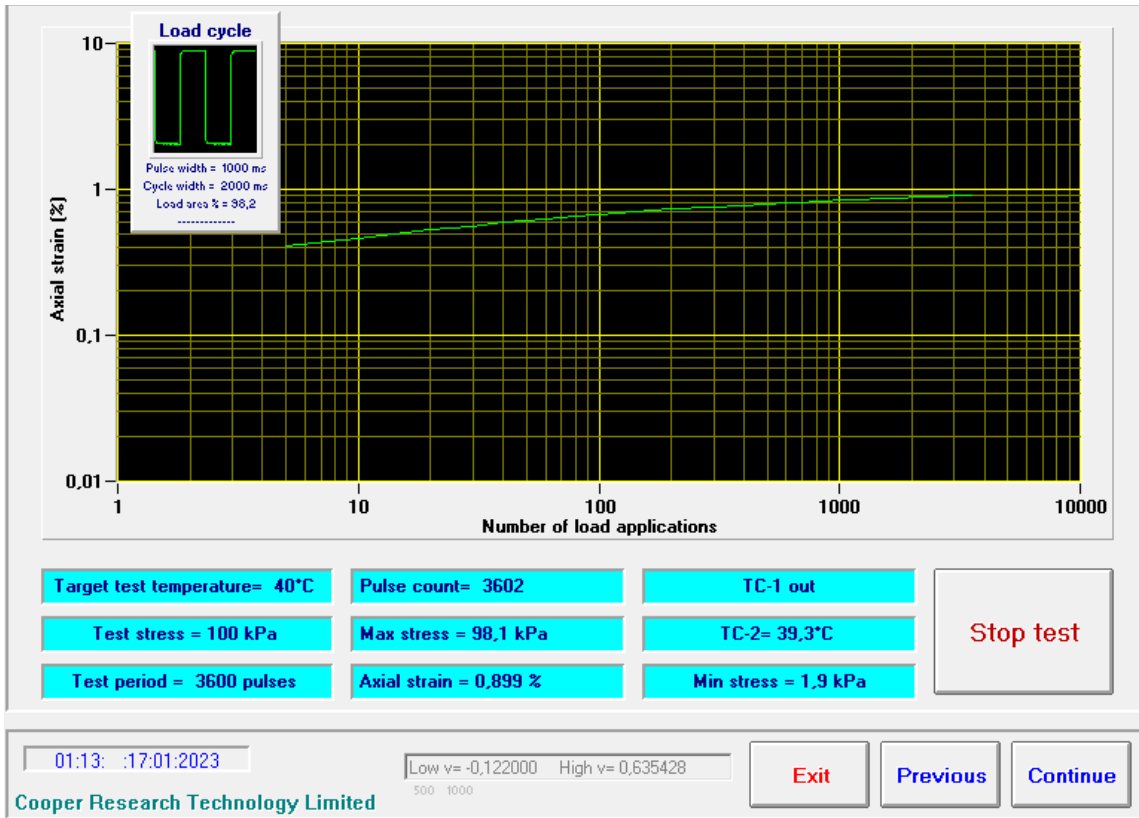




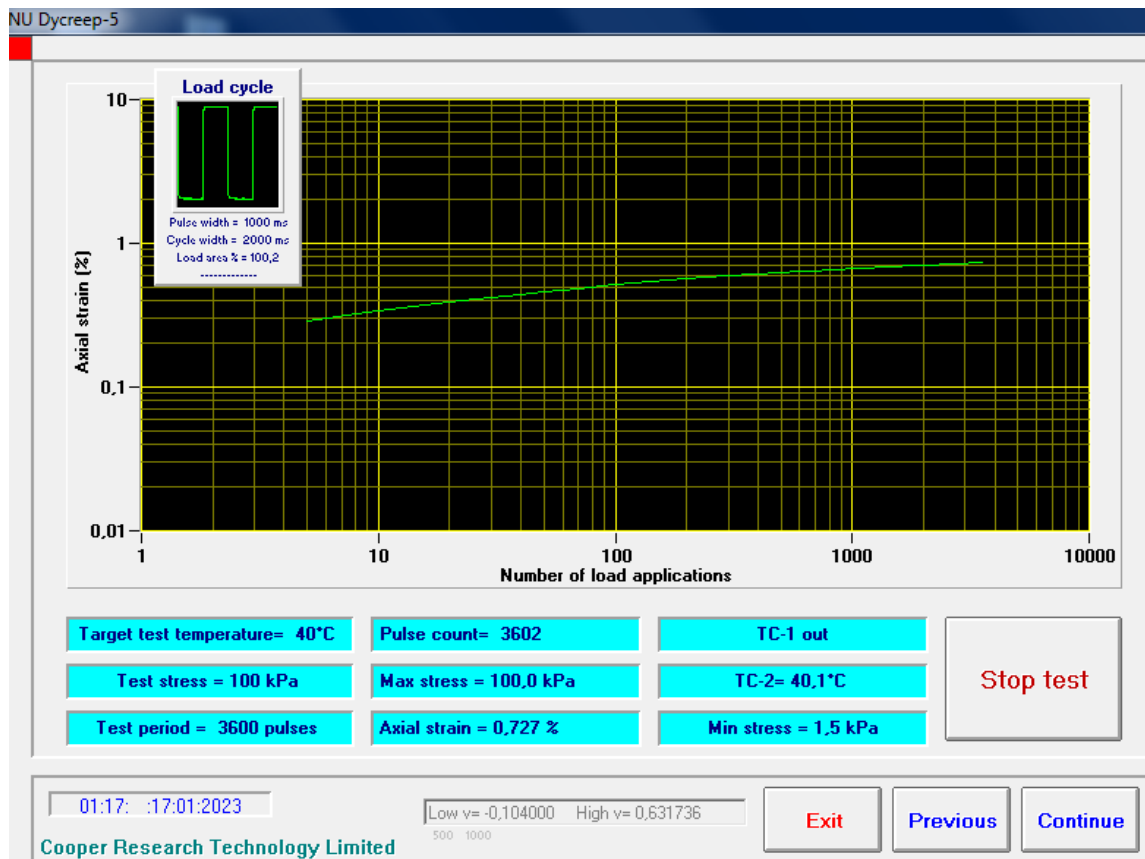
**Anexo 8:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto Base + 10 % RAP.

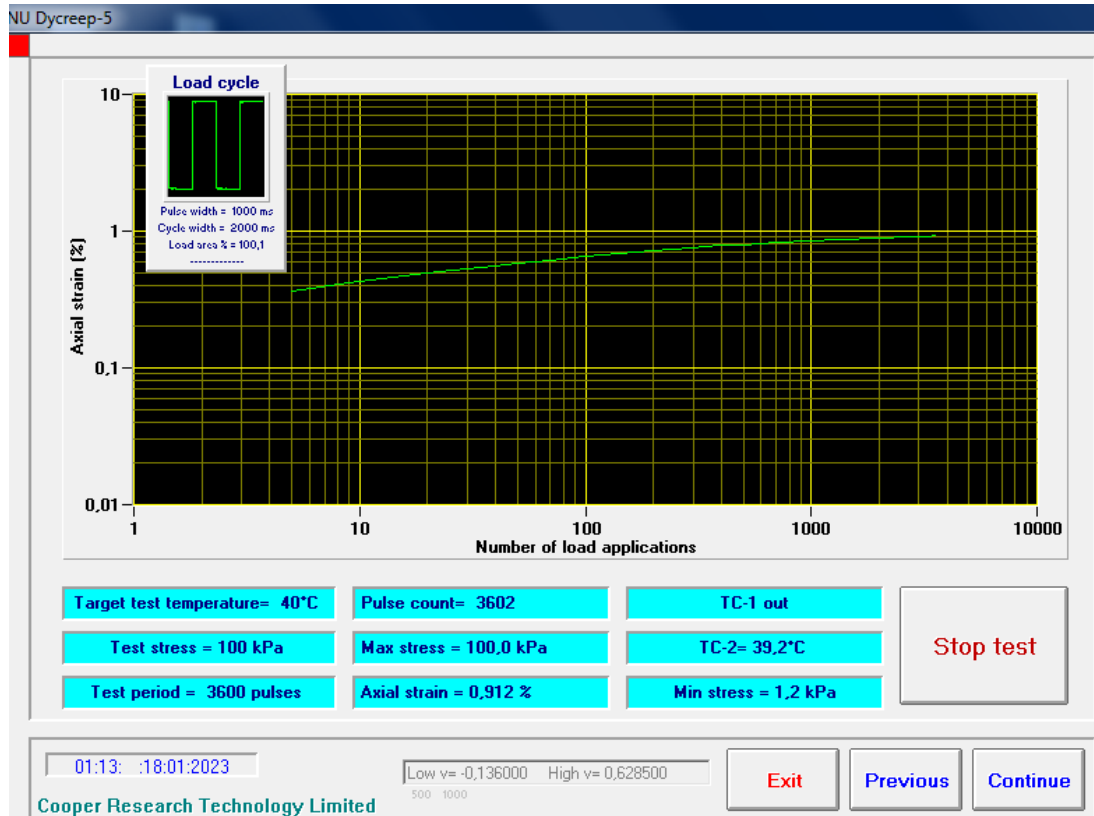
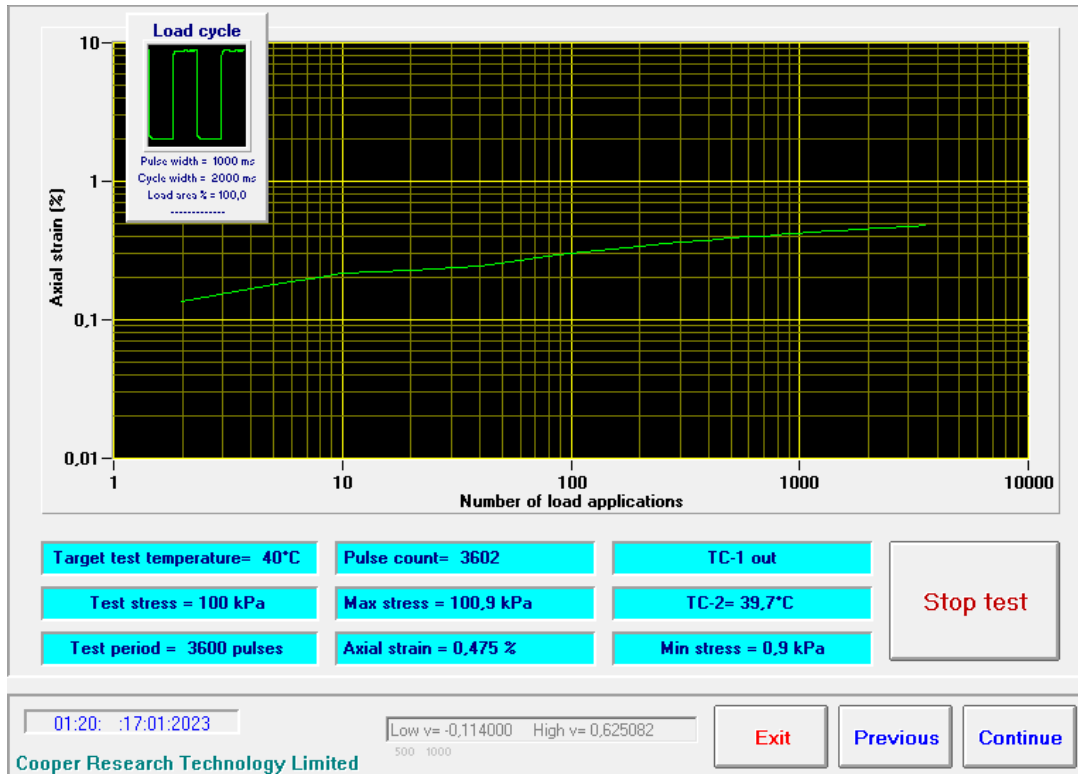




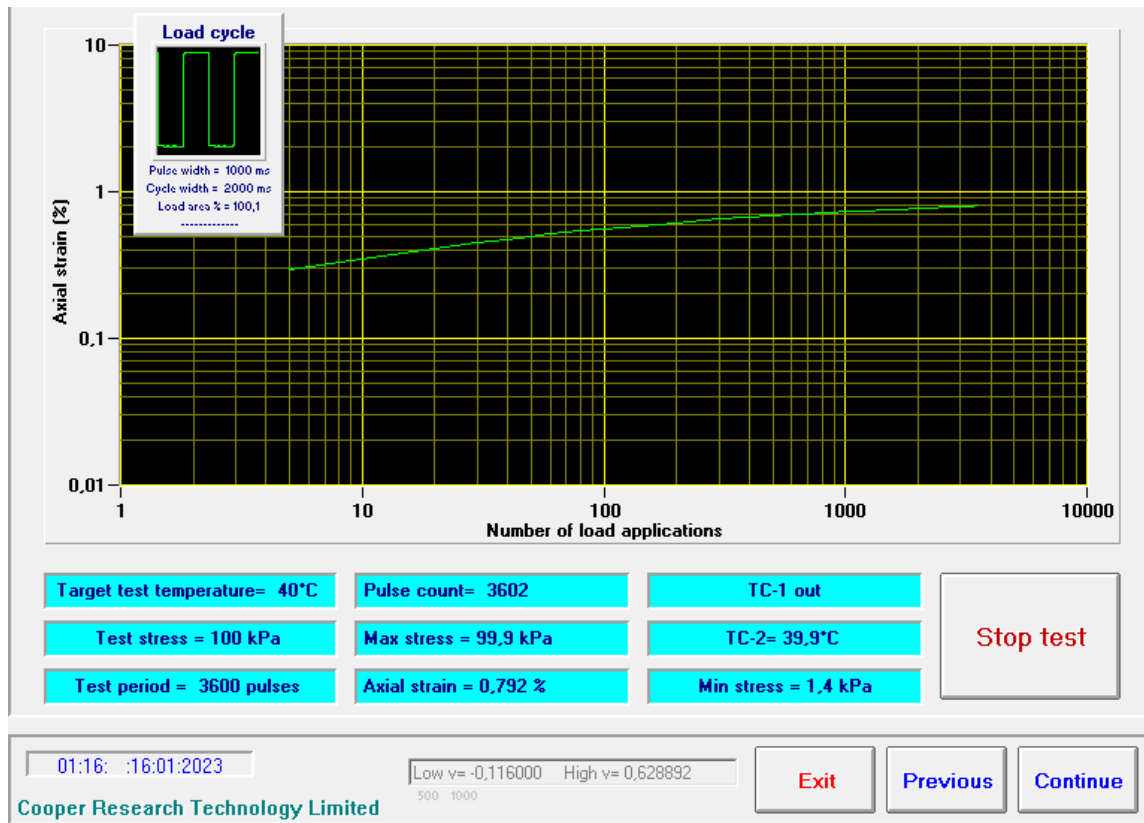


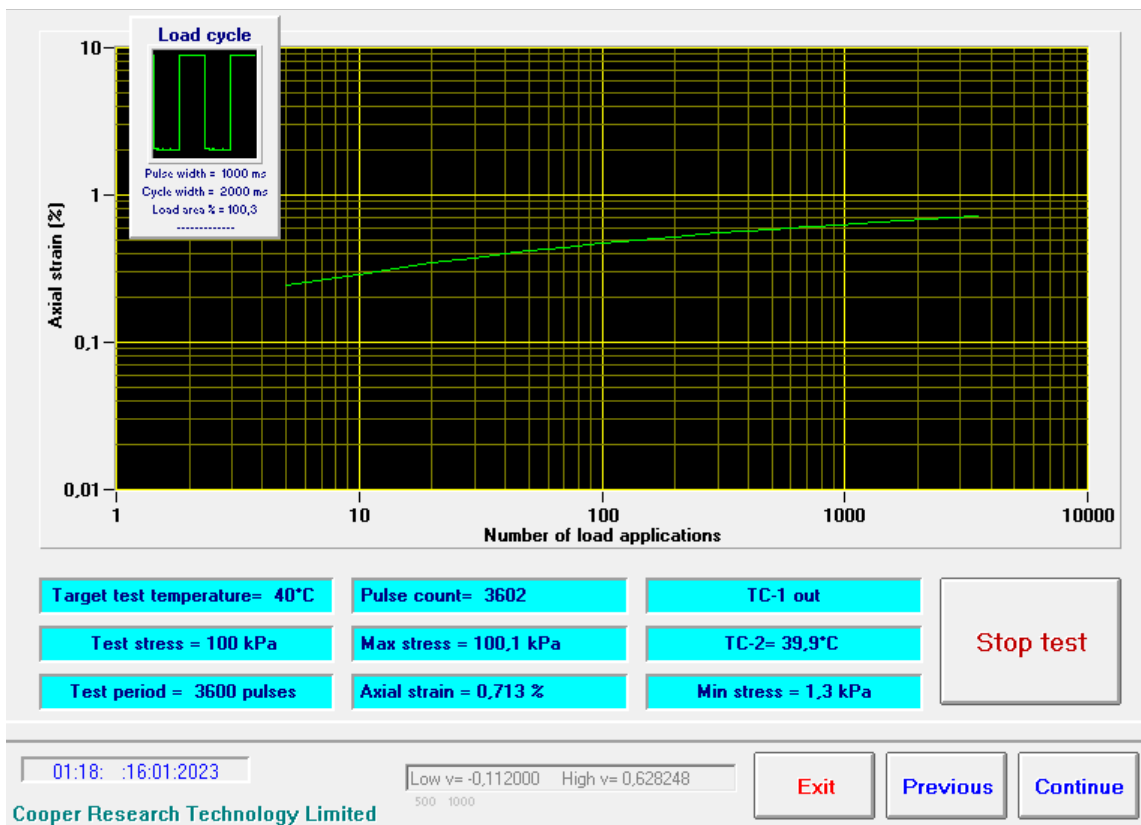
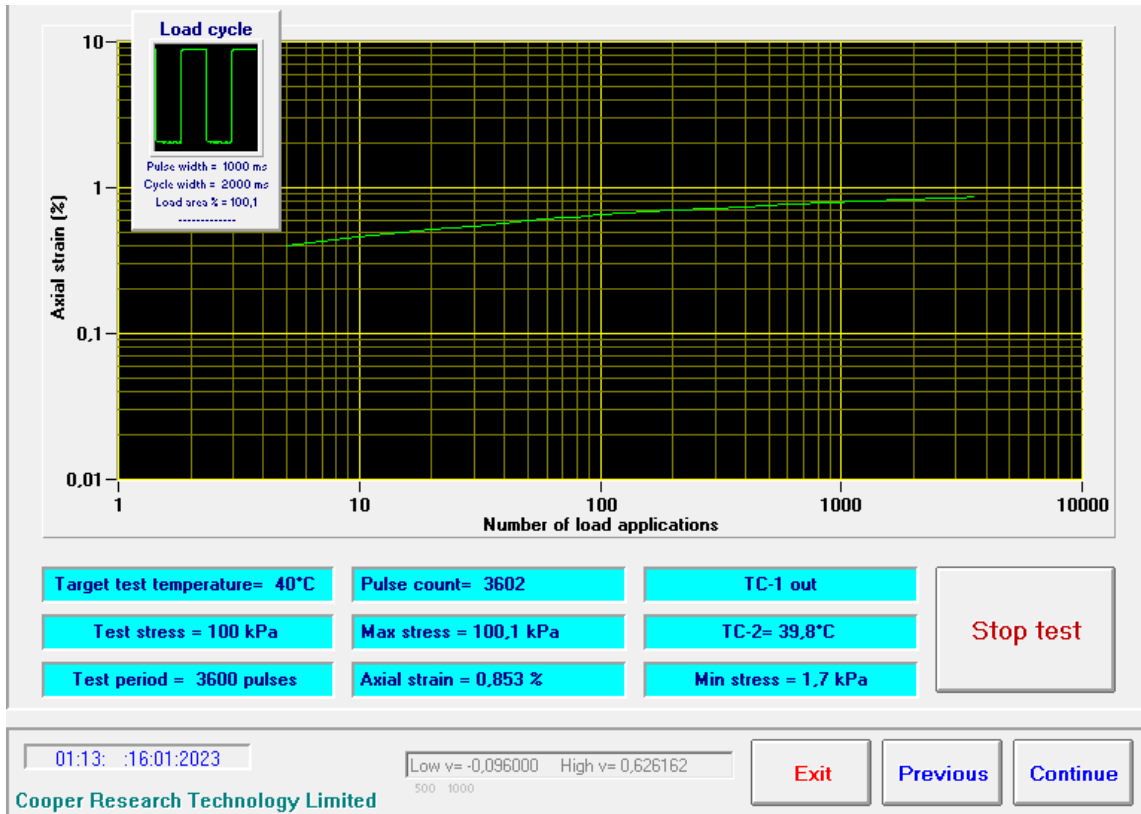
**Anexo 9:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto Base + 20 % RAP.



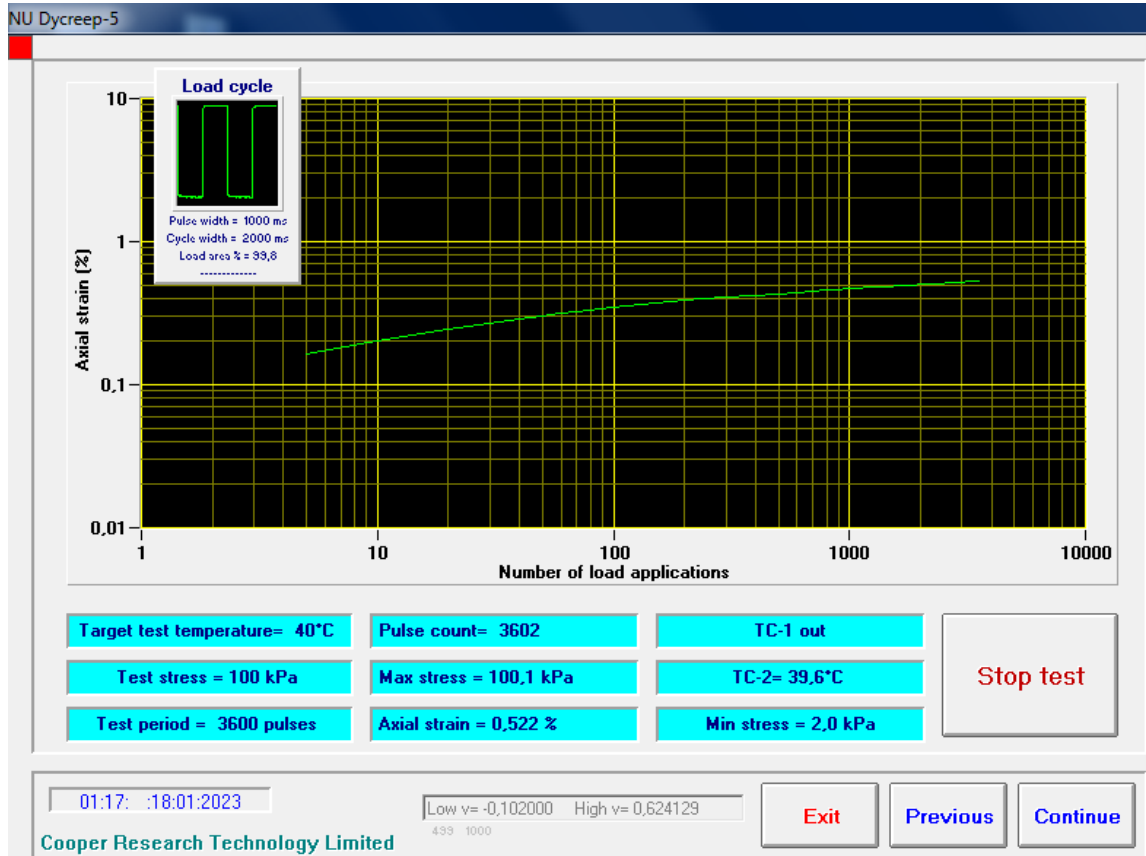


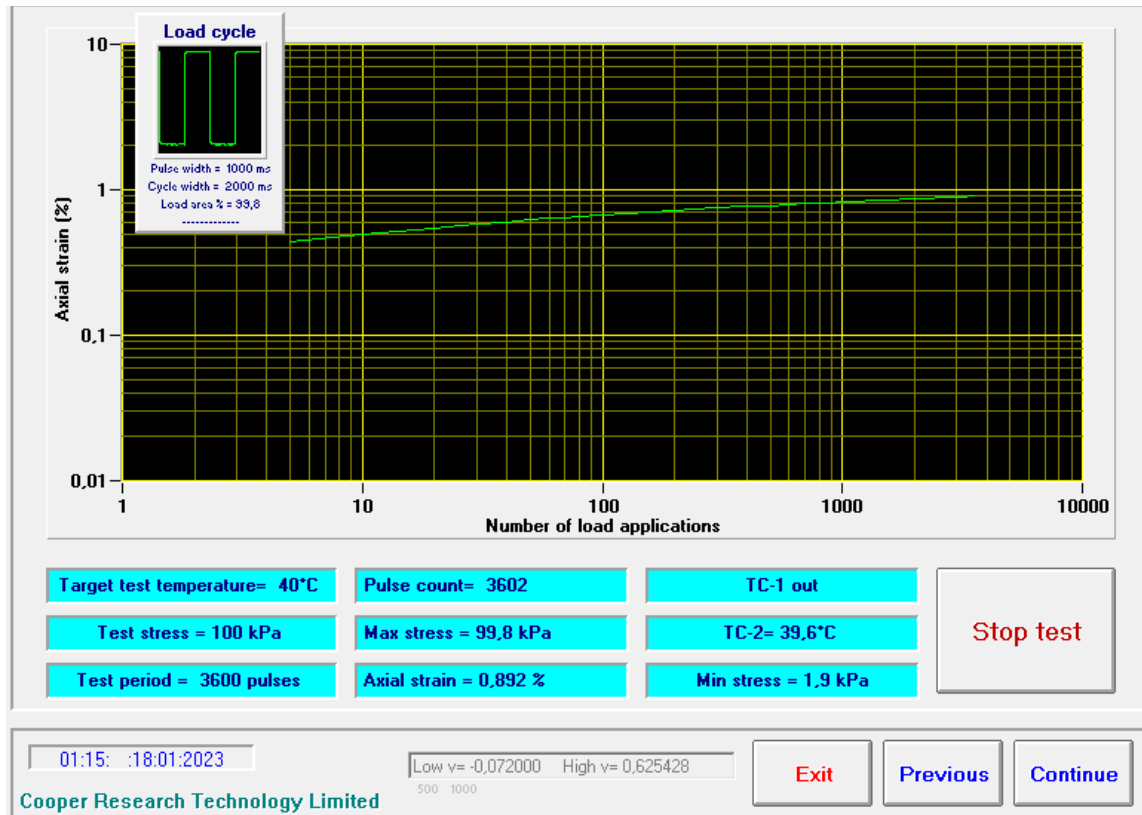
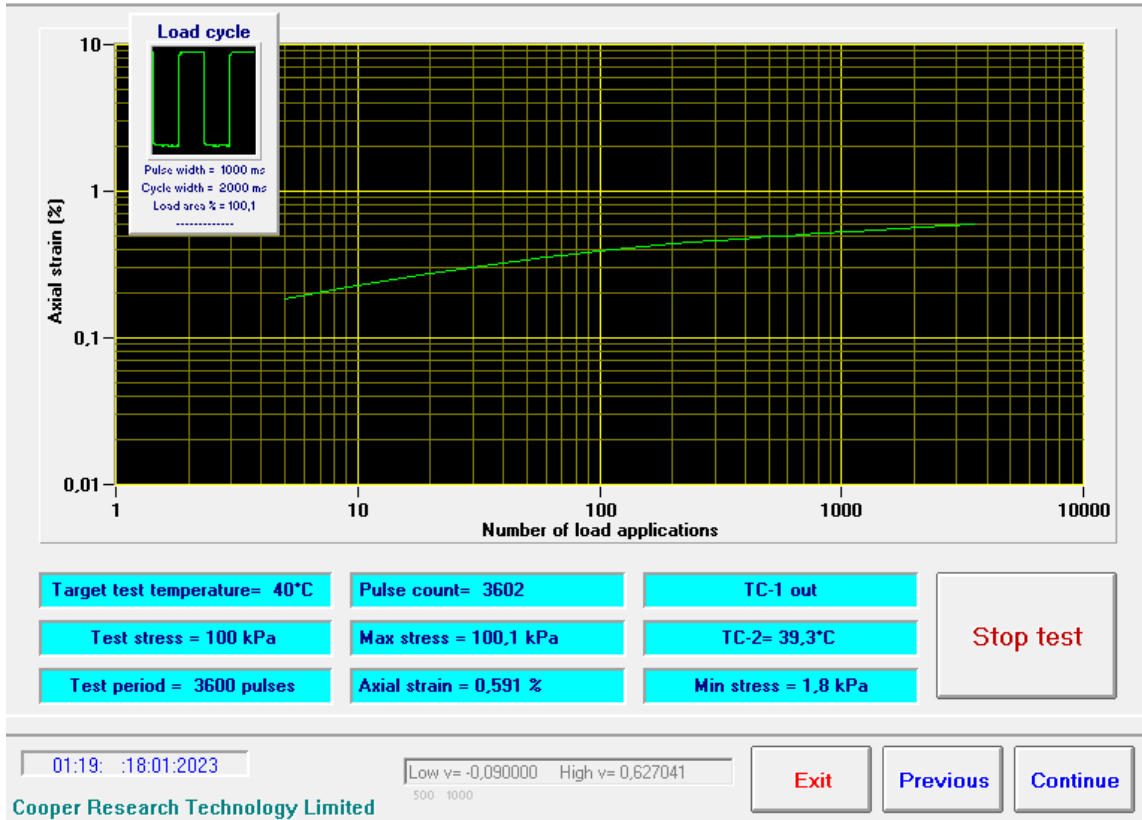
**Anexo 10:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor.



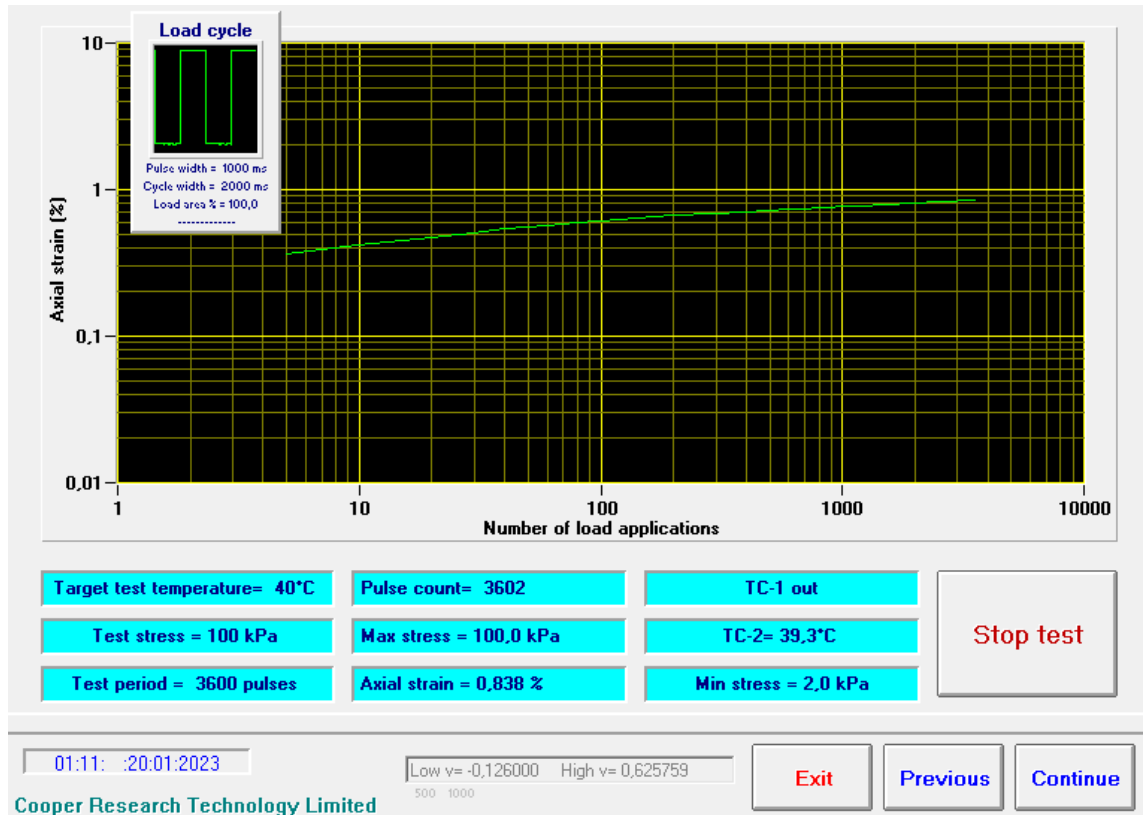


**Anexo 10:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 10 % RAP.

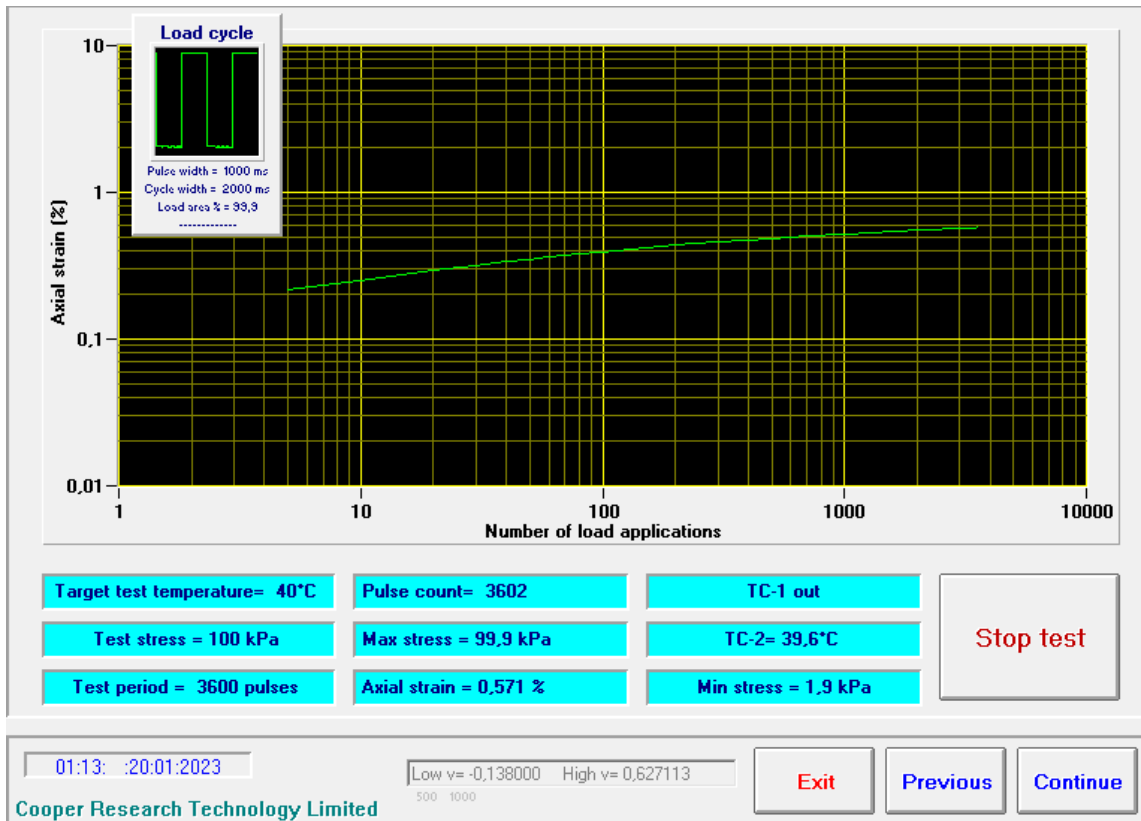
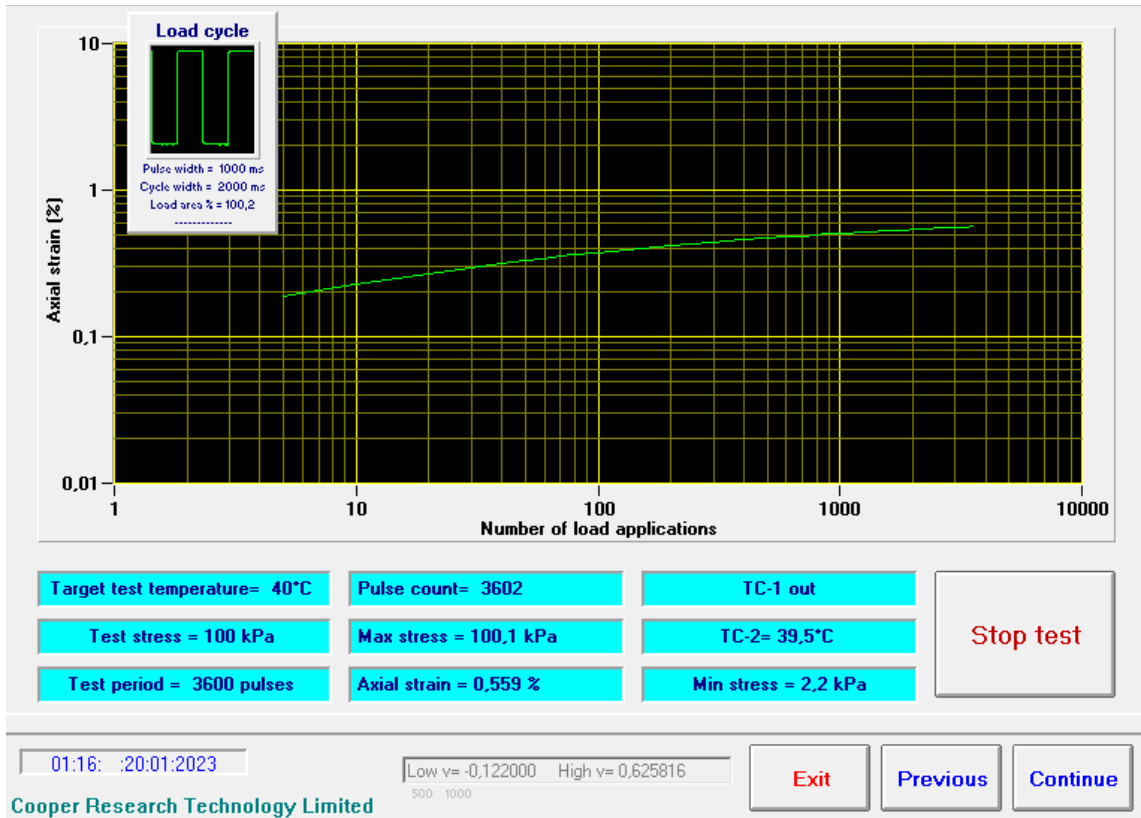




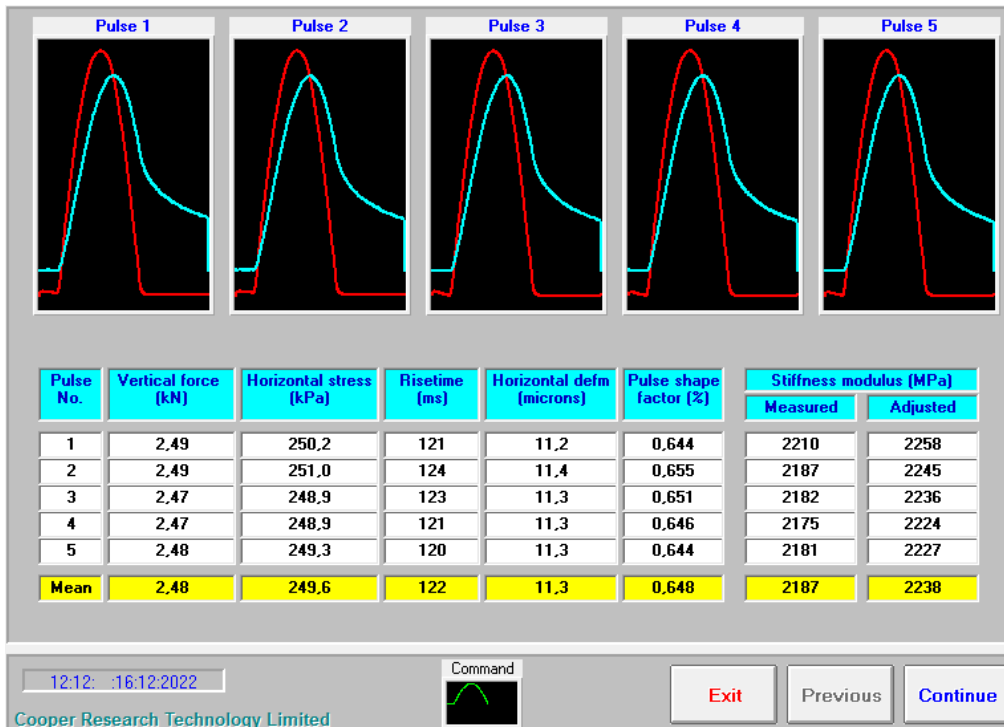
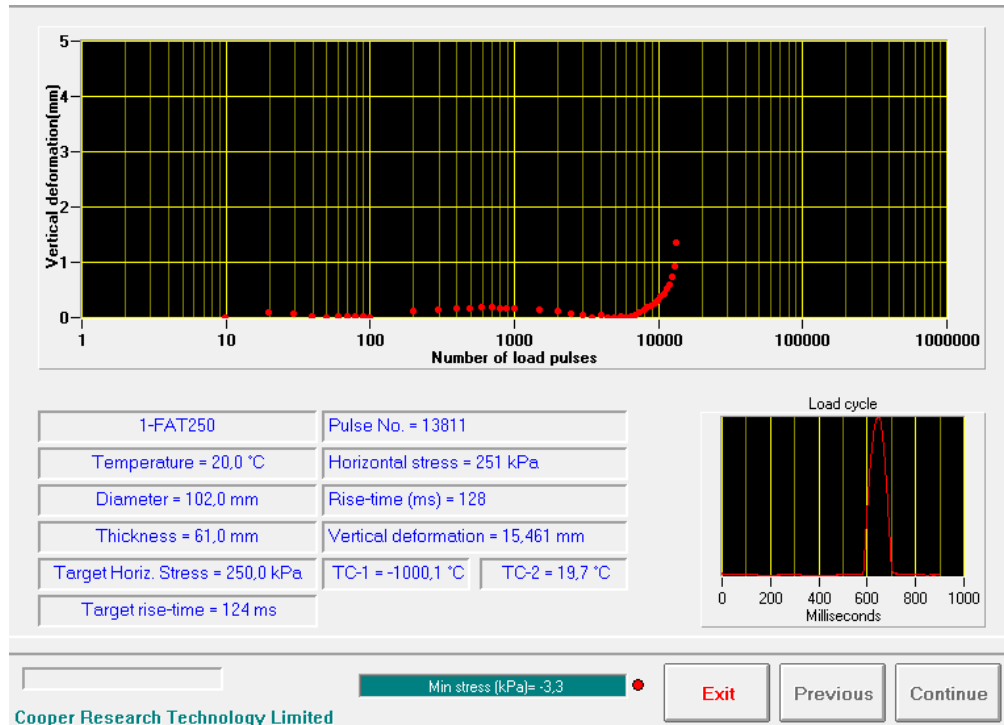
**Anexo 10:** Salida de resultados del equipo NAT para creep en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 20 % RAP.

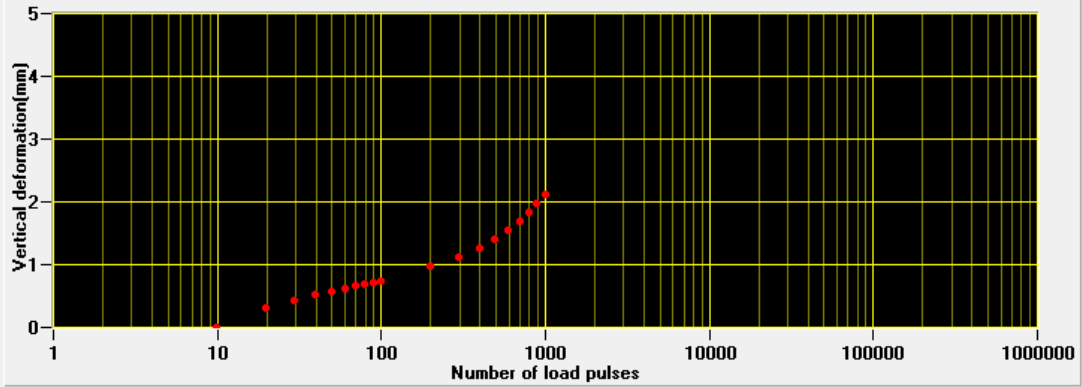




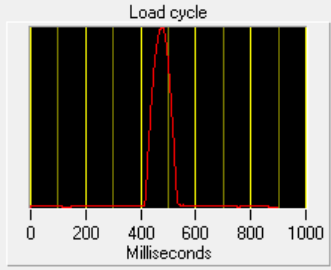


**Anexo 11:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto Base.



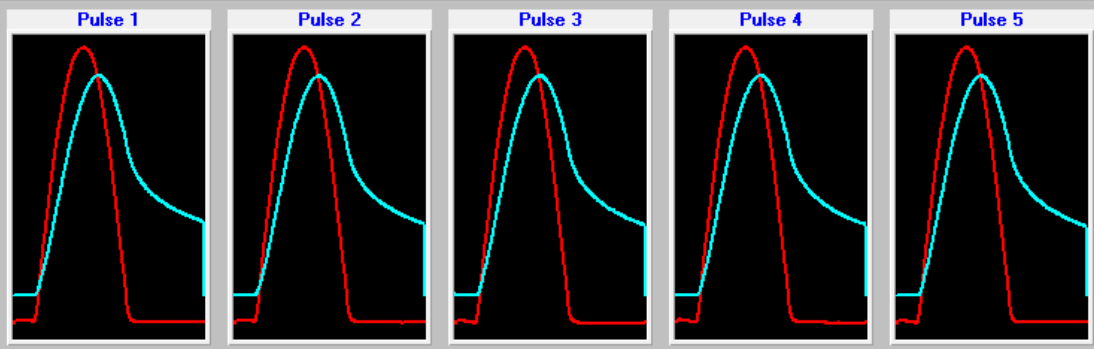


5-FAT350	Pulse No. = 1431	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 354 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 124	
Thickness = 62,0 mm	Vertical deformation = 17,501 mm	
Target Horiz. Stress = 350,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 19,6 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress (kPa)= 3,6 ● Exit Previous Continue

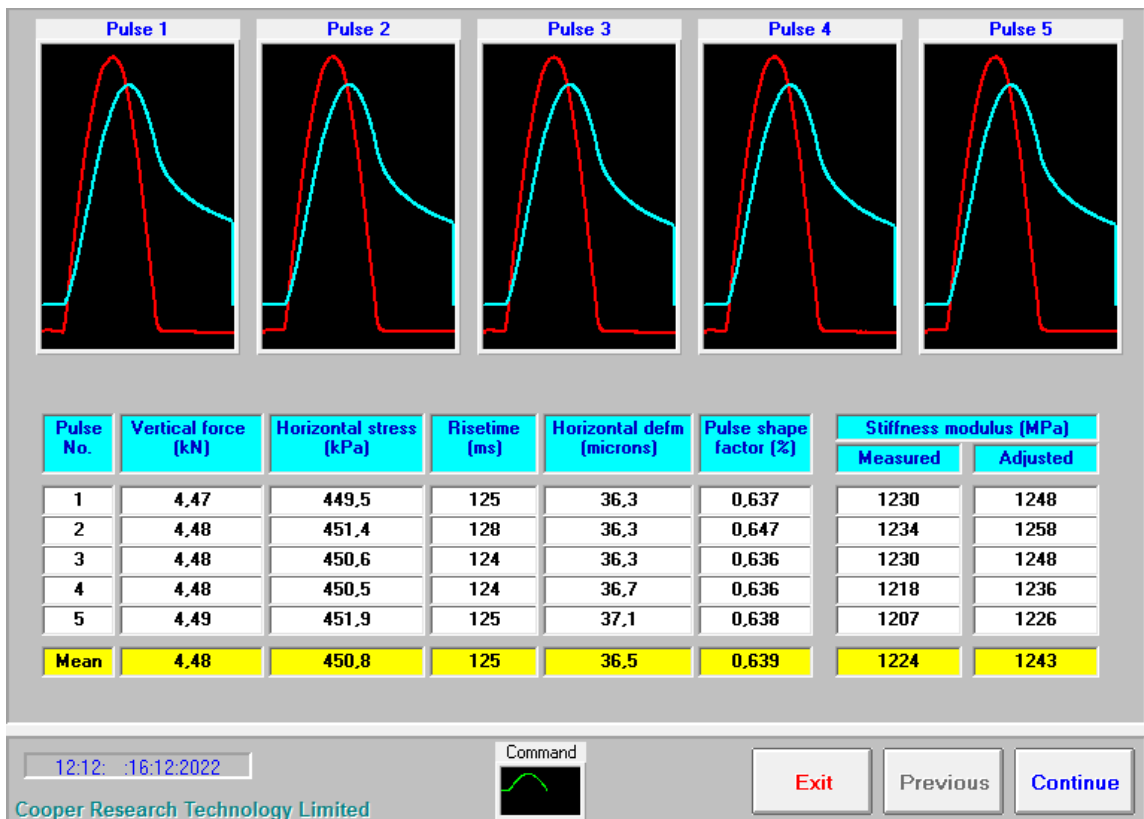
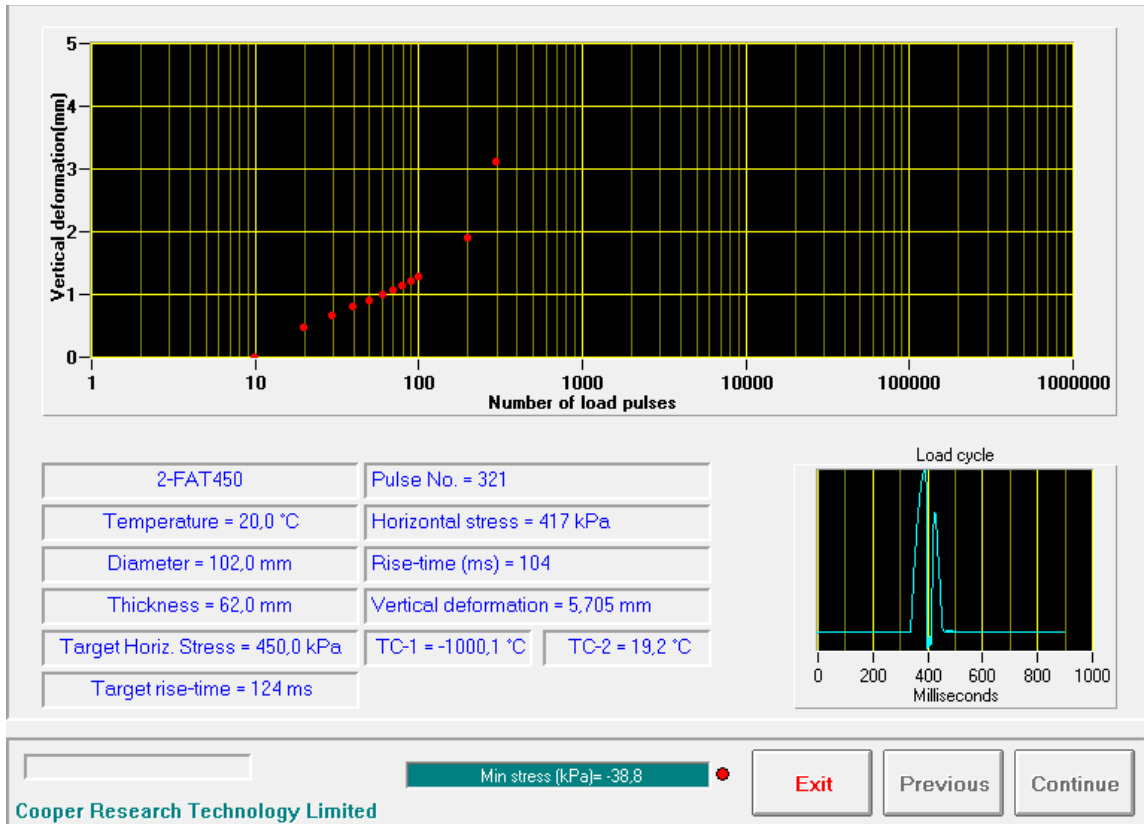
Cooper Research Technology Limited



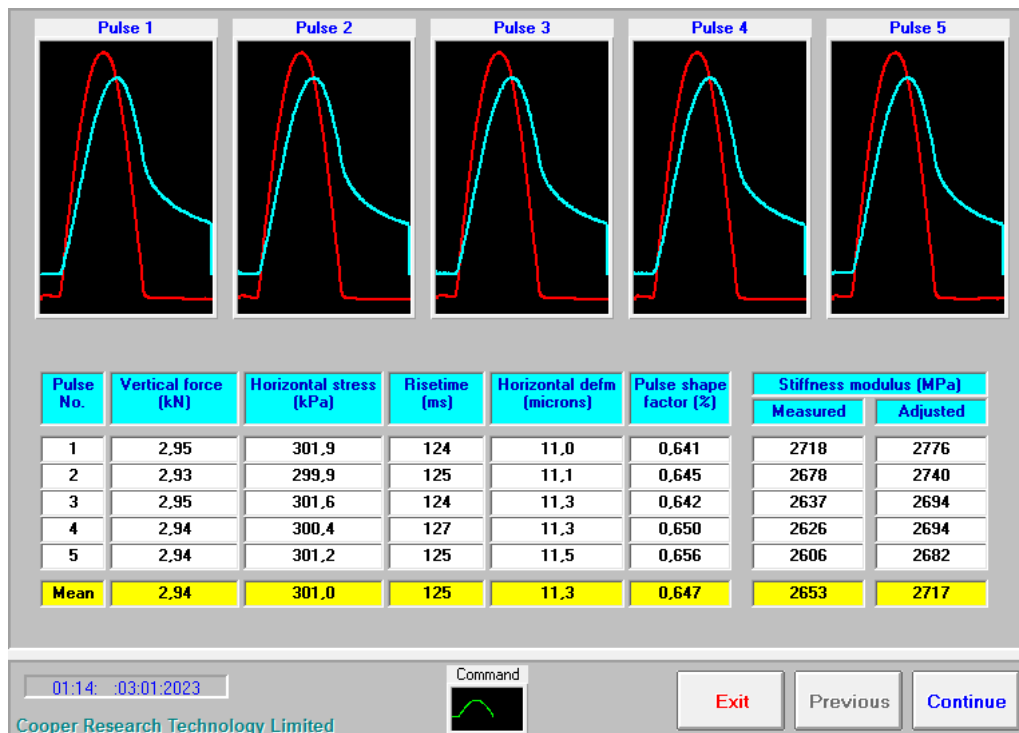
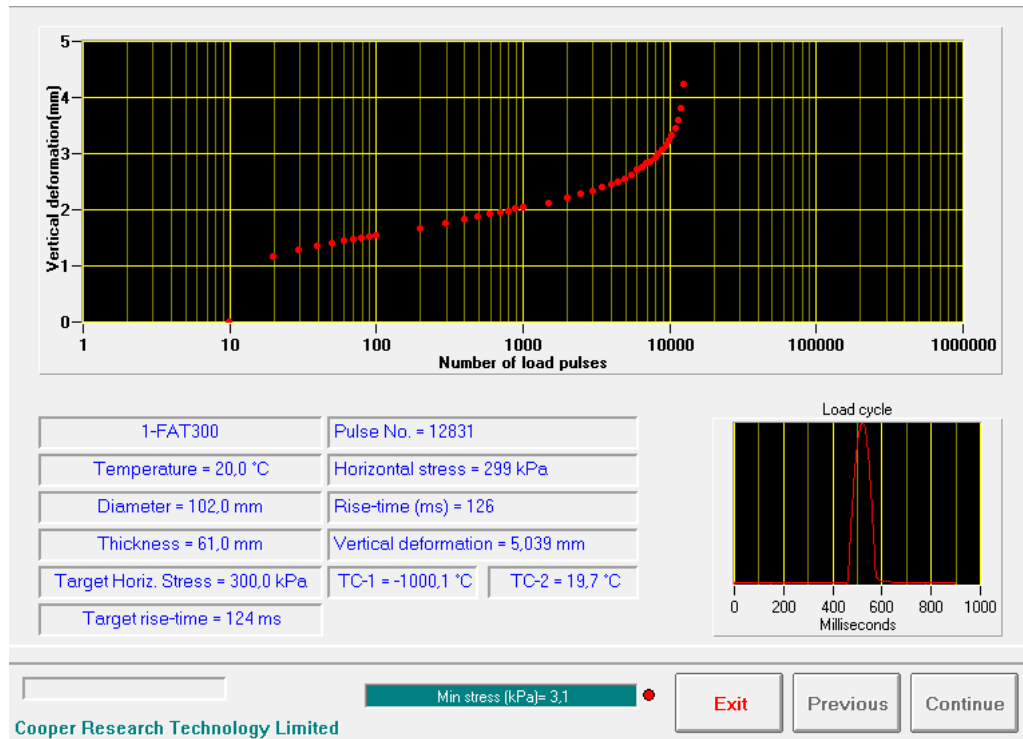
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	3,48	350,4	122	19,6	0,640	1778	1810
2	3,48	349,9	121	19,7	0,638	1762	1793
3	3,47	349,0	122	19,8	0,641	1751	1784
4	3,48	349,8	124	20,0	0,635	1736	1764
5	3,46	348,6	124	20,0	0,647	1728	1766
<b>Mean</b>	<b>3,47</b>	<b>349,6</b>	<b>123</b>	<b>19,8</b>	<b>0,640</b>	<b>1751</b>	<b>1783</b>

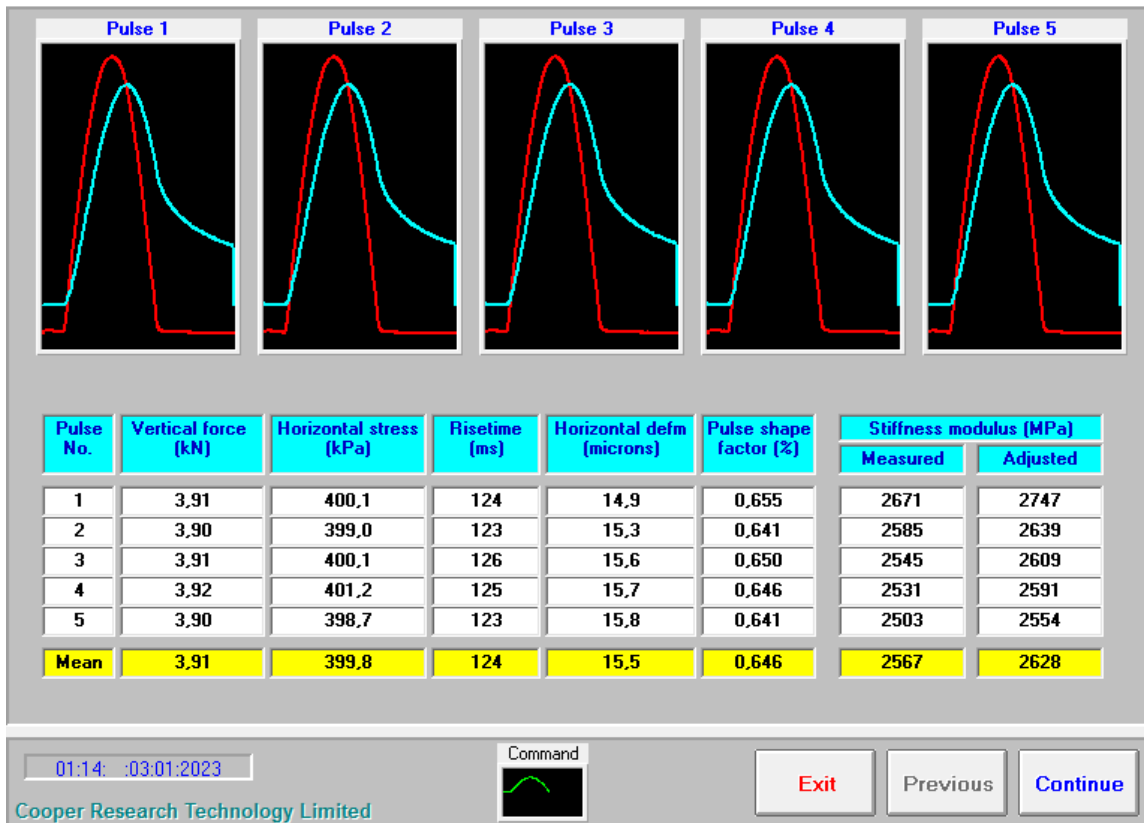
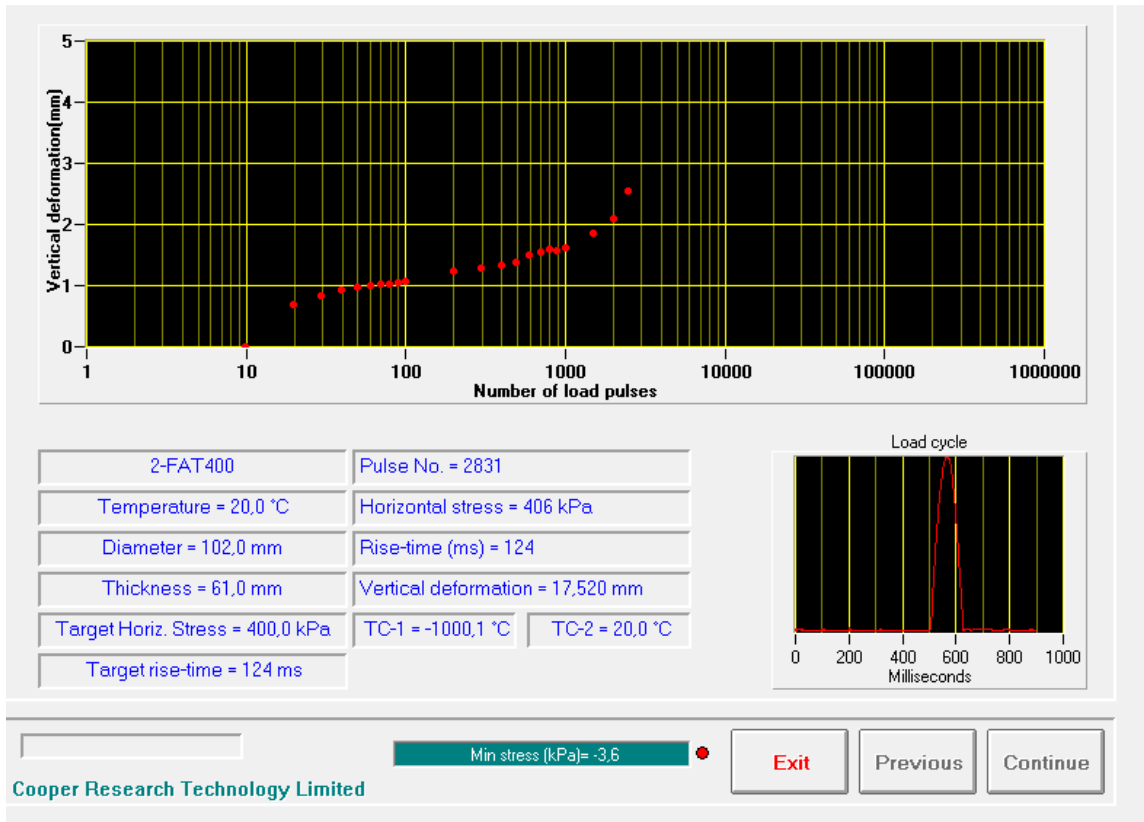
12:12 :16:12:2022 Command  Exit Previous Continue

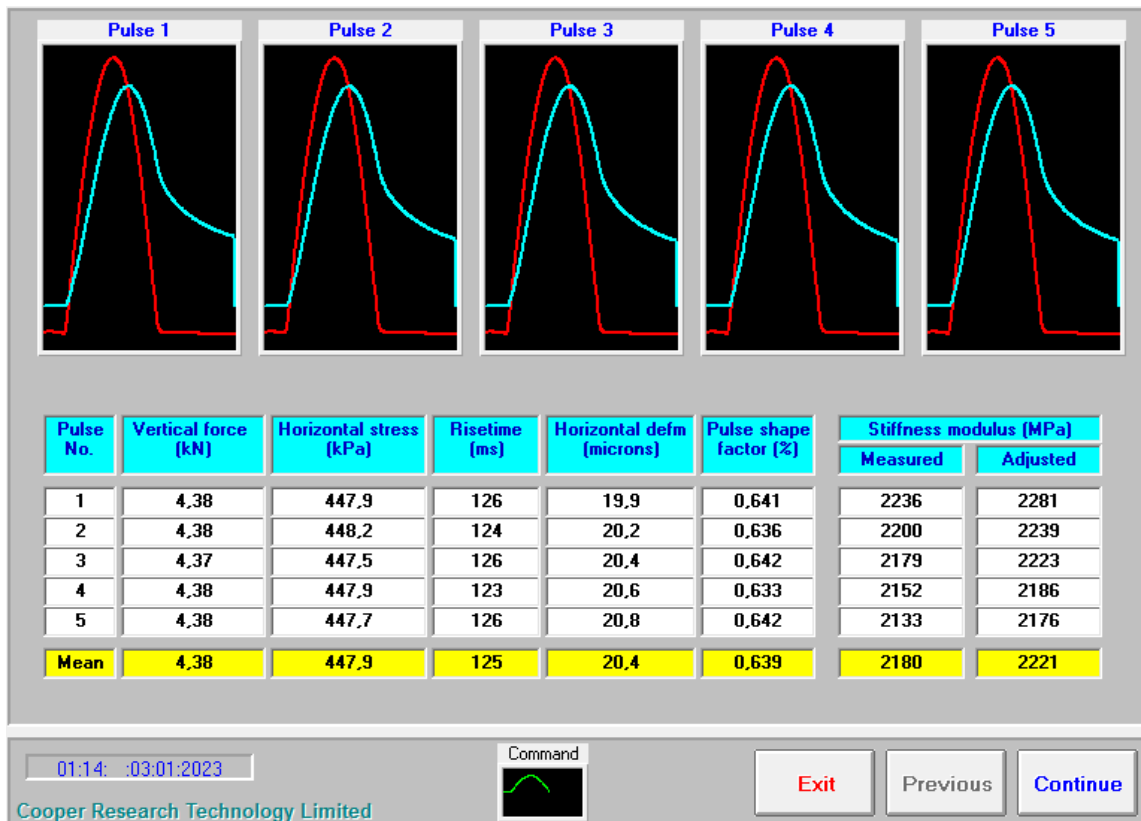
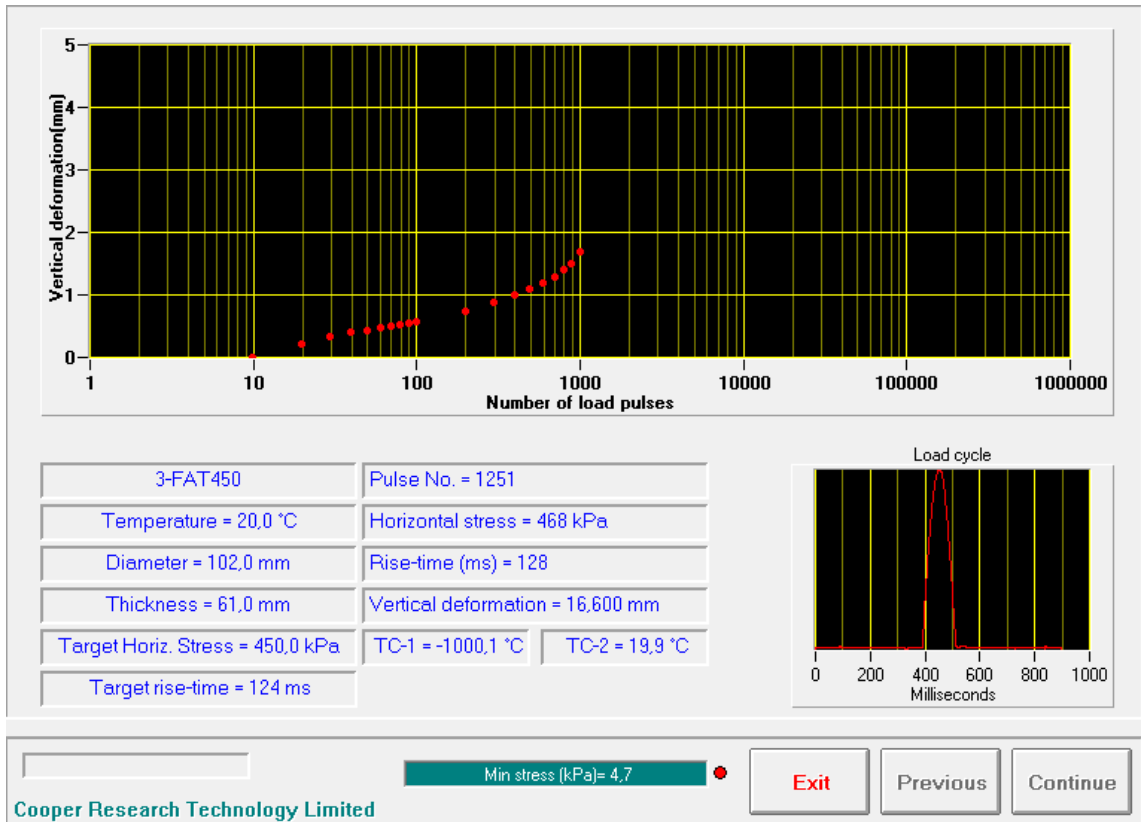
Cooper Research Technology Limited



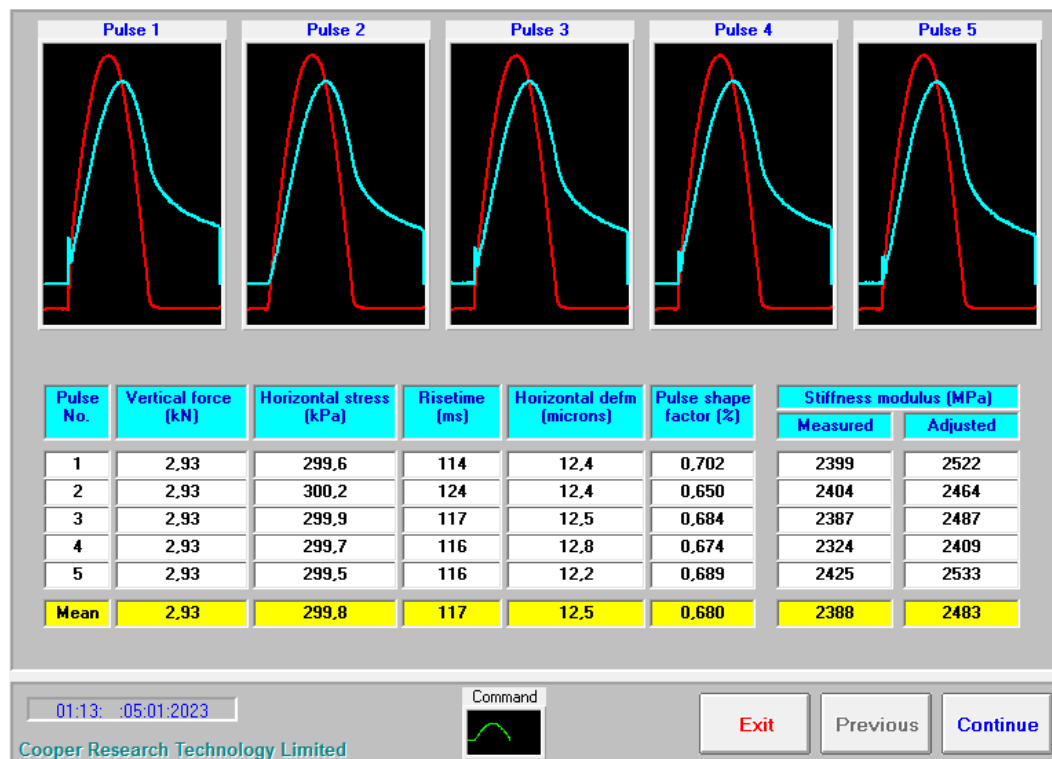
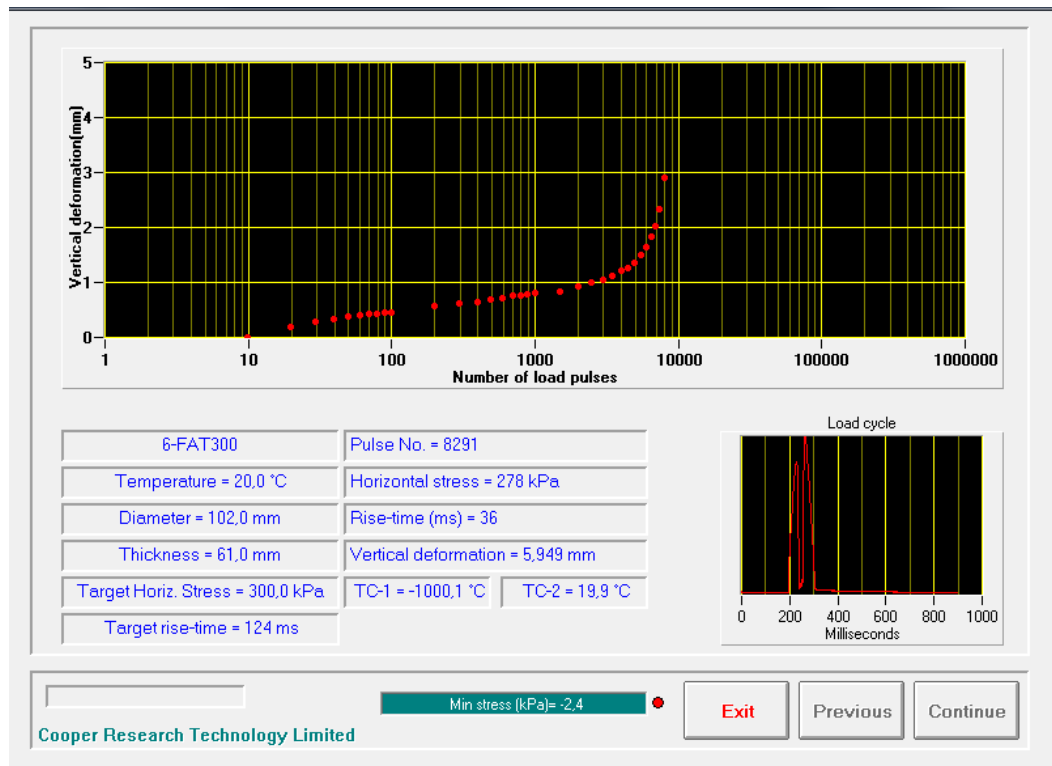
**Anexo 12:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto Base + 10% RAP.



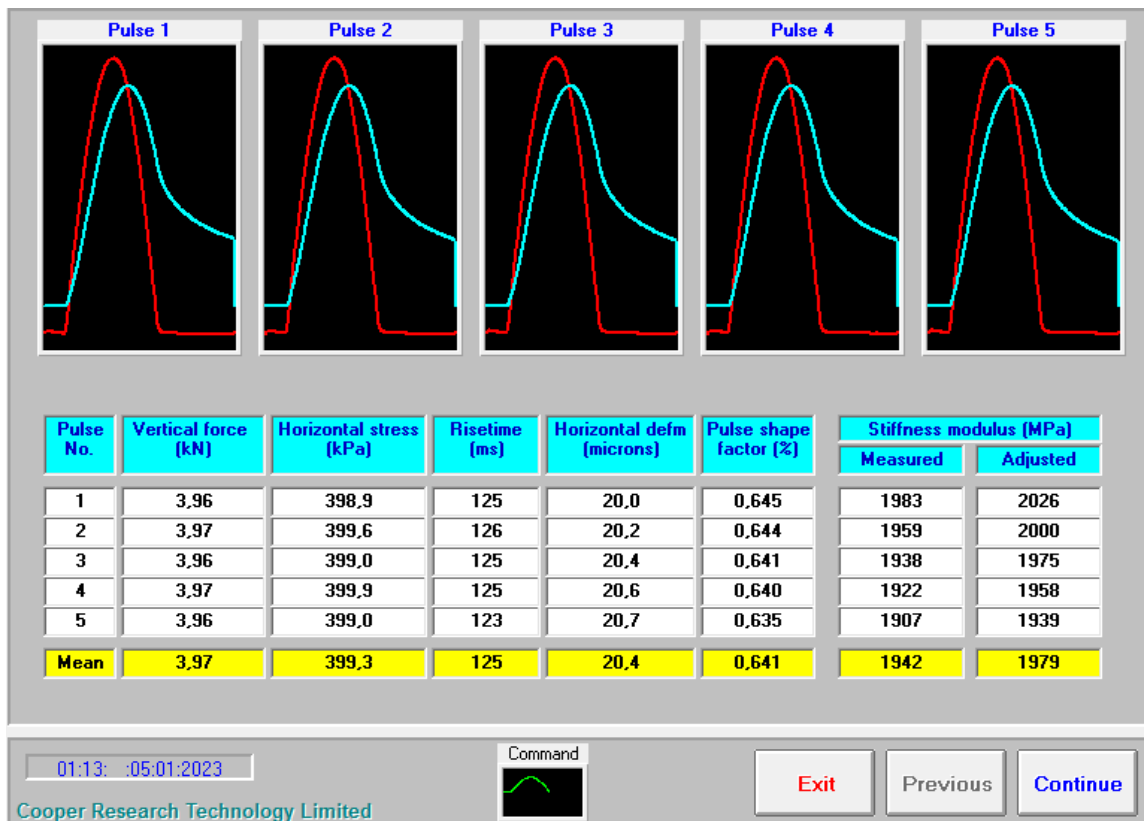
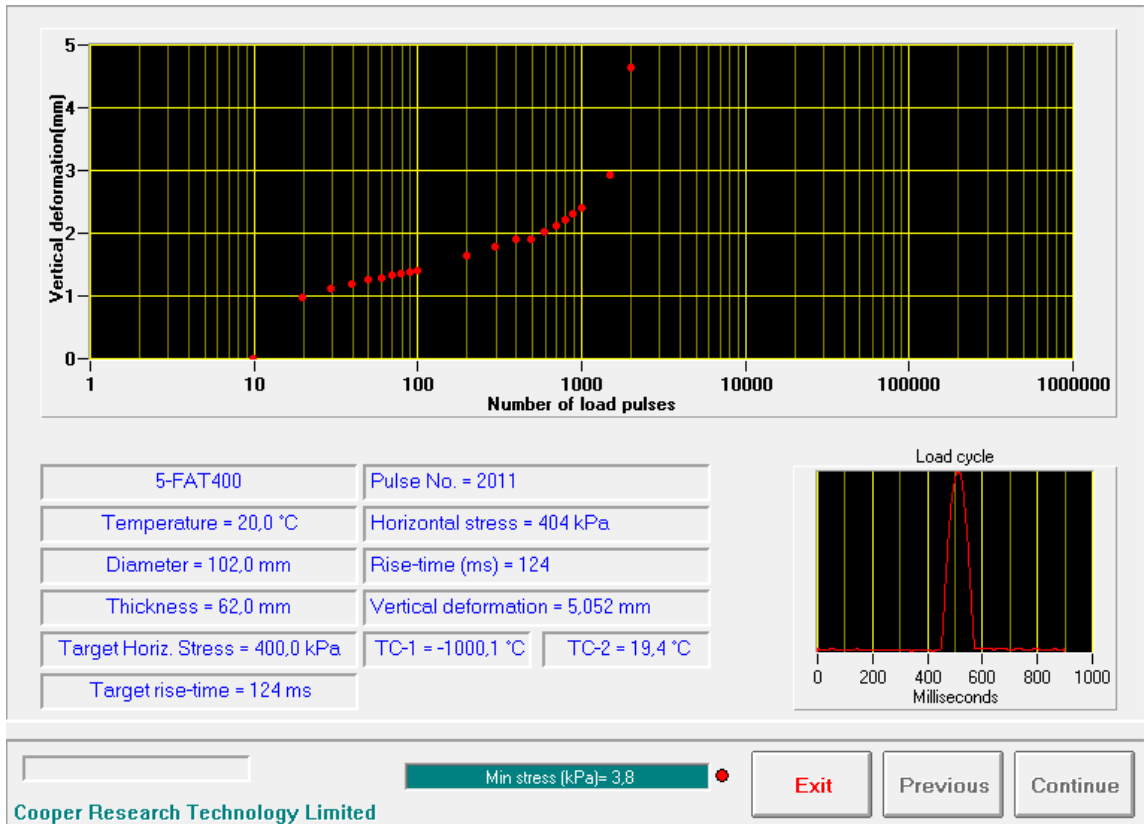


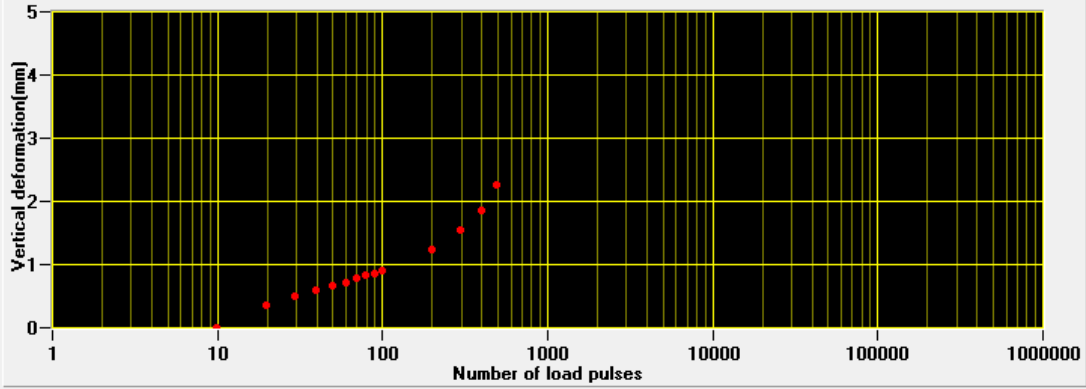


**Anexo 13:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto Base + 20% RAP.

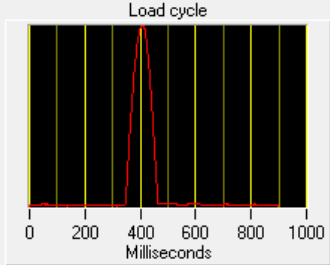








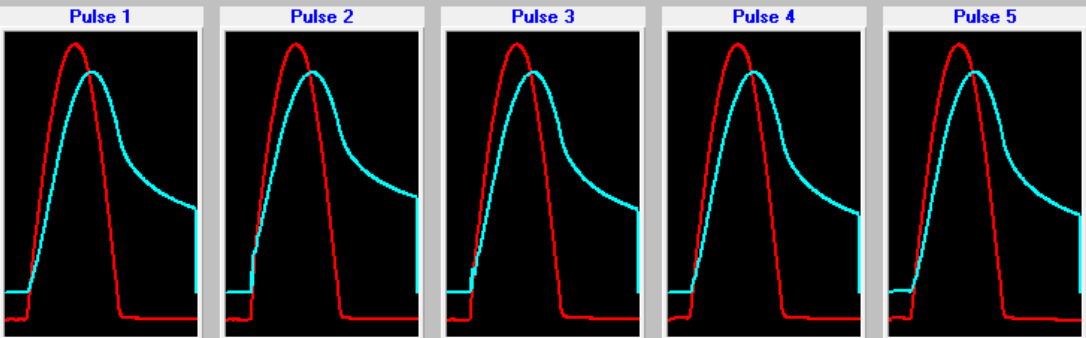
3-FAT450	Pulse No. = 591	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 456 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 124	
Thickness = 62,0 mm	Vertical deformation = 17,010 mm	
Target Horiz. Stress = 450,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 19,6 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress [kPa]= 3,9

Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	4,48	450,6	123	36,9	0,642	1212	1232
2	4,46	449,3	114	41,2	0,680	1082	1116
3	4,49	451,5	122	37,7	0,668	1186	1219
4	4,49	451,6	124	37,0	0,639	1211	1230
5	4,48	450,9	126	37,0	0,644	1208	1230
<b>Mean</b>	<b>4,48</b>	<b>450,8</b>	<b>122</b>	<b>38,0</b>	<b>0,654</b>	<b>1180</b>	<b>1205</b>

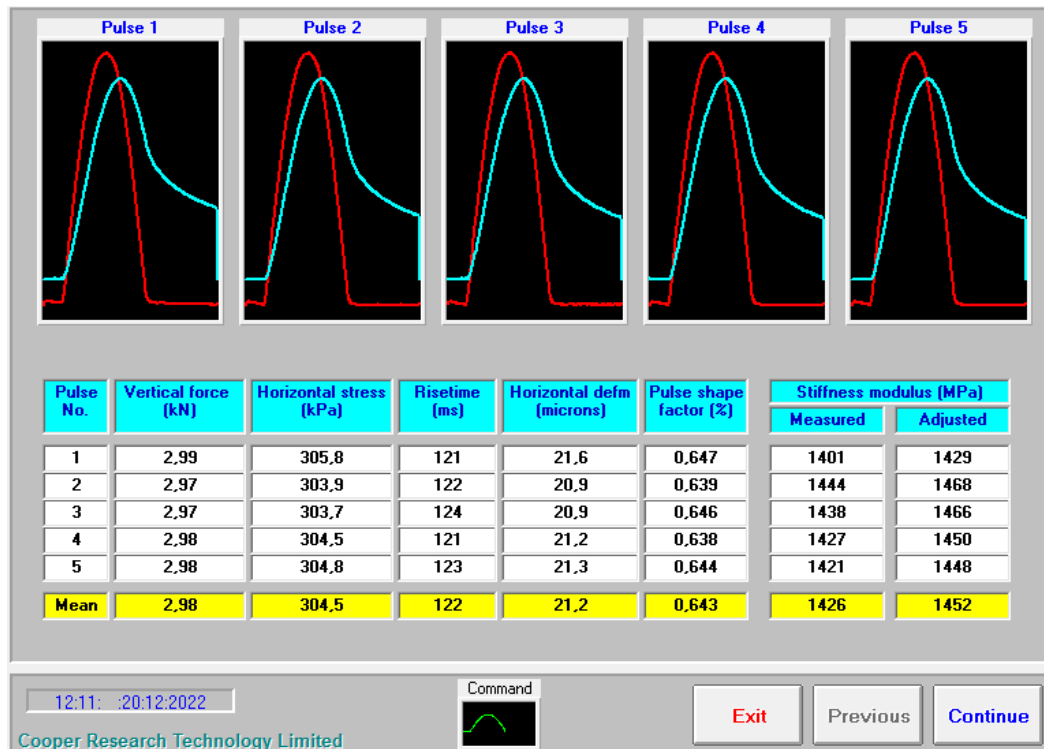
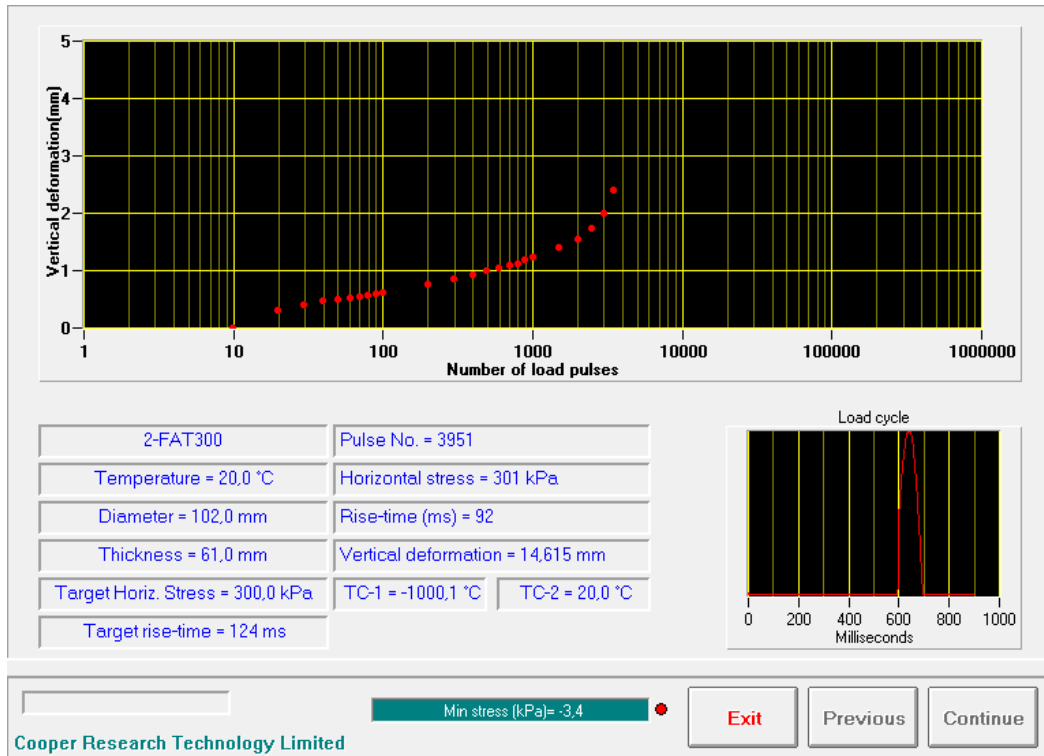
01:13 :05:01:2023

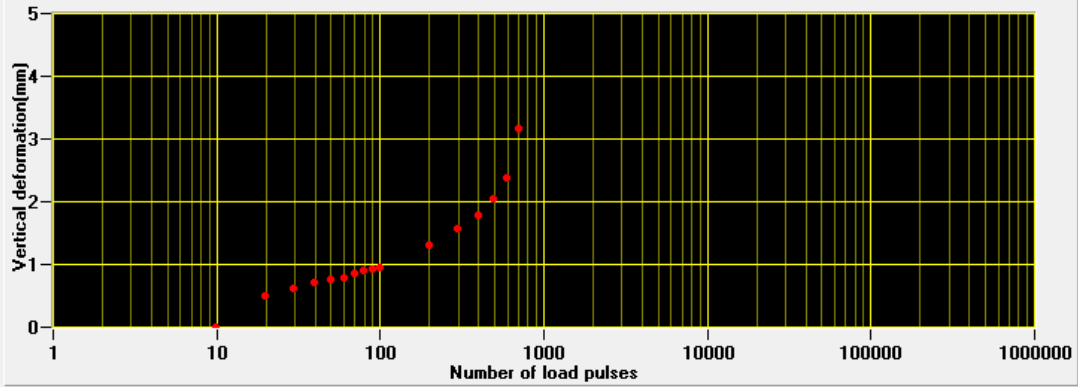
Command

Exit Previous Continue

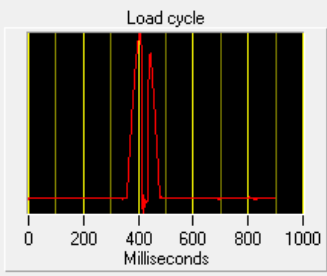
Cooper Research Technology Limited

**Anexo 14:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor.





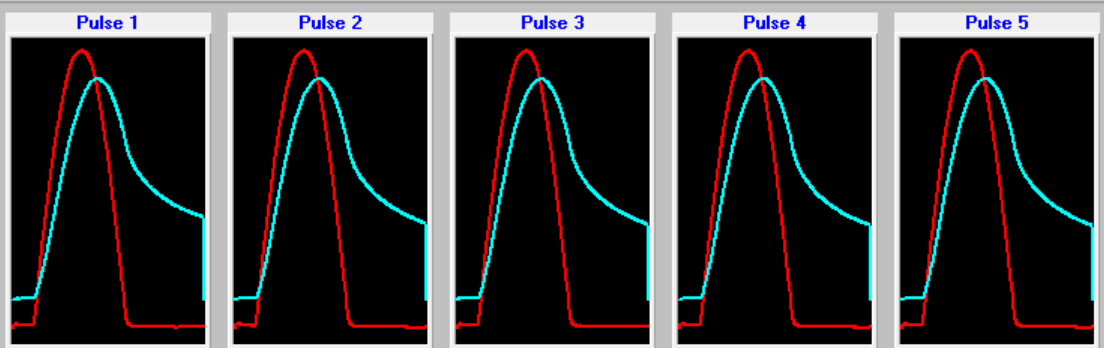
3-FAT400	Pulse No. = 751	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 360 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 100	
Thickness = 61,0 mm	Vertical deformation = 5,464 mm	
Target Horiz. Stress = 400,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 19,2 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress (kPa) = -27,8

Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited



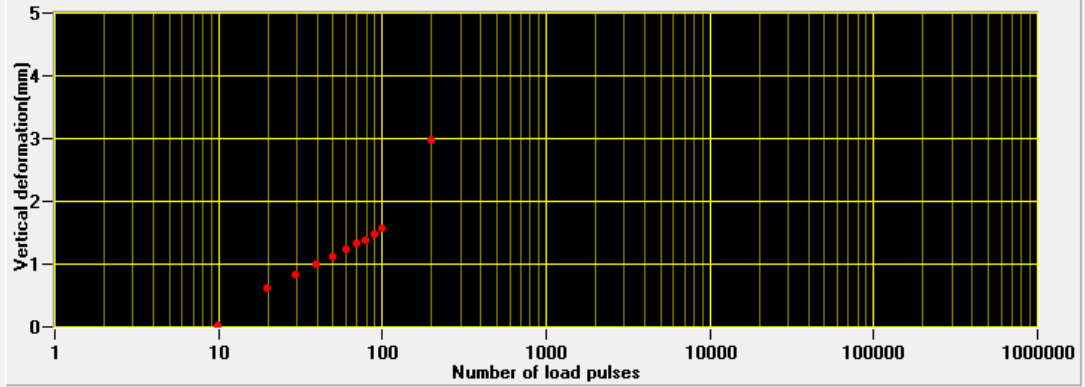
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	3,91	400,3	121	32,0	0,633	1240	1256
2	3,91	400,3	123	31,5	0,640	1261	1282
3	3,92	400,9	123	31,8	0,640	1251	1272
4	3,92	400,7	124	31,9	0,642	1245	1266
5	3,92	400,9	123	32,2	0,640	1236	1256
<b>Mean</b>	<b>3,92</b>	<b>400,6</b>	<b>123</b>	<b>31,9</b>	<b>0,639</b>	<b>1246</b>	<b>1266</b>

12:11 :20:12:2022

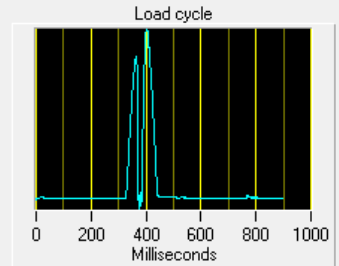
Command

Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited



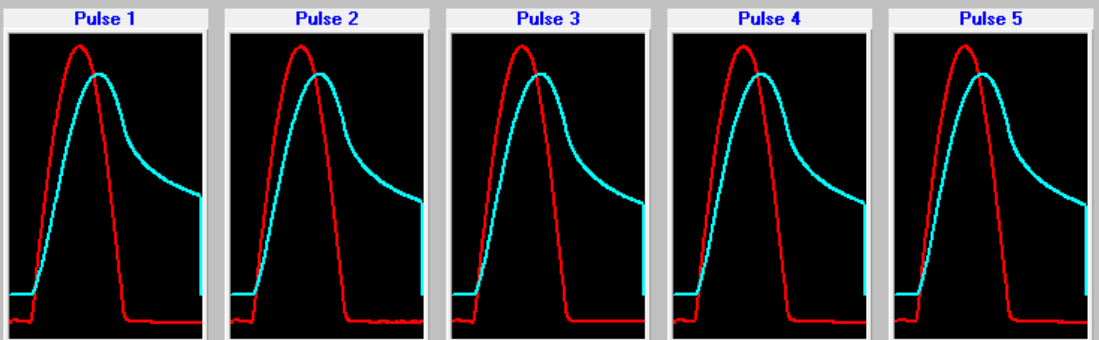
7-FAT450	Pulse No. = 201	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 390 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 62	
Thickness = 62,0 mm	Vertical deformation = 5,346 mm	
Target Horiz. Stress = 450,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 19,1 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress (kPa) = -19,0

Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	4,47	449,8	126	49,4	0,641	902	916
2	4,47	449,9	126	48,7	0,641	917	931
3	4,47	449,5	126	48,9	0,642	912	926
4	4,48	451,4	124	49,6	0,636	903	915
5	4,47	450,2	126	49,7	0,642	899	913
<b>Mean</b>	<b>4,47</b>	<b>450,2</b>	<b>126</b>	<b>49,2</b>	<b>0,640</b>	<b>907</b>	<b>920</b>

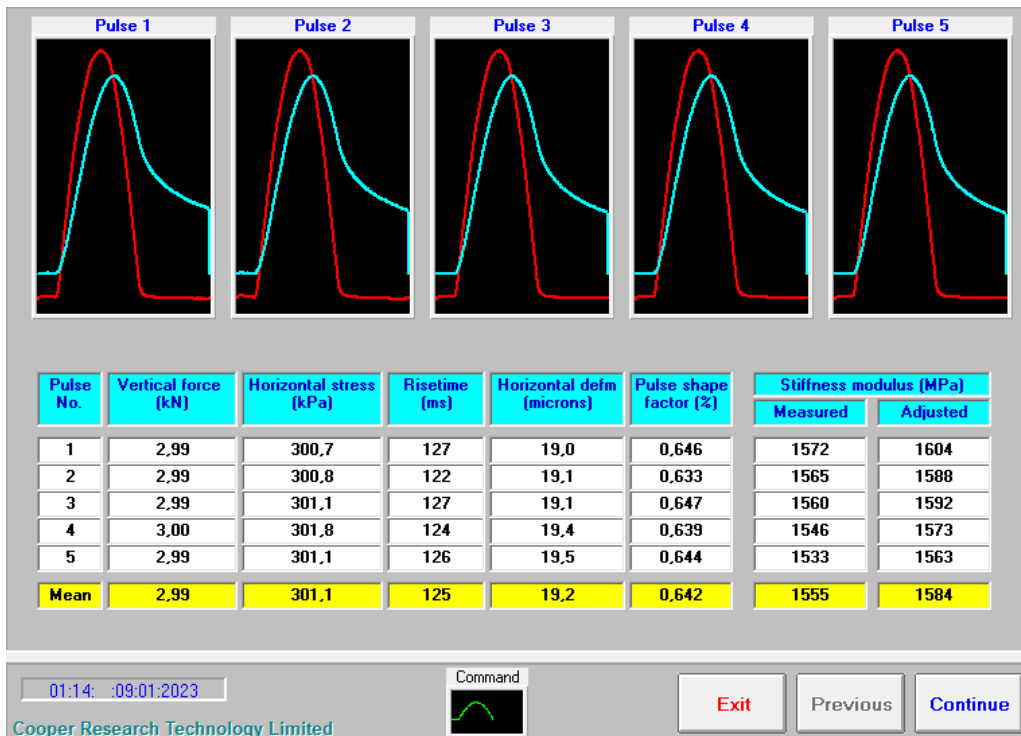
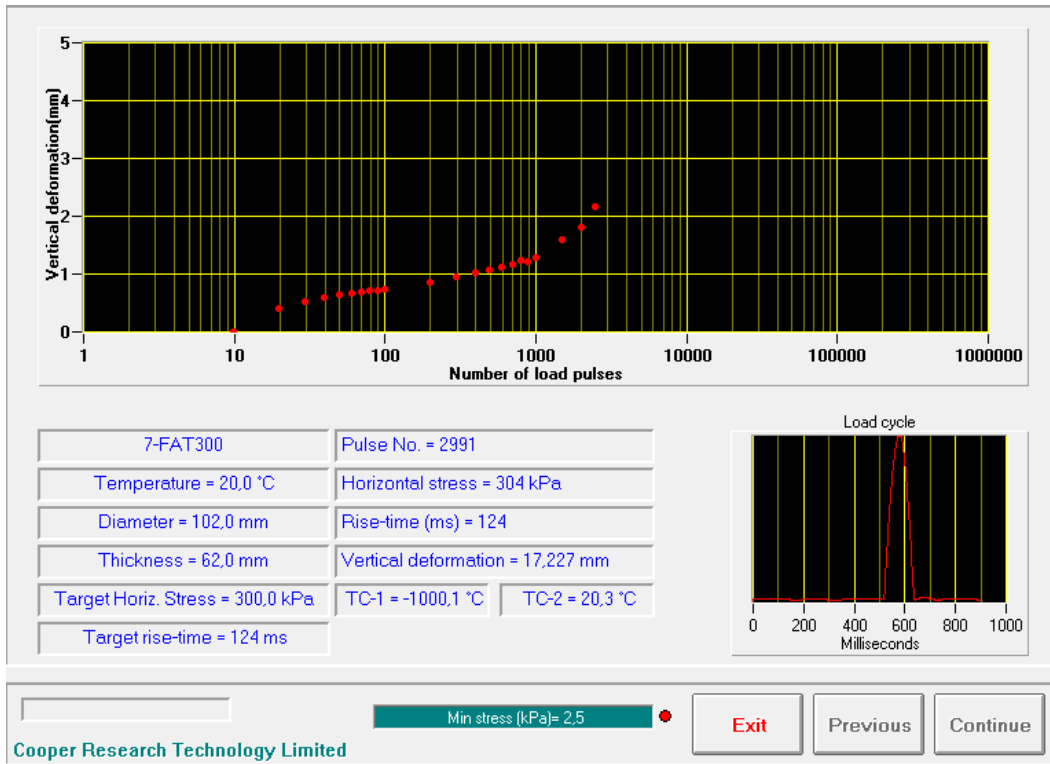
12:11 :20:12:2022

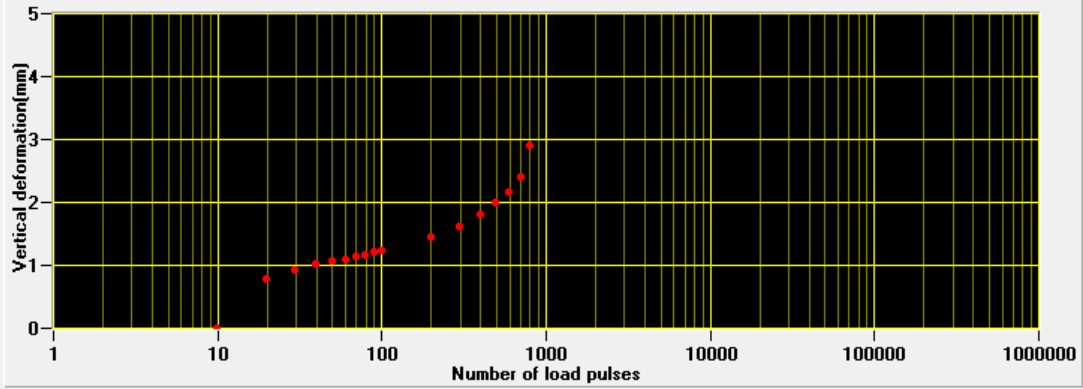
Command

Exit Previous Continue

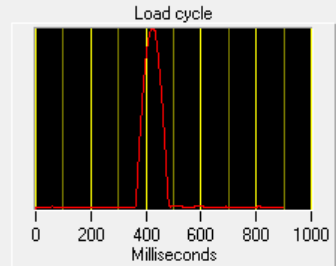
Cooper Research Technology Limited

**Anexo 15:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP.





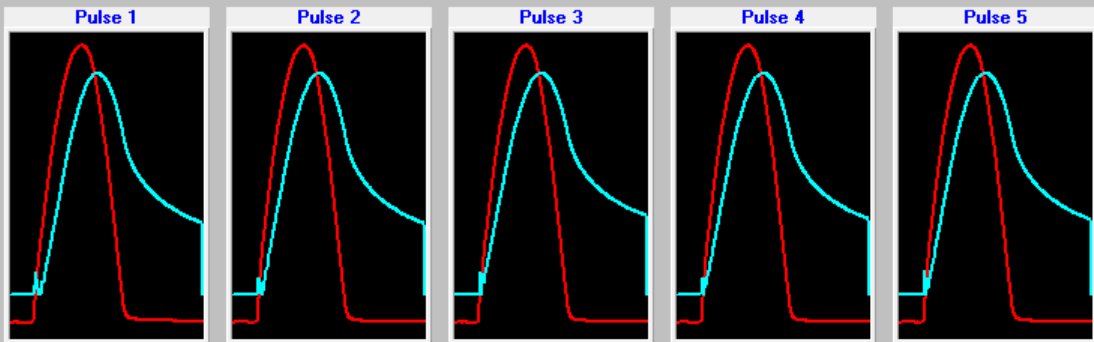
4-FAT400	Pulse No. = 851	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 407 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 122	
Thickness = 62,0 mm	Vertical deformation = 17,405 mm	
Target Horiz. Stress = 400,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 19,8 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress [kPa]= 3,1

Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited



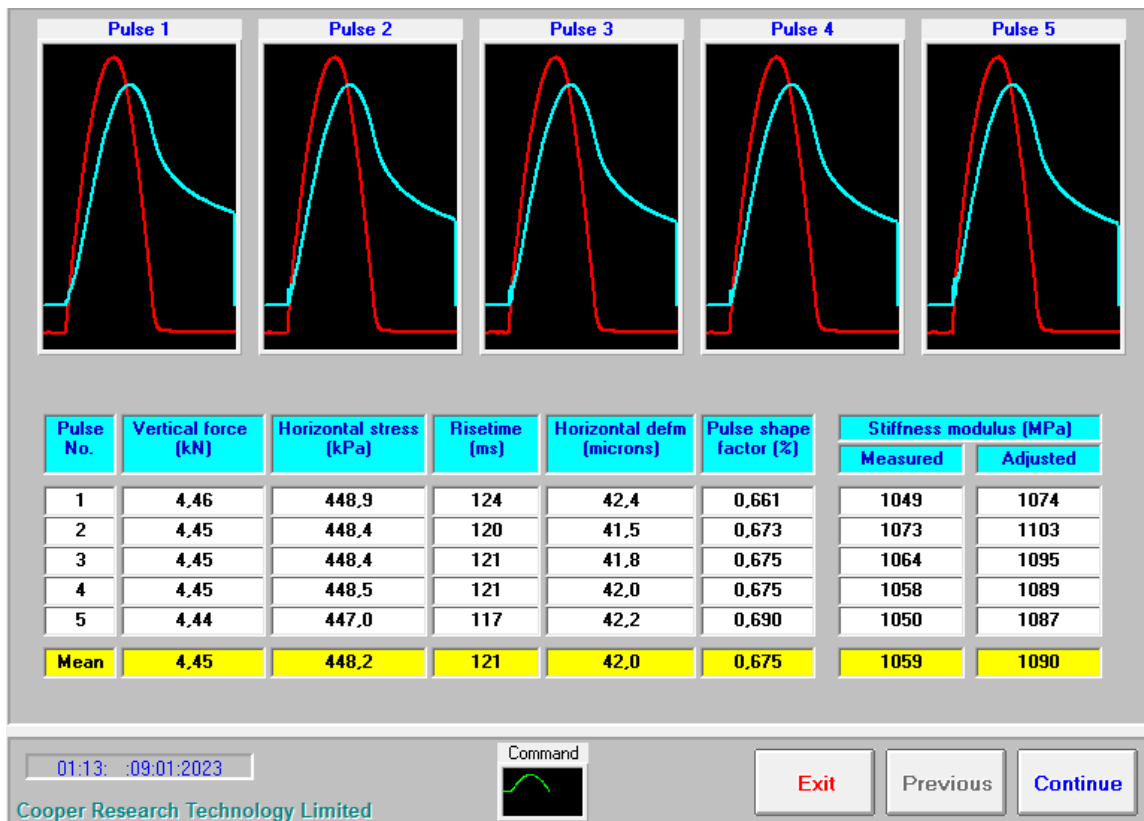
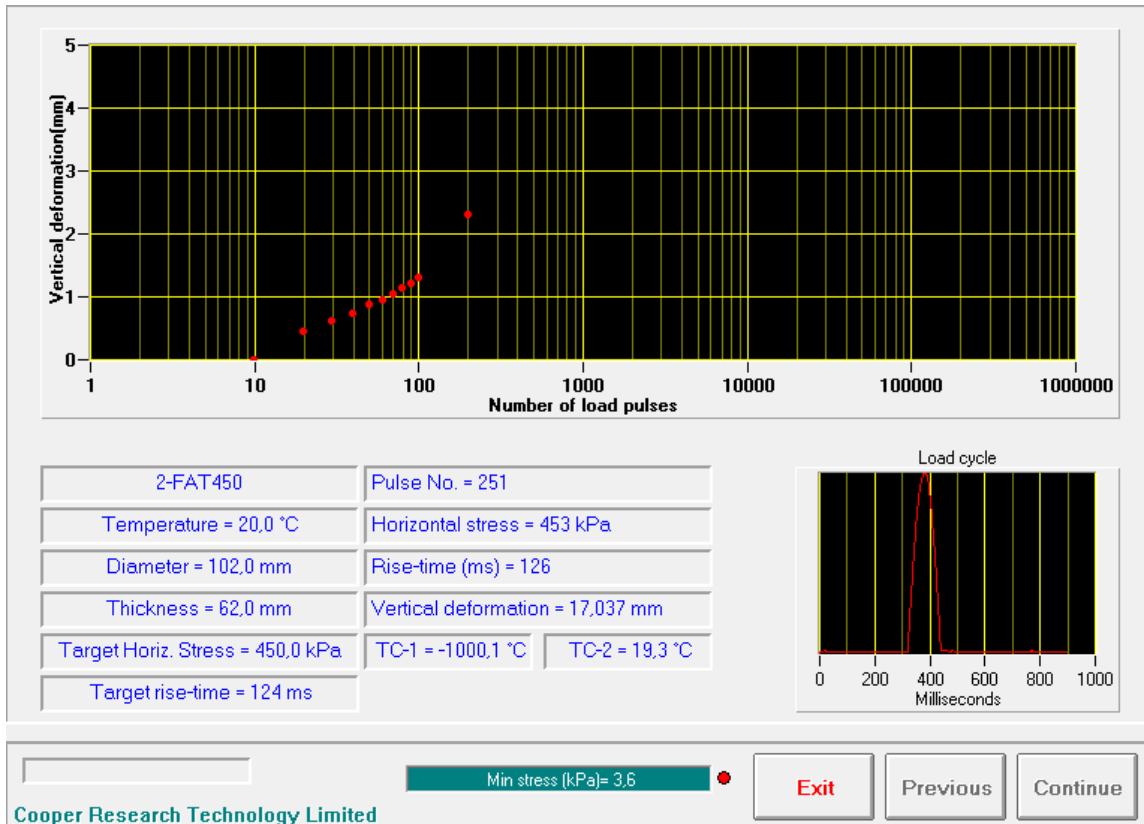
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	3,98	400,6	123	30,3	0,655	1312	1342
2	3,96	398,3	120	31,2	0,681	1264	1306
3	3,96	399,1	121	33,6	0,678	1179	1216
4	3,96	398,8	118	33,2	0,677	1192	1229
5	3,96	398,8	119	33,4	0,679	1185	1223
<b>Mean</b>	<b>3,96</b>	<b>399,1</b>	<b>120</b>	<b>32,3</b>	<b>0,674</b>	<b>1226</b>	<b>1263</b>

01:13 :09:01:2023

Command

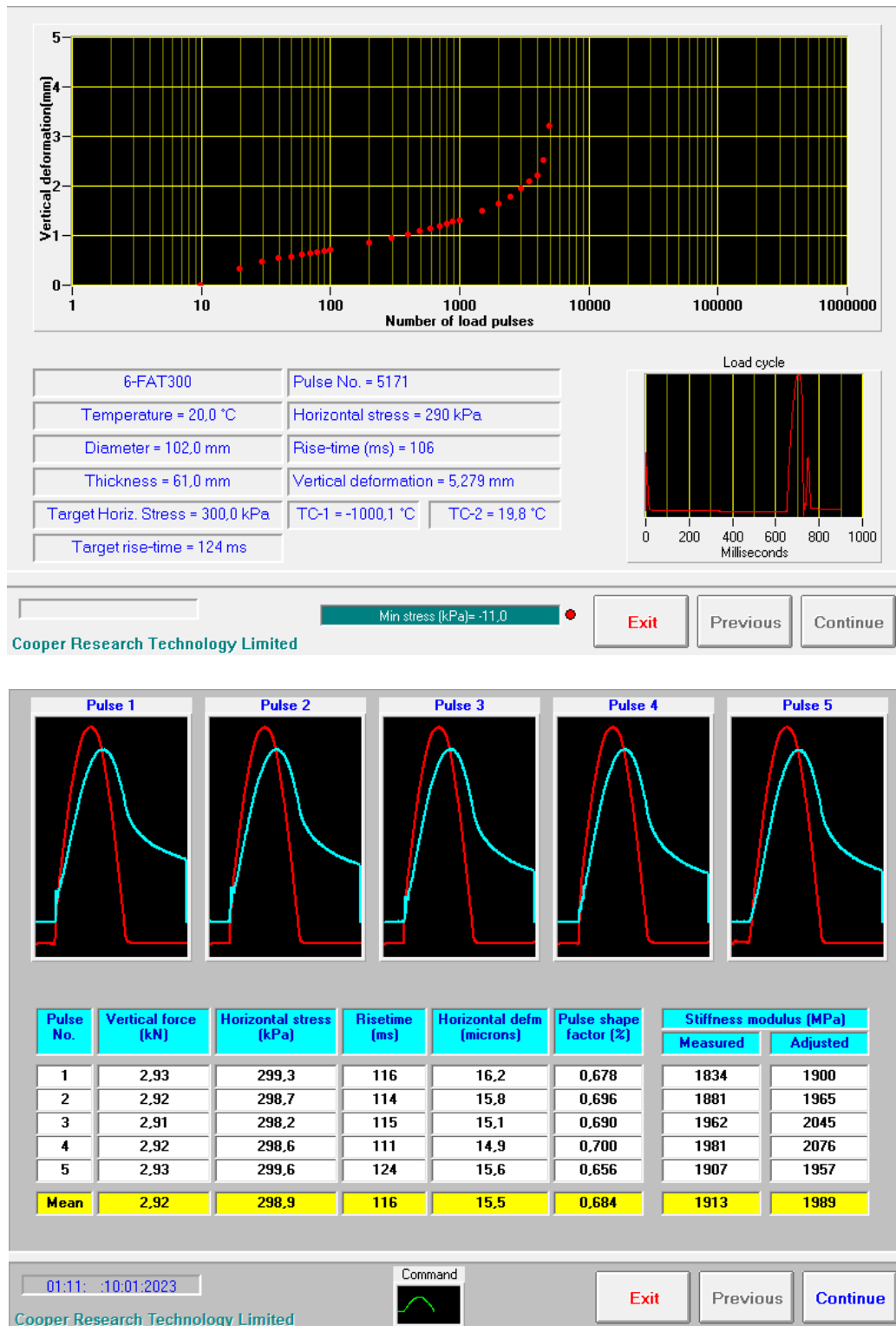
Exit Previous Continue

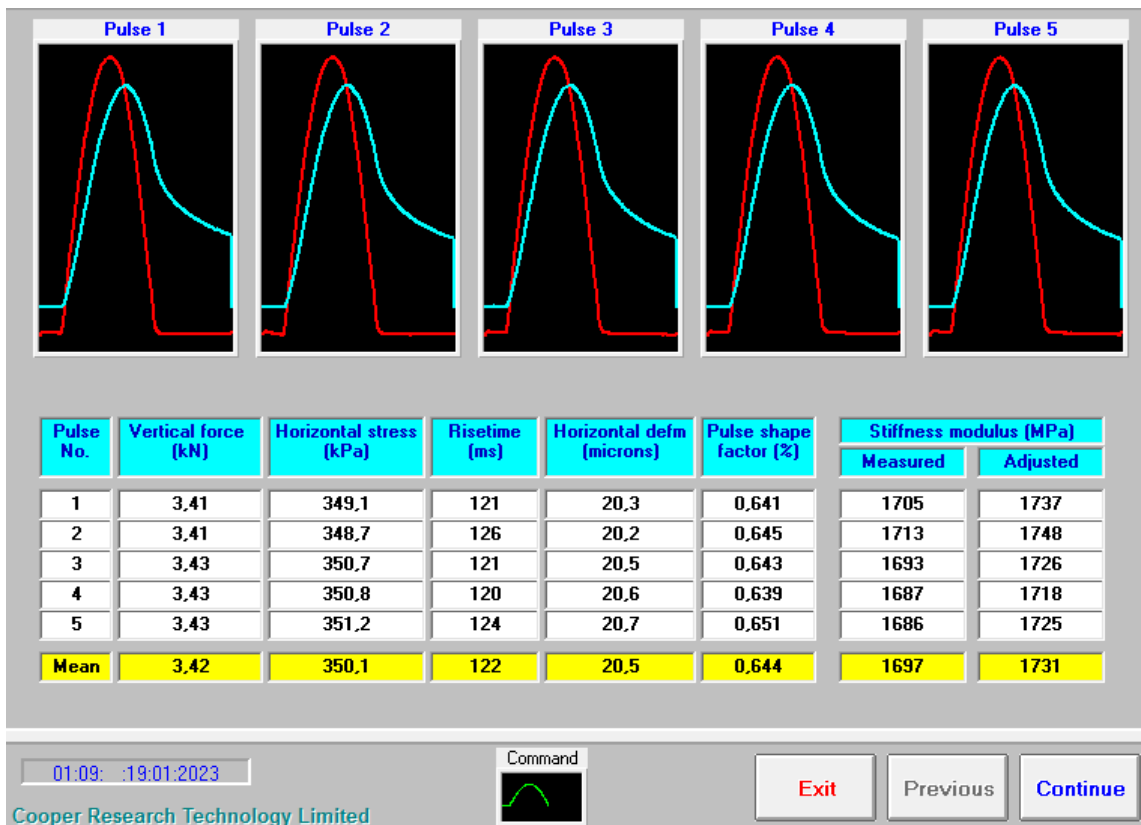
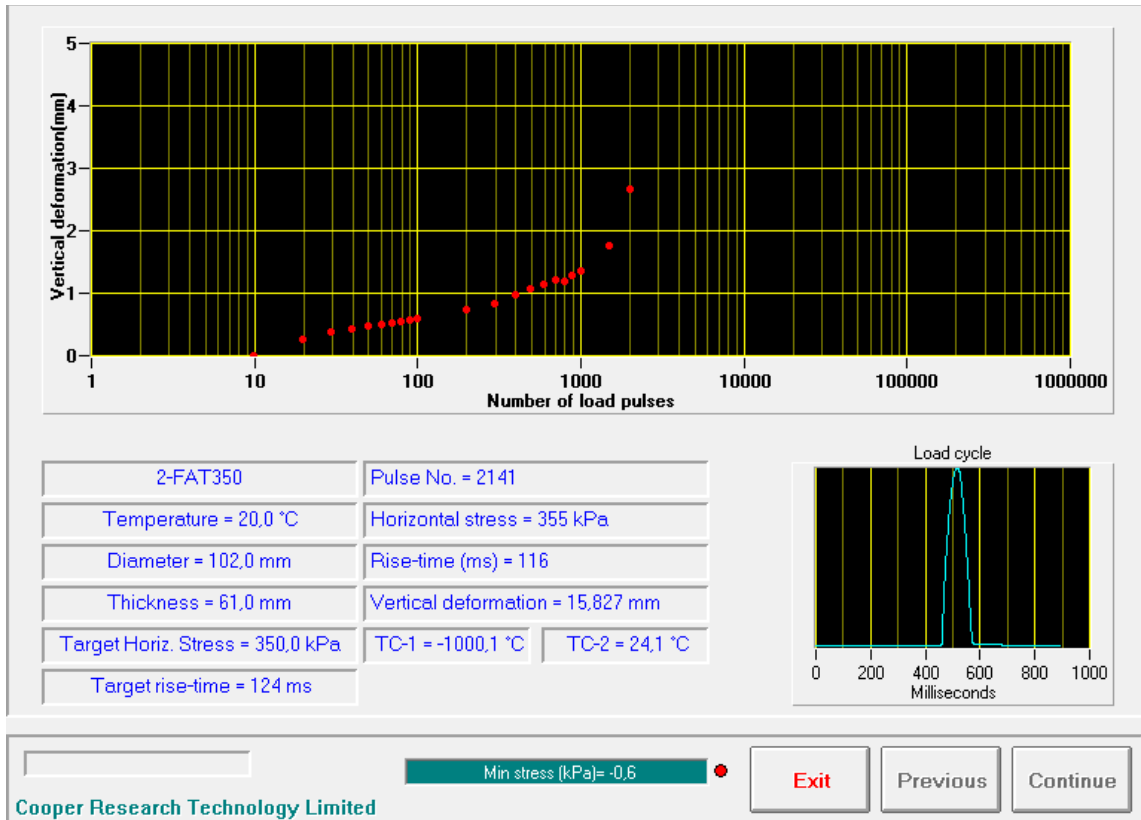
Cooper Research Technology Limited

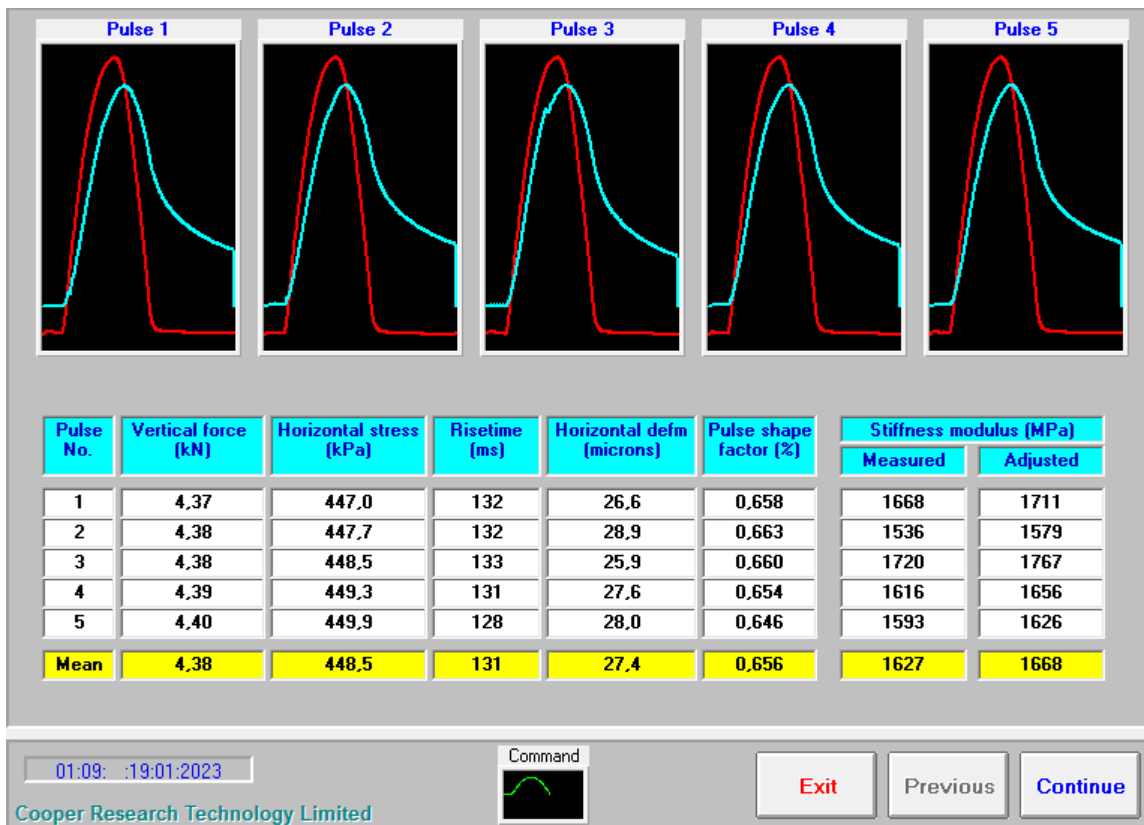
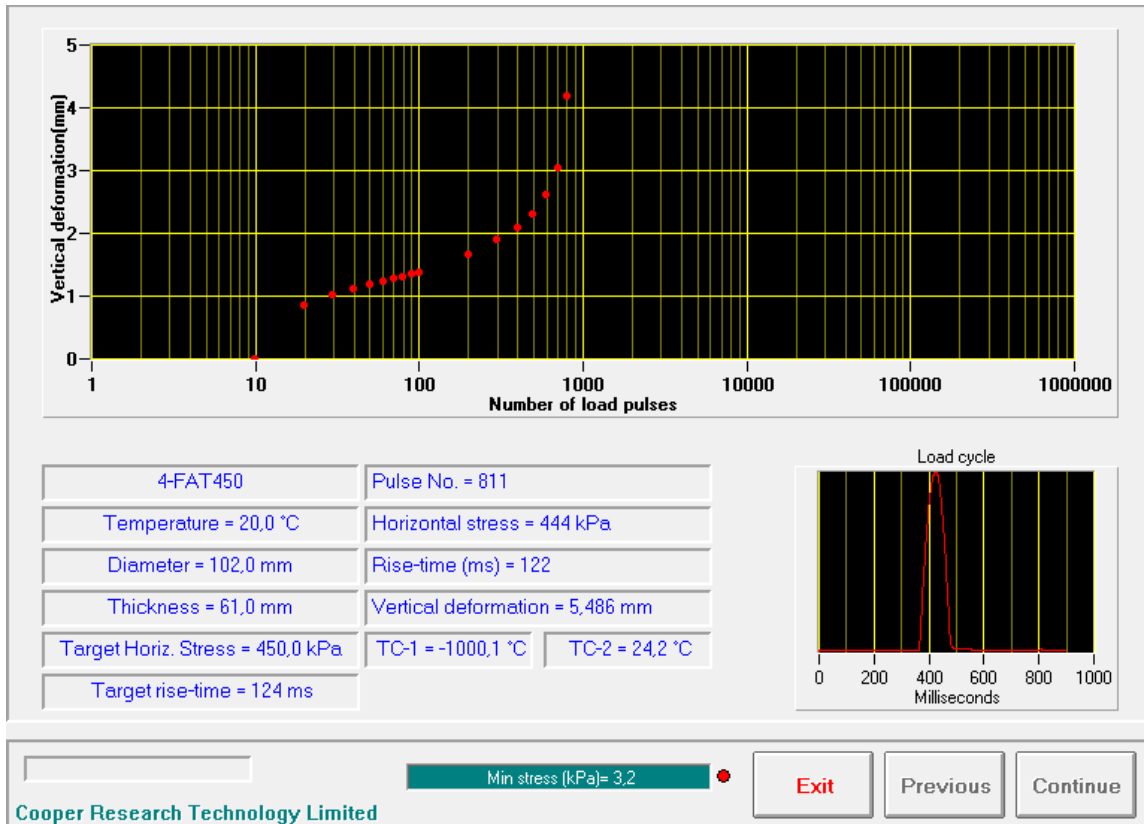




**Anexo 15:** Salida de resultados del equipo NAT para fatiga en la Combinación de Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP.







**Anexo 16:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto Base

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDCH	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		4	6	5	1	2	3	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1172,5	1169,5	1173,2	1176,1	1183,3	1177,1	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1177,3	1173,5	1175,9	1178,9	1185,3	1185,6	
Masa en el agua (gr)	C	671,8	670,6	671,4	675,1	676,8	676,5	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	505,5	502,9	504,5	503,8	508,5	509,1	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,319	2,326	2,325	2,334	2,327	2,312	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	7,1	6,9	6,9	6,5	6,8	7,4	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	35,9	34,5	34,7	32,8	34,6	37,7	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1195	1203	1207	
Masa en el agua (gr)	C'				693	695	694	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				502	507	513	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				18,7	19,4	29,9	
% saturación	100J/I				57,0	56,1	79,3	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>				<b>(todas en baño de agua)</b>				
Espesor (cm)	t	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,5	
Lectura dial condición seca	LDd	191	203	194				
Carga en condición seca (kg)	P	835	887	848				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>8,2</b>	<b>8,7</b>	<b>8,3</b>				<b>8,4</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				129	137	120	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				633	622	645	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>6,3</b>	<b>6,2</b>	<b>6,2</b>	<b>6,2</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>74,3</b>

**Anexo 17:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto Base + 10% RAP.

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDC	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		1	2	6	3.1	4.2	5.3	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1056,9	1177,4	1175,9	1178,1	1179,2	1183,8	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1068,7	1180,2	1178,2	1181,9	1184,1	1185,4	
Masa en el agua (gr)	C	614,4	676,8	677,2	677,3	675,9	675,8	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	454,3	503,4	501	504,6	508,2	509,6	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,326	2,339	2,347	2,335	2,320	2,323	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	6,8	6,3	6,0	6,5	7,1	7,0	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	31,0	31,9	30,1	32,8	36,0	35,5	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1200	1201	1208	
Masa en el agua (gr)	C'				696	694	695	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				503	507	512	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				21,6	21,8	24,0	
% saturación	100J/I				65,9	60,6	67,6	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>				<b>(todas en baño de agua)</b>				
Espesor (cm)	t	5,6	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	189	205	208				
Carga en condición seca (kg)	P	826	894	907				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>9,2</b>	<b>8,9</b>	<b>9,0</b>				<b>9,1</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				147	147	130	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				644	644	572	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>6,4</b>	<b>6,3</b>	<b>5,6</b>	<b>6,1</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>67,4</b>

**Anexo 18:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto Base + 20% RAP.

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDC	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		3	4	6	1	2	5	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1180,6	1184,6	1185,7	1180,3	1177,1	1181,9	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1184,4	1186,7	1190,9	1182,3	1180,4	1186,4	
Masa en el agua (gr)	C	678	681,2	679,3	678	674,5	678,6	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	506,4	505,5	511,6	504,3	505,9	507,8	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,331	2,343	2,318	2,340	2,327	2,327	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	6,6	6,2	7,2	6,3	6,8	6,8	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	33,6	31,1	36,8	31,6	34,5	34,5	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1202	1201	1205	
Masa en el agua (gr)	C'				699	695	697	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				503	505	508	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				21,6	23,5	22,8	
% saturación	100J/I				68,3	68,1	66,1	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>					<b>(todas en baño de agua)</b>			
Espesor (cm)	t	6,4	6,4	6,4	6,3	6,4	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	218	224	203				
Carga en condición seca (kg)	P	953	980	887				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>9,3</b>	<b>9,6</b>	<b>8,7</b>				<b>9,2</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				129	107	121	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				622	589	601	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>6,2</b>	<b>5,8</b>	<b>5,9</b>	<b>5,9</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>64,6</b>

**Anexo 19:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto con Rejuvenecedor.

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDC	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		3	4	5	1	2	6	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1178,1	1180,3	1180,1	1178,4	1164,6	1182,9	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1184,8	1181,9	1182,9	1182	1173,2	1186,8	
Masa en el agua (gr)	C	674,8	674,1	676	674,6	670,1	675,9	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	510,0	507,8	506,9	507,4	503,1	510,9	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,310	2,324	2,328	2,322	2,315	2,315	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	7,5	6,9	6,8	7,0	7,3	7,3	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	38,2	35,1	34,3	35,5	36,7	37,2	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1198	1194	1206	
Masa en el agua (gr)	C'				689	686	696	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				509	508	510	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				19,6	29,1	22,7	
% saturación	100J/I				55,3	79,3	61,1	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>				<b>(todas en baño de agua)</b>				
Espesor (cm)	t	6,5	6,4	6,4	6,4	6,5	6,3	
Lectura dial condición seca	LDd	129	154	158				
Carga en condición seca (kg)	P	567	676	692				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>5,5</b>	<b>6,6</b>	<b>6,8</b>				<b>6,3</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				124	109	120	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				544	476	526	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>5,3</b>	<b>4,6</b>	<b>5,2</b>	<b>5,0</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>80,3</b>

**Anexo 20:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto con Rejuvenecedor + 10% RAP.

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDCH	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		2	5	6	1	3	4	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1180,6	1182,2	1178,8	1178,8	1188,1	1181,7	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1184,3	1185,9	1183,8	1182,3	1192,4	1183,7	
Masa en el agua (gr)	C	675,3	681,3	674,2	674,8	678,3	678,3	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	509,0	504,6	509,6	507,5	514,1	505,4	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,319	2,343	2,313	2,323	2,311	2,338	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	7,1	6,2	7,4	7,0	7,4	6,4	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	36,2	31,2	37,5	35,4	38,3	32,2	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1199	1215	1202	
Masa en el agua (gr)	C'				693	703	698	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				506	512	505	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				19,9	26,5	20,6	
% saturación	100J/I				56,2	69,2	64,1	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>				<b>(todas en baño de agua)</b>				
Espesor (cm)	t	6,5	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	160	160	171				
Carga en condición seca (kg)	P	699	699	748				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>6,7</b>	<b>6,8</b>	<b>7,2</b>				<b>6,9</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				124	129	136	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				522	546	576	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>5,0</b>	<b>5,3</b>	<b>5,6</b>	<b>5,3</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>77,0</b>



**Anexo 20:** Salida de resultados para evaluación de daño por humedad combinación de  
Asfalto con Rejuvenecedor + 20% RAP.

<b>EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD.</b>								
<b>ASTM 4867M-96</b>								
PROYECTO:								
SOLICITADO POR:								
	EJEMPLO	SECO	SECO	SECO	HUMEDC	HUMEDCH	HUMEDO	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES (todas las briquetas)</b>		1	2	3	4.1	5.2	6.3	PROMEDIO
Masa seca en aire (gr)	A	1179,4	1182,8	1165,6	1175,7	1174,8	1162,2	
Masa seca superficialmente (gr)	B	1182,9	1185,7	1171,7	1178,8	1177,2	1168,2	
Masa en el agua (gr)	C	676,3	679,3	670,1	672	673,9	667,3	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E=B-C	506,6	506,4	501,6	506,8	503,3	500,9	
Gravedad específica de masa	F=A/E	2,328	2,336	2,324	2,320	2,334	2,320	
Gravedad específica máxima RICE	G	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	2,497	
% vacíos de aire	H=[100(G-F)/G]	6,8	6,5	6,9	7,1	6,5	7,1	%6,5 y 7,5
Volumen vacíos de aire (cm <sup>3</sup> )	I=HE/100	34,3	32,7	34,8	36,0	32,8	35,5	
<b>Saturación al 55 - 80% con vacío (briquetas en condición húmeda)</b>					<b>Vacío (pulgadas de Hg):</b>			20
Masa saturada superficial seca (gr)	B'				1197	1193	1184	
Masa en el agua (gr)	C'				692	692	695	
Volumen (cm <sup>3</sup> )	E'=B'-C'				504	501	489	
Volumen de agua absorbida (cm <sup>3</sup> )	J=B'-A				20,8	18,3	21,3	
% saturación	100J/I				57,9	55,8	60,1	
<b>Condicionado 24 horas en agua a 60 °C (briquetas en condición húmeda)</b>								
<b>Enfriamiento 20 min a 25 °C cond. seca y 1 hora a 25 °C cond. húmeda</b>					<b>(todas en baño de agua)</b>			
Espesor (cm)	t	6,3	6,3	6,3	6,4	6,3	6,4	
Lectura dial condición seca	LDd	179	190	172				
Carga en condición seca (kg)	P	785	830	753				
Resistencia seca (kg/cm <sup>2</sup> )	Std=2P/(πDt)	<b>7,8</b>	<b>8,3</b>	<b>7,5</b>				<b>7,9</b>
Lectura dial con inmersión	LDm				135	140	121	
Carga luego de inmersión (kg)	P'				590	612	531	
Resistencia húmeda (kg/cm <sup>2</sup> )	Stm=2P'/(πDt)				<b>5,8</b>	<b>6,1</b>	<b>5,2</b>	<b>5,7</b>
<b>% resistencia retenida</b>	TSR=100Stm/Std							<b>72,4</b>



**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



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



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

## **DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Feijóo Malhaber Jean Carlos** y **Tinoco Vásquez Darwin Andrés**, con C.C: # **0705772929** y # **0705309516** autor del trabajo de titulación: **Estudio preliminar sobre el uso del material recuperado de pavimento asfáltico (RAP) en mezclas calientes**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del 2023

**EL AUTOR**

f. 

**Feijóo Malhaber Jean Carlos**  
C.C: 0705772929

**EL AUTOR**

f. 

**Tinoco Vásquez Darwin Andrés**  
C.C: 0705309516

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

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

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Estudio preliminar sobre el uso del material recuperado de pavimento asfáltico (RAP) en mezclas calientes.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Tinoco Vásquez Darwin Andrés y Feijóo Malhaber Jean Carlos		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Walter Mera Intriago. M.Sc.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	23 de febrero del 2023	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	122
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Mezclas Asfálticas, RAP, Rejuvenecedores		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Asfalto, Mezcla asfáltica en caliente, RAP, Rejuvenecedor, NAT y Pruebas de desempeño		
<b>RESUMEN:</b>	<p>En los últimos años se ha generado conciencia sobre generar una economía circular, debido a esto, se promueve la reutilización de los pavimentos asfálticos deteriorados y retirados mediante fresado una vez que hayan cumplido con su periodo de servicio.</p> <p>El objetivo del siguiente trabajo es evaluar el comportamiento a la fatiga y las deformaciones de mezclas asfálticas calientes confeccionadas con contenidos de RAP variables, mediante el empleo de pruebas dinámicas con el equipo NAT, así como el impacto del daño en agua mediante la resistencia a la tracción indirecta retenida, lo que permitirá establecer comparaciones y valorar sus posibles comportamientos.</p> <p>Para el estudio, utilizamos un asfalto base ecuatoriano clasificado como AC-20, con y sin rejuvenecedor. Además, para la presente investigación se utilizó un diseño Marshall de mezcla asfáltica otorgado por una empresa local y que sus agregados son triturados y de origen aluvial. Al diseño se lo mezcló en porcentajes de 10 y 20% con una muestra de RAP con características conocidas. A las 6 mezclas se le aplicaron pruebas dinámicas de desempeño con el equipo NAT; módulo de rigidez, compresión cíclica uniaxial (Creep), fatiga y se evaluó el daño en agua (TSR).</p> <p>La adición de RAP en bajas cantidades en mezclas asfálticas en caliente no alteró considerablemente el comportamiento de las mismas, siendo exclusivamente el parámetro del daño por agua aquel que sufrió un impacto negativo, las exigencias evaluadas están planteadas para mezclas convencionales por lo que el incumplimiento no condiciona la aplicación de este tipo de mezclas.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-0978822226	E-mail: tinoco.andres99@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>			