

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO DE
LLANTAS AÑADIDO POR VÍA SECA”**

AUTORES:

Ayala Cabrera, Karla Lizeth

Heredia Miranda, Joel Heriberto

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD

Guayaquil, Ecuador

18 de septiembre del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Karla Ayala Cabrera y Joel Heredia Miranda**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

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



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Karla Ayala Cabrera y Joel Heredia Miranda**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca** 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 18 días del mes de septiembre del año 2019

AUTOR:

AUTOR:

Karla Ayala Cabrera

Joel Heredia Miranda



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Karla Ayala Cabrera y Joel Heredia Miranda**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

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

AUTOR:

AUTOR:

Karla Ayala Cabrera

Joel Heredia Miranda

Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO TITULACION KARLA AYALA Y JOEL HEREDIA.docx (D55118458)
 Submitted: 8/29/2019 10:59:00 PM
 Submitted By: rolando.vila@cu.ucsg.edu.ec
 Significance: 4 %

Sources included in the report:

TESIS VERDEZOTO CARLOS LUIS.docx (D21955418)
 TRABAJO DE TITULACIÓN - EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN SIERRA (GA RCÉS) . final.docx (D21578176)
 TESIS WALTER MERA INTRIAGO Y KEVIN ICAZA PRECIADO.docx (D41018981)
 TESIS LUIS ALBERTO NAVEDA HIDALGO.pdf (D10646994)
 1470689295_14_GRUPO4_INVESTIGACION.doc (D21346688)
 Danilo Vega.pdf (D22496687)
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17951/2019luiswilches.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>
http://www.crp.pt/docs/A11596-pavimentos_34.pdf
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-13.pdf?sequence=13&isAllowed=y>
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
 c71f66b8-0f6b-44d1-9421-678c068be4c5

Instances where selected sources appear:

AGRADECIMIENTO

En estas líneas quiero agradecer de manera especial a todas las personas que me apoyaron en cada uno de los procesos que se llevaron a cabo para el desarrollo de este trabajo y que admiro enormemente por su experiencia, profesionalismo y calidad humana, principalmente a mi papá, quien con mucho amor siempre estuvo pendiente, aconsejándome y ayudándome en todo lo necesario durante este proceso y a lo largo de toda mi vida, al Dr. Rolando Vila, Ing. Ciro Mejía, Ing. José Jaramillo e Ing. Walter Mera quienes me abrieron sus puertas, compartieron sus conocimientos con mucho cariño y paciencia, además de brindarme su amistad.

Karla Ayala Cabrera

Quiero expresar mi total agradecimiento a Dios ya que sin su ayuda y bendición nada de esto hubiera sido posible. A mis padres por el esfuerzo de verme convertido en un profesional, el apoyo incondicional y sus sabias palabras durante mi carrera universitaria. A mis hermanos que todo el tiempo creyeron en mí.

También agradecer al Dr. Rolando Vila por brindarme sus conocimientos y orientación para este excelente trabajo de titulación. Al Ing. Walter Mera y al Ing. Jaramillo por la ayuda brindada. A mis compañeros Karla y Andrés, con quienes compartí buenos momentos a lo largo de mi carrera universitaria.

Joel Heredia Miranda

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por haber sido mi inspiración y fortaleza para continuar con el proceso de obtener mi título universitario e ir en búsqueda de más logros.

A toda mi familia, en especial a mi papá y a mi mamá por haberme brindado su apoyo y comprensión en todo momento, por su gran sacrificio e inculcarme su fe con amor.

A mis hermanos, Alejandra y Nicolás por ser mi alegría de todos los días.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a la memoria de mi abuelito Samuel, quien habría estado muy feliz y orgulloso de compartir este logro conmigo.

Karla Ayala Cabrera

Dedico este trabajo a mi madre, mujer virtuosa quien me enseñó durante toda mi vida los valores y principios que me han formado como una persona de bien. Tu ejemplo siempre me demostró que los sueños se cumplen a base de esfuerzo y con la bendición de Dios.

Joel Heredia Miranda



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

Ing. Rolando Vila Romaní. PhD.

TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Nancy Varela Terreros. MSc.

DOCENTE DE LA CARRERA

Ing. Federico von Buchwald Jánon. MSc.

OPONENTE

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	2
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Razones que motivaron el estudio	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Alcance y limitaciones.....	6
1.6 Planteamiento del problema	6
1.7 Metodología	7
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Agregados minerales	8
2.1.1 Generalidades	8
2.1.2 Propiedades físicas	8
2.1.3 Propiedades químicas	9
2.1.4 Exigencias	10
2.2 Cemento asfáltico	11
2.2.1 Generalidades	11
2.2.2 Composición química del asfalto	11
2.2.3 Propiedades de los asfaltos.....	12
2.3.4 Exigencias	14
2.3 Mezclas asfálticas.....	15
2.3.1 Introducción.....	15

2.3.2 Método de diseño Marshall	16
2.4 Grano de caucho reciclado	23
2.4.1 Generalidades	23
2.4.2 Composición de los neumáticos	23
2.4.3 Obtención del grano de caucho reciclado (GCR).....	24
2.4.4 Incorporación de caucho en mezclas asfálticas.....	25
2.4.5 Observaciones sobre el grado de digestión caucho-asfalto en el proceso vía seca.	28
2.4.6 Tecnología desarrollada para el proceso vía seca.....	29
2.4.7 Ventajas y desventajas del proceso por vía seca	30
2.4.8 Consideraciones para la confección de briquetas con caucho	31
CAPÍTULO III.....	33
3. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A ESTUDIAR	33
3.1 Metodología del trabajo	33
3.2 Resultados de las pruebas al cemento asfáltico	33
3.3 Resultados de las pruebas a los agregados minerales	34
3.4 Observaciones sobre la confección de briquetas	37
3.4.1 Generalidades	37
3.4.2 Pasos para la fabricación de briquetas sin caucho	37
3.4.3 Pasos para la fabricación de briquetas con caucho.....	40
3.5 Diseño de mezcla asfáltica referencial con 0% de GCR	43
3.6 Diseño de mezcla asfáltica con 0.75% de GCR	47
3.7 Diseño de mezcla asfáltica con 1.5% de GCR.....	51
CAPÍTULO IV	55
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS A LAS DIFERENTES MEZCLAS.....	55
4.1 Generalidades	55
4.2 Pruebas convencionales.....	56

4.2.1 Pruebas de estabilidad y flujo Marshall	56
4.2.2 Evaluación de daño en agua por tracción indirecta	61
4.3 Pruebas de desempeño.....	65
4.3.1 Módulo de rigidez bajo deformación controlada	66
4.3.2 Deformación permanente bajo compresión cíclica (Creep)	70
4.3.3 Ensayo de fatiga.....	73
CAPÍTULO V	78
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Recomendaciones	79
CAPÍTULO VI	81
6. REFERENCIAS.....	81
CAPÍTULO VII	85
7. ANEXOS	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Exigencias para control de calidad del agregado	10
Tabla 2.2 Clasificación del asfalto por viscosidad	15
Tabla 2.3 Granulometría recomendada para mezclas asfálticas en Ecuador	17
Tabla 2.4 Criterios de diseño de mezclas Marshall	22
Tabla 2.5 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)	22
Tabla 2.6 Composición química típica de un neumático	23
Tabla 3.1 Clasificación por viscosidad para asfaltos	34
Tabla 3.2 Características de los agregados minerales	35
Tabla 3.3 Granulometría de la piedra 3/4" (19mm)	35
Tabla 3.4 Granulometría del cisco de piedra 3/8" (9.5mm)	36
Tabla 3.5 Granulometría de la arena de río	36
Tabla 3.6 Granulometría del grano de caucho reciclado (GCR)	37
Tabla 3.7 Contenido óptimo de asfalto del diseño sin GCR	43
Tabla 3.8 Dosificación de la mezcla con sin GCR	44
Tabla 3.9 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica sin GCR	45
Tabla 3.10 Contenido óptimo de asfalto del diseño con 0.75% de GCR	47
Tabla 3.11 Dosificación de la mezcla con 0.75% de GCR	48
Tabla 3.12 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 0.75% de GCR	49
Tabla 3.13 Contenido óptimo de asfalto del diseño con 1.5% de GCR	51
Tabla 3.14 Dosificación de la mezcla con 1.5% de GCR	52
Tabla 3.15 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 1.5% de GCR	53
Tabla 4.1 Resultados de estabilidad Marshall y flujo en el diseño referencial (0% de GCR)	56
Tabla 4.2 Resultados de estabilidad Marshall y flujo con 0.75% de GCR	57
Tabla 4.3 Resultados de estabilidad Marshall y flujo con 1.5% de GCR	58
Tabla 4.4 Efecto de GCR en estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas	60
Tabla 4.5 Resultados de daño en agua en el diseño referencial (0% de GCR)	63
Tabla 4.6 Resultados de daño en agua en el diseño con 0.75% de GCR	63
Tabla 4.7 Resultados de daño en agua en el diseño con 1.5% de GCR	64

Tabla 4.8 Resultados de módulo de rigidez en el diseño referencial (0% de GCR)	67
Tabla 4.9 Resultados de módulo de rigidez del diseño con 0.75% de GCR.	67
Tabla 4.10 Resultados de módulo de rigidez del diseño con 1.5% de GCR.	68
Tabla 4.11 Efecto de GCR en la rigidez.....	69
Tabla 4.12 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño referencial con 0% de GCR	71
Tabla 4.13 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 0.75% de GCR.....	71
Tabla 4.14 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 1.5% de GCR.....	72
Tabla 4.15 Efecto de GCR en el ahuellamiento	73
Tabla 4.16 Resultados de fatiga en el diseño referencial con 0% de GCR ..	75
Tabla 4.17 Resultados de fatiga en el diseño con 0.75% de GCR	76
Tabla 4.18 Resultados de fatiga del diseño con 1.5% de GCR.....	77

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1 Equipo Marshall	20
Figura 2.2 Ejemplo de análisis Marshall.....	21
Figura 2.3 Esquema para obtención de GCR	25
Figura 2.4 Proceso adición GCR al asfalto por vía húmeda (Castro & Diaz, 2017)	26
Figura 2.5 Proceso adición GCR por vía seca (Castro & Diaz, 2017)	27
Figura 2.6 Resultados de ensayo de inmersión-compresión (Gallego & Prieto, 2004)	28
Figura 2.7 Resultados de viscosidad (Gallego & Prieto, 2004)	29
Figura 3.1 Bandejas con agregados dosificados en el horno	38
Figura 3.2 Verificación de temperatura en el recipiente de asfalto	38
Figura 3.3 Proceso de mezclado manual	38
Figura 3.4 Muestras de mezcla asfáltica en el horno	39
Figura 3.5 Martillo automático Marshall	40
Figura 3.6 Secado de los agregados en horno	40
Figura 3.7 Muestra de GCR	41
Figura 3.8 Adición de GCR a la mezcla caliente	41
Figura 3.9 Briquetas identificadas para control de las mismas.....	42
Figura 3.10 Curva granulométrica combinada del diseño sin caucho	43
Figura 3.11 Resumen gráfico del diseño óptimo de la mezcla sin GCR	46
Figura 3.12 Curva granulométrica combinada del diseño con 0.75% de GCR	47
Figura 3.13 Resumen gráfico del diseño óptimo de mezcla con 0.75% de GCR	50
Figura 3.14 Curva granulométrica combinada del diseño con 1.5% de GCR	51
Figura 3.15 Resumen gráfico del diseño óptimo de mezcla con 1.5% de GCR	54
Figura 4.1 Distribución de briquetas para las pruebas convencionales y de desempeño.....	55
Figura 4.2 Variación de la estabilidad en el diseño referencial con 0% de GCR	57

Figura 4.3 Variación del flujo en el diseño referencial con 0% de GCR	57
Figura 4.4 Variación de la estabilidad en el diseño con 0.75% de GCR	58
Figura 4.5 Variación del flujo en el diseño con 0.75% de GCR	58
Figura 4.6 Variación de la estabilidad en el diseño con 1.5% de GCR	59
Figura 4.7 Variación del flujo en el diseño con 1.5% de GCR	59
Figura 4.8 Resumen de resultados de ensayo de estabilidad	60
Figura 4.9 Resumen de resultados de ensayo de flujo	60
Figura 4.10 Briquetas en baño María	62
Figura 4.11 Tracción indirecta	62
Figura 4.12 Resumen de resultados de ensayo de tracción indirecta	64
Figura 4.13 Equipo NAT	65
Figura 4.14 Medición de módulo de rigidez con equipo NAT	66
Figura 4.15 Variación del módulo de rigidez en el diseño referencial con 0% de GCR	67
Figura 4.16 Variación del módulo de rigidez en el diseño con 0.75% de GCR	68
Figura 4.17 Variación del módulo de rigidez en el diseño con 1.5% de GCR	68
Figura 4.18 Resumen de resultados de medición de módulo de rigidez	69
Figura 4.19 Ensayo Creep con equipo NAT	70
Figura 4.20 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño referencial con 0% de GCR	71
Figura 4.21 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 0.75% de GCR	72
Figura 4.22 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 1.5% de GCR	72
Figura 4.23 Resumen de resultados de deformación obtenidos del ensayo creep	73
Figura 4.24 Procesamiento de datos	74
Figura 4.25 Ensayo de fatiga	74
Figura 4.26 Variación de la fatiga en el diseño con 0% de GCR	76
Figura 4.27 Variación de la fatiga en el diseño con 0.75% de GCR	76
Figura 4.28 Variación de la fatiga en el diseño con 1.5% de GCR	77

INDICE DE ANEXOS

Anexo 7.1 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 0% de GCR.....	85
Anexo 7.2 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.75% de GCR.....	86
Anexo 7.3 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.5% de GCR.....	87
Anexo 7.4 Cálculos obtenidos de los ensayos realizados para las características de los agregados minerales	88
Anexo 7.5 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla sin caucho	92
Anexo 7.6 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla con 0.75% de GCR.....	93
Anexo 7.7 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla con 1.5% de GCR.....	95
Anexo 7.8 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla sin caucho.....	96
Anexo 7.9 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla con 0.75% de GCR	98
Anexo 7.10 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla con 1.5% de GCR	99
Anexo 7.11 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla sin caucho	101
Anexo 7.12 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla con 0.75% de GCR.....	104
Anexo 7.13 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla con 1.5% de GCR	107

Resumen

A nivel internacional las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) son comúnmente empleadas en obras viales, obteniéndose resultados favorables. Sin embargo, en Ecuador se han realizado estudios experimentales por la vía húmeda donde los resultados no han sido buenos. El objetivo de este trabajo es evaluar de manera experimental el efecto que tiene el GCR añadido por la vía seca en diferentes porcentajes en el comportamiento de mezclas asfálticas densas, manteniendo constantes las características del asfalto y los agregados minerales en su elaboración. Se realizaron diseños de mezclas asfálticas con 0, 0.75 y 1.5% de caucho, a partir de los cuales se realizaron pruebas de estabilidad y flujo Marshall, módulo de rigidez, compresión cíclica y fatiga, además de evaluar el daño en agua a través de la resistencia a la tracción indirecta retenida. De los resultados obtenidos se determinó que para la granulometría empleada no es conveniente añadir 1.5% de GCR a la mezcla asfáltica puesto que sus propiedades resistentes disminuyen y añadiendo 0.75% de GCR no difieren mucho de la mezcla tradicional, excepto por la deformación creep, pudiendo emplearse con los afinamientos requeridos, como capas para control de fisuras en espesores delgados y capas superficiales en vías de poco tráfico, como calles de tierra en zonas urbanas, también con espesores pequeños donde el impacto del ahuellamiento sería muy reducido.

Palabras Claves: *Mezclas asfálticas modificadas, grano de caucho reciclado, vía seca.*

Abstract

At the international level, the use of recycled tire rubber (RTR) in asphalt pavements has produced optimal results, however, experimental studies done in Ecuador employing the wet process has not shown good results. This work's objective is to evaluate the effect that GCR added by the dry process has in different percentages on the behavior of dense asphalt mixtures, while keeping the mineral aggregates and asphalt's characteristics constant. Asphalt mixtures with 0, 0.75, 1.5% of TRT were designed and its performance was evaluated with laboratory tests of Marshall stability, permanent deformations, stiffness modulus and fatigue, but also the effect of water on these asphalt mixtures through retain resistance using TSR. From the results obtained, it was determined that it is not convenient to add 1.5% of GCR to the asphalt mixture since its resistant properties got deteriorated and adding 0.75% of GCR does not differ much from the traditional mixture, except for creep deformation, being able to be used as layers for reflective cracking control using thin thicknesses and superficial layers on roads of light traffic, such as unpaved roads in urban areas, also with small thicknesses where the impact of rutting would be greatly reduced.

Keywords: *Recycled tire rubber, dry process, asphalt mixtures.*

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en función a contribuir a la búsqueda de métodos para incluir el uso de los neumáticos en desuso en diferentes procesos con el fin de reciclarlos, trabajando con el Ministerio del Medio Ambiente y en base a estudios realizados en otros países tales como Estados Unidos, España, Colombia, Brasil, entre otros, determinó que una de las soluciones para darle un buen aprovechamiento a esos neumáticos podría ser incluirlos como un material constitutivo del pavimento asfáltico o flexible. Para que el caucho proveniente de los neumáticos pueda ser considerado como un material constitutivo de un pavimento flexible, este tiene que ser transformado a polvo o grano a través de diferentes procesos, de los cuales se obtiene como resultado final los llamados polvo de caucho de llantas, o bien el grano de caucho reciclado (GCR).

El pavimento asfáltico puede conformarse típicamente por la capa asfáltica, debajo de la cual existan otras capas inferiores como la base y la subbase. Sin embargo, la estructura en particular del pavimento dependerá de las necesidades que presente la obra y de la calidad de la subrasante (Minaya & Ordoñez, 2006).

La inclusión del GCR en la mezcla asfáltica puede hacerse a través del proceso por vía húmeda o vía seca. Conociendo que la mezcla está conformada por asfalto y agregados minerales, se puede decir que la vía húmeda es el proceso en el cual el GCR se adiciona directamente al asfalto obteniendo un betún-caucho, mientras que en la vía seca el GCR debe ser incorporado en la mezcla asfáltica como una fracción más de los áridos (Gallego & Prieto, 2004). Aunque evidentemente el caucho tendrá una interesante interacción con el asfalto.

Este estudio se enfoca en la inclusión de GCR de llantas en la mezcla asfáltica en el país. Existen otros ya realizados como un estudio en la Universidad Técnica de Ambato en el cual éste material se adicionó en la subbase para para determinar su influencia en las propiedades mecánicas (Laica, 2016). La Escuela Politécnica Nacional realizó estudios en laboratorio empleando la vía húmeda y seca realizando pruebas de desempeño como resistencia a la fatiga, deformación dinámica, módulo de rigidez, sin embargo, no se consideró la evaluación de daño en agua, donde aparentemente los resultados por la vía húmeda fueron mejores que los de la vía seca (Campaña, Galeas, & Guerrero, 2015). La Pontificia Universidad Católica del Ecuador también desarrolló estudios de adición de polvo de caucho a mezclas en frío, donde se produjo una pérdida de resistencia de las mismas, del 50% ante pruebas de durabilidad en condiciones extremas (Carrasco & Espinosa, 2014).

En el Ecuador se desarrollaron por parte del MTOP algunas pruebas preliminares tanto por la vía seca como por la vía húmeda en el año 2014, con sus respectivos ensayos reológicos para determinar el desempeño de este tipo de mezclas modificadas con polvo de caucho. En el año 2015 se construyó un tramo de prueba con caucho añadido por vía húmeda en dos carriles en las abscisas 31+135 – 31+410 del tramo Pifo-Papallacta. Además, se incluyó el polvo de caucho no solo en pruebas para mezclas asfálticas sino también en la preparación de material para sello asfáltico que se utiliza en el sellado de fisuras. Los resultados para las pruebas de desempeño que se realizaron en general no fueron buenos (Gordillo, Carvajal, Fonseca, & Villalobos, 2015).

En el 2018 con el apoyo del BID, el Ministerio del Medio Ambiente efectuó otra investigación al respecto empleando la vía húmeda. Los resultados obtenidos, aunque prometedores, no son concluyentes y se espera en el 2019 ampliar dicha investigación.

1.2 Razones que motivaron el estudio

Como se conoce, las carreteras de tráfico pesado en nuestro país sufren un alto nivel de daño y degradación de sus propiedades físicas y mecánicas, por lo que se busca realizar investigaciones para hallar una mezcla asfáltica cuya

constitución permita la optimización de las redes de transporte, y que soporte de mejor manera los tráficos futuros permitiendo así obtener una vida útil adecuada.

A nuestro juicio el empleo de la vía húmeda para la adición del caucho presenta serios inconvenientes dada la tendencia del asfalto producido en la Refinería de Esmeraldas al envejecimiento prematuro.

Desarrollar una mezcla bituminosa añadiendo GCR por la vía seca, implica incorporarlo como una fracción más de los áridos, lo primordial es que el GCR actúe de forma armónica con el resto de la mezcla bituminosa, buscando cumplir con las exigencias propuestas por el MTOP.

De esa forma no solamente se mejoran las propiedades de la mezcla asfáltica, sino que también se ayuda a la reducción y reutilización de un material que genera contaminación en gran medida, ya que cada año crecen los depósitos de llantas usadas por no tener un fin específico para ser usadas después que ya cumplieron su vida útil. Por ello siempre será importante investigar y continuar con este tipo de estudios.

1.3 Justificación

Este trabajo de titulación proyecta enfatizar nuevas tendencias para un diseño de mezcla asfáltica que genere mejoras en las características físicas y comportamientos mecánicos óptimos para carreteras en Ecuador. Dada que nuestra red vial se ve limitada por sus deterioros prematuros y su reducida vida útil, varias instituciones en estos últimos años se han esforzado en buscar soluciones con mezclas asfálticas modificadas que permitan un nivel de desempeño destacado y que haga frente a los factores de temperatura, humedad y cargas considerables que son la principal razón de daño en carreteras de Ecuador.

Realizando esta investigación se determinará la incidencia del GCR añadido por vía seca en una mezcla bituminosa típica, y cómo pudiera mejorar sus propiedades frente al deterioro que sufre una mezcla asfáltica convencional. La finalidad de este trabajo de titulación implica llegar a determinar si es viable

la utilización del GCR por la vía seca, es decir, si realmente aporta algún beneficio cuantificable a la ingeniería vial.

Sabiendo que la incorporación del GCR por vía seca es un proceso que no se considera mucho en el país, ésta investigación propone aportar elementos o experiencias de cómo integrar un material que permita beneficiar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica. La propuesta básica de un ingeniero civil siempre será innovar con el apego de nuevas tecnologías.

Otro aspecto interesante en este proyecto de titulación es la orientación al manejo sustentable de materiales fuera de uso. En pocas palabras reducción de desechos provocados por el mismo ser humano, que de hecho en Ecuador solamente en el 2018 se presentó una cantidad de más de 2.4 millones de neumáticos desechados según el Ministerio del Ambiente (MAE) y que son desechados no solamente en botaderos específicos de neumáticos, sino también en quebradas, lagos, sectores a las afueras de cada ciudad entre otros. Esto es un problema que parece ser cada día más insostenible, debido a que el campo automotriz se mantiene en constante crecimiento. De tal forma que conseguir resultados favorables con los datos experimentales de esta investigación sería un aporte a las técnicas posibles de emplear en el país, mientras que también se puede ser amigable con el medio ambiente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar de manera experimental el efecto del caucho de llantas recicladas añadido por vía seca y en distintos porcentajes, en el comportamiento de mezclas asfálticas densas estudiadas mediante pruebas convencionales y de desempeño, en cuya elaboración se mantienen constantes las características del asfalto y los agregados minerales.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar los basamentos teóricos y procedimientos experimentales del uso de caucho de llantas recicladas en mezclas asfálticas.
- Diseñar tres mezclas asfálticas densas con porcentajes de caucho de 0% (referencia), 0.75% y 1.5%.

- Desarrollar las pruebas convencionales y de desempeño a las tres mezclas diseñadas, con su contenido óptimo de asfalto: estabilidad Marshall y flujo, módulo de rigidez, compresión cíclica y fatiga, así como resistencia retenida en agua.
- Comparar los resultados de las propiedades evaluadas entre las diferentes combinaciones de mezclas empleando criterios estadísticos.

1.5 Alcance y limitaciones

Se estudiará el efecto que resulta de la aplicación por vía seca de diferentes contenidos de caucho reciclado en un tipo de mezcla densa, con el propósito de valorar las potenciales mejoras en su comportamiento; considerando la calidad de la “digestión” del caucho por el asfalto a través de la compactabilidad de la mezcla y su resistencia al agua.

En lo referente a los límites de la investigación, lo ideal para complementar este estudio si se llegara a determinar que modificar las mezclas asfálticas en caliente con GCR añadido por la vía seca mejora sus propiedades, sería realizar un tramo de prueba para darle seguimiento y comprobar la factibilidad técnica y económica de realizar proyectos que incluyan este tipo de mezclas asfálticas en la capa de rodadura de pavimentos flexibles. Sin embargo, el trabajo de titulación se limitará únicamente a estudiar en laboratorio los efectos que se generarían en las mezclas utilizando este método.

1.6 Planteamiento del problema

En la actualidad, los neumáticos fuera de uso y su disposición final representan un serio problema para el medio ambiente y la salud pública, debido a que la acumulación que es generada por cantidades altas de estos desechos pueden generar peligros de incendios, ocasionar enfermedades y plagas, su almacenamiento causa también contaminación debido a su degradación química. En otras ocasiones, para acabar con estos residuos, se usa el método de la incineración en los hornos industriales, pero esta técnica solamente traslada la contaminación a la atmósfera cuando se despiden las sustancias tóxicas de estos desechos durante el proceso de incineración, lo cual tampoco es conveniente.

A la hora de reciclar los neumáticos dañados para convertirlos en polvo o grano se pueden emplear distintas técnicas, como la termólisis, la trituración mecánica o criogénica, la pirolisis, etc. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, en lo que se refiere al aprovechamiento de la materia prima o a los niveles de toxicidad que se produce con cada método.

Debido a que la acumulación de neumáticos es un problema a nivel mundial, diferentes organizaciones protectoras del medio ambiente continúan en la búsqueda de una solución a este problema, sin embargo, lo que se aplica ya en otros países como una solución a este problema ambiental es usar el polvo o grano de caucho reciclado en la industria vial particularmente en las mezclas asfálticas, siendo el procedimiento por vía húmeda el más generalizado. No obstante, siempre será conveniente que se realicen las investigaciones necesarias para adecuar estas técnicas con los materiales y procedimientos de trabajo de cada país.

1.7 Metodología

El trabajo de titulación está comprendido por una parte teórica y otra parte experimental, en la cual se han desarrollado ensayos y pruebas de laboratorio a tres diferentes tipos de mezclas, manteniendo constante la granulometría de los agregados y el tipo de asfalto, pero variando el porcentaje de caucho que se le ha añadido a cada mezcla, para poder determinar el porcentaje de caucho ideal para que las propiedades de las mezclas tengan un buen comportamiento y cumplan con las exigencias y especificaciones técnicas. El presente trabajo de titulación está conformado por las siguientes etapas:

1. Marco teórico:
 - Estudios bibliográficos referentes al tema
2. Desarrollo experimental
 - Caracterización y control de calidad de los materiales de las mezclas asfálticas
 - Confección de briquetas
 - Realización de ensayos
3. Análisis de los resultados
 - Comparación de los resultados obtenidos de las diferentes mezclas
 - Conclusiones y recomendaciones

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

Dado que nuestro objeto de estudio son las mezclas asfálticas con la adición de granos de caucho reciclado, se considera oportuno hacer una revisión de las principales características de los materiales involucrados.

2.1 Agregados minerales

2.1.1 Generalidades

Los agregados son partículas minerales de diferentes tamaños que provienen de la trituración natural o artificial de las rocas. Aunque la naturaleza de los agregados sea comúnmente considerada como inerte, la actividad química y superficial de estos materiales es importante con respecto al asfalto y al agua. Los áridos o agregados pétreos que forman parte de las mezclas asfálticas se pueden clasificar en árido grueso, árido fino y filler. El agregado grueso es la porción retenida en el tamiz ASTM N°4, mientras que el agregado fino es aquel que pasa por este tamiz. El filler se compone de un polvo mineral muy fino, usualmente el pasante del tamiz N°200 en por lo menos un 70% en peso. Este no debe contener partículas de arcilla ni materia orgánica.

2.1.2 Propiedades físicas

Porosidad

La porosidad que tienen los agregados depende del número, tamaño, distribución, accesibilidad de los poros, que influyen sobre la permeabilidad, absorción, peso específico aparente, textura superficial, dureza y resistencia de los áridos (Universidad Politécnica de Cataluña, 2006).

Forma

La forma que tienen las partículas, afecta a su resistencia mecánica y a su esqueleto mineral. Las formas que pueden tener los agregados pueden ser redondeadas o angulosas.

Gravedad específica bruta

Esta propiedad indica la gravedad específica bruta del material mineral, dependiendo de la accesibilidad de los vacíos. La misma es característica de la composición mineralógica y naturaleza de la roca.

Textura superficial

Indica las irregularidades superficiales de la piedra, su textura puede ser rugosa o pulida. Esta propiedad influye en el rozamiento interno del esqueleto mineral y en la resistencia al deslizamiento que tendrán las llantas en la capa de rodadura.

Dureza

La dureza depende de la petrografía del agregado y se evalúa de forma indirecta a través de la resistencia al desgaste.

2.1.3 Propiedades químicas

Si la superficie de los agregados fuera de mayor tamaño, de tal manera que esta usualmente se pudiera observar de mejor manera y a su vez esta estuviera libre de polvo, se podría decir que las reacciones químicas con agentes exteriores o desintegración química dependieran únicamente de la naturaleza de dichos agentes y de la composición de la roca. Por eso es importante realizar pruebas de limpieza a los agregados.

- **Adhesividad**

La adhesividad de los ligantes bituminosos con la superficie de los agregados depende de ciertos factores físicos como: textura, porosidad, viscosidad, tensión superficial, espesor de la película del ligante y también de factores químicos como su naturaleza petrológica ya que esta define sus propiedades químicas (Universidad Politécnica de Cataluña, 2006).

De acuerdo a su origen y naturaleza petrológica las rocas pueden clasificarse en tres grupos:

Rocas básicas.- Sus agregados pueden ser usados en todas las capas de firme, en casos excepcionales puede ser utilizado como agregado grueso en las capas de rodadura debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter es básico y presenta problemas menores de adhesividad o afinidad con los ligantes asfálticos.

Rocas ácidas.- Los agregados de naturaleza ácida pueden no aportar con adhesividad suficiente para unirse a los ligantes bituminosos. Sin embargo, si el material tiene un contenido alto de sílice y caras fracturadas, las características mecánicas y el rozamiento interno del material pueden proporcionar un esqueleto mineral bueno que pueda ser utilizado incluso en mezclas asfálticas sometidas a la acción directa del tráfico (Padilla, Capítulo 2: Materiales básicos, 2004).

Rocas semiácidas.- Los agregados correspondientes tienen un comportamiento entre los anteriores.

2.1.4 Exigencias

Según las Especificaciones Generales del MTOP 001-F-2002, Sección 811, a los áridos se les debe realizar pruebas de forma, dureza, limpieza y adherencia, para chequear el cumplimiento de las exigencias indicadas. A continuación, se presenta un resumen de las pruebas que se les debe realizar con las respectivas exigencias que deben cumplir.

Tabla 2.1 Exigencias para control de calidad del agregado

PRUEBAS	Agregados	
	Gruesos	Finos
FORMA	Caras fracturadas (>80% -2) Planas y alargadas (<10%)	Angularidad (>45%)
DUREZA	Abrasión los ángulos (>40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
LIMPIEZA	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4%)
ADHERENCIA	Resistencia retenida ante el agua en prueba de tracción indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Fuente: Material de estudio de asignatura Pavimentos (Vila Romani, 2015)

Los resultados de las pruebas realizadas a los agregados empleados en el proyecto, provenientes de la cantera “La Germania” ubicada en los alrededores de la ciudad de Guayaquil, se mostrarán en el próximo capítulo.

2.2 Cemento asfáltico

2.2.1 Generalidades

El cemento asfáltico es un material bituminoso de color negro de naturaleza hidrocarbonada, posee propiedades adhesivas, aglomerantes e impermeables, y es capaz de soportar ácidos, sales y álcalis (Pinargote & Ramos, 2018). Puede ser de origen natural (rocas o lagos asfálticos) o artificial obteniéndose como producto de la refinación del petróleo crudo, siendo así este también podría definirse como el residuo obtenido de la destilación al vacío del petróleo. En la actualidad el cemento asfáltico producido se obtiene mayormente por la destilación del petróleo (Abugattas, 2010).

Cabe recalcar, que los betunes de base parafínica, como por ejemplo los procedentes del Oriente Medio, no son aptos para la pavimentación de carreteras debido a que estos contienen hidrocarburos saturados que requieren un proceso complementario de oxidación parcial; por otro lado, los betunes de base nafténica, comúnmente procedentes de Venezuela que contienen hidrocarburos no saturados son los mejores para ese propósito (Vila, 2017). Las propiedades del cemento asfáltico dependen de su composición química y de las operaciones de la refinería.

2.2.2 Composición química del asfalto

Dentro de su composición química típica están elementos como Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, pequeñas cantidades de nitrógeno y otros metales, además de compuestos covalentes del azufre como el Sulfuro.

La caracterización química del cemento asfáltico influye en el comportamiento del pavimento debido a que de esta depende su estructura molecular, la misma que incide en sus propiedades mecánicas y físicas; y estas a su vez en el desempeño de las mezclas asfálticas (Vila, Cementos asfálticos. Generalidades. Caracterización química, física y reológica, 2017).

La estructura química o composición de los cementos asfálticos puede conocerse bajo diferentes procedimientos comúnmente utilizados, (García, 2013), cómo:

- Fraccionamiento por precipitación
- Fraccionamiento por destilación
- Separación cromatográfica
- Análisis químico, utilizando técnicas de espectrofotometría
- Análisis de pesos moleculares por espectrometría de masas
- Análisis de composición indirecta por medio de ensayos de estabilidad de la dispersión interna

La técnica más utilizada es el fraccionamiento por precipitación, dentro de esta categoría se destaca el procedimiento de cromatografía líquida propuesto por Corbett y Swarbrick (1960), basado en un mecanismo selectivo de adsorción-desorción (García, 2013). Con el método de Corbett se obtienen cuatro fracciones que inicialmente son los asfaltenos y maltenos, estos últimos se fraccionan en una columna de aluminio mediante cromatografía de elución-adsorción y con la adición de solventes de polaridad creciente en saturados, nafteno-aromáticos (aromáticos) y polar-aromáticos (resinas). El fraccionamiento Corbett es el empleado en la normativa ASTM D4124.

Los asfaltenos se encuentran dispersos en los maltenos proporcionando el color y dureza del asfalto, los maltenos, por otro lado, son líquidos viscosos y pegajosos que se componen de resinas y aceites siendo los que proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto, es decir su valor cohesivo. Los maltenos definen la capacidad que tendrá el asfalto de ser manejado con seguridad a elevadas temperaturas. El contenido de asfaltenos y maltenos en el cemento asfáltico varía debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre en el tiempo (Navarro, 2013).

2.2.3 Propiedades de los asfaltos

Al cemento asfáltico se le atribuyen las siguientes propiedades:

1. Comportamiento reológico
2. Resistencia al envejecimiento
3. Adhesividad a los áridos

Por lo que es importante realizar pruebas para determinar su caracterización física, pruebas básicas de consistencia, así como pruebas de caracterización reológica mediante viscosímetros y reómetros.

2.2.3.1 Comportamiento reológico

El comportamiento de los asfaltos está determinado por sus propiedades reológicas y físico-mecánicas, (Universidad de las Américas de Puebla, 2007), que son las siguientes:

- a. Elasticidad: Esta propiedad permite que los materiales recuperen su forma cuando deja de imponerse una carga.
- b. Viscosidad: Es la propiedad que tienen los fluidos de oponerse a su flujo cuando a estos se les aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad fluyen menos que los de baja viscosidad. Ante una mayor temperatura se obtiene una menor viscosidad debido a que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura.
- c. Ductilidad: Es la capacidad de los materiales para disipar la energía dentro del rango plástico, al asfalto la ductilidad le permite tener mejores propiedades aglomerantes, por eso los asfalto que tienen mayor ductilidad se comportan mejor ante cambios de temperatura.
- d. Resistencia al corte: Es la capacidad que tiene el asfalto para resistir temperaturas altas, esta resistencia se determina con el “reómetro de corte dinámico”, Este aparato imprime una fuerza cortante cosenoidal con la que se mide esta resistencia.

2.2.3.2 Resistencia al envejecimiento

El envejecimiento se da por varias reacciones químicas, producidas por temperaturas altas y oxígeno, que hace que el asfalto tienda a convertirse en un material rígido y con menos capacidad para aglutinar. El asfalto a lo largo de su vida útil puede experimentar dos tipos de envejecimiento (Navarro, 2013):

Envejecimiento primario: Se origina durante el proceso de fabricación de la mezcla en planta hasta el proceso de compactación debido a las altas temperaturas que este material experimenta. Las altas temperaturas hacen que los materiales más livianos que constituyen el asfalto se evaporen.

Envejecimiento secundario: Se da durante la vida de servicio de los pavimentos.

Es posible que las fisuras reflejadas en la superficie de los pavimentos flexibles, especialmente en las zonas del paso de las cargas, puedan tener como una de las causas al envejecimiento del asfalto (Universidad Politécnica de Cataluña, 2004) .

2.2.3.3 Adherencia a los agregados

Es la capacidad del asfalto de adherirse al agregado en una mezcla asfáltica y la medida de los esfuerzos necesarios para romper los enlaces entre el ligante bituminoso y el agregado mineral. Para que esta ocurra debe producirse afinidad entre las moléculas de ambos cuerpos (Hernández, Molina, & Reyes, 2007).

Este fenómeno puede ser evaluado de manera práctica mediante el ensayo de tracción indirecta sobre briquetas sin y con inmersión en agua, con lo que se calcula un porcentaje de resistencia a la tracción retenida (TSR), cuyo procedimiento se encuentra detallado en el apartado 4.2.2.1 de este capítulo.

Es importante realizar pruebas de adherencia a las mezclas asfálticas, puesto que la pérdida de la misma puede provocar que la fuerza cohesiva de la capa asfáltica disminuya, provocando a su vez una pérdida de resistencia del pavimento, siendo el agua, el principal causante de la pérdida de adherencia (Gorkem & Sengoz, 2009).

2.3.4 Exigencias

El control de calidad de los cementos asfálticos en el Ecuador se rige por la normativa del Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN 2515-2010) Ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación del asfalto 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 ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^b		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min. ^b Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen-20 SP}{50 \log pen-SP-120}$ donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36 ^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)

Usualmente los asfaltos que se producen en la Refinería de Esmeraldas clasifican como AC-20 ó AC-30, aunque en ocasiones existen problemas para el cumplimiento de las propiedades en el residuo RTFOT.

2.3 Mezclas asfálticas

2.3.1 Introducción

Las mezclas asfálticas resultan de la combinación de asfalto y áridos, donde el asfalto, que constituye el ligante debe envolver todas las partículas minerales del árido.

Las dosificaciones de los agregados determinan las propiedades físicas y el comportamiento de las mezclas (Universidad Politécnica de Cataluña, 2006). Para determinar las dosificaciones de los agregados y el contenido óptimo de

asfalto existen varios métodos, siendo el método Marshall el utilizado en el presente trabajo de titulación.

Las mezclas bituminosas se emplean en la construcción de pavimentos, como capas de rodadura o en las capas inferiores: intermedias o base, y su función es proporcionar una superficie de rodadura cómoda (Padilla, 2004), además de su aporte estructural.

2.3.2 Método de diseño Marshall

2.3.2.1 Generalidades

El método Marshall es el más empleado para determinar el diseño de las mezclas asfálticas en caliente en laboratorio y para su control en campo. El procedimiento detallado se recoge en: "Asphalt Mix Design Methods", MS-2, 7th Edition, del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos. Esta última edición se publicó en 2014.

La preparación de los especímenes o briquetas consiste en calentar y mezclar asfalto y agregado, las que serán compactadas por impacto empleando moldes estandarizados. Las medidas de referencia de las briquetas son 64 mm (2 ½") de altura y 102 mm (4") de diámetro (ASTM D1559). Los aspectos importantes que se evalúan en este método de diseño son: densidad, porcentaje de vacíos en la mezcla, vacíos en el agregado, vacíos rellenos de asfalto, así como pruebas de estabilidad y flujo de los especímenes que han sido compactados previamente.

2.3.2.2 Granulometría combinada

La selección de la curva granulométrica que será empleada en el diseño de una mezcla asfáltica depende del tamaño máximo nominal del agregado (Alarcón et al., 2004). En Ecuador comúnmente para capas de rodadura en el país se usa la granulometría de ½" (12,7 mm) según la normativa ecuatoriana MOP-001, F-2002, Tabla 405-5.1, que se muestra a continuación.

Tabla 2.3 Granulometría recomendada para mezclas asfálticas en Ecuador

Tabla 405-5.1.

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: (Ministerio de Transporte y Obras públicas, 2002) Cap. 400 (IV-76)

2.3.2.3 Parámetros volumétricos

De acuerdo con el MS-2 del Instituto del Asfalto, para considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica se deben chequear en primer lugar las proporciones volumétricas del asfalto y de los agregados, o simplemente, los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. El análisis de los mismos se presenta a continuación:

- **Gravedad específica bruta o bulk (Gmb)**

Es la relación dada entre la masa (peso en aire) de un volumen de material a generalmente 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. Este parámetro se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 ó ASTM D2726 y se calcula según:

$$Gmb = \frac{P. \text{aire}}{P. \text{SSS} - P. \text{agua}}$$

P. aire: Masa de la muestra en aire (gramos).

P. SSS: Masa de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gramos).

P. agua: Masa de la muestra en agua (gramos).

- **Vacíos de aire (Va)**

Son espacios pequeños de aire en la mezcla presentes después de ser compactada, su presencia es necesaria para proporcionar espacios donde el asfalto pueda acomodar sus variaciones volumétricas durante las variaciones de temperatura y ciertas compactaciones adicionales. El porcentaje permitido de vacíos en las muestras de laboratorio está entre 3 y 5%, dependiendo del diseño específico.

Para determinar el porcentaje de vacíos puede emplearse la siguiente fórmula (Asphalt Institute, 2014):

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

Donde:

Gmm: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica (ASTM D2041).

Gmb: Gravedad específica bruta de una mezcla compactada (ASTM D 1188 o ASTM D2726).

- **Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Constituye el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica que ya ha sido compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse con la siguiente expresión (Asphalt Institute, 2014):

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

Donde:

Gsb: gravedad específica bruta del total de agregados.

Gmb: gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 o D2726).

- **Vacíos rellenos con asfalto (VFA)**

Los vacíos rellenos con asfalto se determinan con la siguiente expresión de acuerdo con el MS-2 del Instituto del Asfalto:

$$VFA = 100 - \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde:

VFA: vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

Va: vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

- **Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm)**

La determinación de este parámetro es esencial para el cálculo del porcentaje de vacíos para cada contenido de asfalto del diseño de mezcla. La gravedad específica máxima teórica puede calcularse mediante el procedimiento Rice que establece la ASTM 2041.

Una vez calculada la gravedad específica efectiva del agregado, la gravedad específica máxima para cualquier contenido de asfalto se puede conocer empleando la siguiente ecuación (Asphalt Institute, 2014):

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde:

Gmm: Gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

Pmm: Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100

Ps: Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla

Pb: Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Gb: Gravedad específica del asfalto

2.3.2.4 Parámetros resistentes y pruebas.

- **Estabilidad y flujo Marshall**

La prueba de estabilidad y flujo se ejecuta para estimar los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de una mezcla asfáltica. La estabilidad

de un espécimen de prueba es la máxima resistencia en Newton que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando este es ensayado. Por otro lado, el valor de flujo es la deformación o variación del diámetro, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en la briqueta entre la carga cero y la carga máxima de ruptura durante la prueba de estabilidad (Asphalt Institute, 2014). Navarro (2013) dice que la estabilidad "Es la capacidad de una mezcla asfáltica compactada para resistir las cargas impuestas por el tránsito vehicular sin que se produzcan deformaciones permanentes" (p.30).

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Sumergir el espécimen en baño maría durante 30 o 40 minutos a 60°C ± 1 °C antes del ensayo.
2. Tomar cada briqueta del baño María y secar su superficie, para luego colocarla en la mordaza inferior acomodando la mordaza superior de tal forma que la briqueta quede centrada en el equipo de carga, Ver Figura 2.1.



Figura 2.1 Equipo Marshall

3. Aplicar carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que la falla ocurra.
4. Definir al punto de falla como la lectura de carga máxima obtenida. Alarcón et al (2004) afirman que "el número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall" (p.8).
5. Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá

que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 “) será el valor del flujo Marshall (Asphalt Institute, 2014).

2.3.2.5 Contenido de asfalto óptimo

El contenido de asfalto óptimo debe ser determinado en el laboratorio y posteriormente controlado en obra. Para su determinación se deben fabricar cinco grupos de tres briquetas, cada grupo corresponderá a un porcentaje de asfalto diferente. De todos los grupos, debe obtener el promedio de los parámetros volumétricos como: Porcentaje de vacíos en la mezcla (V_a), porcentaje de vacíos en agregados (VMA), porcentaje de vacíos rellenos con asfalto (VFA), gravedad específica bruta de la mezcla (G_{mb}) y de los parámetros resistentes como la estabilidad y flujo, con los cuales se construyen las gráficas que se muestran en la Figura 2.2:

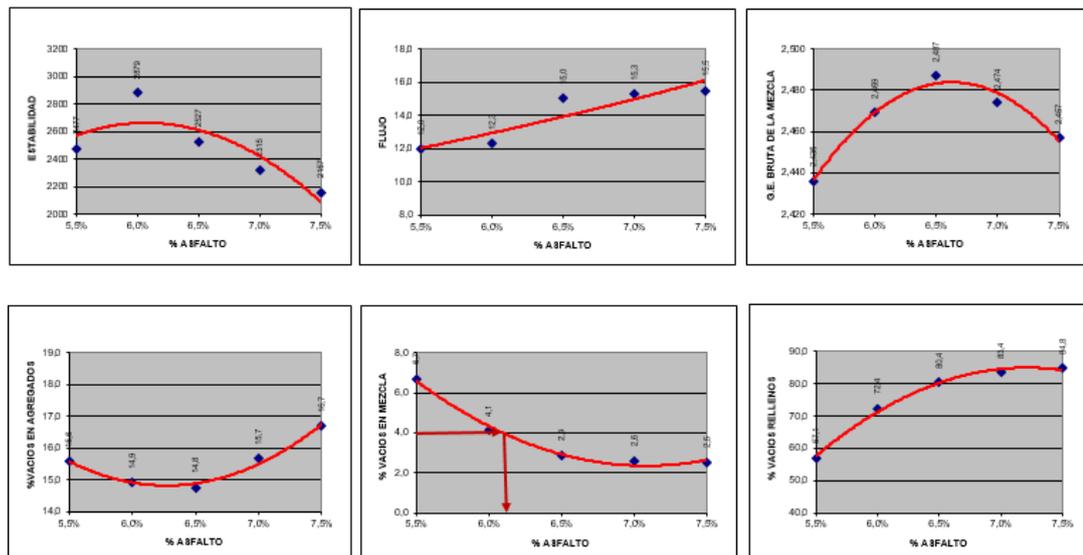


Figura 2.2 Ejemplo de análisis Marshall

Fuente: Autores

Su determinación implica seguir los criterios basados en el Método Marshall. Debe escogerse el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos en mezcla, es decir 4% y con este contenido se determinarán los valores de las propiedades volumétricas. Si los valores obtenidos cumplen con las exigencias de las Tablas 2.4 y 2.5, entonces dicho contenido puede

considerarse el óptimo. Si alguno de los criterios no se cumple se deberán hacer ajustes o considerar el rediseño de la mezcla (Asphalt Institute, 2014).

Tabla 2.4 Criterios de diseño de mezclas Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máy	Mín	Máy	Mín	Máy
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (lb)	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.5					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: (Asphalt Institute, 2014) “Asphalt Mix Design Methods” MS-2

En nuestro trabajo se presenta en todos los casos, la estabilidad en unidades de libras-fuerza y el flujo en centésimas de pulgada ya que son las empleadas en todo el territorio nacional y en las especificaciones técnicas del MTOP.

Tabla 2.5 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19	3/4	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: (Asphalt Institute, 2014) “Asphalt Mix Design Methods” MS-2

2.4 Grano de caucho reciclado

2.4.1 Generalidades

Las mezclas asfálticas modificadas con granos o polvo de caucho reciclado son usadas para mejorar las propiedades de durabilidad de los pavimentos, incrementando los tiempos entre mantenimientos y así reducir los costos del proyecto.

2.4.2 Composición de los neumáticos

Los neumáticos están conformados por más de doscientos componentes. El caucho es el componente que predomina en su peso, ya que es casi la mitad del peso del neumático, este caucho puede ser sintético o natural. De los beneficios que aportan estos materiales, se puede decir que el sintético aporta a la estabilidad térmica mientras que el caucho natural aporta a la elasticidad del neumático.

El caucho natural proviene de un fluido de color blanco y consistencia lechosa, que se puede obtener de algunas plantas como la “Hevea”, denominado savia. El caucho sintético se obtiene a partir de reacciones químicas, tales como la polimerización que se da a partir de ciertos hidrocarburos insaturados.

Ambos tipos de cauchos pertenecen al grupo de los polímeros elastoméricos, este tipo de materiales poseen la propiedad mecánica de poder experimentar deformaciones elásticas más altas bajo tensión que otros materiales y regresar a su estado original sin presentar deformaciones permanentes.

La composición de los neumáticos puede variar dependiendo de si el neumático ha pertenecido a un vehículo pesado o liviano, aunque los componentes básicos son los mismos y se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Composición química típica de un neumático

MATERIAL	RANGO TÍPICO	
	Vehículo Liviano	Vehículo Pesado
Caucho Natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Rellenos Reforzantes	28	28
Acero	14	15
Antioxidante y rellenos	17	16

Fuente: (Castro G. , 2008)

2.4.3 Obtención del grano de caucho reciclado (GCR)

Para que el caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso pueda ser utilizado como material constitutivo de las mezclas asfálticas, este debe ser transformado a forma de polvo o grano hasta tener el tamaño deseado, mediante procesos de trituración separando metales, tejidos (fibras textiles) y otras impurezas que puedan incorporarse (Navarro, 2013). Con frecuencia las partículas de caucho cuyo tamaño esté comprendido entre 1 mm y 10 mm se denominan granos.

Existen diferentes técnicas para realizar la trituración, las que se usan comúnmente son:

- Trituración mecánica (Se realiza a temperatura ambiente)
- Trituración criogénica (Se realiza a baja temperatura)

Estos tipos de trituración se realizan en plantas de reciclaje diseñadas para estos fines, el método a escogerse puede depender del costo y de la garantía que ofrezca de que las partículas de GCR estén libres de acero, fibras y otros productos. El método de trituración de los neumáticos, determina la forma, textura, granulometría, contenido remanente de contaminantes metálico y textil las partículas de caucho que influyen en la reacción con el asfalto.

Las partículas obtenidas por trituración ambiental tienen forma y textura irregular y su reacción con el asfalto se produce de manera rápida, por otro lado, con la trituración criogénica se obtiene una forma ovalada y superficies planas disminuyendo la reacción con el asfalto.

A continuación, se muestra de manera ordenada en un esquema las etapas para la obtención del GCR:

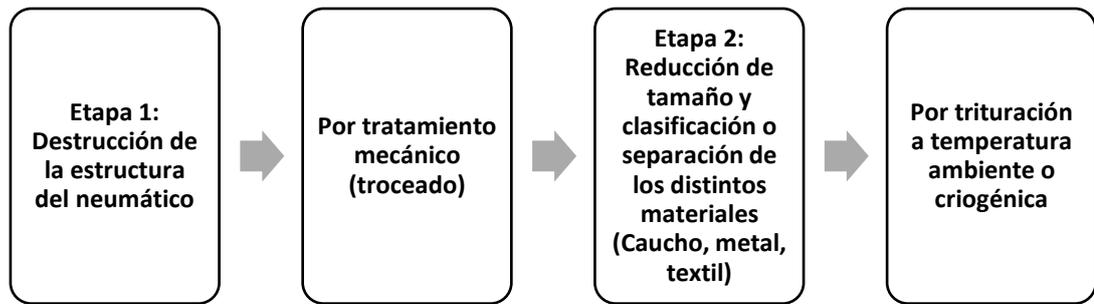


Figura 2.3 Esquema para obtención de GCR

Fuente: Autores

Tratamiento mecánico: En esta primera etapa se hace la disminución del tamaño de los neumáticos en trozos iguales de aproximadamente 30 cm, este proceso se realiza independientemente del método de trituración que vaya a utilizarse para obtener el polvo de caucho.

Trituración ambiental: Esta trituración se da a temperatura ambiente, la reducción de tamaño consiste en procesos de granulado, molienda, pulverización a través de granuladores, molinos. Para que las partículas de caucho queden libres de material textil y metálico, se extraen los fragmentos de acero mediante electroimanes y las fibras textiles mediante corrientes de aire y equipos de aspiración.

Trituración criogénica: Para este procedimiento se debe enfriar previamente los trozos de neumáticos con nitrógeno líquido u otros métodos, a temperaturas de 200°C bajo cero para que el caucho pierda elasticidad y pueda ser triturado fácilmente. Luego para reducir aún más su tamaño los trozos congelados deben pasar por un molino de impacto, después del producto que se obtuvo, se separa la fibra textil con aspiración y el metal con imanes.

2.4.4 Incorporación de caucho en mezclas asfálticas

Entre los métodos para incorporar el GCR en las mezclas asfálticas destacan la vía húmeda y la vía seca.

2.4.4.1 Vía Húmeda

Por este método el GCR se mezcla con el cemento asfáltico produciendo una mezcla modificada con lo que se le denomina asfalto-caucho, que se usa como un ligante modificado y resulta de la interacción del GCR con el ligante.

Cuando el cemento asfáltico y GCR se mezclan, el GCR reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose debido a la absorción de aceites aromáticos, la reacción que ocurre entre los dos no es de tipo química. El grado de modificación del ligante depende de factores como, tamaño, textura y cantidad del GCR, tipo del cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla, el componente aromático del cemento de asfáltico, y el uso de otros aditivos (Contreras & Delgado, 2017).



Figura 2.4 Proceso adición GCR al asfalto por vía húmeda (Castro & Diaz, 2017)

En la Figura 2.4 se indica el proceso de adición del GCR mediante la vía húmeda también conocido como proceso McDonald, consiste en mezclar el GCR con el cemento asfáltico en un tanque de mezclado, asegurando la circulación de la mezcla y garantizando una reacción óptima entre ambos materiales durante 45 a 60 minutos, de forma paralela los agregados se calientan (paso 5) para posteriormente mezclarse con el betún modificado. El producto obtenido es transportado a obra procurando mantener temperaturas

de 160°C a 190°C con el fin de evitar problemas de manejabilidad y pérdida de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica producida (Castro & Diaz, 2017).

2.4.4.2 Vía seca

Por este método el GCR, generalmente de granulometría fina se mezcla con los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, como si fuera un árido más antes de agregar el cemento asfáltico. Sin embargo, el caucho no se comporta como un árido más, puesto que estos pueden considerarse como un material inerte que durante el proceso de mezclado absorberá una pequeña proporción del ligante, a diferencia del GCR que sigue interactuando con el betún por el fenómeno de digestión que se da, este proceso de interacción consiste en que el asfalto baña las partículas de GCR desde la parte más superficial hasta la parte más interna, modificando de esta manera al betún y a la mezcla asfáltica (Berenguer, Cuenca, Griñan, & Verdú, 2009).



Figura 2.5 Proceso adición GCR por vía seca (Castro & Diaz, 2017)

En la Figura 2.5 se muestra detalladamente el proceso de adición del GCR por la vía seca, debido a que el GCR es sustituto de una fracción de los agregados (paso 3), este se incorpora directamente a los áridos cuando alcanzan una temperatura específica antes de adicionar el cemento asfáltico. La parte más fina del GCR modifica al cemento asfáltico. Para producir este

tipo de mezclas no se requiere de equipos especiales, sin embargo, existen otras tecnologías que pueden ser utilizadas que se menciona en la Sección 2.4.6 (Castro & Diaz, 2017).

2.4.5 Observaciones sobre el grado de digestión caucho-asfalto en el proceso vía seca.

Es de fundamental importancia estimar el tiempo y temperatura mínima para alcanzar el grado de digestión deseado, de lo contrario la falta de digestión produce que la mezcla desarrolle baja resistencia al agua, mala compactabilidad y disgregabilidad de la mezcla (Gallego, 2012).

De acuerdo a un ensayo de inmersión compresión, para determinar la pérdida de resistencia a la compresión producida por la acción del agua, realizado a una mezcla S-20 de la normativa española, se establecieron las tendencias de los tiempos mínimos para contenidos de caucho por vía seca del 1% s/áridos, la evolución de la resistencia conservada en inmersión compresión al incrementarse el tiempo de digestión, para distintos tamaños del polvo de caucho se presentan en la Figura 2.6 (Gallego & Prieto, 2004):

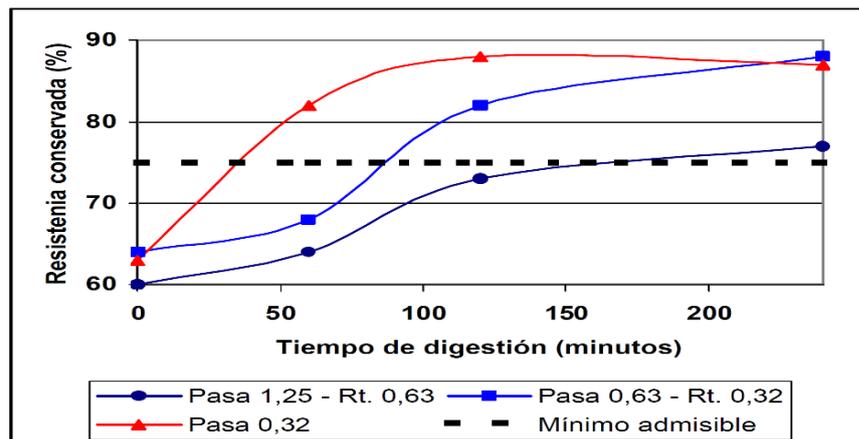


Figura 2.6 Resultados de ensayo de inmersión-compresión (Gallego & Prieto, 2004)

Cabe recalcar que no todas las mezclas seguirán exactamente este comportamiento, pero su tendencia sí. Según la Figura 2.6 con un caucho fino, se requiere de menos de una hora para lograr una buena digestión, tiempo que normalmente se demora en cualquier obra de pavimentación en mantener la mezcla caliente, dado que se consume tiempo en transportar la mezcla y

alimentar la extendidora, durante este tiempo la mezcla permanece a más de 120°C para lo que, Gallego y Prieto (2004) dicen “que podría considerarse como límite inferior del rango de temperaturas a que se desarrolla la digestión” (p.5).

La digestión es más rápida si, la partícula de caucho es más fina, la cantidad de caucho en la mezcla es baja y mientras más elevada sea la temperatura de la mezcla y el mayor sea el tiempo que esta se mantenga caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio la digestión puede simularse manteniendo en la estufa a 150°C durante el tiempo deseado antes de la compactación.

Se ha determinado el grado de modificación que el betún de la mezcla alcanza progresivamente mediante ensayos de viscosidad, donde se demostró que mientras mayor era el tiempo de digestión y las partículas de caucho eran más finas, el grado de digestión era mayor y también su viscosidad (Gallego & Prieto, 2004). En la Figura 2.7 se muestra la evolución de la viscosidad con el tiempo de digestión:

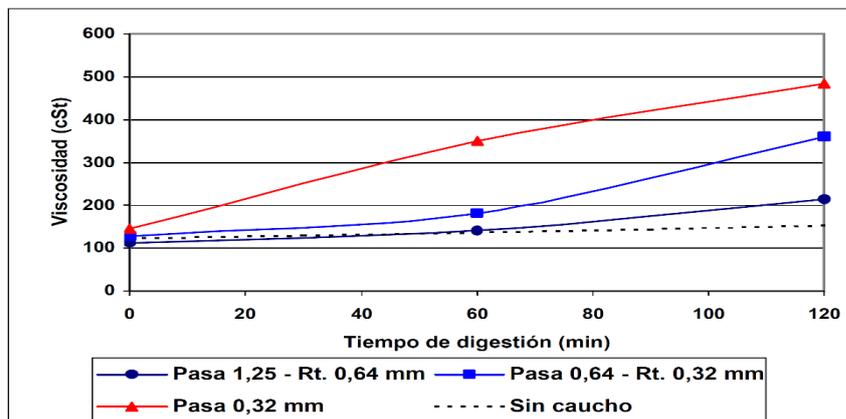


Figura 2.7 Resultados de viscosidad (Gallego & Prieto, 2004)

2.4.6 Tecnología desarrollada para el proceso vía seca

De acuerdo a Díaz y Castro (2017) existen algunas tecnologías por vía seca que tienen sus particularidades como, por ejemplo:

2.4.6.1 Tecnología PlusRide

Se agrega del uno a tres por ciento del peso total de los agregados de GCR en la mezcla, sus partículas van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz No. 10).

El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre el 2 y el 4 por ciento, y por lo general obtenido con contenidos de asfalto entre el 7.5 y el 9 por ciento.

2.4.6.2 Tecnología Genérica

Se emplean en dos fracciones, una gruesa y otra fina con la finalidad de emparejar la granulometría de los agregados mejorando la mezcla asfáltica. La parte fina del GCR interactúa con el cemento asfáltico, la parte gruesa se comporta como un agregado elástico en la mezcla asfáltica.

2.4.6.3 Tecnología Convencional

No requiere grandes cantidades de cemento asfáltico, pero la cantidad de caucho es aproximadamente del dos por ciento del peso total de los agregados. Sus resultados favorables para la aplicación por esta vía se aprobaron gracias a pruebas dinámicas de laboratorio (Castro & Diaz, 2017).

Según Verdú, Cuenca, Berenguer y Griñán (2009), en el proceso por vía seca existen 2 técnicas, de las cuales la primera usa dotaciones de hasta 2% de “polvo de caucho” en peso de mezcla y tamaños máximos de partículas de caucho de 2 mm, que actúan como un árido elastomérico dentro del esqueleto mineral de la mezcla asfáltica, mientras que las partículas de 0.5 mm interactúan con el betún. La segunda técnica en cambio usa “polvo de caucho” en menor cantidad y tamaño, donde todas las partículas pasan por el tamiz 0.6 mm.

2.4.7 Ventajas y desventajas del proceso por vía seca

Ventajas

- El GCR actúa como espesante, aumentando la viscosidad del asfalto, lo que permite envolver los áridos con las películas de asfalto más gruesas evitando exudaciones.
- Modifica las propiedades reológicas del asfalto, aumentando su elasticidad y resiliencia a temperaturas altas, presentando menor susceptibilidad térmica.

- Las modificaciones antes mencionadas generan ventajas técnicas que permiten reducir los costos de mantenimiento e interrupción del tráfico por reparaciones del pavimento (Navarro, 2013).
- El proceso por vía seca resulta ser más económico que el proceso por vía húmeda, ya que en el proceso por vía húmeda se requieren equipos especiales.
- Con este método la tecnología es accesible a las empresas que producen mezclas asfálticas, puesto que no requiere de un equipo especial de mezclado, sino un sistema de alimentación que añada la cantidad de caucho adecuada en el momento preciso (como un filler de aportación) antes que el cemento asfáltico sea adicionado (Navarro, 2013).
- La resistencia a la fatiga y al ahuellamiento de la mezcla asfáltica aumenta cuando la reacción entre la mezcla y el GCR no supera los 175°C (Dias, Santos, & Capitao, 2014).
- Ofrece ventajas ambientales puesto que la demanda de GCR para obtener este tipo de mezclas modificadas, aporta con el reciclado y reducción de volumen de neumáticos fuera de uso.

Desventajas

- El tiempo de compactación de la mezcla es mayor y demanda mayor cantidad de ligante asfáltico (Velar, 1997).
- La falta de digestión puede desarrollar en la mezcla baja resistencia al agua, mala compactabilidad y disgregabilidad.

2.4.8 Consideraciones para la confección de briquetas con caucho

De acuerdo a la experiencia internacional, más específicamente, la experiencia española, se determinó el tiempo y la temperatura de mezclado. Una vez que se obtuvo la dosificación de los áridos y el GCR se fijaron los siguientes lineamientos para la confección de las briquetas con caucho:

1. Agregados: Deberán ser calentados en el horno a 160°C durante 2 horas en bandejas. Se consideró un incremento de 10°C en

temperatura referente al procedimiento sin caucho donde el agregado se calienta a 150°C (Berenguer, Cuenca, Griñan, & Verdú, 2009).

2. Asfalto: Deberá calentarse en el horno a 155°C. Se consideró un incremento de 5°C en la temperatura respecto al procedimiento sin caucho donde el asfalto se calienta a 150°C.
3. La temperatura de calentamiento de los áridos y asfalto por separado previo al mezclado se incrementó debido a que el GCR no se calienta previamente, se incorpora a la mezcla a la temperatura ambiente. Una vez que los materiales cumplen con la temperatura y tiempo de calentamiento especificados se debe mezclar el agregado con el asfalto en las bandejas sobre hornillas eléctricas y posteriormente incorporar el GCR hasta que todas las partículas de agregado y caucho sean pintadas con el betún.
4. Se coloca la mezcla con caucho en el horno durante 1h30 min a 150°C, con el fin de garantizar que se alcance el grado de digestión adecuado. No obstante, el tiempo y temperatura indicados pueden ser ajustados para optimizar la digestión.
5. Se coloca la mezcla en los moldes previamente calentados en el horno, teniendo especial cuidado en la temperatura de compactación, la cual debe ser aproximadamente de 140° C.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A ESTUDIAR

3.1 Metodología del trabajo

Este trabajo se basa en resultados obtenidos en diseños propios de mezclas bituminosas modificadas con grano de caucho de llantas. Se mostrarán los resultados de los ensayos acorde a las exigencias actuales tanto de los agregados minerales, el cemento asfáltico y las mezclas asfálticas confeccionadas.

Como punto de partida se diseñará una mezcla asfáltica con una dosificación de agregados producidos por una importante cantera cercana a la ciudad de Guayaquil y que cumplen las exigencias establecidas (MOP-001-F 2002). De esta forma se tendrá una referencia para nuestro trabajo, donde también se realizarán diseños con adiciones de 0.75% y 1.5% de grano de caucho reciclado. En total se harán tres diseños.

3.2 Resultados de las pruebas al cemento asfáltico

Los ensayos para determinar el grado de viscosidad del asfalto se realizaron en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería perteneciente a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Una vez realizada las pruebas correspondientes al asfalto proveniente de la Refinería de Esmeraldas, su clasificación por viscosidad permitió conocer que el asfalto corresponde a un grado AC-30 en su estado original, aunque la viscosidad y ductilidad en el residuo del RTFOT no cumplen los límites establecidos, ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación por viscosidad para asfaltos

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS INEN		RESULTADOS
			AC-20	AC-30	
LIGANTE ORIGINAL					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	254
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	396
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	298
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1,012
Punto de ablandamiento	0,1 mm	ASTM D-5			
Índice de penetración	°C	ASTM D-36			51,0
		ASTM D 5/D5M	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	-0,60
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)					
Viscosidad a 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1470
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	-0,29
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	27

Fuente: Autores

3.3 Resultados de las pruebas a los agregados minerales

En el numeral: “Agregados para hormigón asfáltico”, de las especificaciones vigentes (MOP, 2002), se establece que:

“Los agregados serán fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente. Se utilizarán agregados completamente secos y de no poder cumplirse esto, se instalarán dos secadores en serie, de tal forma que cuando se termine la operación de mezclado, la humedad de los agregados no exceda de 1%”.

Las mezclas asfálticas se confeccionaron con agregados “Tipo A” que son aquellos en los cuales todas las partículas que forman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino puede ser arena natural o material triturado y, de requerirse, se puede añadir relleno mineral para cumplir las exigencias de graduación antes mencionadas. Este relleno mineral puede ser inclusive cemento Portland, si así se establece para la obra. (MOP, 2002, pág. VIII 81).

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y sus exigencias fueron los siguientes.

Tabla 3.2 Características de los agregados minerales

AGREGADOS				
PRUEBAS	GRUESOS		FINOS	
	Exigencia	Valor obtenido	Exigencia	Valor obtenido
FORMA	Caras fracturadas (>80% - 2 caras)	100	Angularidad (>80%)	100%
	Planas y alargadas (<10%)	3		
DUREZA	Abrasión los ángulos (<40%)	15,40%	Sulfatos (<12%)	0,88%
	Sulfatos (<12%)	0,72%		
LIMPIEZA	Deletéreos (<1%)	0%	Deletéreos (<1%)	0,2%
			Equivalente de arena (>50%)	70%
			Índice de plasticidad (<4%)	0,5%
ADHERENCIA (*)	Resistencia retenida ante el agua en prueba de tracción indirecta (>80%) --> Real: 75,1%			
	Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%) --> Real: 98%			

(*) Asfalto sin aditivo de adherencia.

Fuente: Autores

A continuación, se muestra el análisis granulométrico correspondiente a cada diseño, incluyendo al GCR que se incorporará en la mezcla.

Tabla 3.3 Granulometría de la piedra 3/4" (19mm)

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1" (25,4 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/4" (19,0 mm.)	25,20	1,26	98,74
1/2" (12,7 mm.)	1538,90	76,95	23,06
3/8" (9,50 mm.)	1980,80	99,04	0,96
No. 4 (4,75 mm.)	1997,90	99,90	0,11
PASA No. 4			
No.8 (2,36 mm.)	1997,90	99,90	0,11
No. 16 (1,18 mm.)	1998,00	99,90	0,10
No. 30 (0,60 mm.)	1998,00	99,90	0,10
No. 50 (0,30 mm.)	1998,10	99,91	0,09
No. 100 (0,15 mm.)	1998,20	99,91	0,09
No. 200 (0,075 mm.)	1998,20	99,91	0,09
PASA No. 200	1,80	0,09	
TOTAL	2000,00		

Fuente: Autores

Tabla 3.4 Granulometría del cisco de piedra 3/8" (9.5mm)

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1" (25,4 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/4" (19,0 mm.)	0,00	0,00	100,00
1/2" (12,7 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/8" (9,50 mm.)	103,50	5,18	94,82
No. 4 (4,75 mm.)	503,40	25,21	74,79
PASA No. 4			
No.8 (2,36 mm.)	1043,80	52,26	47,74
No. 16 (1,18 mm.)	1377,70	68,98	31,02
No. 30 (0,60 mm.)	1598,90	80,06	19,94
No. 50 (0,30 mm.)	1754,60	87,85	12,15
No. 100 (0,15 mm.)	1874,10	93,84	6,16
No. 200 (0,075 mm.)	1934,70	96,87	3,13
PASA No. 200	62,50	3,13	
TOTAL	1997,20		

Fuente: Autores

Tabla 3.5 Granulometría de la arena de río

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1" (25,4 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/4" (19,0 mm.)	0,00	0,00	100,00
1/2" (12,7 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/8" (9,50 mm.)	4,60	0,46	99,54
No. 4 (4,75 mm.)	32,50	3,25	96,75
PASA No. 4			
No.8 (2,36 mm.)	92,40	9,24	90,76
No. 16 (1,18 mm.)	198,50	19,85	80,15
No. 30 (0,60 mm.)	463,30	46,33	53,67
No. 50 (0,30 mm.)	852,60	85,26	14,74
No. 100 (0,15 mm.)	984,80	98,48	1,52
No. 200 (0,075 mm.)	994,10	99,41	0,59
PASA No. 200	5,90	0,59	
TOTAL	1000,00		

Fuente: Autores

Tabla 3.6 Granulometría del grano de caucho reciclado (GCR)

TAMIZ	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1" (25,4 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/4" (19,0 mm.)	0,00	0,00	100,00
1/2" (12,7 mm.)	0,00	0,00	100,00
3/8" (9,50 mm.)	0,00	0,00	100,00
No. 4 (4,75 mm.)	0,00	0,00	100,00
PASA No. 4			
No.8 (2,36 mm.)	0,00	0,00	100,00
No. 16 (1,18 mm.)	34,10	17,05	82,95
No. 30 (0,60 mm.)	137,60	68,80	31,20
No. 50 (0,30 mm.)	182,70	91,35	8,65
No. 100 (0,15 mm.)	197,00	98,50	1,50
No. 200 (0,075 mm.)	199,20	99,60	0,40
PASA No. 200	0,80	0,40	
TOTAL	200,00		

Fuente: Autores

En nuestro trabajo se optó por reemplazar un determinado porcentaje de arena para realizar la adición del caucho en la mezcla bituminosa, en los dos diseños que contienen los porcentajes de caucho.

3.4 Observaciones sobre la confección de briquetas

3.4.1 Generalidades

Para la elaboración de briquetas se utilizó el método de diseño Marshall, el mismo que permite determinar el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla. Se confeccionaron briquetas con un peso total de 1200g, empleando moldes Marshall. Para la compactación de cada briqueta se aplicaron 75 golpes por cara utilizando el martillo automático Marshall.

3.4.2 Pasos para la fabricación de briquetas sin caucho

1. Calentar los agregados a una temperatura de 110° C durante 24 horas para que puedan estar lo más seco posible. Luego dosificar en bandejas y deberá ingresar al horno a una temperatura de 150° C durante 2 horas más.



Figura 3.1 Bandejas con agregados dosificados en el horno

2. Calentar asfalto a utilizar a una temperatura de 150° C.



Figura 3.2 Verificación de temperatura en el recipiente de asfalto

3. Mezclar manualmente con las herramientas adecuadas; con el asfalto y los agregados a 150° C respectivamente. Todos los agregados involucrados tienen que ser pintados por el asfalto y la mezcla debe ser homogénea.



Figura 3.3 Proceso de mezclado manual

- Colocar dicha mezcla 2 horas en el horno a una temperatura de 135°C, esto se realiza con el fin que logre simular el envejecimiento que sufre la mezcla debido al transporte y puesta en obra de la misma; más la absorción de asfalto por parte de la piedra.



Figura 3.4 Muestras de mezcla asfáltica en el horno

- Calentar durante dos horas simultáneamente los moldes Marshall, los mismos que deberán tener la misma temperatura que la mezcla a la hora de compactar. Los moldes tendrán una ligera capa de aceite para facilitar la extracción de la briqueta.
- Colocar la mezcla en los moldes cumplidas las 2 horas; asegurando ser cauteloso y ligero para no perder demasiada temperatura. Inmediatamente proceder a la compactación con el martillo Marshall (135° C) tomando en cuenta el número de golpes adecuados en cada briqueta, o sea, 75 golpes para 100% de densidad relativa y ajustar mediante interpolaciones para obtener el 97% de densidad para el caso de la prueba de daño en agua.



Figura 3.5 Martillo automático Marshall

7. Identificar cada briqueta del proceso para tabular los datos adecuadamente, esperar que las briquetas se enfríen para el desmolde correspondiente y análisis de cada una.

3.4.3 Pasos para la fabricación de briquetas con caucho

Dado que el caucho que se utilizará en este trabajo es del mismo tipo para los diseños 0.75% y 1.5% de caucho; el procedimiento de ambos es similar.

1. Calentar los agregados a una temperatura de 110° C durante 24 horas para luego dosificar en bandejas el peso de una briqueta, aumentándose la temperatura a 160° C durante 2 horas más.



Figura 3.6 Secado de los agregados en horno

2. Esta vez el asfalto a utilizar debe ser calentado a una temperatura de 155° C.



Figura 3.7 Muestra de GCR

3. Mezclar manualmente con las herramientas adecuadas; pero en este caso con el asfalto a una temperatura de 155° C y los agregados a 160° C respectivamente.



Figura 3.8 Adición de GCR a la mezcla caliente

4. Colocar la mezcla en el horno durante 1.5 horas a una temperatura de 150°C para que se tenga una adecuada digestión del caucho en asfalto. Además, simular un cierto envejecimiento en la mezcla.
5. Calentar los moldes Marshall, los mismos que deberán tener la misma temperatura de (150° C) a la hora de compactar la mezcla asfáltica. Los moldes tendrán una ligera capa de aceite para facilitar su retirada.
6. Colocar la mezcla en los moldes cumplidas las 1.5 horas; asegurando ser cauteloso y ligero para no perder demasiada temperatura.

Inmediatamente proceder a la compactación con el martillo Marshall (135° C) tomando en cuenta el número de golpes adecuados en cada briqueta, o sea, 75 golpes para 100% de densidad relativa y ajustar mediante interpolaciones para obtener el 97% de densidad para el caso de la prueba de daño en agua.

7. Identificar cada briqueta del con el porcentaje de caucho para tabular los datos adecuadamente, esperar que las briquetas se enfríen para el desmolde correspondiente y análisis de cada una.



Figura 3.9 Briquetas identificadas para control de las mismas

3.5 Diseño de mezcla asfáltica referencial con 0% de GCR

En la Tabla 3.8 puede observarse la dosificación correspondiente a este diseño, la cual corresponde a:

- Piedra 3/4" (gruesa) → 7%
- Piedra 3/8" (cisco) → 80%
- Arena de río → 13%
- Caucho → 0%

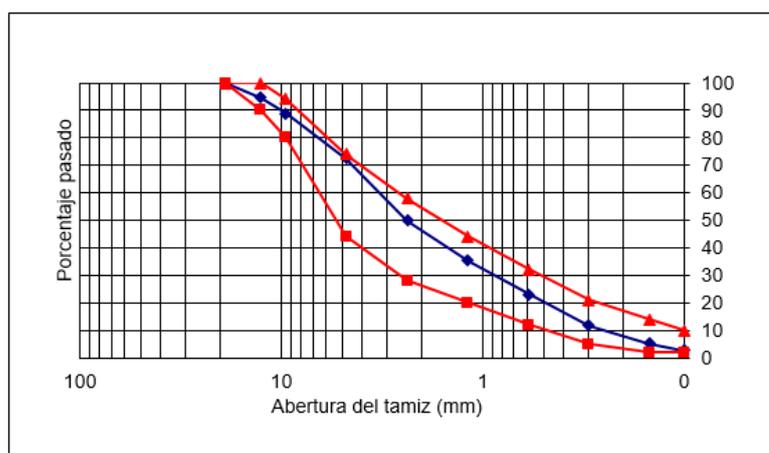


Figura 3.10 Curva granulométrica combinada del diseño sin caucho

Todos los cálculos del procedimiento Marshall para este diseño aparecen resumidos en la Tabla 3.9 y graficados en la Figura 3.11. Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Contenido óptimo de asfalto del diseño sin GCR

PROPIEDADES	VALOR OBTENIDO	EXIGENCIAS
ESTABILIDAD	2789 lb	> 1800 lb
FLUJO	13	(8 - 14) in/100
Gmb	2,472	*
VACÍOS EN MEZCLA	4%	(3 - 5) %
VACÍOS EN AGREGADOS	14,8%	> 14 %
VACÍOS RELLENOS	73%	(65 - 75) %
CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO - (0% GCR)		6,1%

Fuente: Autores

Tabla 3.8 Dosificación de la mezcla con sin GCR

ABERTURA DE TAMICES		AG 1	AG 2	AG 3	AGR 4	AG 1	AG 2	AG 3	AG 4	GRANUL.	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	100	100	100	100	7,0	80,0	13,0	0,0	COMBINADA	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	98,7	100,0	100,0	100,0	6,9	80,0	13,0	0,0	99,9	100	100
1/2"	12,70	23,1	100,0	100,0	100,0	1,6	80,0	13,0	0,0	94,6	90	100
3/8"	9,50	1,0	94,8	99,5	100,0	0,1	75,9	12,9	0,0	88,9	80	94
# 4	4,75	0,1	74,8	96,8	100,0	0,0	59,8	12,6	0,0	72,4	44	74
# 8	2,36	0,1	47,7	90,8	100,0	0,0	38,2	11,8	0,0	50,0	28	58
# 16	1,19	0,1	31,0	80,2	83,0	0,0	24,8	10,4	0,0	35,2	20	44
# 30	0,59	0,1	19,9	53,7	31,2	0,0	16,0	7,0	0,0	22,9	12	32
# 50	0,30	0,1	12,1	14,7	8,7	0,0	9,7	1,9	0,0	11,6	5	21
# 100	0,15	0,1	6,2	1,5	1,5	0,0	4,9	0,2	0,0	5,1	2	14
# 200	0,10	0,1	3,1	0,6	0,4	0,0	2,5	0,1	0,0	2,6	2	10

Fuente: Autores

Tabla 3.9 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica sin GCR

ANILLO No. 0901, K = CARTA DE CALIBRACION																
NUMERO DE GOLPES POR LADO:		75		GRAV. ESPEC. EFEC. AGREGADO (Gse):				2,857		ANILLO =		7,406613		12,69187		
GRAVEDAD ESPECIFICA DE C.A. (Gb):		1,012		C.A. ABSORBIDO POR EL AGREG (Pba):				1,67		CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187						
GRAV. ESPEC. BRUTA AGREGADOS (Gsb):		2,728														
Mezcla No.	% DE ASFALTO	Peso en gramos			VOL. (cm³)	DENSIDAD		Volumen % Total			% V.M.A.	% V.F.A.	ESTABILIDAD EN LBS.			Flujo 1/100"
		SECO EN AIRE	EN AGUA	S.S.S. EN AIRE		BULK	RICE	AGREG.	ASFALTO	VACIOS AIRE			FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA	
1		1159,5	681,9	1160,5	478,6	2,423							1,14	310	2632	11
2		1158,6	684,6	1159,1	474,5	2,442							1,14	285	2421	12
3		1169,5	691,6	1170,0	478,4	2,445							1,14	280	2379	13
% C.A.	5,5					2,436	2,611	84,4	8,9	6,7	15,6	57,1			2477	12,0
4		1152,0	685,6	1152,3	466,7	2,468							0,86	415	2654	13
5		1160,7	691,3	1161,2	469,9	2,470							0,86	425	2718	13
6		1169,2	695,8	1169,6	473,8	2,468							1,14	385	3265	11
% C.A.	6,0					2,469	2,575	85,1	10,8	4,1	14,9	72,4			2879	12,3
7		1157,4	692,1	1157,6	465,5	2,486							0,86	390	2495	17
8		1159,6	693,2	1159,8	466,6	2,485							0,86	400	2559	14
9		1162,2	695,7	1162,6	466,9	2,489							0,86	395	2527	14
% C.A.	6,5					2,487	2,561	85,2	11,9	2,9	14,8	80,4			2527	15,0
10		1157,4	690,2	1157,6	467,4	2,476							0,86	350	2240	17
11		1155,5	688,4	1155,7	467,3	2,473							0,86	370	2368	15
12		1151,1	685,8	1151,4	465,6	2,472							0,86	365	2336	14
% C.A.	7,0					2,474	2,540	84,3	13,1	2,6	15,7	83,4			2315	15,3
13		1149,4	684,0	1149,6	465,6	2,469							0,86			
14		1157,2	690,6	1157,5	466,9	2,478							0,86	355	2272	16
15		1165,0	684,4	1165,1	480,7	2,424							1,14	240	2041	15
% C.A.	7,5					2,457	2,521	83,3	14,1	2,5	16,7	84,8			2157	15,5

Fuente: Autores

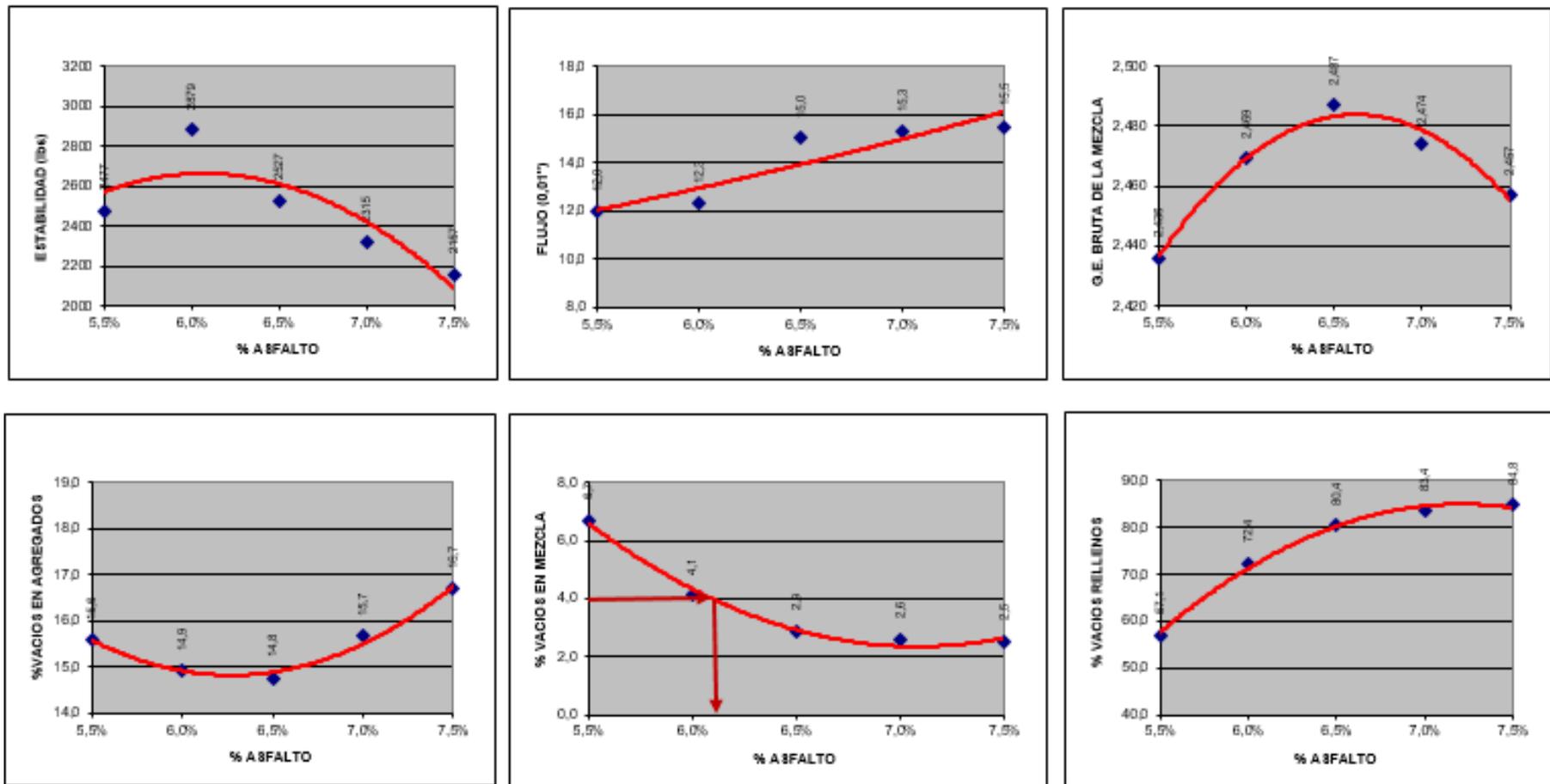


Figura 3.11 Resumen gráfico del diseño óptimo de la mezcla sin GCR

Fuente: Autores

3.6 Diseño de mezcla asfáltica con 0.75% de GCR

En la Tabla 3.11 puede observarse la dosificación correspondiente a este diseño, la cual corresponde a:

- Piedra 3/4" (gruesa) → 7%
- Piedra 3/8" (cisco) → 80%
- Arena de río → 12.25%
- Caucho → 0.75%

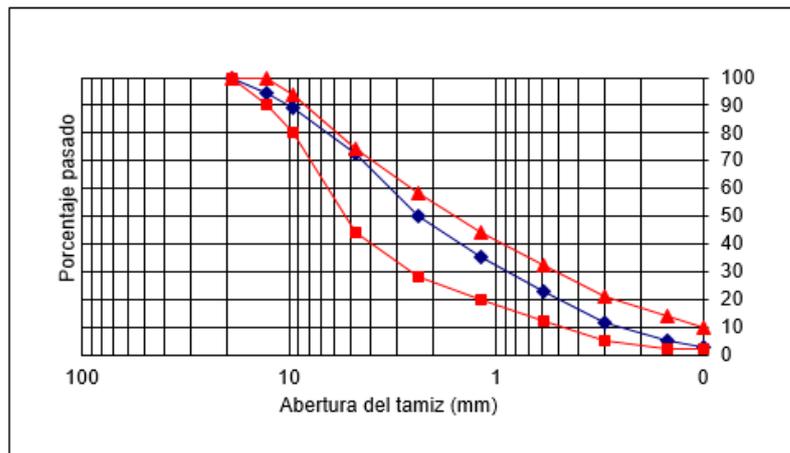


Tabla 3.11 Dosificación de la mezcla con 0.75% de GCR

ABERTURA DE TAMICES		AG 1	AG 2	AG 3	AGR 4	AG 1	AG 2	AG 3	AG 4	GRANUL.	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	100	100	100	100	7,0	80,0	12,3	0,8	COMBINADA	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	98,7	100,0	100,0	100,0	6,9	80,0	12,3	0,8	99,9	100	100
1/2"	12,70	23,1	100,0	100,0	100,0	1,6	80,0	12,3	0,8	94,6	90	100
3/8"	9,50	1,0	94,8	99,5	100,0	0,1	75,9	12,2	0,8	88,9	80	94
# 4	4,75	0,1	74,8	96,8	100,0	0,0	59,8	11,9	0,8	72,4	44	74
# 8	2,36	0,1	47,7	90,8	100,0	0,0	38,2	11,1	0,8	50,1	28	58
# 16	1,19	0,1	31,0	80,2	83,0	0,0	24,8	9,8	0,6	35,3	20	44
# 30	0,59	0,1	19,9	53,7	31,2	0,0	16,0	6,6	0,2	22,8	12	32
# 50	0,30	0,1	12,1	14,7	8,7	0,0	9,7	1,8	0,1	11,6	5	21
# 100	0,15	0,1	6,2	1,5	1,5	0,0	4,9	0,2	0,0	5,1	2	14
# 200	0,10	0,1	3,1	0,6	0,4	0,0	2,5	0,1	0,0	2,6	2	10

Fuente: Autores

Tabla 3.12 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 0.75% de GCR

ANILLO No. 0901, K = CARTA DE CALIBRACION																
NUMERO DE GOLPES POR LADO:		75		GRAV. ESPEC. EFEC. AGREGADO (Gse):		2,817		ANILLO =		7,406613		12,69187				
GRAVEDAD ESPECIFICA DE C.A. (Gb):		1,012		C.A. ABSORBIDO POR EL AGREG (Pba):		2,56		CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187								
GRAV. ESPEC. BRUTA AGREGADOS (Gsb):		2,629														
Mezcla No.	% DE ASFALTO	Peso en gramos			VOL. (cm³)	DENSIDAD		Volumen % Total			% V.M.A.	% V.F.A.	ESTABILIDAD EN LBS.			Flujo 1/100"
		SECO EN AIRE	EN AGUA	S.S.S. EN AIRE		BULK	RICE	AGREG.	ASFALTO	VACIOS AIRE			FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA	
1		1140,8	664,3	1142,8	478,5	2,384							1,14	390	3307	13
2		1170,8	676,2	1173	496,8	2,357							1,04	450	3479	11
3		1158,7	674,3	1162	487,7	2,376							1,09	425	3445	14
% C.A.	6,0					2,372	2,558	84,8	7,9	7,3	15,2	52,2			3411	12,7
4		1173,9	687,9	1174,8	486,9	2,411							1,09	465	3768	15
5		1164,9	677,9	1165,9	488	2,387							1,09	420	3405	15
6		1169,8	686,8	1170,6	483,8	2,418							1,09	495	4010	17
% C.A.	6,5					2,405	2,529	85,5	9,6	4,9	14,5	66,2			3728	15,7
7		1167	679,2	1167,5	488,3	2,390							1,09	450	3647	18
8		1168,3	681,3	1169,3	488	2,394							1,09	390	3162	17
9		1173,5	686,4	1174,2	487,8	2,406							1,09	455	3687	20
% C.A.	7,0					2,397	2,505	84,8	10,9	4,3	15,2	71,6			3499	18,3
10		1154,3	671,7	1155,1	483,4	2,388							1,09	330	2678	21
11		1172,3	687	1173	486	2,412							1,09	355	2880	18
12		1161,2	679,4	1162	482,6	2,406							1,14	345	2927	20
% C.A.	7,5					2,402	2,486	84,5	12,1	3,4	15,5	78,2			2828	19,7
13		1169,5	680,3	1170,4	490,1	2,386							1,09	350	2839	23
14		1167,8	681,5	1168,5	487,0	2,398							1,09	325	2638	24
15		1169,4	681,8	1170,1	488,3	2,395							1,09	335	2718	21
% C.A.	8,0					2,393	2,469	83,7	13,2	3,1	16,3	81,1			2732	22,7

Fuente: Autores

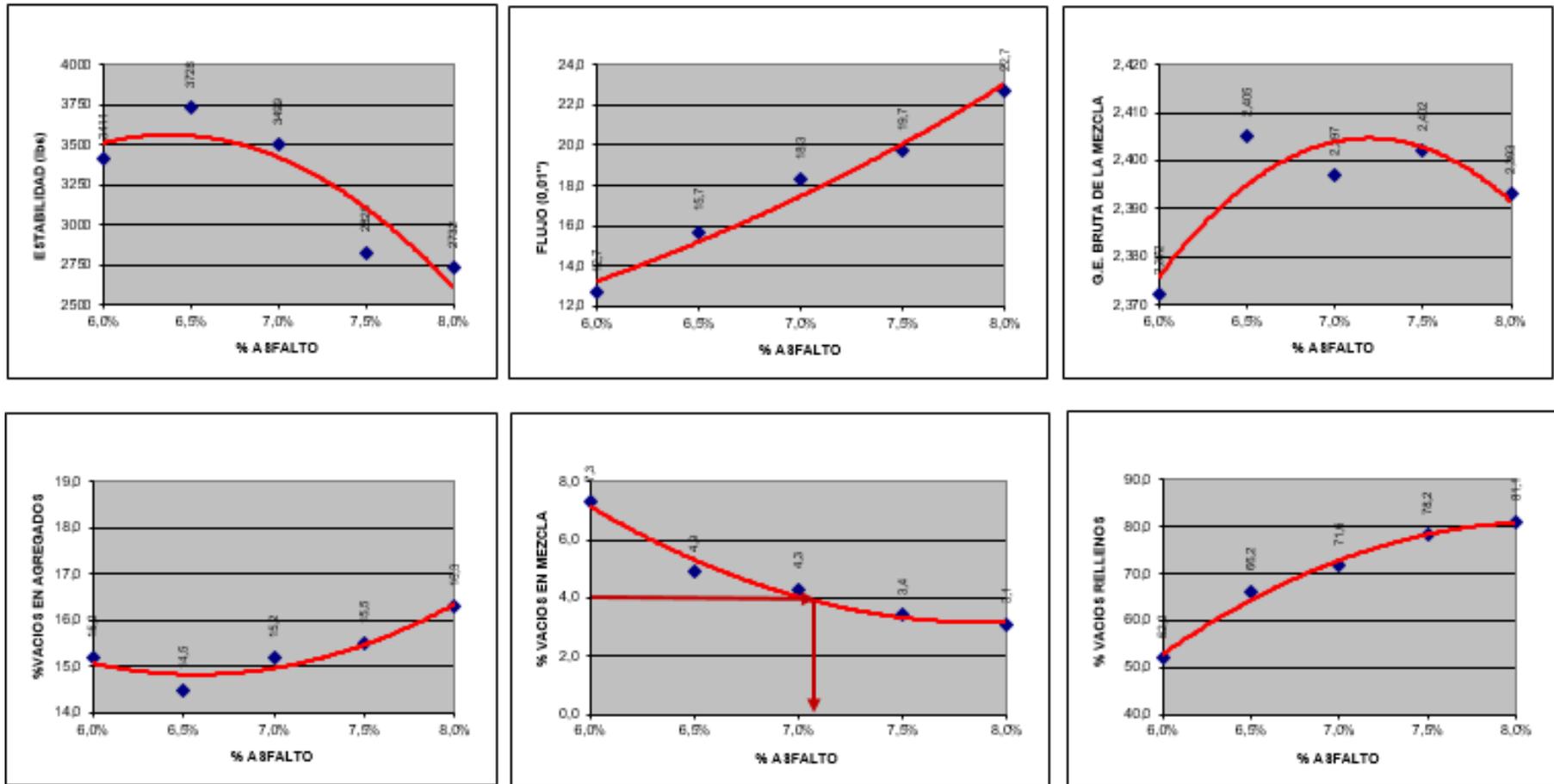


Figura 3.13 Resumen gráfico del diseño óptimo de mezcla con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

3.7 Diseño de mezcla asfáltica con 1.5% de GCR

En la Tabla 3.14 puede observarse la dosificación correspondiente a este diseño, la cual corresponde a:

- Piedra 3/4" (gruesa) → 7%
- Piedra 3/8" (cisco) → 80%
- Arena de río → 11.5%
- Caucho → 1.5%

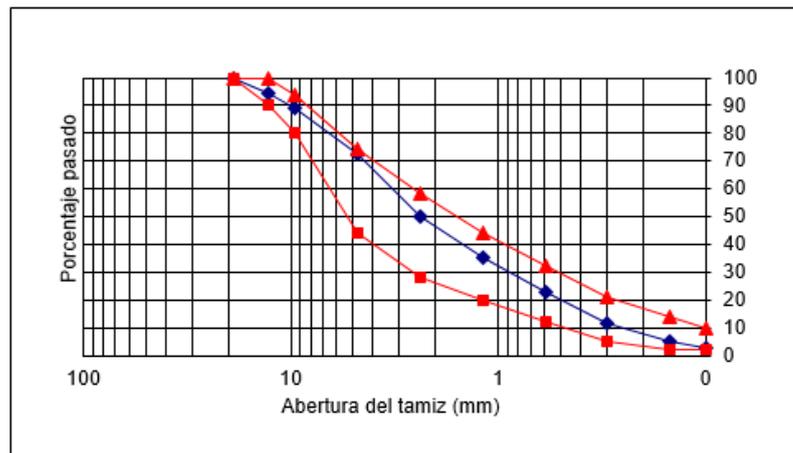


Figura 3.14 Curva granulométrica combinada del diseño con 1.5% de GCR

Todos los cálculos del procedimiento Marshall para este diseño aparecen resumidos en la Tabla 3.15 y graficados en la Figura 3.15. Los resultados obtenidos se sintetizan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Contenido óptimo de asfalto del diseño con 1.5% de GCR

PROPIEDADES	VALOR OBTENIDO	EXIGENCIAS
ESTABILIDAD	2453 lb	> 1800 lb
FLUJO	NO	(8 - 14) in/100
PESO UNITARIO	2,317	*
VACÍOS EN MEZCLA	5%	(3 - 5) %
VACÍOS EN AGREGADOS	16%	> 14 %
VACÍOS RELLENOS	68,5%	(65 - 75) %
CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO - (1,5% GCR)		8,0%

Fuente: Autores

Tabla 3.14 Dosificación de la mezcla con 1.5% de GCR

ABERTURA DE TAMICES		AG 1	AG 2	AG 3	AGR 4	AG 1	AG 2	AG 3	AG 4	GRANUL.	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	100	100	100	100	7,0	80,0	11,5	1,5	COMBINADA	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	98,7	100,0	100,0	100,0	6,9	80,0	11,5	1,5	99,9	100	100
1/2"	12,70	23,1	100,0	100,0	100,0	1,6	80,0	11,5	1,5	94,6	90	100
3/8"	9,50	1,0	94,8	99,5	100,0	0,1	75,9	11,4	1,5	88,9	80	94
# 4	4,75	0,1	74,8	96,8	100,0	0,0	59,8	11,1	1,5	72,5	44	74
# 8	2,36	0,1	47,7	90,8	100,0	0,0	38,2	10,4	1,5	50,1	28	58
# 16	1,19	0,1	31,0	80,2	83,0	0,0	24,8	9,2	1,2	35,3	20	44
# 30	0,59	0,1	19,9	53,7	31,2	0,0	16,0	6,2	0,5	22,6	12	32
# 50	0,30	0,1	12,1	14,7	8,7	0,0	9,7	1,7	0,1	11,5	5	21
# 100	0,15	0,1	6,2	1,5	1,5	0,0	4,9	0,2	0,0	5,1	2	14
# 200	0,10	0,1	3,1	0,6	0,4	0,0	2,5	0,1	0,0	2,6	2	10

Fuente: Autores

Tabla 3.15 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con 1.5% de GCR

ANILLO No. 0901, K = CARTA DE CALIBRACION																
NUMERO DE GOLPES POR LADO:		75		GRAV. ESPEC. EFEC. AGREGADO (Gse):		2,781		ANILLO =		7,406613		12,69187				
GRAVEDAD ESPECIFICA DE C.A. (Gb):		1,012		C.A. ABSORBIDO POR EL AGREG (Pba):		3,49		CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187								
GRAV. ESPEC. BRUTA AGREGADOS (Gsb):		2,538														
Mezcla No.	% DE ASFALTO	Peso en gramos			VOL. (cm³)	DENSIDAD		Volumen % Total			% V.M.A. V.F.A.		ESTABILIDAD EN LBS.			Flujo 1/100"
		SECO EN AIRE	EN AGUA	S.S.S. EN AIRE		BULK	RICE	AGREG.	ASFALTO	VACIOS AIRE	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA			
1		1154,6	653,1	1155,8	502,7	2,297							1,04	300	2324	16
2		1155,6	657,7	1156,5	498,8	2,317							1,04	320	2478	14
3		1162,8	657,9	1163,1	505,2	2,302							1,04	305	2363	15
% C.A.	7,0					2,305	2,482	84,5	8,4	7,1	15,5	54,1			2388	15,0
4		1150,7	652,8	1151,6	498,8	2,307							1,04			
5		1146,9	650,8	1147,5	496,7	2,309							1,04	345	2671	16
6		1159,2	661	1162	501	2,314							1,04	375	2902	17
% C.A.	7,5					2,310	2,465	84,2	9,5	6,3	15,8	60,2			2786	16,5
7		1130,3	642	1130,6	488,6	2,313							1,09	310	2517	17
8		1142,3	650,5	1143,9	493,4	2,315							1,09	315	2557	23
9		1168,1	665,3	1168,3	503	2,322							1,04	295	2286	20
% C.A.	8,0					2,317	2,440	84,0	11,0	5,0	16,0	68,5			2453	20,0
10		1150,6	653,9	1151,1	497,2	2,314							1,04	250	1939	22
11		1098,4	620,8	1100,4	479,6	2,290							1,14	195	1661	25
12		1158,6	663,1	1159,1	496	2,336							1,04	285	2209	20
% C.A.	8,5					2,313	2,432	83,4	11,7	4,9	16,6	70,6			1936	22,3
13		1170,7	655,5	1171,2	515,7	2,270							1,00	215	1605	22
14		1174	662,3	1174,2	511,9	2,293							1,00	255	1901	26
15		1163,2	660,6	1163,5	502,9	2,313							1,04	265	2054	23
% C.A.	9,0					2,292	2,416	82,2	12,7	5,1	17,8	71,2			1854	23,7

Fuente: Autores

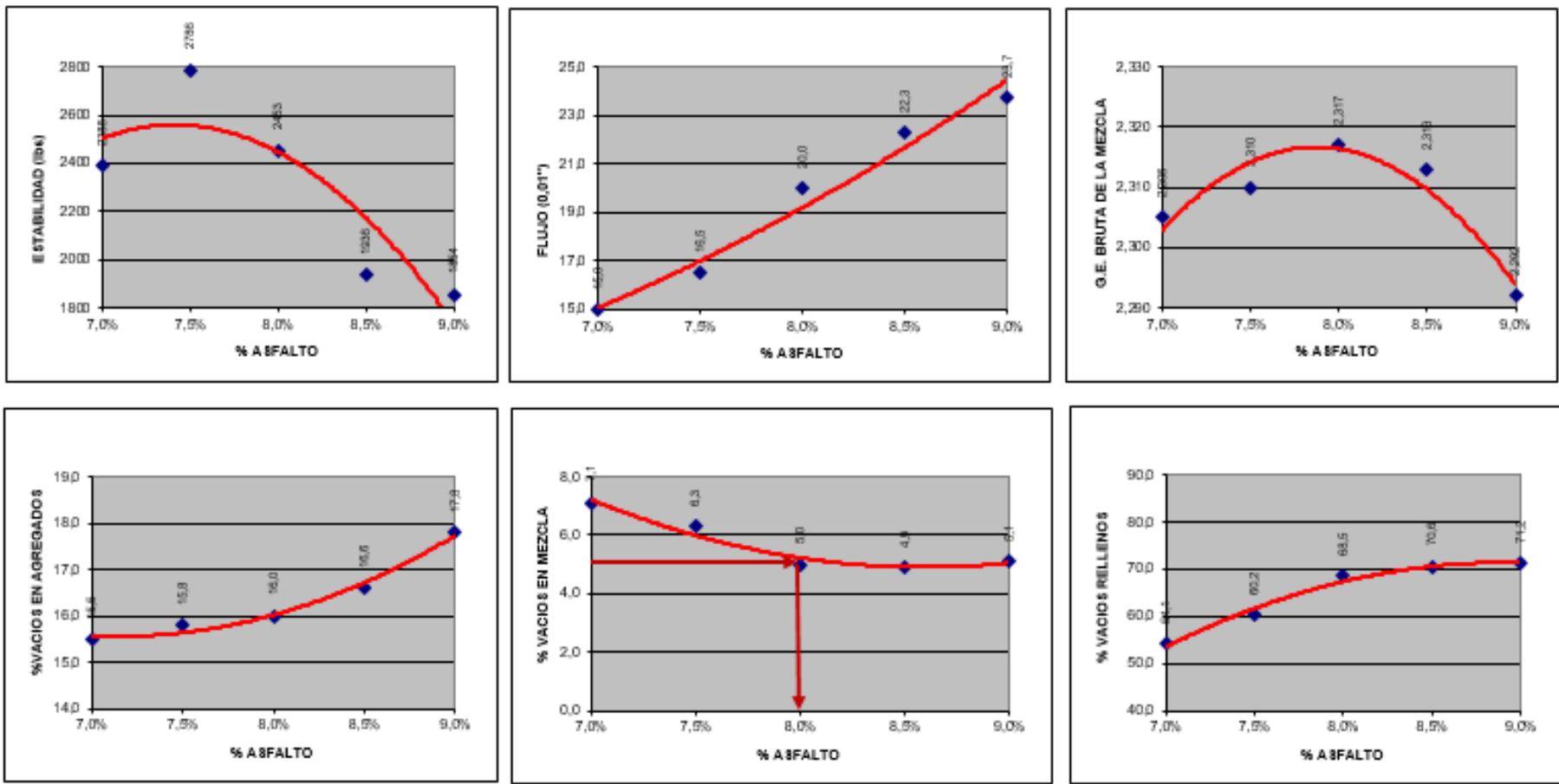


Figura 3.15 Resumen gráfico del diseño óptimo de mezcla con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS A LAS DIFERENTES MEZCLAS

4.1 Generalidades

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos tanto para pruebas convencionales como para pruebas de desempeño que se realizaron a los tres diseños que contempla este estudio.

Para cada mezcla diseñada con 0, 0.75 y 1.5% de GCR se preparó un lote de 18 briquetas, con la finalidad de realizar los ensayos que se muestran a continuación en la Figura 4.1.

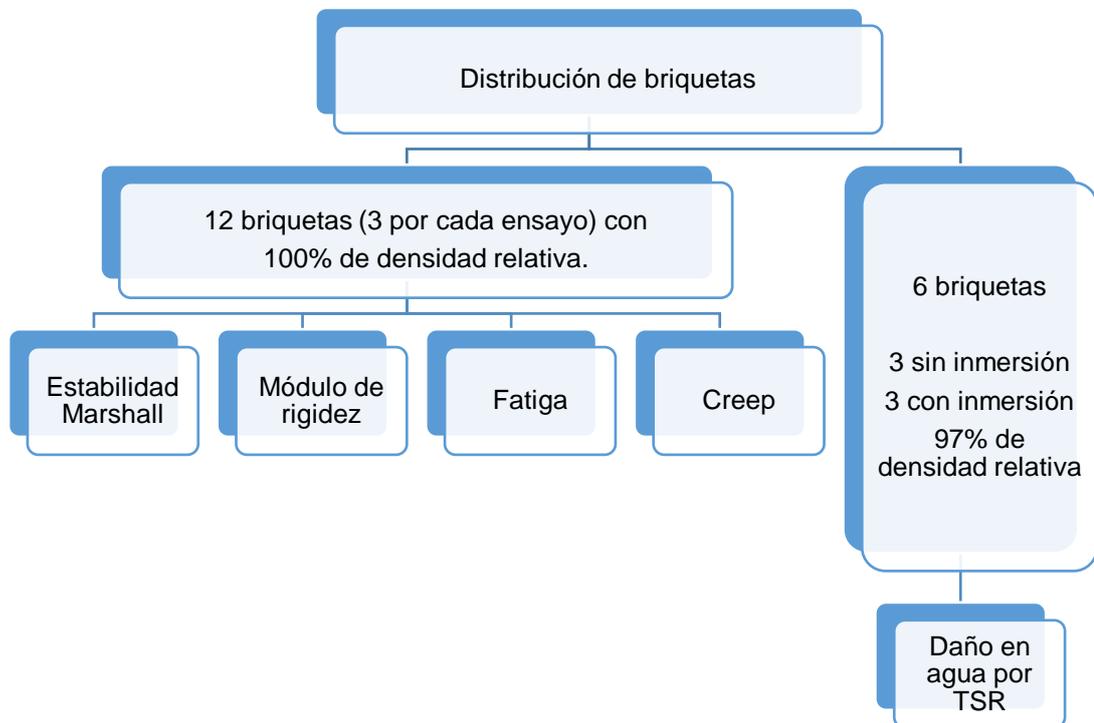


Figura 4.1 Distribución de briquetas para las pruebas convencionales y de desempeño

Fuente: Autores

4.2 Pruebas convencionales

Dentro de las pruebas convencionales están la determinación de estabilidad Marshall y flujo, además de la evaluación de daño en agua por tracción Indirecta.

4.2.1 Pruebas de estabilidad y flujo Marshall

Los procedimientos de estos ensayos se realizaron bajo la normativa ASTM D6927 descritos en la Sección 2.3.2.4 de este documento. El cumplimiento de los resultados de estabilidad y flujo se verifica de acuerdo a los criterios de diseño Marshall presentados en la Tabla 2.4 de la Sección 2.3.2.5.

Se ensayaron 3 briquetas por cada diseño, promediando los valores de estabilidad y flujo para obtener un único valor por diseño y realizar un análisis comparativo general. En las tablas 4.1 a 4.3 y en las Figuras 4.2 a 4.7 se muestran los resultados de dichos parámetros obtenidos del ensayo Marshall.

4.2.1.1 Resultados

Tabla 4.1 Resultados de estabilidad Marshall y flujo en el diseño referencial (0% de GCR)

DISEÑO	N° BRIQUETA	CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187			
		ESTABILIDAD (lbs)			Flujo
		FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA	1/100"
0 % Caucho	1	1,19	450	3981	13
	2	1,19	495	4378	13
	3	1,14	455	3856	14
	PROMEDIO			4072	13,3
	DES. ESTÁNDAR			272,56	0,58
	COEF. VARIACIÓN			6,69	4,33
	EXIGENCIAS			> 1800	8 - 14

Fuente: Autores



Figura 4.2 Variación de la estabilidad en el diseño referencial con 0% de GCR

Fuente: Autores



Figura 4.3 Variación del flujo en el diseño referencial con 0% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.2 Resultados de estabilidad Marshall y flujo con 0.75% de GCR

DISEÑO	N° BRIQUETA	CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187			
		ESTABILIDAD (lbs)			Flujo
		FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA	1/100"
0,75 % Caucho	1	1,09	356	3717	18
	2	1,09	360	3758	20
	3	1,09	324	3390	16
	PROMEDIO			3622	18,0
	DES. ESTÁNDAR			201,82	2,00
	COEF. VARIACIÓN			5,57	11,11
	EXIGENCIAS			> 1800	8 - 14

Fuente: Autores

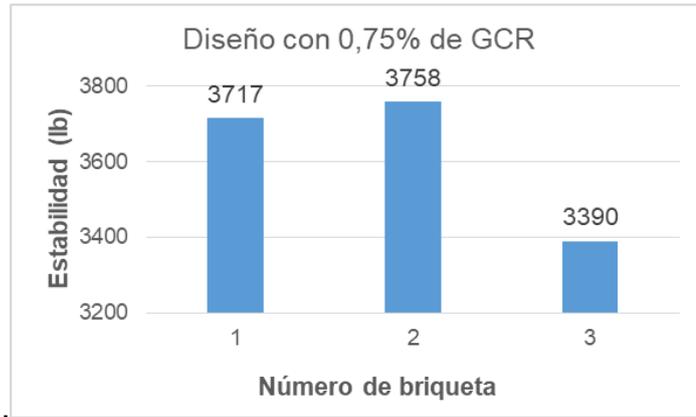


Figura 4.4 Variación de la estabilidad en el diseño con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

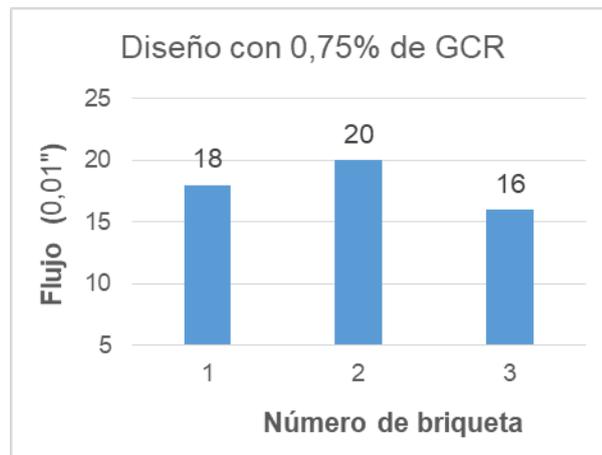


Figura 4.5 Variación del flujo en el diseño con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.3 Resultados de estabilidad Marshall y flujo con 1.5% de GCR

DISEÑO	N° BRIQUETA	CONSTANTE DE CALIBRACION Estab (libras) = (Lectura x 7,406613)+ 12,69187			
		ESTABILIDAD (lbs)			Flujo
		FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA	1/100"
1,5 % Caucho	1	1,09	310	2517	17
	2	1,09	315	2557	23
	3	1,04	295	2286	20
	PROMEDIO			2453	20,0
	DES. ESTÁNDAR			146,29	3,00
	COEF. VARIACIÓN			5,96	15,00
	EXIGENCIAS			> 1800	8 - 14

Fuente: Autores

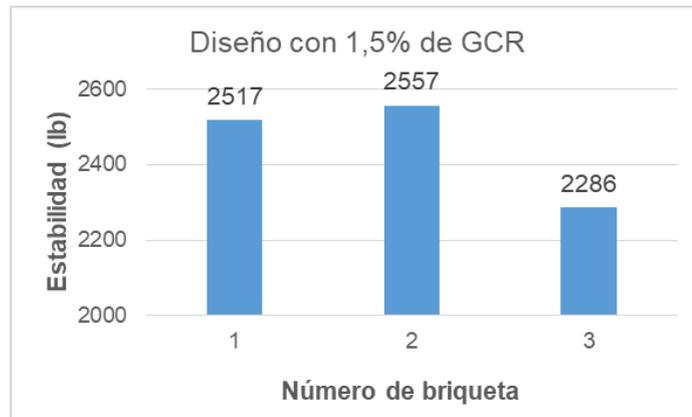


Figura 4.6 Variación de la estabilidad en el diseño con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

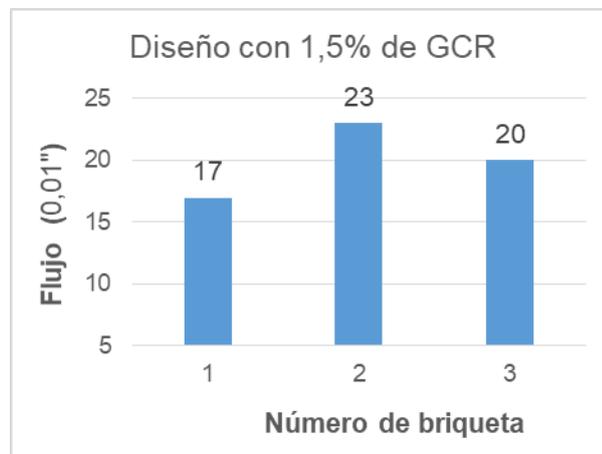


Figura 4.7 Variación del flujo en el diseño con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

En resumen, los resultados de estabilidad y flujo Marshall se detallan en las figuras 4.8 y 4.9 y en la Tabla 4.4, se incluye la variación de la estabilidad y flujo originada por la cantidad de caucho incorporado, tomando como punto de referencia para su comparación una mezcla asfáltica tradicional, es decir sin caucho.

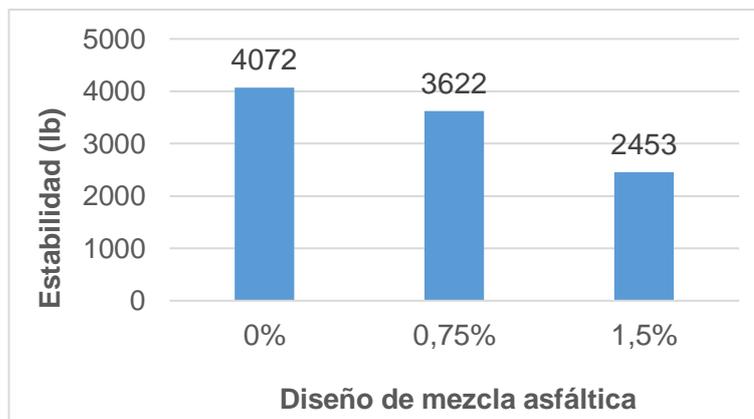


Figura 4.8 Resumen de resultados de ensayo de estabilidad

Fuente: Autores

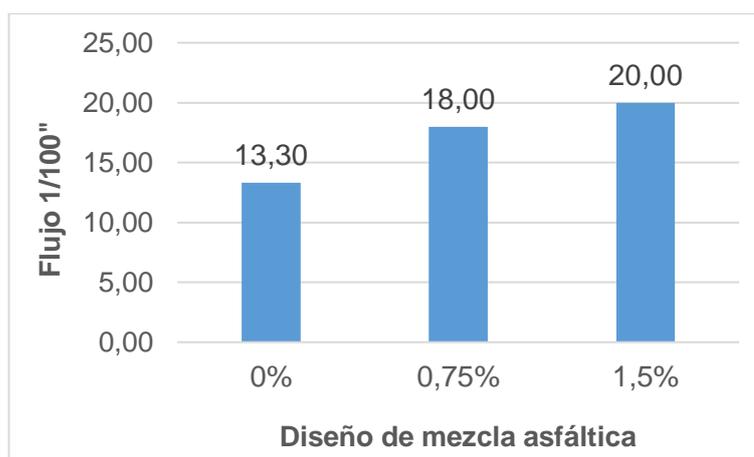


Figura 4.9 Resumen de resultados de ensayo de flujo

Fuente: Autores

Tabla 4.4 Efecto de GCR en estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas

Diseño de mezcla asfáltica	Estabilidad (lbs)	Flujo 1/100''	Disminución de estabilidad	Aumento del flujo
0%	4072	13,3	0%	0%
0,75%	3622	18	11%	35%
1,50%	2453	20	40%	50%

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 4.4 se puede decir que los tres diseños cumplen con el valor mínimo de estabilidad para tráfico pesado exigido por los criterios de diseño Marshall, de 1800 libras, en cambio

para los valores del flujo sólo la mezcla asfáltica sin caucho cumple con el rango de 0.08 a 0.14 pulgadas, los diseños con caucho excedieron el límite máximo de este criterio.

Se observa que las mezclas asfálticas modificadas por la vía seca reflejan valores menores de estabilidad (cohesión) con respecto a la mezcla asfáltica sin caucho, mientras la estabilidad sea menor la mezcla tendrá un comportamiento menos rígido. Por otro lado, el flujo crece cuando se incrementa la cantidad de caucho debido a que las deformaciones plásticas antes de la falla durante el ensayo Marshall fueron altas, esto se debe a la presencia del caucho, un polímero elastomérico. Es decir, que las mezclas con caucho son más elásticas por lo que en la prueba Marshall independientemente de la magnitud de la carga los valores del flujo serán mayores al aumentar el porcentaje de caucho.

Otra razón por la cual la estabilidad baja y el flujo aumenta puede atribuirse a los porcentajes óptimos de asfalto en los diseños con caucho, considerados como elevados (7.1% para el diseño con 0.75% de caucho y 8.1% para el diseño con 1.5% de caucho).

4.2.2 Evaluación de daño en agua por tracción indirecta

Para estimar la pérdida de resistencia por daño en agua por tracción indirecta se utilizó el TSR (Tensile Strength Ratio), con esta prueba se determina la pérdida de cohesión en las mezclas asfálticas originada por la acción del agua vinculada a la adherencia árido-ligante.

4.2.2.1 Procedimiento y cálculos

Según la norma ASTM D4867/D4867M-09, para realizar el ensayo, se confeccionan seis briquetas al 97% de su densidad relativa, es decir, con $7\pm 1\%$ de vacíos aproximadamente. Se separan las briquetas en dos grupos de tres, procurando que el porcentaje de vacíos promedio de ambos grupos sea muy parecido.

El primer grupo (sin inmersión) se coloca en un recipiente con agua a 25°C por 20 minutos antes de ser ensayadas en el equipo Marshall. El segundo grupo (con inmersión) se satura en un rango de 55%-80% con picnómetro y

bomba de vacíos y posteriormente se lleva a un baño María a 60°C por 24 horas. Ver Figura 4.10.



Figura 4.10 Briquetas en baño María

Cumplidas las 24 horas se colocan en otro recipiente con agua a 25°C por 1 hora antes de ser ensayadas en el Equipo Marshall a una velocidad constante de 2 pulgadas/ minuto (50 mm/minuto).



Figura 4.11 Tracción indirecta

Las cargas de rotura de ambos grupos deben registrarse para luego obtener los valores de resistencia a tracción indirecta con la expresión:

$$St = \frac{2 * P_{\text{máx}}}{\pi * t * d}$$

Donde:

St= resistencia a la rotura por tracción indirecta (kg/cm²)

P_{máx}= carga máxima o carga de rotura (kg)

t= espesor de la briqueta (cm)

d= diámetro de la briqueta (cm)

Después de calcular la resistencia a tracción indirecta, se calcula el porcentaje de resistencia retenida (TSR) con la siguiente fórmula:

$$TSR = 100 * \frac{St_{con\ inmersión}}{St_{sin\ inmersión}}$$

4.2.2.2 Exigencias

Las especificaciones generales del MTOP 001-F-2002, Sección 811 estipulan que el porcentaje de resistencia retenida de una mezcla asfáltica ante la acción del agua debe ser mayor al 80%.

4.2.2.3 Resultados

En las tablas 4.5 a 4.7 se presentan los porcentajes de resistencias retenidas obtenidos en cada diseño.

Tabla 4.5 Resultados de daño en agua en el diseño referencial (0% de GCR)

Mezcla	Muestra					Resistencia a compresión (MPa)			
		Diámetro (cm)	DEF (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)	Sin inmersión	Con inmersión	% Retenida	
0% Caucho	1	10,10	202,36	1948,70	8,7	1,08		75,1	
	2	10,10	212,60	2046,60	9,1	1,14			
	3	10,10	195,28	1881,05	8,4	1,04			
	PROMEDIO					1,09			
	4	10,10	143,31	1383,55	6,2		0,77		
	5	10,10	142,52	1375,99	6,1		0,76		
	6	10,10	171,65	1655,00	7,4		0,92		
	PROMEDIO						0,82		
EXIGENCIA								> 80%	

Fuente: Autores

Tabla 4.6 Resultados de daño en agua en el diseño con 0.75% de GCR

Mezcla	Muestra					Resistencia a compresión (MPa)			
		Diámetro (cm)	DEF (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)	Sin inmersión	Con inmersión	% Retenida	
0,75 % Caucho	1	10,10	156,69	1511,75	6,7	0,84		68,1	
	2	10,10	172,44	1662,50	7,4	0,92			
	3	10,10	163,78	1579,60	7,0	0,88			
	PROMEDIO					0,88			
	4	10,10	123,62	1194,90	5,3		0,66		
	5	10,10	111,02	1074,10	4,8		0,60		
	6	10,10	100,00	968,30	4,3		0,54		
	PROMEDIO						0,60		
EXIGENCIA								> 80%	

Fuente: Autores

Tabla 4.7 Resultados de daño en agua en el diseño con 1.5% de GCR

Mezcla	Muestra	Diámetro (cm)	DEF (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)	Resistencia a compresión (MPa)			
						Sin inmersión	Con inmersión	% Retenida	
1,5 % Caucho	1	10,10	144,88	1398,65	6,2	0,78		71,5	
	2	10,10	115,75	1119,39	5,0	0,62			
	3	10,10	123,62	1194,90	5,3	0,66			
	PROMEDIO						0,69		
	4	10,10	94,49	915,50	4,1		0,51		
	5	10,10	96,06	930,48	4,1		0,52		
	6	10,10	83,46	809,53	3,6		0,45		
PROMEDIO							0,49		
EXIGENCIA								> 80%	

Fuente: Autores

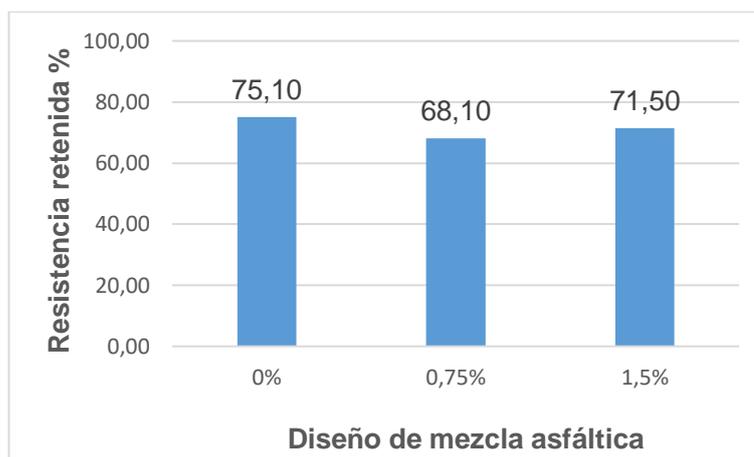


Figura 4.12 Resumen de resultados de ensayo de tracción indirecta

Fuente: Autores

En la Figura 4.12 se observa que los valores de porcentaje de resistencia retenida para todos los diseños de las mezclas asfálticas son menores que el valor mínimo aceptable por la normativa vigente en el Ecuador, es decir 80%, (MOP, 2002). Sin embargo, se puede destacar que el valor más alto de resistencia retenida corresponde al diseño sin caucho (75.10%), empleando un asfalto sin aditivos de adherencia. De utilizarse aditivos de adherencia, estas mezclas suelen estar alrededor del 85% de resistencia retenida. En las mezclas con caucho los porcentajes disminuyen, pero sin mantener una disminución progresiva con el incremento del caucho, dado que los porcentajes de asfalto también variaron significativamente. Usualmente una resistencia conservada mínima del 75% para mezclas con caucho es satisfactoria pero tal como se explica en la sección 2.5.5, la misma está

relacionada fuertemente con la temperatura y el tiempo a los cuales se realiza la digestión caucho-asfalto y al tamaño de partículas de caucho, que se consideran el punto más crítico en esta investigación, dado que se utilizó un producto de la industria local sin ajustes granulométricos. Este aspecto requiere estudios adicionales.

4.3 Pruebas de desempeño

Dentro de las pruebas de desempeño desarrolladas están la medición de módulo de rigidez, deformación permanente (Creep) y fatiga, también analizadas para los tres diseños respectivamente. Por cada ensayo se utilizó tres briquetas cilíndricas de tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara con $4 \pm 1\%$ de vacíos.

Las pruebas de desempeño fueron realizadas en el Laboratorio de Carreteras con el equipo Nottingham Asphalt Tester- NU 10 (NAT) bajo cargas dinámicas. El NAT es un equipo servo-neumático desarrollado por la compañía Cooper Research Tecnology Limited que posee un pistón (actuador) capaz de aplicar cargas de compresión, permitiendo la aplicación de pulsos y cargas de tipo sinusoidal, además de una cámara reguladora de temperatura. La fuerza aplicada se mide por el transductor de la celda de carga, así como los esfuerzos y las deformaciones producidas, cuyos valores se reflejan en distintos softwares instalados en una computadora enlazada al equipo que ayuda al procesamiento de la información.



Figura 4.13 Equipo NAT

4.3.1 Módulo de rigidez bajo deformación controlada

La medición del módulo de rigidez bajo deformación controlada se hace a través de ensayos a tracción indirecta con el NAT utilizando un cabezal de carga tipo Lottman, aplicando una carga sobre el diámetro vertical de la briqueta a ensayar, mientras el equipo mide los esfuerzos y deformaciones.

4.3.1.1 Procedimiento

Las briquetas se colocan dentro del NAT a 20°C durante 2 horas previo al ensayo, esta temperatura se mantiene constante durante el ensayo. Se emplea un nivel de deformación controlada de 5 micrones y cargas haversine cuyo intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima, es de 0.12 segundos.



Figura 4.14 Medición de módulo de rigidez con equipo NAT

4.3.1.2 Propuesta de exigencias

En base a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con el equipo NAT desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil y en fase de prueba por el MTOP, las mezclas asfálticas pueden calificarse según el módulo de rigidez de la siguiente manera:

- Mezclas asfálticas satisfactorias: Su módulo de rigidez está en el rango de 3000 a 4000 MPa.
- Mezclas asfálticas tolerables: Su módulo de rigidez está en rangos de 2500 a 3000 MPa ó 4000 a 5000 MPa.

- Mezclas asfálticas inadecuadas: Su módulo de rigidez es menor a 2500 MPa o mayor a 5000 MPa (Vila, 2017).

4.3.1.3 Resultados

Tabla 4.8 Resultados de módulo de rigidez en el diseño referencial (0% de GCR)

MUESTRAS CON 0% DE CAUCHO	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1	3685
2	3681
3	4075
PROMEDIO	3814
DES. ESTANDAR	226
COEF. VARIACIÓN	5,9

Fuente: Autores

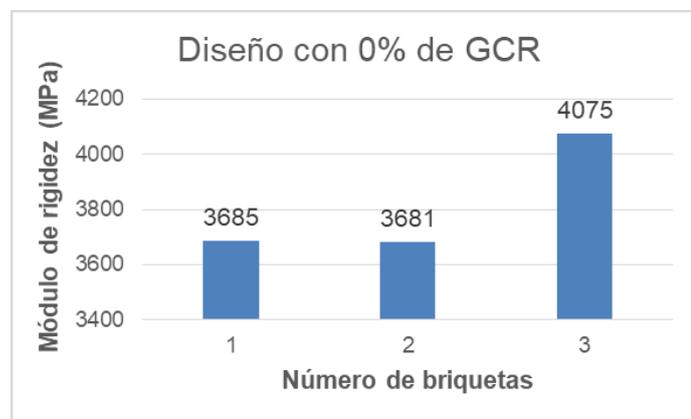


Figura 4.15 Variación del módulo de rigidez en el diseño referencial con 0% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.9 Resultados de módulo de rigidez del diseño con 0.75% de GCR

MUESTRAS CON 0,75% DE CAUCHO	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1	3661
2	3805
3	3517
PROMEDIO	3661
DES. ESTANDAR	144
COEF. VARIACIÓN	3,9

Fuente: Autores

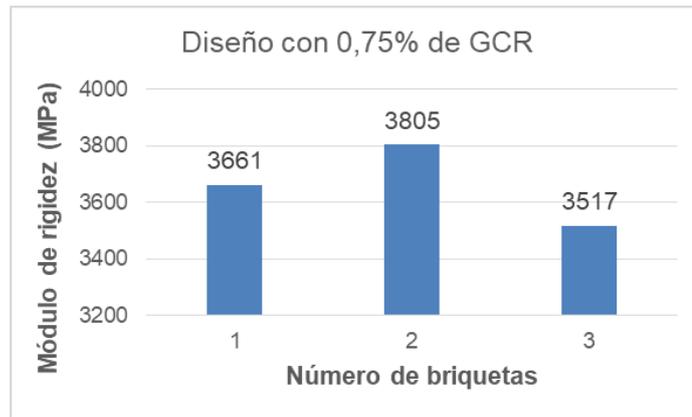


Figura 4.16 Variación del módulo de rigidez en el diseño con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.10 Resultados de módulo de rigidez del diseño con 1.5% de GCR

MUESTRAS CON 1,5% DE CAUCHO	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1	2680
2	2609
3	2751
PROMEDIO	2680
DES. ESTANDAR	71
COEF. VARIACIÓN	2,6

Fuente: Autores

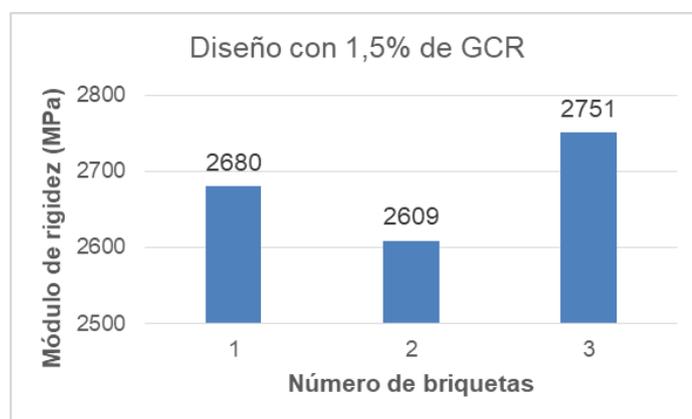


Figura 4.17 Variación del módulo de rigidez en el diseño con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

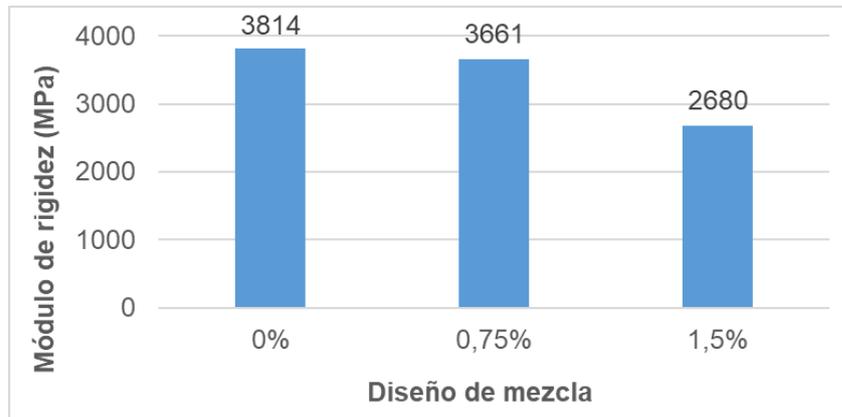


Figura 4.18 Resumen de resultados de medición de módulo de rigidez

Fuente: Autores

Tabla 4.11 Efecto de GCR en la rigidez

Diseño de mezcla asfáltica	Módulo de rigidez (MPa)	Disminución de módulo de rigidez
0%	3814	0
0,75%	3661	4%
1,50%	2680	30%

Fuente: Autores

De acuerdo a la propuesta de exigencia la mezcla asfáltica sin caucho y la que contiene 0.75% de caucho fueron calificadas como satisfactorias, mientras que la que contiene 1.5% de caucho calificó como tolerable.

En la Tabla 4.11 y Figura 4.18 puede notarse un decremento de la rigidez en los diseños de las mezclas asfálticas modificadas en comparación al diseño de mezcla asfáltica tradicional. Esta disminución es proporcional al aumento del porcentaje de caucho, mientras más caucho se adicione a la mezcla disminuye más el módulo de rigidez, según el patrón identificado.

Sin embargo, es recomendable complementar este ensayo con otro que determine la resistencia a la fatiga en las mezclas diseñadas. Los valores de módulo de rigidez bajos también podrían indicar susceptibilidad al ahuellamiento, pero este fenómeno también debe ser comprobado con ensayos de Creep.

4.3.2 Deformación permanente bajo compresión cíclica (Creep)

Esta evaluación consiste en determinar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas sometidas a cargas de compresión uniaxial cíclicas y se realiza para valorar el comportamiento ante las deformaciones plásticas.

4.3.2.1 Procedimiento

Se ensayan tres briquetas cuyo porcentaje de vacíos sea de $4 \pm 1\%$, con el equipo NAT a una temperatura de 40°C , induciendo 3600 repeticiones de carga de 100 kPa y midiendo las deformaciones producidas por este ciclo de carga que consiste en aplicar un esfuerzo durante 1 segundo seguido por 1 segundo de detención.



Figura 4.19 Ensayo Creep con equipo NAT

4.3.2.2 Propuesta de exigencia

De acuerdo con la propuesta de exigencia en fase de prueba por el MTOP, bajo las condiciones de ensayo mencionadas en la Sección 4.3.2.1, (Vila, 2017), se establece:

- Mezclas satisfactorias: $\leq 1\%$ de deformación
- Mezclas inadecuadas: $> 1\%$ de deformación

Lo que significa que mientras las deformaciones permanentes no sean mayores a 1%, se considerará que la mezcla se comportará de forma satisfactoria ante las deformaciones plásticas.

4.3.2.3 Resultados

Tabla 4.12 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño referencial con 0% de GCR

MUESTRAS CON 0% DE CAUCHO	CREEP DINÁMICO (%)
1	0,971
2	1,014
3	0,899
PROMEDIO	0,96
DES. ESTANDAR	0,058
COEF. VARIACIÓN	6,0

Fuente: Autores



Figura 4.20 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño referencial con 0% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.13 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 0.75% de GCR

MUESTRAS CON 0% DE CAUCHO	CREEP DINÁMICO (%)
1	1,508
2	2,117
3	2,779
PROMEDIO	2,13
DES. ESTANDAR	0,636
COEF. VARIACIÓN	29,8

Fuente: Autores



Figura 4.21 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.14 Resultados de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 1.5% de GCR

MUESTRAS CON 1,5% DE CAUCHO	CREEP DINÁMICO (%)
1	4,129
2	3,981
3	3,055
PROMEDIO	3,72
DES. ESTANDAR	0,582
COEF. VARIACIÓN	15,6

Fuente: Autores

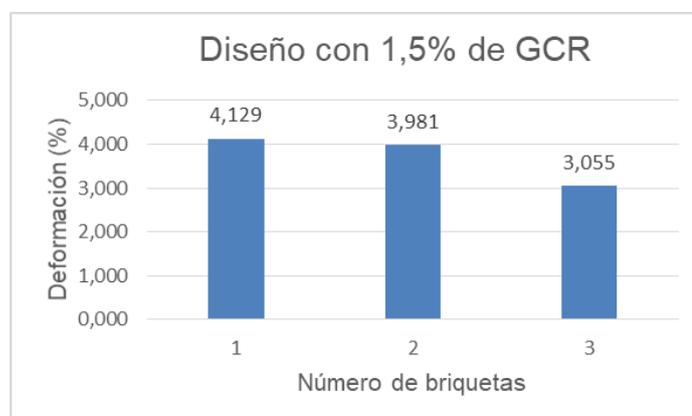


Figura 4.22 Variación de la deformación permanente (Creep) en el diseño con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

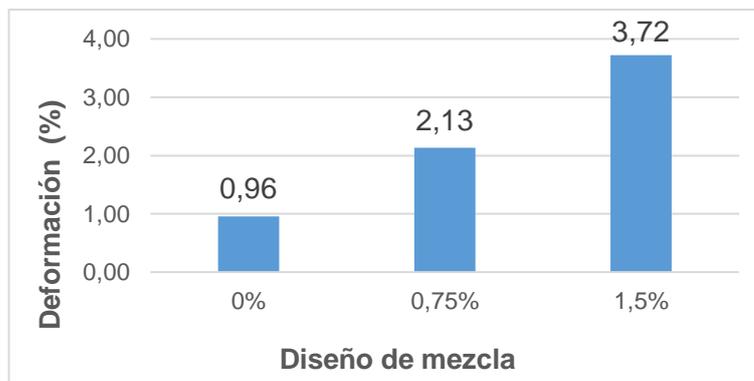


Figura 4.23 Resumen de resultados de deformación obtenidos del ensayo creep

Fuente: Autores

Tabla 4.15 Efecto de GCR en el ahuellamiento

Diseño de mezcla asfáltica	Deformación (%)	Incremento de deformación
0%	0,96	0
0,75%	2,13	122%
1,50%	3,72	288%

Fuente: Autores

De acuerdo a los valores presentados en la Tabla 4.16 y a las exigencias propuestas, solamente el diseño sin caucho tendría un buen comportamiento ante el ahuellamiento por presentar una deformación del 0.96% a una determinada temperatura y ciclo de carga especificados en el procedimiento del ensayo.

Los diseños con 0.75 y 1.5% aseguran un mal comportamiento a las deformaciones por presentar valores excedentes del 2%, por lo que puede decirse que mientras más cantidad de caucho se añada a la mezcla esta será más susceptible a las deformaciones plásticas.

4.3.3 Ensayo de fatiga

Para realizar este ensayo es necesario determinar en primer lugar el módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado (MEC) de tres briquetas que cumplan con el porcentaje de vacíos de $4 \pm 1\%$, este se obtiene con un procedimiento y

cabezal igual al que se utiliza para obtener el módulo de rigidez bajo deformación controlada, la diferencia es que para este caso se impondrá una carga diferente a cada briqueta según convenga y no una deformación, por medio del software en la computadora enlazada al equipo, comúnmente se aplican cargas entre 100 y 500 kPa.



Figura 4.24 Procesamiento de datos

4.2.3.1 Procedimiento y cálculos

El ensayo de fatiga se hace con la misma carga con que se obtuvo el MEC de cada briqueta, colocándose en el NAT a 20°C. La carga aplicada determina el número de pulsos necesarios para que la briqueta falle por agrietamiento. Si esta falla no ocurre, se considerarán el número de pulsos requeridos para que la briqueta sufra una deformación vertical máxima de 5mm (Las salidas de los resultados de los módulos de rigideces bajo esfuerzo, deformación controlada y fatiga se muestran en los anexos del documento).



Figura 4.25 Ensayo de fatiga

Conociendo el módulo de rigidez (S_m) a un determinado esfuerzo controlado (σ), el coeficiente de Poisson (μ) de 0.35, se calcula la deformación unitaria por tracción inicial (ϵ), de acuerdo a la expresión:

$$\epsilon = \frac{\sigma(kPa) * (1 + 3\mu)}{S_m(kPa)}$$

Los valores de " ϵ " se expresan en $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$.

Con los datos obtenidos y calculados se realizan gráficas donde el eje "x" representa las deformaciones en $\mu\text{m}/\text{m}$ y el eje "y" el número de repeticiones como se muestra en las figuras 4.26 a 4.28.

4.2.3.2 Propuesta de exigencia

De acuerdo a los criterios propuestos por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG para pruebas de desempeño con equipo NAT, con las gráficas obtenidas (figuras 4.26 - 4.28) se califica el comportamiento que tendrá la mezcla asfáltica ante los ciclos de carga y descarga (fatiga) de la siguiente manera:

- Satisfactorio: Se encuentra por encima de la línea promedio.
- Tolerable: Si la curva azul está entre la línea promedio y percentil 15.
- Inadecuado: Si la curva azul está por debajo de la línea percentil 15.

4.2.3.3 Resultados

Tabla 4.16 Resultados de fatiga en el diseño referencial con 0% de GCR

ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN $\mu\text{m}/\text{m}$	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250			
300	19101	177	3473
350	10491	224	3206
400			
450	1701	425	2169
500			

Fuente: Autores

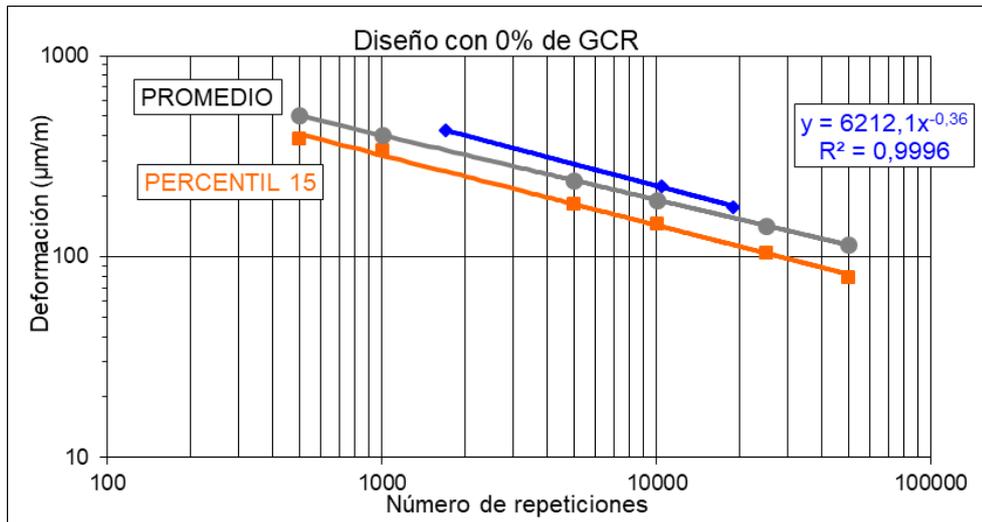


Figura 4.26 Variación de la fatiga en el diseño con 0% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.17 Resultados de fatiga en el diseño con 0.75% de GCR

ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN µm/m	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250			
300			
350	6991	263	2729
400	2661	338	2429
450	1191	399	2310
500			

Fuente: Autores

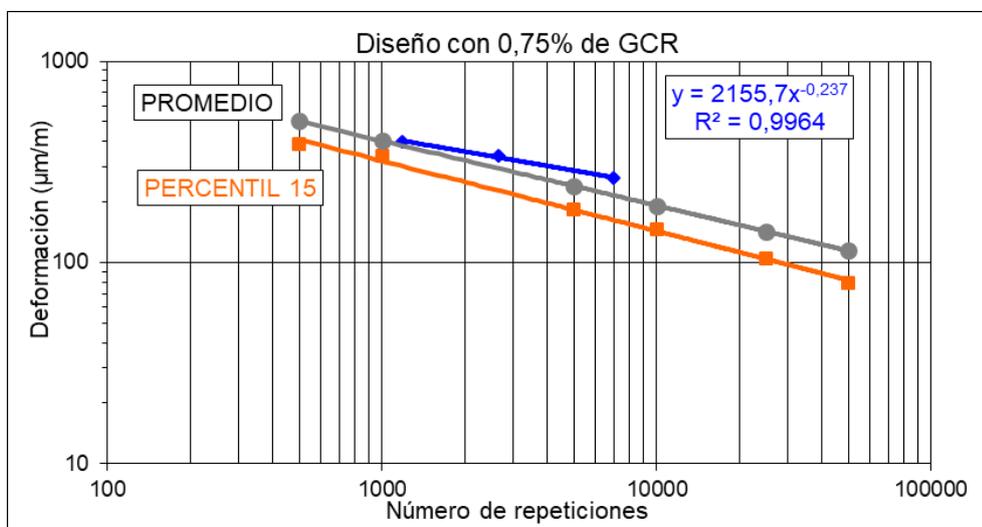


Figura 4.27 Variación de la fatiga en el diseño con 0.75% de GCR

Fuente: Autores

Tabla 4.18 Resultados de fatiga del diseño con 1.5% de GCR

ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN $\mu\text{m/m}$	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250			
300	6161	304	2023
350	2331	402	1783
400	941	518	1584
450			
500			

Fuente: Autores

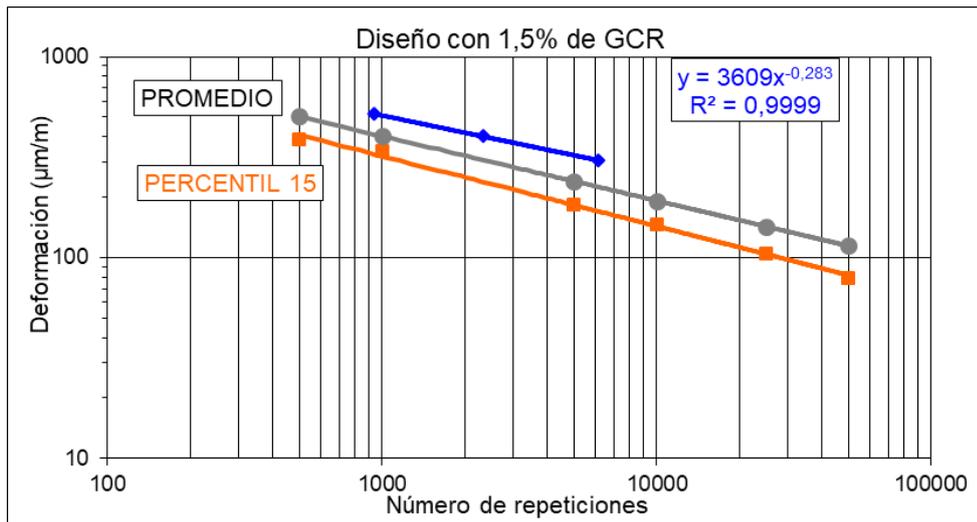


Figura 4.28 Variación de la fatiga en el diseño con 1.5% de GCR

Fuente: Autores

Analizando los resultados de los ensayos de fatiga y de acuerdo a la propuesta de exigencia, se determinó que la mezcla asfáltica elaborada sin caucho tuvo un comportamiento satisfactorio ante la fatiga y también los diseños de mezclas asfálticas modificadas con caucho.

La mezcla que presenta un mejor comportamiento ante los ciclos de carga y descarga de los tres diseños, es la que contiene 1.5% de caucho, donde también se empleó contenido de asfalto más grande al 8,1%.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. Los valores de estabilidad de los diseños de mezclas asfálticas con caucho y sin caucho cumplen con el valor mínimo para carreteras de tráfico pesado, de 1800 libras, aunque presentan un patrón de disminución conforme se incrementa el porcentaje de caucho en la mezcla asfáltica. En la medida que la estabilidad sea menor la mezcla asfáltica tenderá a ser menos rígida, no obstante, el valor mínimo debe ser respetado. Con respecto al flujo, sus valores en mezclas modificadas con elastómeros no deben ser considerados, ya que en el proceso de aplicación de la carga podrán presentarse mayores deformaciones.
2. De la evaluación de daño en agua se determinó que los tres diseños presentan valores de porcentaje de resistencia retenida menores al 80% establecido por la norma vigente en el Ecuador para mezclas convencionales, aunque el asfalto empleado en todos los casos no tuvo aditivos de adherencia, algo que en la práctica es de uso común. Por otra parte, en mezclas con caucho la resistencia retenida límite usual es del 75%, lo que, si bien no se cumplió, se considera posible de alcanzar empleando aditivos de adherencia y tiempos y temperaturas más convenientes para la digestión, aspecto que necesita ser investigado con más profundidad.
3. Según el módulo de rigidez, la mezcla asfáltica sin caucho y la que contiene 0.75% caucho calificaron como satisfactorias por presentar módulos entre 3000 y 4000 MPa, mientras que la mezcla asfáltica con 1.5% de caucho está en el rango de tolerables. Se notó una disminución de rigidez en las mezclas proporcional al aumento del contenido del caucho.

4. En lo referente a las deformaciones plásticas o ahuellamiento, el diseño sin caucho tendrá un buen comportamiento ante este fenómeno, sin embargo, las mezclas asfálticas modificadas con caucho presentan resultados superiores a 1%, por lo que no reflejaron un buen comportamiento.
5. De los ensayos de fatiga se concluyó que los tres diseños de mezclas asfálticas tienen un comportamiento satisfactorio ante los ciclos de carga y descarga, de acuerdo a la ubicación de la recta ajustada. Sin embargo, llama la atención que la pendiente de estas rectas (leyes de fatiga) en el caso de emplearse caucho tienen menos pendiente, lo que implicará un mejor comportamiento.
6. Los porcentajes de GCR empleados en general fueron altos, dado que, por ejemplo, el 0.75% de GCR por vía seca hubiese sido equivalente a un 10% aproximadamente por vía húmeda. Sin embargo, para 0.75% las propiedades evaluadas no difieren mucho de la mezcla sin caucho, con la excepción de la deformación creep, que sin duda constituye el mayor problema. Bajo estas condiciones y pese a lo preliminar de esta investigación, pudiera pensarse con los afinamientos ya mencionados, en el empleo de estas mezclas como capas para control de fisuras en espesores delgados y capas superficiales en vías de poco tráfico, como calles de tierra en zonas urbanas, también con espesores pequeños donde el impacto del ahuellamiento sería muy reducido.

5.2 Recomendaciones

1. En base a los estudios realizados es recomendable no añadir porcentajes de GCR mayores a 0.75%, ya que con el diseño modificado con 1.5% de caucho las propiedades de las mezclas asfálticas como estabilidad, módulo de rigidez y resistencia a las deformaciones plásticas empeoraron.
2. Es importante que se incentive la investigación sobre este método de adición de GCR a las mezclas asfálticas (vía seca) a nivel nacional,

para desarrollar y adecuar estas técnicas que a nivel internacional son comúnmente aplicadas generando buenos resultados en la industria de la construcción. Se sugiere como aspectos de gran interés la optimización de los tiempos y temperaturas de digestión, así como la valoración de otros tipos de granulometrías como las discontinuas y las abiertas.

3. Se recomienda aprovechar este material de reciclaje (GCR) que podría ofrecer vías más durables, rehabilitaciones menos costosas, reducción de presencia de fisuras en las infraestructuras viales y sobre todo aportar con la mitigación de los impactos ambientales que genera la acumulación de neumáticos en todo el país. Esto sin dudas amerita más investigaciones.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS

- Abugattas, M. (2010). Determinación de carga y diseño básico de equipos principales de una planta industrial para la oxidación de asfaltos en refinería Conchán. *Tesis de pregrado*. Univesidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Alarcón et al. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*.
- Alarcón, H., Alonso, S., Gómez, J., Delgado, H., & Garnica, P. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Recuperado el 2019, de IMT: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt mix design Methods (7 ma ed.)*. Volumetric Properties of compacted Paving Mixtures.
- Berenguer, J., Cuenca, A., Griñan, E., & Verdú, F. (2009). Comunciación 31: Utilización de polvo de caucho NFU aportado por vía seca para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para capas de base antifisuras.
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). *Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Carrasco, S., & Espinosa, P. (2014). Utilización del polvo de llanta en mezclas asfálticas en frío como alternativa de. *Tesis de pregrado*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Carión, H., & Velásquez, W. (2016). Evaluación de la adherencia en el sistema-asfalto agregado mineral mediante una prueba de corte directo. *Tesis de pregrado*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Castro, G. (2008). *Materiales y compuestos para la industria del neumático*. Recuperado el 2019, de campus.fi.uba.ar: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf
- Castro, L., & Diaz, C. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (gcr) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. *Tesis de Pregrado*. Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Contreras, K., & Delgado, A. (2017). Análisis costo-beneficio basado en el ciclo de vida útil de mezclas de asfalto modificado con polvo de

- caucho en la capa de rodadura. *Tesis de Grado*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- Cooper Research Technology Limited. (2002). *NU-10 & NU-5 Operation & Maintenance Manual*. United Kingdom.
- Dias, F., Santos, P., & Capitaio, S. (2014). *Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network* (Vol. 73).
- Gallego, J. (2012). Ventajas de los asfaltos con caucho de neumáticos. *Ejemplos de obras en España con distintas tecnologías*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Gallego, J., & Prieto, J. (2004). *Tipos de mezclas asfálticas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia Española*. Recuperado el Mayo de 2019, de CRP: http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos_34.pdf
- García, W. (2013). Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente. *Tesis de maestría*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Gordillo, C., Carvajal, P., Fonseca, C., & Villalobos, D. (2015). *Experiencias en Ecuador de prueba piloto de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho*. Ministerio de Transporte de Obras Públicas, Ecuador.
- Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). *Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared With Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime*. Construction and Building Materials.
- Hernández, H., Molina, R., & Reyes, C. (2007). *Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos*. San Miguel.
- Hidalgo, A., & Riera, J. (2016). Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos. *Tesis de Pregrado*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Icaza, K., & Mera, W. (2018). Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas. *Tesis de pregrado*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (Clasificación por viscosidad)*. Quito: Enmienda 1.
- Laica, J. (2016). Influencia de la inclusión de polímero reciclado (caucho) en las propiedades mecánicas de una subbase. *Tesis de pregrado*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato.

- Minaya, S., & Ordoñez, A. (2006). Diseño moderno de pavimentos asfálticos. (*Tesis doctoral*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Ministerio de Obras públicas. (2002). *Especificaciones técnicas para la construcción de carreteras y puentes*. Quito: MOP-001-F2002.
- Ministerio de Transporte y Obras públicas. (2002). *Especificaciones técnicas para la construcción de carreteras y puentes*. Quito: MOP-001-F2002.
- MOP, M. d. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Quito.
- Navarro, N. (2013). Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. *Tesis de grado*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Padilla, A. (2004). *Capítulo 2: Materiales básicos*. Recuperado el 2019, de upcommons:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-13.pdf?sequence=13&isAllowed=y>
- Padilla, A. (2004). *Capítulo 3: Mezclas asfálticas*. Obtenido de Upcommons:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>
- Pinargote, K., & Ramos, K. (2018). Control de calidad a cementos asfálticos producidos en la refinería de esmeraldas durante el 2018. *Tesis de pregrado*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil.
- Universidad de las Américas de Puebla. (2007). *Capítulo 1: El asfalto*. Recuperado el 2019, de Catarina.udlap:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/de_l_a/capitulo1.pdf
- Universidad de Piura. (2006). *Capítulo IV: Diseño de mezclas asfálticas*. Recuperado el 2019, de UDEP:
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2004). *Capítulo 3: Mezclas asfálticas*. Recuperado el 2019, de Upcommons:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2006). *Capítulo 2: Las mezclas bituminosas*. Recuperado el 2019, de upcommons:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Velar, J. (1997). *Characterization of Hot Mix Asphalt Using Crumb Rubber*. University of Puerto Rico, Puerto Rico.

- Vila Romani, R. (14 de Noviembre de 2018). Asignatura de Pavimentos. *Agregados minerales para mezclas asfálticas*. Ecuador.
- Vila, R. (2017). Cementos asfálticos. Generalidades. Caracterización química, física y reológica. *Conferencia*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad Católica Santiado de Guayaquil.
- Vila, R. (2017). *Estudios y propuestas sobre la calidad de los asfaltos y de las mezclas bituminosas en el Ecuador*. Guayaquil: Dirección de publicaciones de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

CAPÍTULO VII

7. ANEXOS

Anexo 7.1 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 0% de GCR

A: Peso del picnómetro + agua	6620,4		
B: Peso del picnómetro + agua + mezcla	7234,6		
C: Peso de la muestra	1000	RICE	2,592

Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
0%DECAUCHO						
1	1154,7	689,3	1154,9	465,6	2,480	4,3
2	1165,1	695,5	1165,5	470,00	2,479	4,4
3	1152,3	688,1	1152,6	464,5	2,481	4,3
4	1155,6	686,5	1155,9	469,4	2,462	5,0
5	1155,5	687,7	1155,7	468,0	2,469	4,7
6	1165,4	693,2	1165,8	472,6	2,466	4,9
7	1173,3	700,9	1173,5	472,6	2,483	4,2
8	1174,1	700,3	1174,5	474,2	2,476	4,5
9	1171	695,5	1171,5	476	2,460	5,1
10	1160	689,3	1154,9	465,6	2,491	3,9
11	1170,6	694,2	1170,9	476,7	2,456	5,3
12	1172,4	697,4	1172,4	475	2,468	4,8
%vacíos prom					2,473	4,61
DES. ESTANDAR					0,01	0,41
COEF. VARIACIÓN					0,00	8,97

Briquetas para daño en agua - 0%GCR
Ensayo T.I

16	6,7	6,7	11
15	6,5	7	8
7	7,5	7	2
	6,90	6,90	

Briquetas para daño en agua - 0%GCR						
Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
2	1165,1	682,9	1166	483,1	2,41	7,0
7	1165,5	680	1166,3	486,3	2,40	7,5
8	1168	684,6	1169,1	484,5	2,41	7,0
11	1160,1	681,2	1160,9	479,70	2,42	6,7
15	1156,7	680,2	1157,5	477,30	2,42	6,5
16	1164,8	683,9	1165,4	481,50	2,42	6,7
PROMEDIO					2,41	6,89
DESV. ESTAD.					0,01	0,37
COEF. VAR.					0,39	5,30

Anexo 7.2 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.75% de GCR

A: Peso del picnómetro + agua	6620,4		
B: Peso del picnómetro + agua + mezcla	7220		
C: Peso de la muestra	1000	RICE	2,498

Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
0,75%DECAUCHO						
1	1167,7	682,8	1168,7	485,9	2,403	3,8
2	1160,6	677,7	1160,9	483,20	2,402	3,8
3	1166,9	683,3	1167,3	484	2,411	3,5
4	1156,9	674,9	1157,8	482,9	2,396	4,1
5	1173,2	688,3	1173,7	485,4	2,417	3,2
6	1169,6	682	1170,4	488,4	2,395	4,1
7	1170	686,2	1170,3	484,1	2,417	3,2
8	1169,5	682,7	1170,2	487,5	2,399	3,9
9	1162,3	680,1	1162,9	482,8	2,407	3,6
10	1156,9	674,9	1157,8	482,9	2,396	4,1
11	1173,2	688,3	1173,7	485,4	2,417	3,2
13	1169,9	680,6	1170,4	489,8	2,389	4,4
%vacíos prom					2,404	3,74
DES. ESTANDAR					0,01	0,39
COEF. VARIACIÓN					0,00	10,55

Briquetas para daño en agua - 0,75% GCR
Ensayo T.I

1	7	6,9				4
2	7	7				5
3	6,7	6,7				6
	6,90	6,87				

Briquetas para daño en agua - 0,75%GCR						
Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
1	1170,3	669,1	1172,7	503,6	2,32	7,0
2	1158,3	659,8	1158,6	498,80	2,32	7,0
3	1172,1	671,5	1174,5	503	2,33	6,7
4	1129,8	645,6	1131,7	486,1	2,32	6,9
5	1166,5	665,3	1167,6	502,30	2,32	7,0
6	1168,4	667,6	1169,1	501,50	2,33	6,7
PROMEDIO					2,33	6,89
DESV. ESTAD.					0,00	0,15
COEF. VAR.					0,16	2,12

Anexo 7.3 Cálculos para obtener densidades y porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.5% de GCR

A: Peso del picnómetro + agua 6620,4
 B: Peso del picnómetro + agua + mezcla 7210,5
 C: Peso de la muestra 1000 RICE 2,440

Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
1,5%DECAUCHO						
1	1154,4	657,8	1155,1	497,3	2,321	4,9
2	1158,6	659,4	1159,7	500,30	2,316	5,1
3	1167,2	664,1	1168	503,9	2,316	5,1
4	1157,9	662,3	1158,5	496,2	2,334	4,4
5	1162	664,2	1162,7	498,5	2,331	4,5
6	1159,5	658,2	1161,1	502,9	2,306	5,5
7	1169,1	670,4	1169,5	499,1	2,342	4,0
8	1158,4	660,2	1159,1	498,9	2,322	4,8
9	1153,3	656,5	1153,7	497,2	2,320	4,9
10	1157,1	663,5	1157,8	494,3	2,341	4,1
11	1159,5	658,2	1160,1	501,9	2,310	5,3
12	1169,1	663,3	1170	506,7	2,307	5,4
%vacíos prom					2,322	4,83
DES. ESTANDAR					0,01	0,51
COEF.VARIACIÓN					0,01	10,51

Briquetas para daño en agua - 1,5% GCR
 Ensayo T.I

2	8,1	7,5	4
6	6,4	7,1	5
1	7,3	7,9	6,1
	7,30	7,50	

Briquetas para daño en agua - 1,5%GCR						
Briquetas	P. Seco	P. Agua	P. SSS	Volumen	Densidad	%Vacíos
1	1156,9	647,3	1158,8	511,5	2,26	7,3
2	1150,1	638,3	1151,4	513,1	2,24	8,1
6	1161,1	654,3	1162,7	508,4	2,28	6,4
4	1164,5	649,5	1165,5	516,00	2,26	7,5
5	1163	651,8	1165	513,20	2,27	7,1
6,1	1170	650,4	1171	520,60	2,25	7,9
PROMEDIO					2,26	7,39
DESV. ESTAD.					0,01	0,61
COEF. VAR.					0,66	8,30

Anexo 7.4 Cálculos obtenidos de los ensayos realizados para las características de los agregados minerales

ENSAYO DE DESGASTE CON SULFATO DE SODIO

=====

PROYECTO : CALIFICACION MATERIALES

CANTERA : LA GERMANIA

ASTM C131-C88

UTILIDAD: MEZCLAS ASFALTICAS

NORMA INEN 863

Fecha: 15-06-2019

OPERADOR:

CMA

PROFUND.

0,00 m.

=====

A: DATOS DEL ENSAYO EN AGREGADO FINO

TAMIZ # PASA	RET	MASA INICIAL	MASA FINAL	PERDIDA PARCIAL	GRANUL. % MUESTRA	DESGASTE TOTAL
# 30	# 50	100,00	98,80	1,20	20,0%	0,24
# 16	# 30	100,00	99,00	1,00	20,0%	0,20
# 8	# 16	100,00	99,20	0,80	20,0%	0,16
# 4	# 8	100,00	98,30	1,70	20,0%	0,34
3/8"	# 4	100,00	98,60	1,40	20,0%	0,28
SUMAN:		500,00	493,90			
% DE DESGASTE DEL AGREGADO FINO =						1,22

B: DATOS DEL ENSAYO EN AGREGADO GRUESO

TAMIZ # PASA	RET	MASA INICIAL	MASA FINAL	PERDIDA PARCIAL	GRANUL. % MUESTRA	DESGASTE TOTAL
3/8"	# 4	300,00	290,00	3,33	5,2%	0,17
1/2"	3/8"	330,00				
3/4"	1/2"	670,00				
3/4"	3/8"	1.000,00	990,00	1,00	17,2%	0,17
1"	3/4"	500,00				
1 1/2"	1"	1.000,00				
1 1/2"	3/4"	1.500,00	1.486,00	0,93	25,9%	0,24
2"	1 1/2"	1.500,00				
2 1/2"	2"	1.500,00				
2 1/2"	1 1/2"	3.000,00	2.970,00	1,00	51,7%	0,52
SUMAN:		5.800,00	5.736,00		100,0%	
% DE DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO =						1,10

ENSAYO DE ABRASIÓN

PROYECTO : CALIFICACION MATERIALES

CANTERA : LA GERMANIA

ASTM C535

UTILIDAD: MEZCLAS ASFALTICAS

NORMAS INEN 860 Y 861

Fecha: 15-06-2019

CM.

PROFUND.: 0,00 m.

1.- ENSAYO DE ABRASION LOS ANGELES

TIPO	MASA IN. gr	MASA FINAL gr	% ABRASION
A	5.000,00	4.115,00	17,70%
ESPECIF.: < 50		SI CUMPLE	

2.- MATERIA ORGANICA

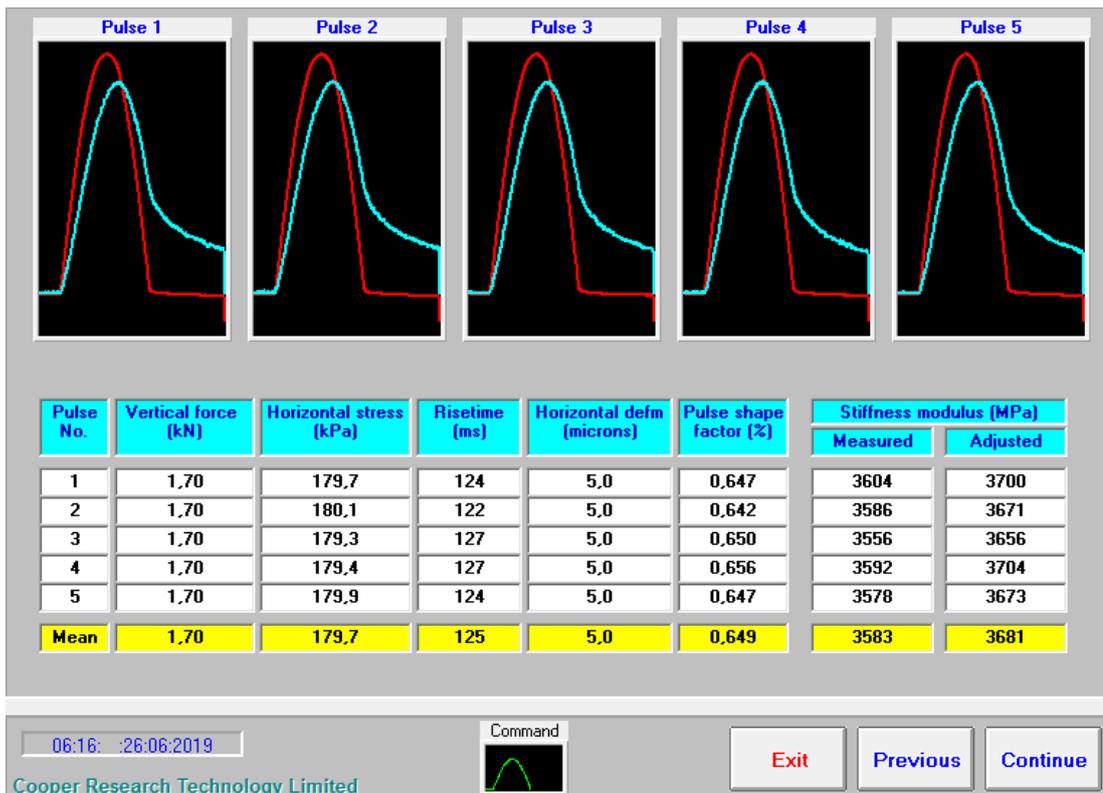
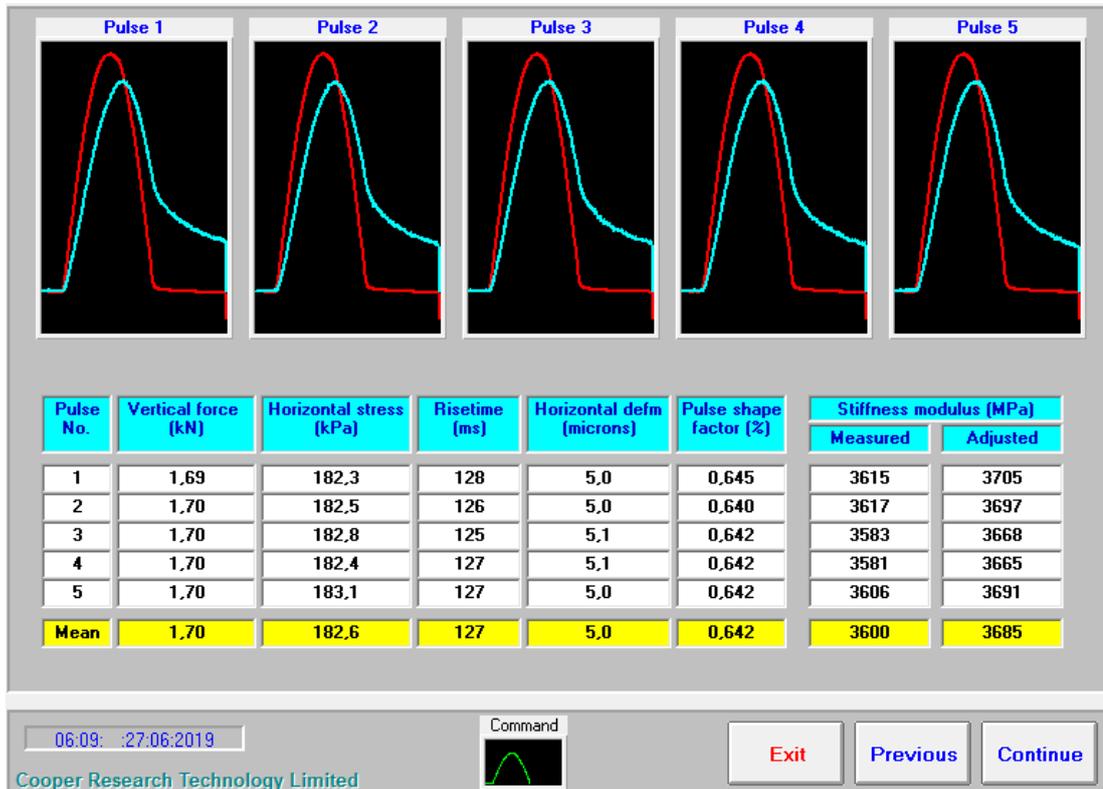
DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE MATERIALES DELETEREOS						
NORMA ASTM C 142 - INEN 698 - AASTHO T112						
TAMZ		PESO ANTES ENSAYO gr.	GRADUACION MUESTRA	PESO DESPUES ENSAYO gr.	%DELETEREOS DE LA FRACCION	%DELETEREOS TOTAL
PASA	RETIENE					
SERIE FINA						
4,75 mm(No.4)	1,18 MM (No16)	100,00		99,80		0,20
SERIE GRUESA						
Mayores de 37,5 mm(1 1/2")						
37,5 mm (1 1/2")	19 mm (3/4")					
19 mm (3/4")	9,5 mm (3/8")	2000,00	66,67	2000,00	0,00	0,00
9,5 mm (3/8")	4,75 mm No.4	1000,00	33,33	1000,00	0,00	0,00
TOTAL		3000,00				0,00
ESPECIFICADO						<1

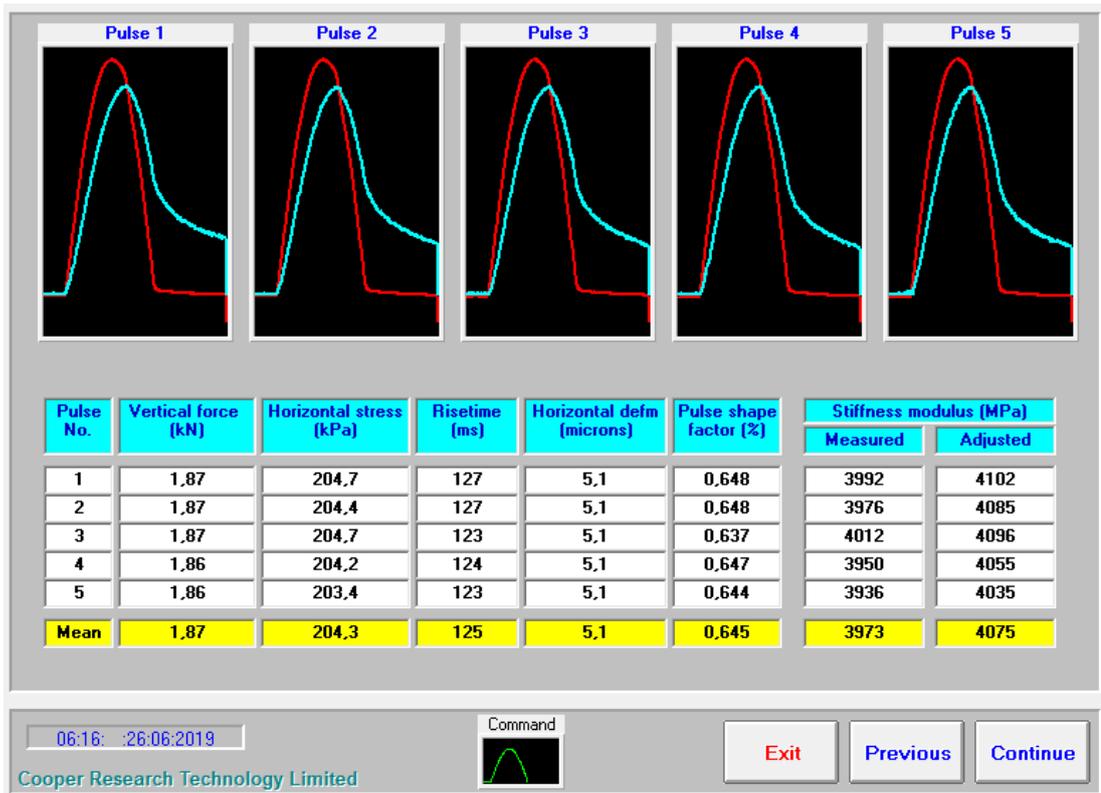
DETERMINACION DEL INDICE DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS						
NORMA ASTM D 4791						
AGREGADOS OBTENIDOS STOCK CANTERA						
TAMIZ		PESO ANTES ENSAYO gr.	PESO DE PARTICULAS PLANAS gr.	PESO DESPUES ENSAYO gr.	%DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	%DE PARTICULAS PLANAS DE LA FRACCION
PASA	RETIENE					
19 mm (3/4")	12,2 mm (1/2")	2000,00	154,00	1846,00	7,70	5,13
12,2 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	1000,00	77,00	923,00	7,70	2,57
		3000,00		PARTICULA PLANAS		7,70

DETERMINACION DE LA ANGULARIDAD EN AGREGADO GRUESO				
NORMA ASTM D5821				
TAMIZ	ENSAYO No.	PESO TOTAL AGREGADO gr.	PESO AGREGADO + DE DOS CARAS FRACTURADAS gr.	% DE CARAS FRACTURADAS
PASA/RETIENE				
76,2 mm (3")	1	3000	3000,0	100,0
4,75 mm (No.4)	2	3000	3000,0	100,0
			PROMEDIO	100,00

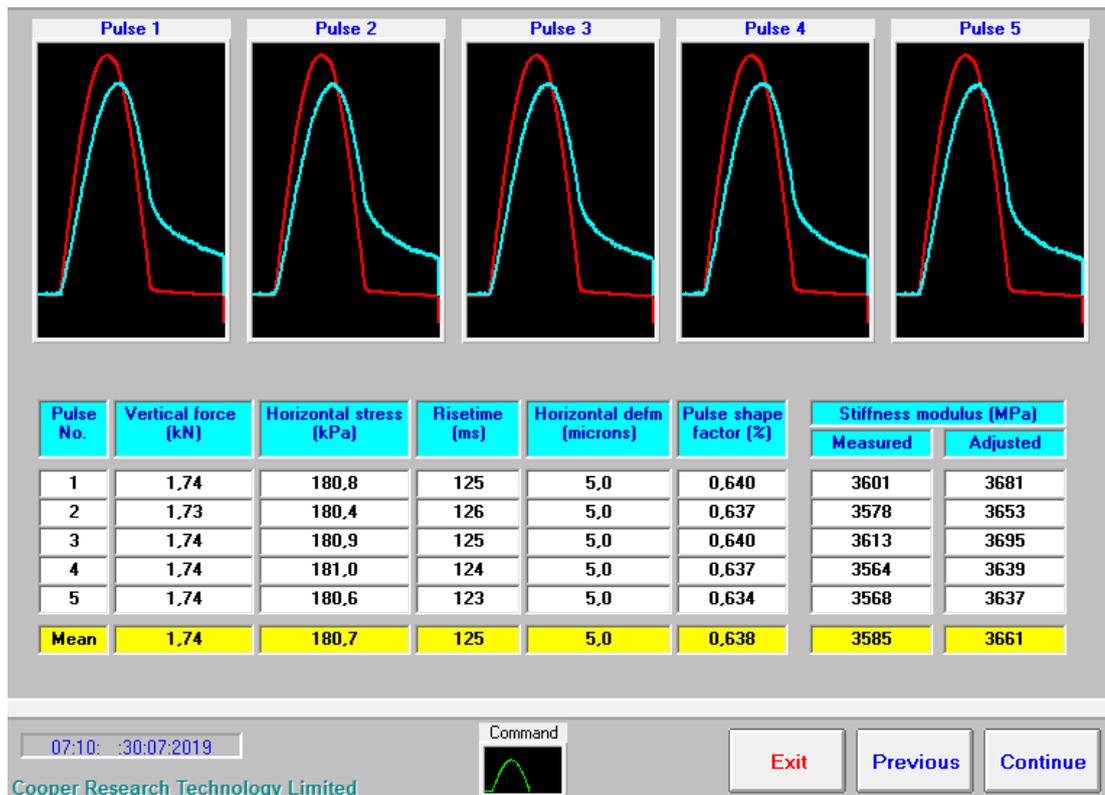
EQUIVALENTE DE ARENA				
Fecha: 15-06-2019				
ORIGEN MUESTRA : FINO DE LA MEZCLA TOTAL.				
NORMAS AASHTO T 176 y/o ASTM D2419				
	NUMERO DE LA PROBETA	ENSAYO No.1	ENSAYO No.2	PROMEDIO
K	CONSTANTE DEL APARATO	10	10	10
d1	DISTANCIA DEL NIVEL SUPERIOR DE LA SUSPENSIÓN ARCILLOSA DEL TRAZO SUPERIOR DE LA PROBETA	10,85	10,75	10,8
d2	DISTANCIA ENTRE LA BASE DEL PESO Y EL TOPE SUPERIOR DEL PISTON (mm)	13,0	12,9	12,95
$h1=15"-d1$	DISTANCIA DE LA BASE DE LA PROBETA AL NIVEL SUPERIOR DE LA SUSPENSIÓN ARCILLOSA (mm)	4,15	4,25	4,2
$h2=d2-K$	DISTANCIA DE LA BASE DE LA PROBETA AL NIVEL SUPERIOR DE LA ARENA (mm)	3,0	2,9	2,95
$EA.=h2/h1 \times 100$	EQUIVALENTE DE ARENA (%)	72,3	68,24	
	MEDIA DEL EQUIVALENTE DE ARENA			70

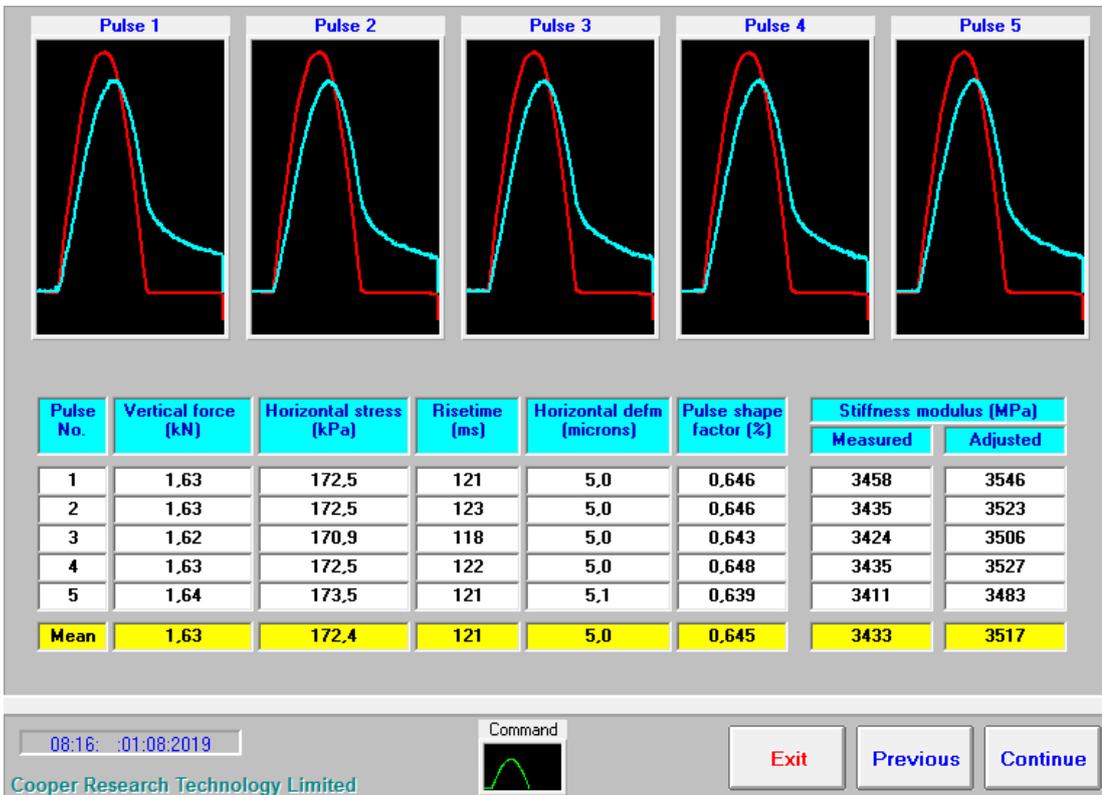
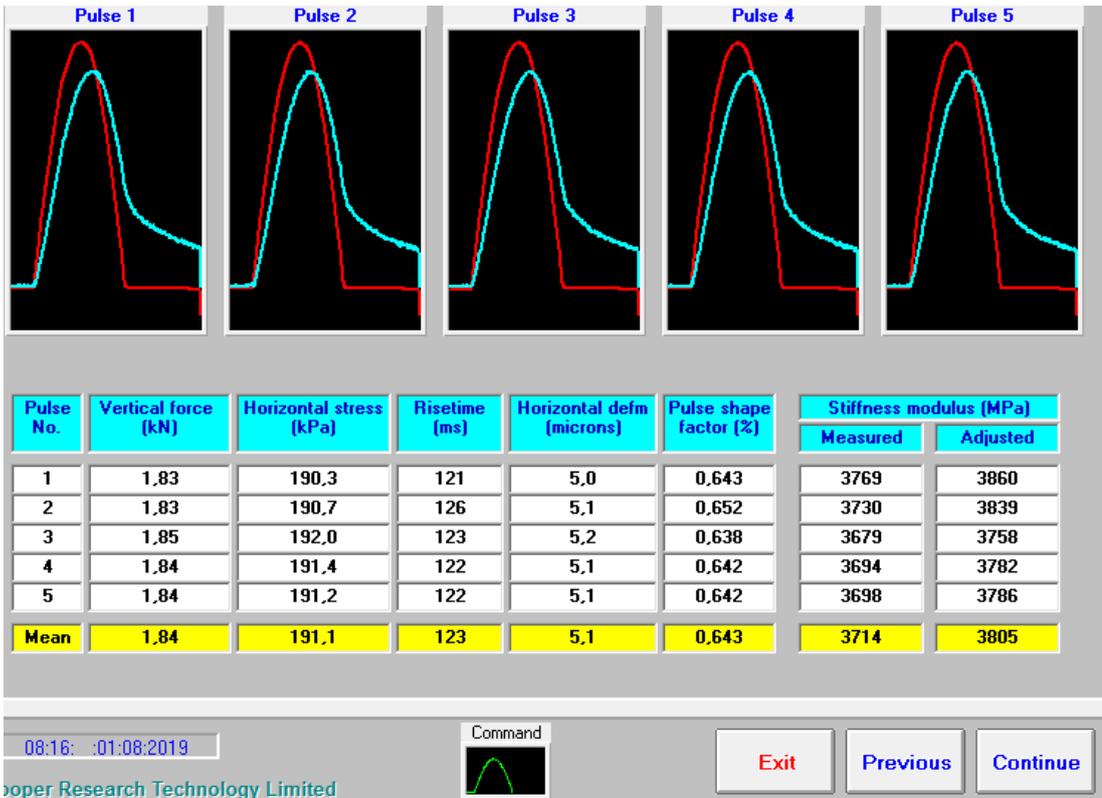
Anexo 7.5 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla sin caucho



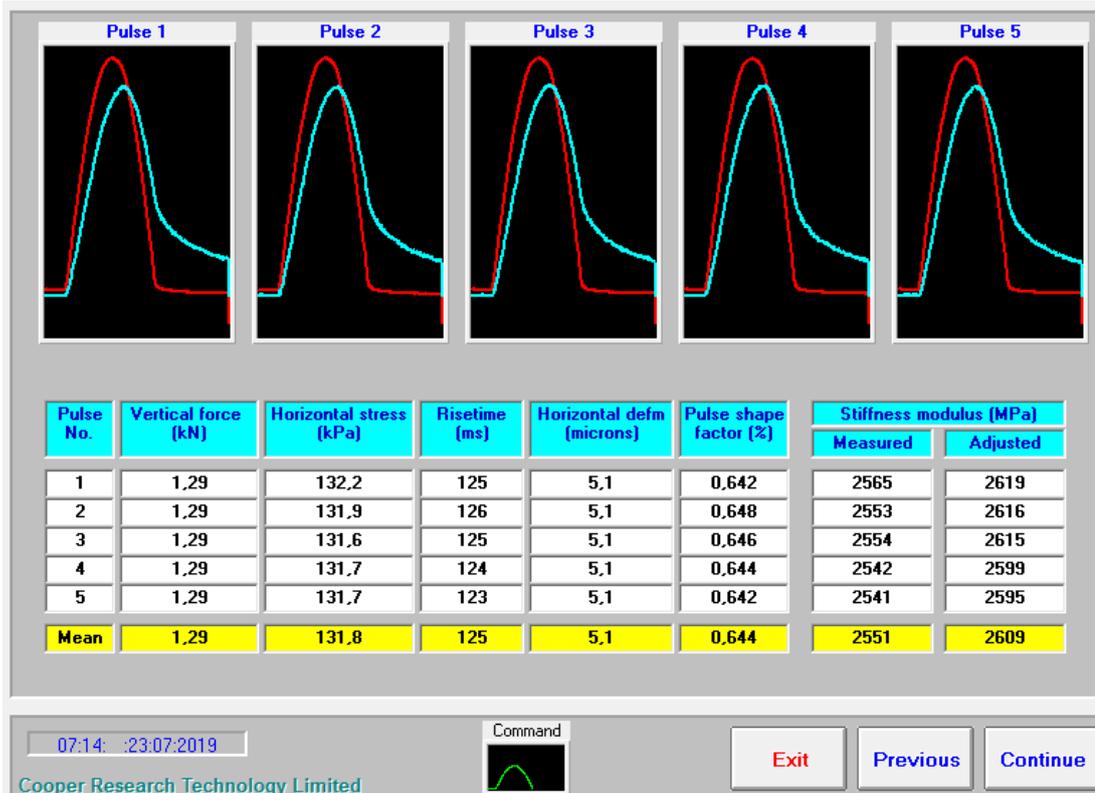
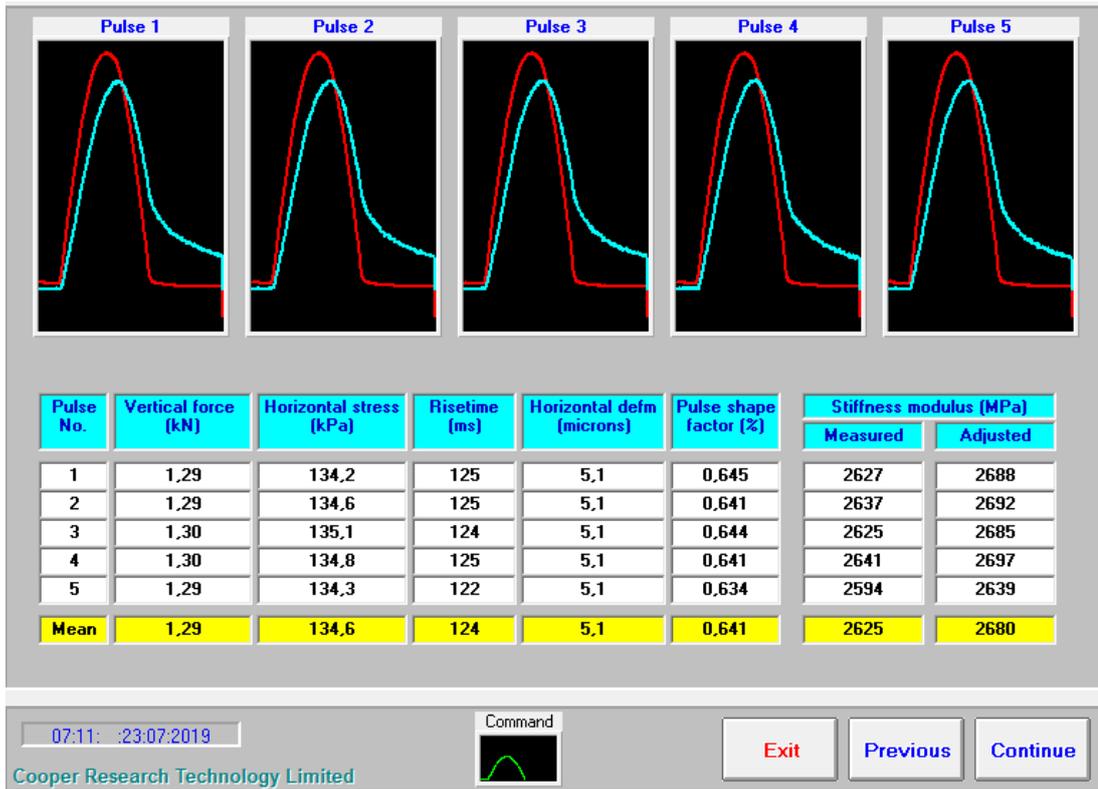


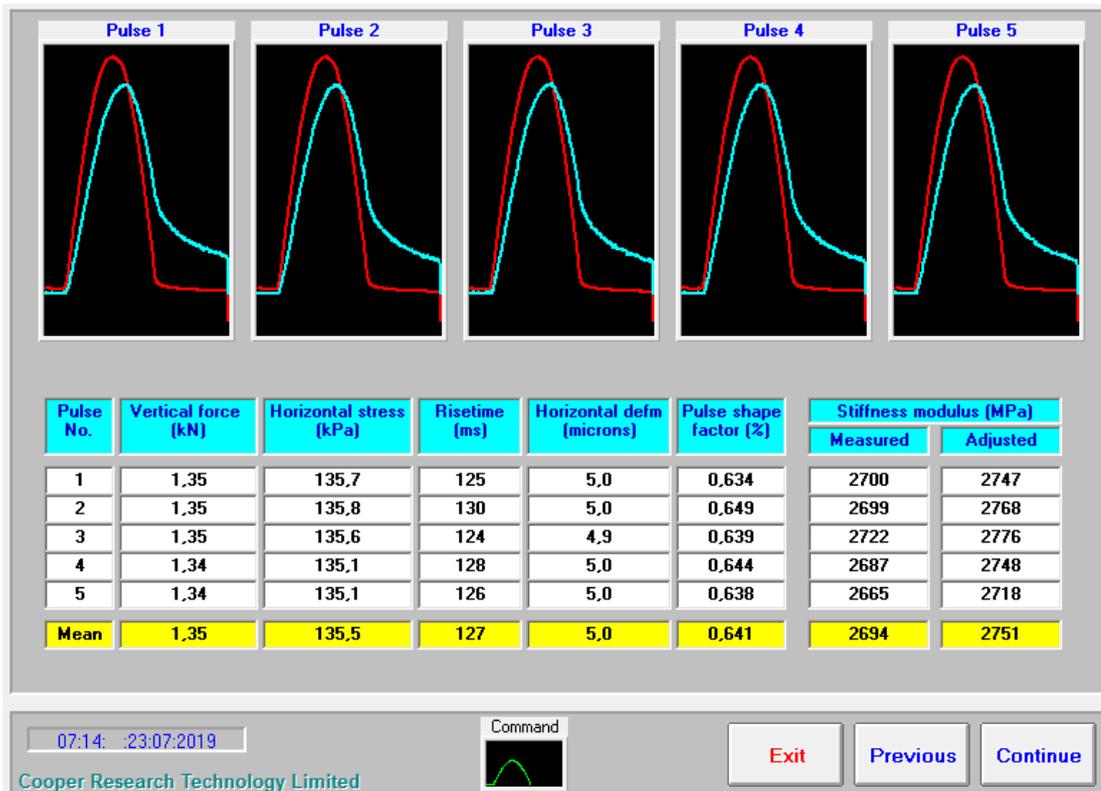
Anexo 7.6 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla con 0.75% de GCR



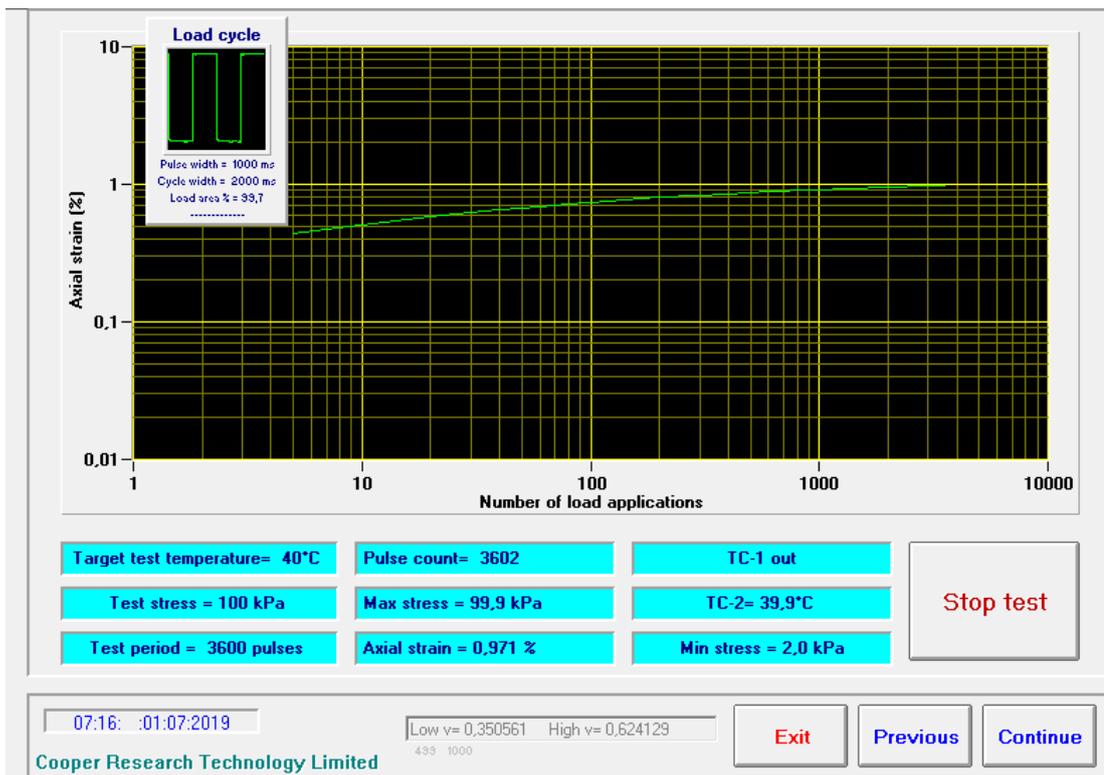


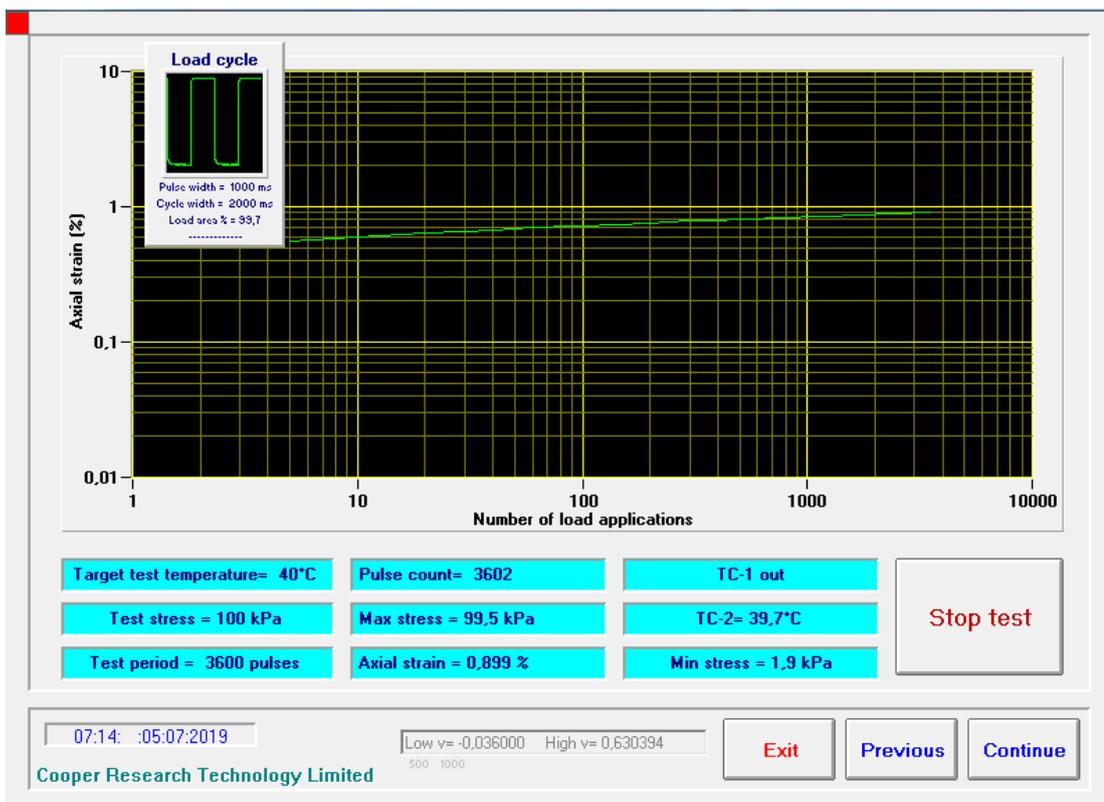
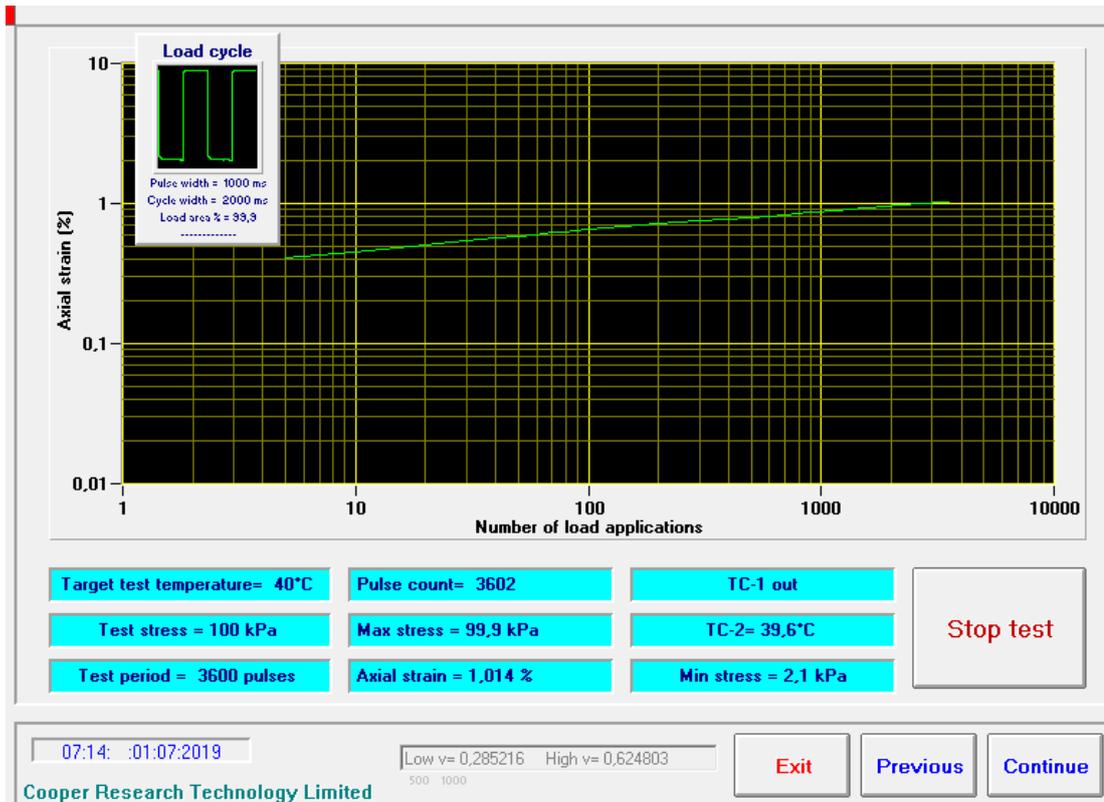
Anexo 7.7 Resultados obtenidos del equipo NAT del módulo de rigidez en la mezcla con 1.5% de GCR



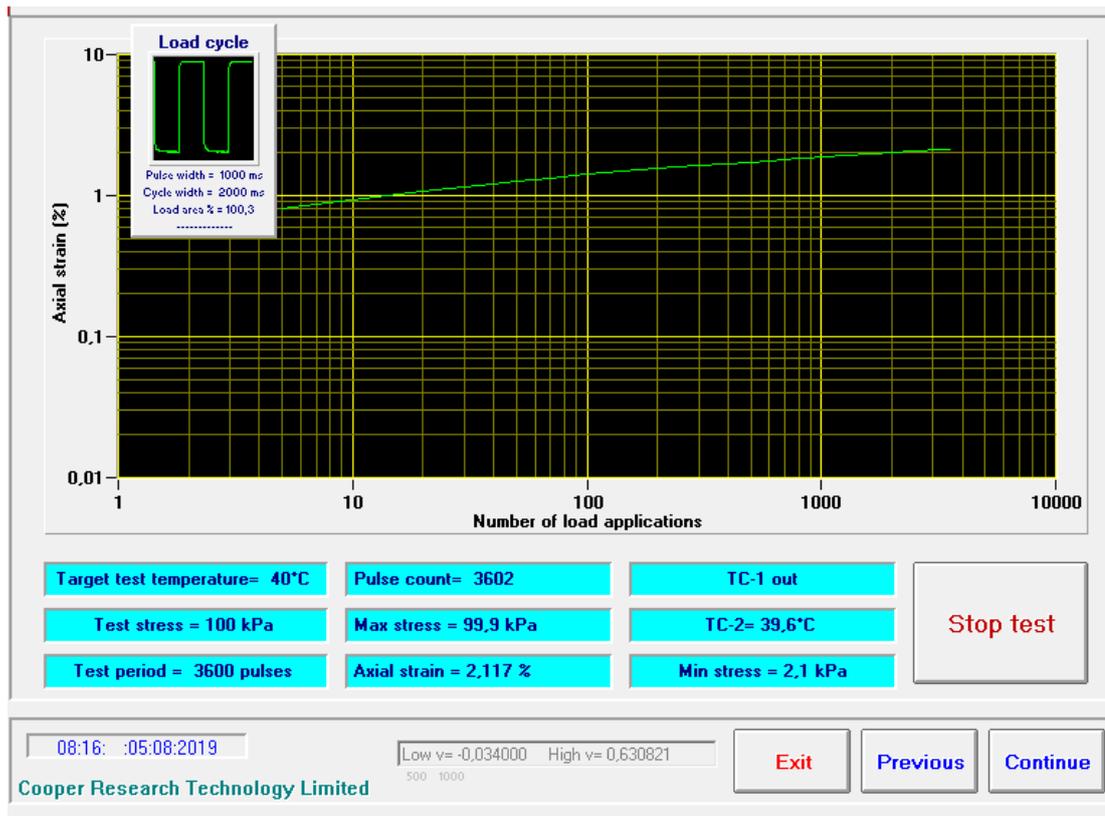
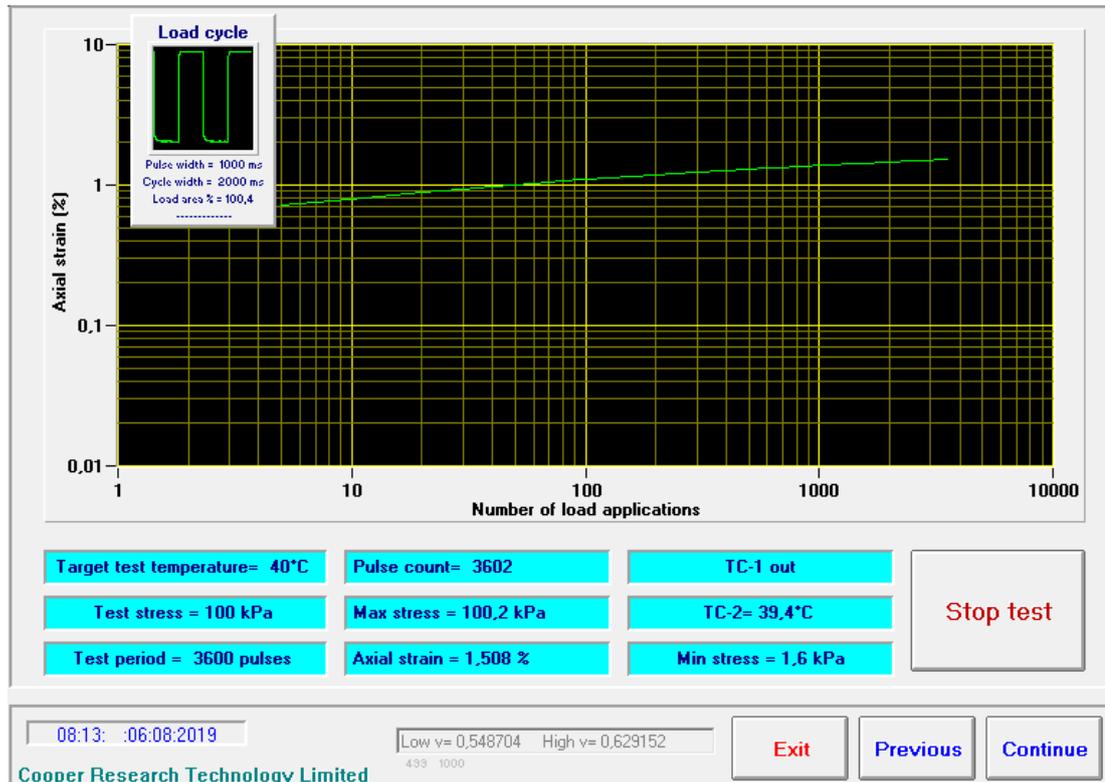


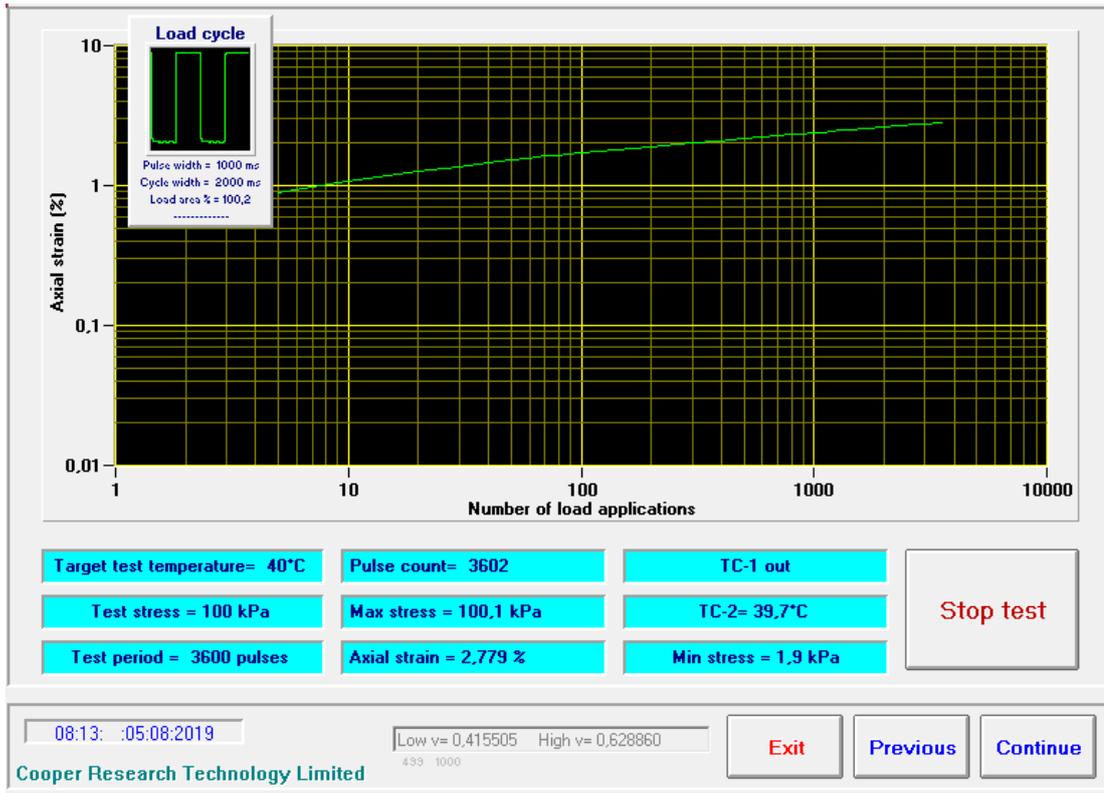
Anexo 7.8 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla sin caucho



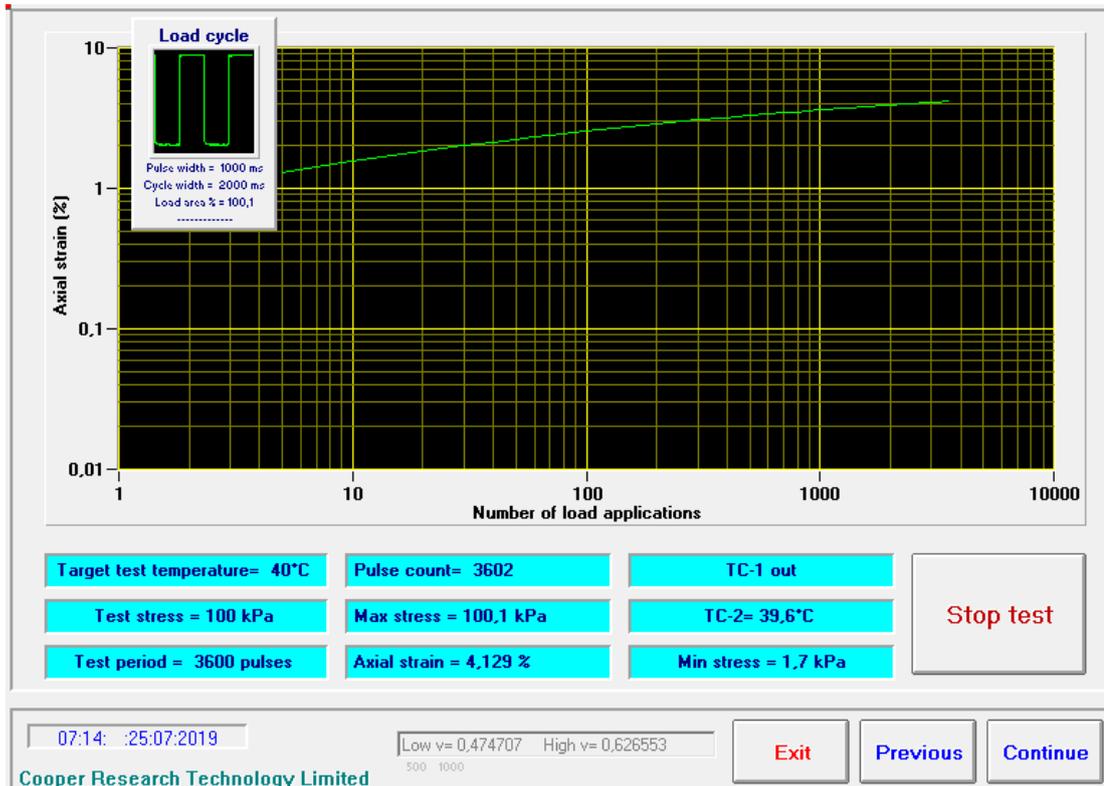


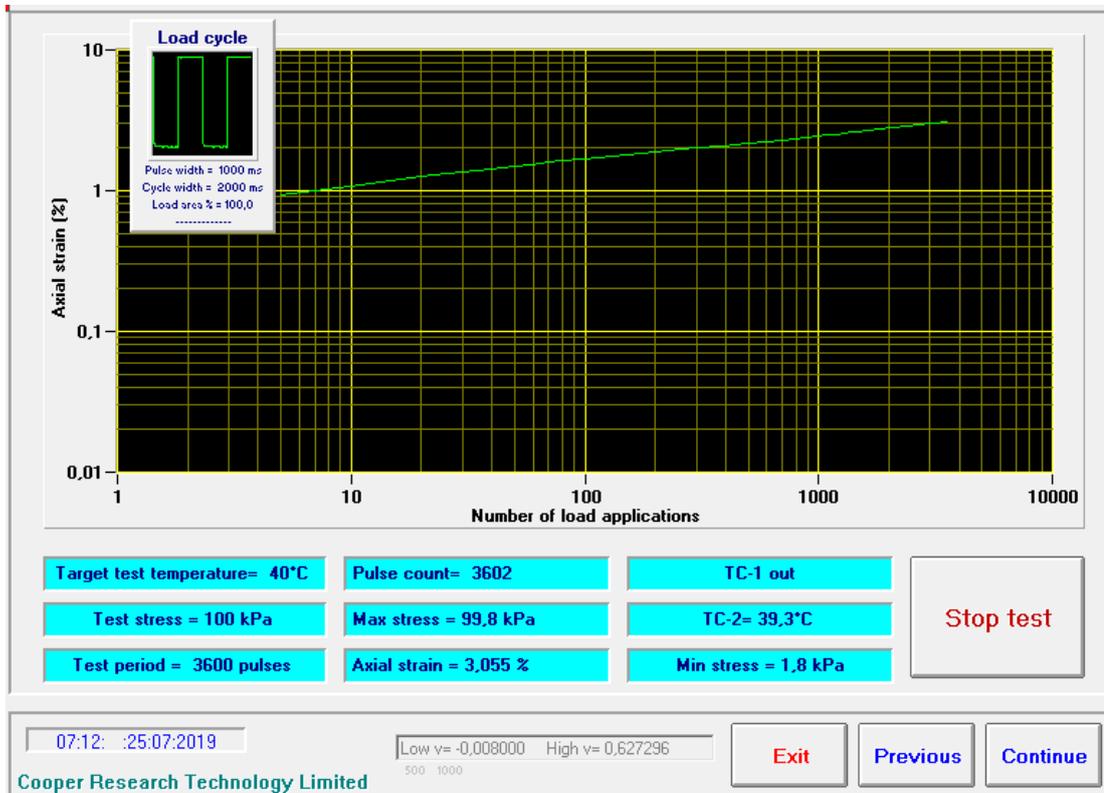
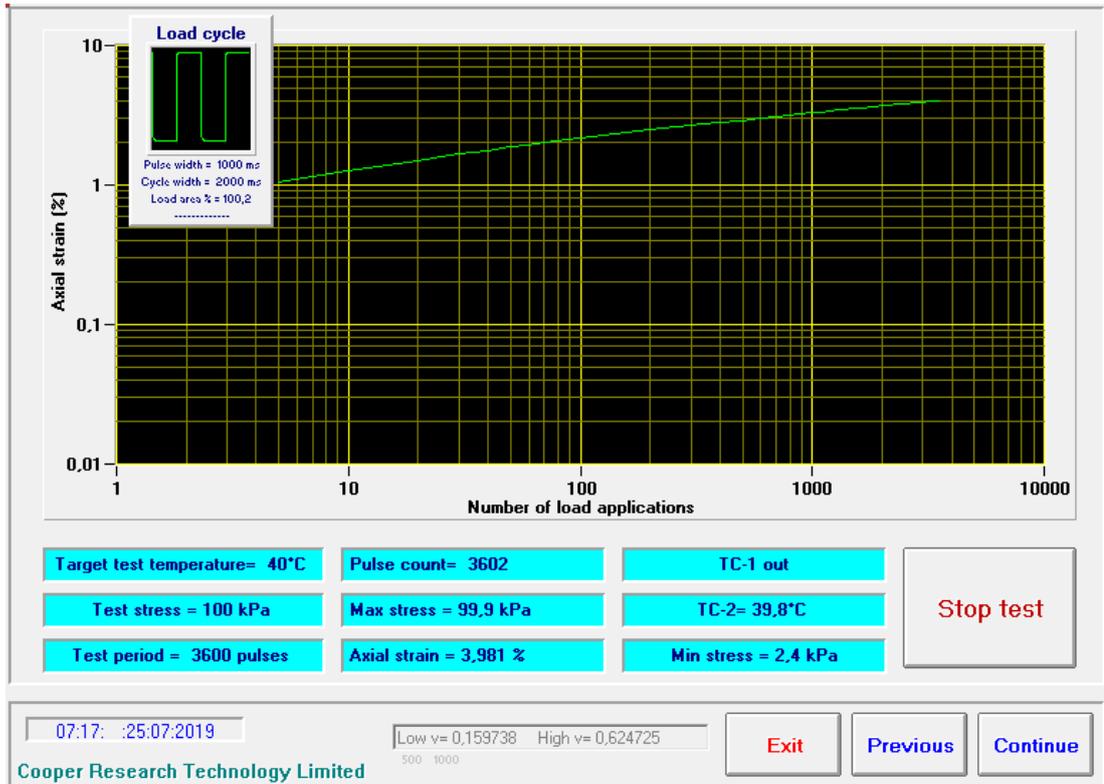
Anexo 7.9 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla con 0.75% de GCR



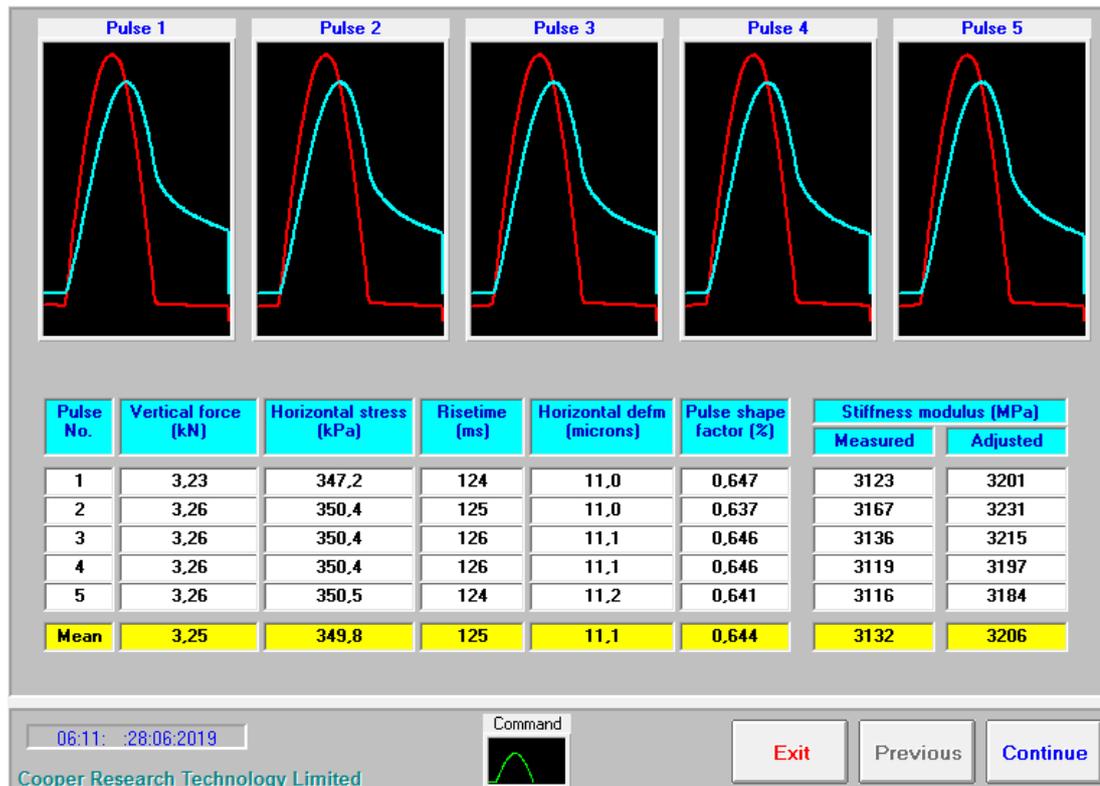
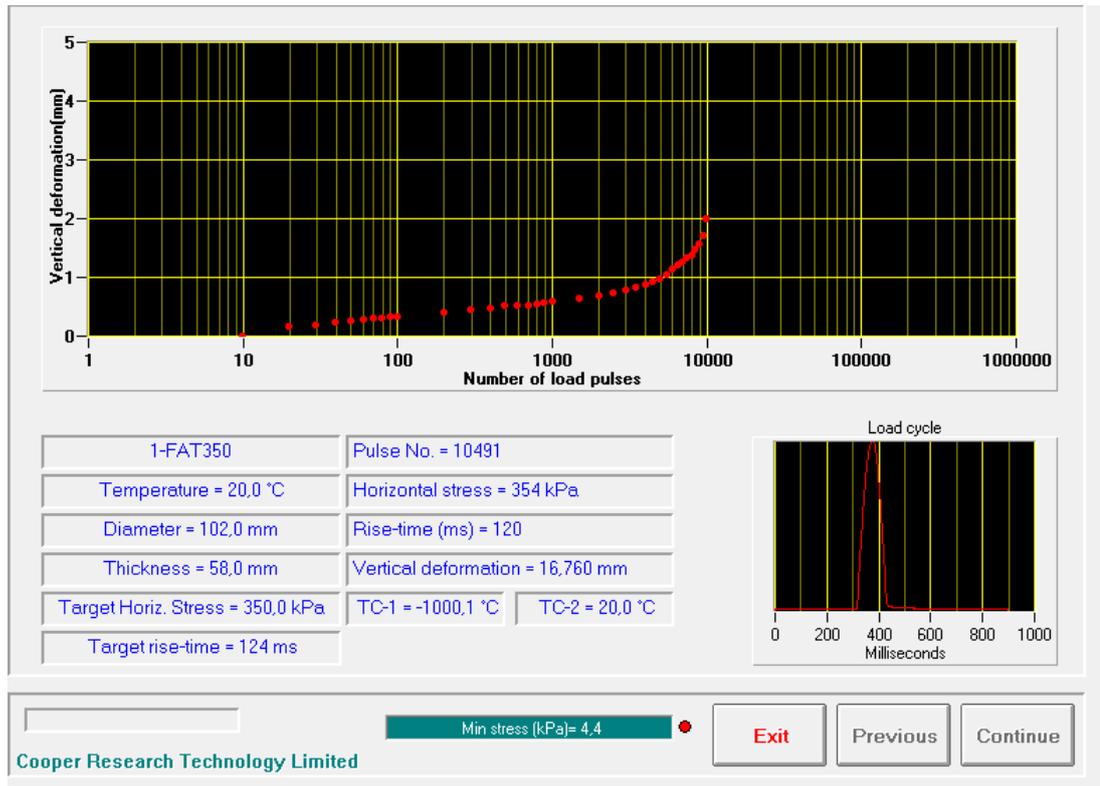


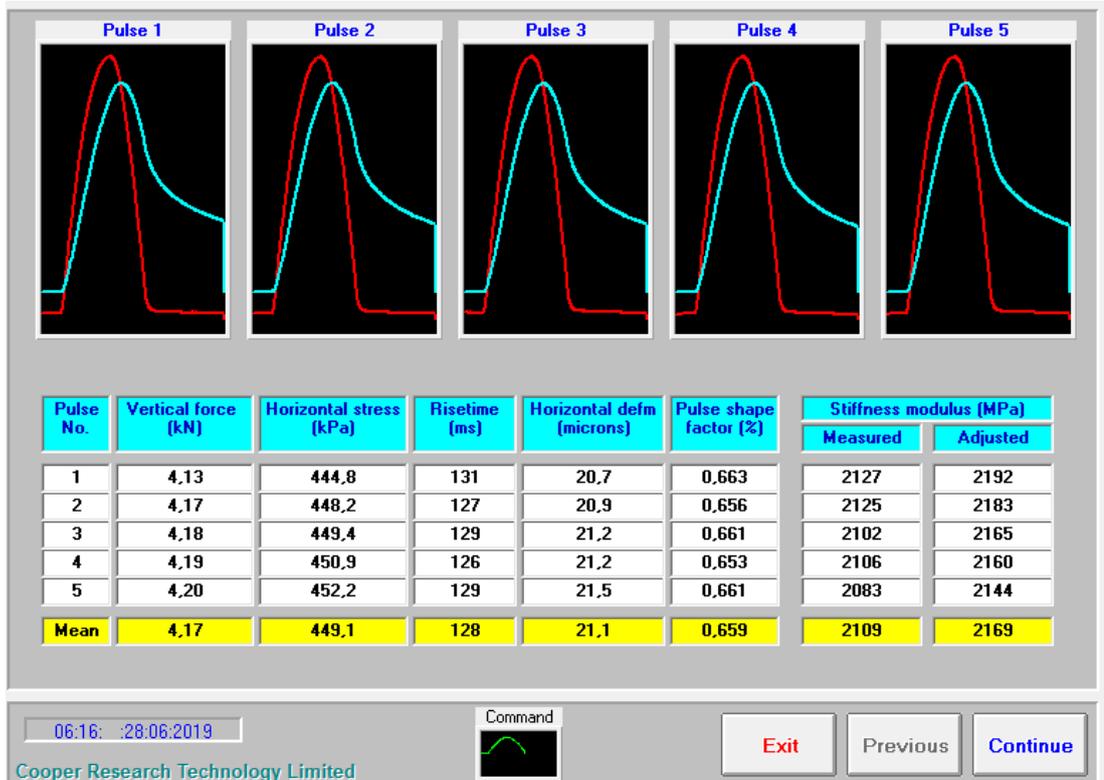
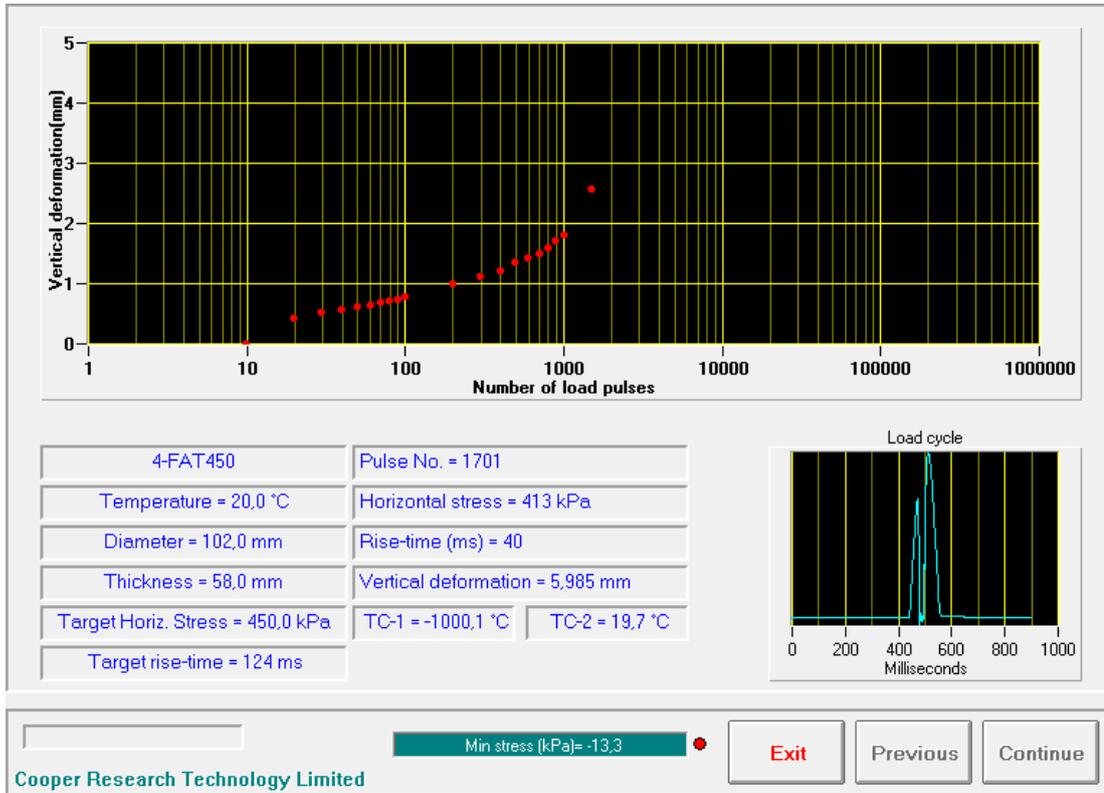
Anexo 7.10 Resultados obtenidos del equipo NAT para deformación permanente en la mezcla con 1.5% de GCR

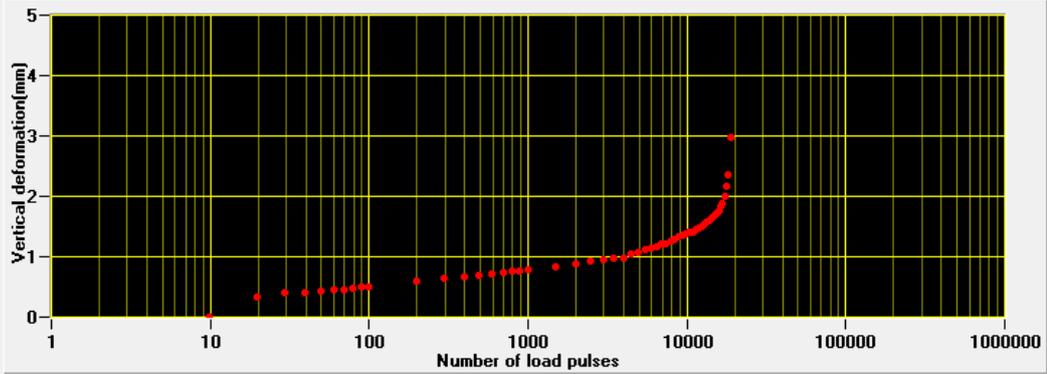




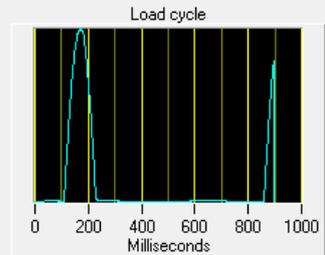
Anexo 7.11 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla sin caucho





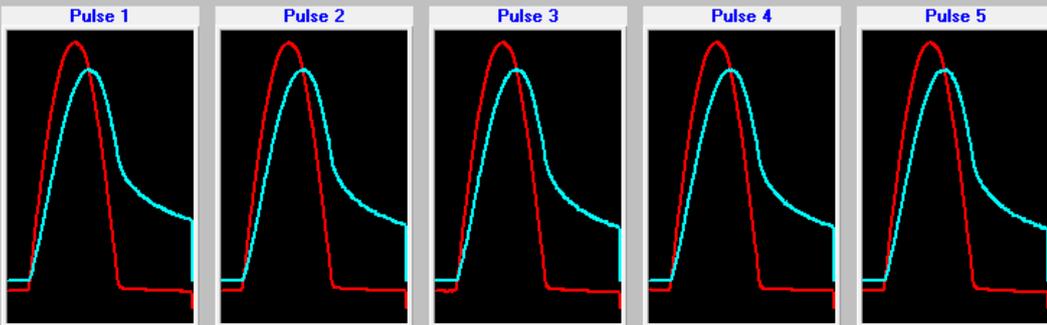


5-FAT300	Pulse No. = 19101	
Temperature = 20.0 °C	Horizontal stress = 305 kPa	
Diameter = 102.0 mm	Rise-time (ms) = 124	
Thickness = 57.0 mm	Vertical deformation = 17.458 mm	
Target Horiz. Stress = 300.0 kPa	TC-1 = -1000.1 °C	TC-2 = 19.9 °C
Target rise-time = 124 ms		



Min stress (kPa)= 3.7 Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited

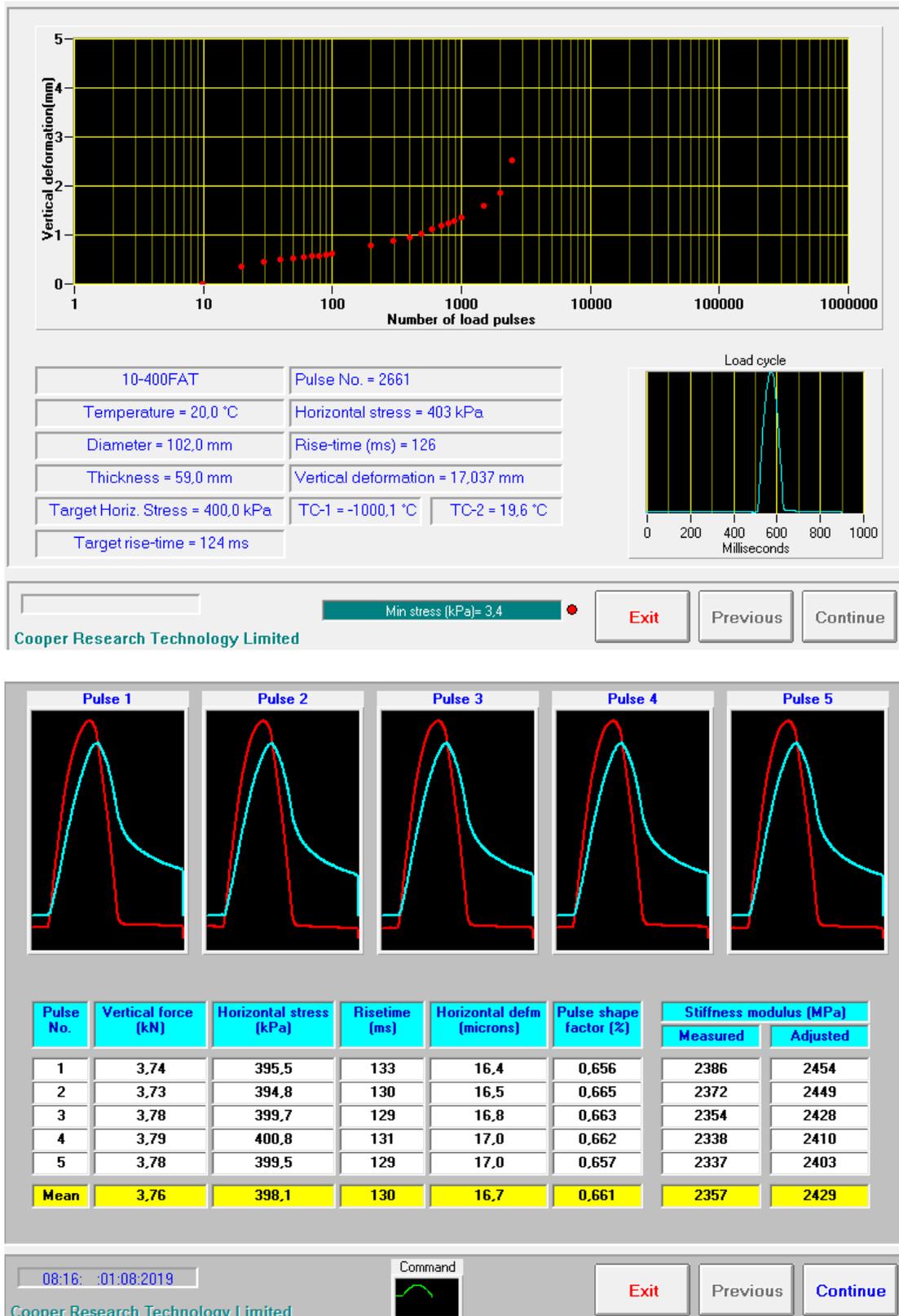


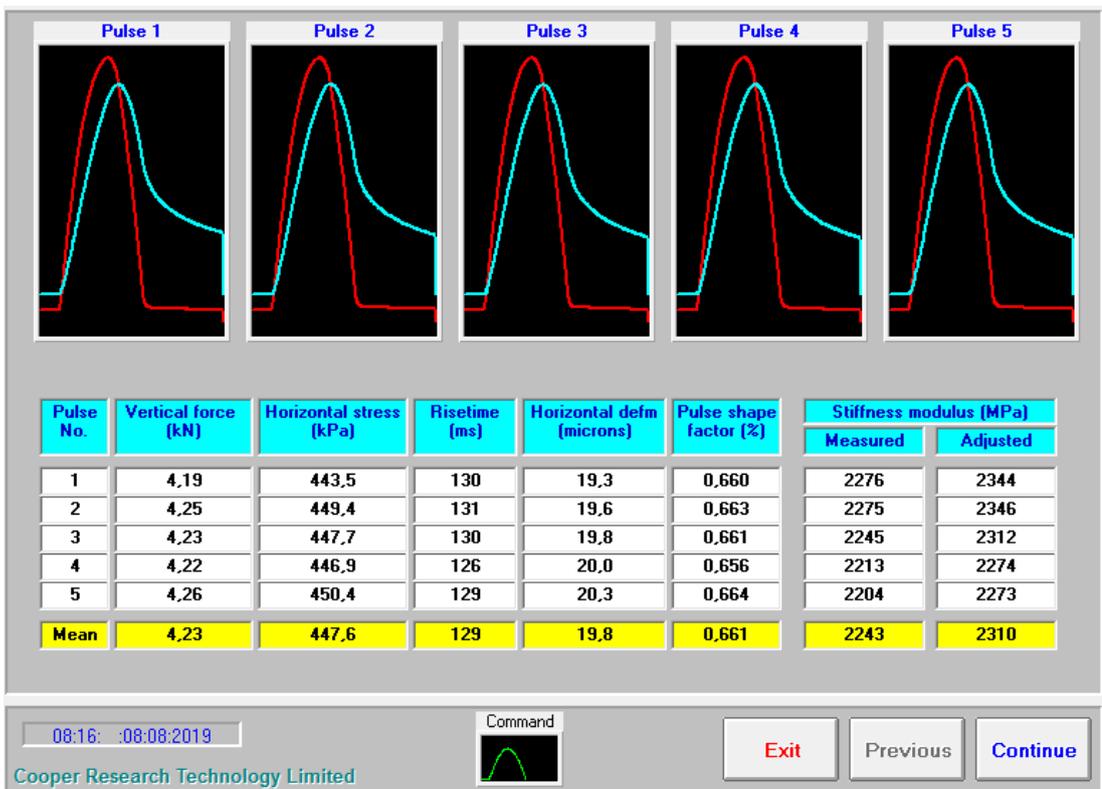
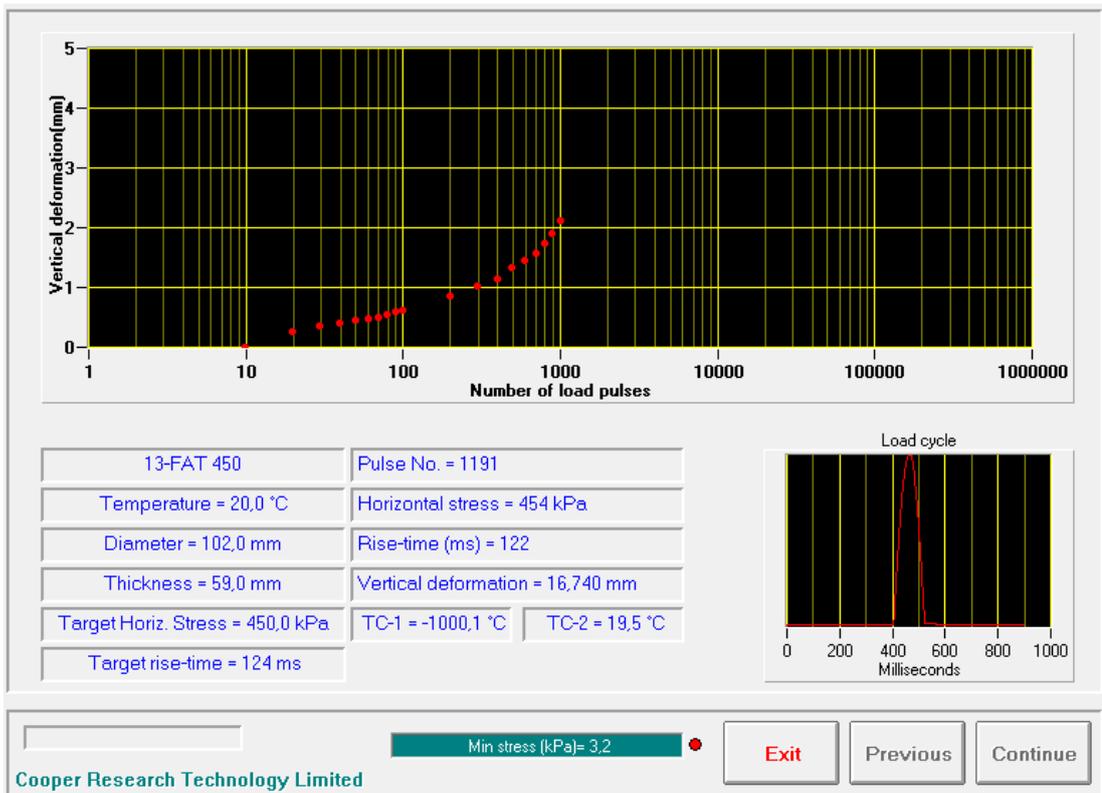
Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	2,75	300,7	122	8,9	0,640	3365	3439
2	2,74	300,5	125	8,7	0,648	3413	3503
3	2,74	299,7	125	8,7	0,643	3414	3494
4	2,73	298,8	122	8,8	0,640	3376	3450
5	2,73	298,6	126	8,8	0,651	3385	3480
Mean	2,74	299,7	124	8,8	0,644	3390	3473

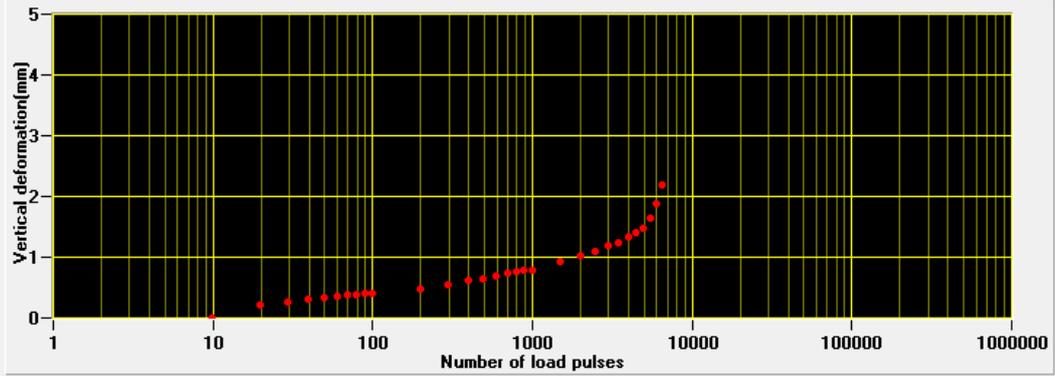
06:11: :27:06:2019 Command Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited

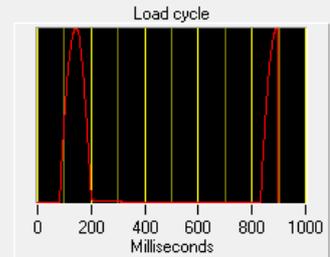
Anexo 7.12 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla con 0.75% de GCR







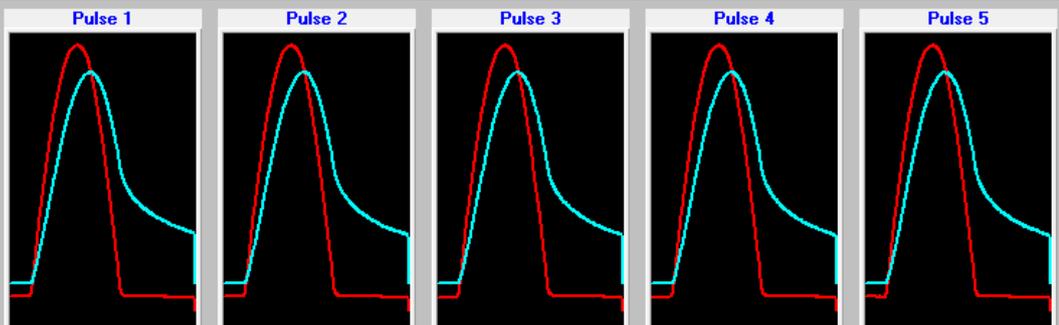
14-350FAT	Pulse No. = 6991	
Temperature = 20,0 °C	Horizontal stress = 353 kPa	
Diameter = 102,0 mm	Rise-time (ms) = 128	
Thickness = 60,0 mm	Vertical deformation = 17,002 mm	
Target Horiz. Stress = 350,0 kPa	TC-1 = -1000,1 °C	TC-2 = 20,7 °C
Target rise-time = 124 ms		



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	3,36	349,5	124	12,9	0,638	2696	2750
2	3,36	350,0	122	12,9	0,640	2687	2743
3	3,39	352,7	126	13,1	0,646	2669	2732
4	3,38	351,9	124	13,2	0,641	2654	2710
5	3,37	350,6	125	13,2	0,649	2640	2707
Mean	3,37	350,9	124	13,0	0,643	2669	2729

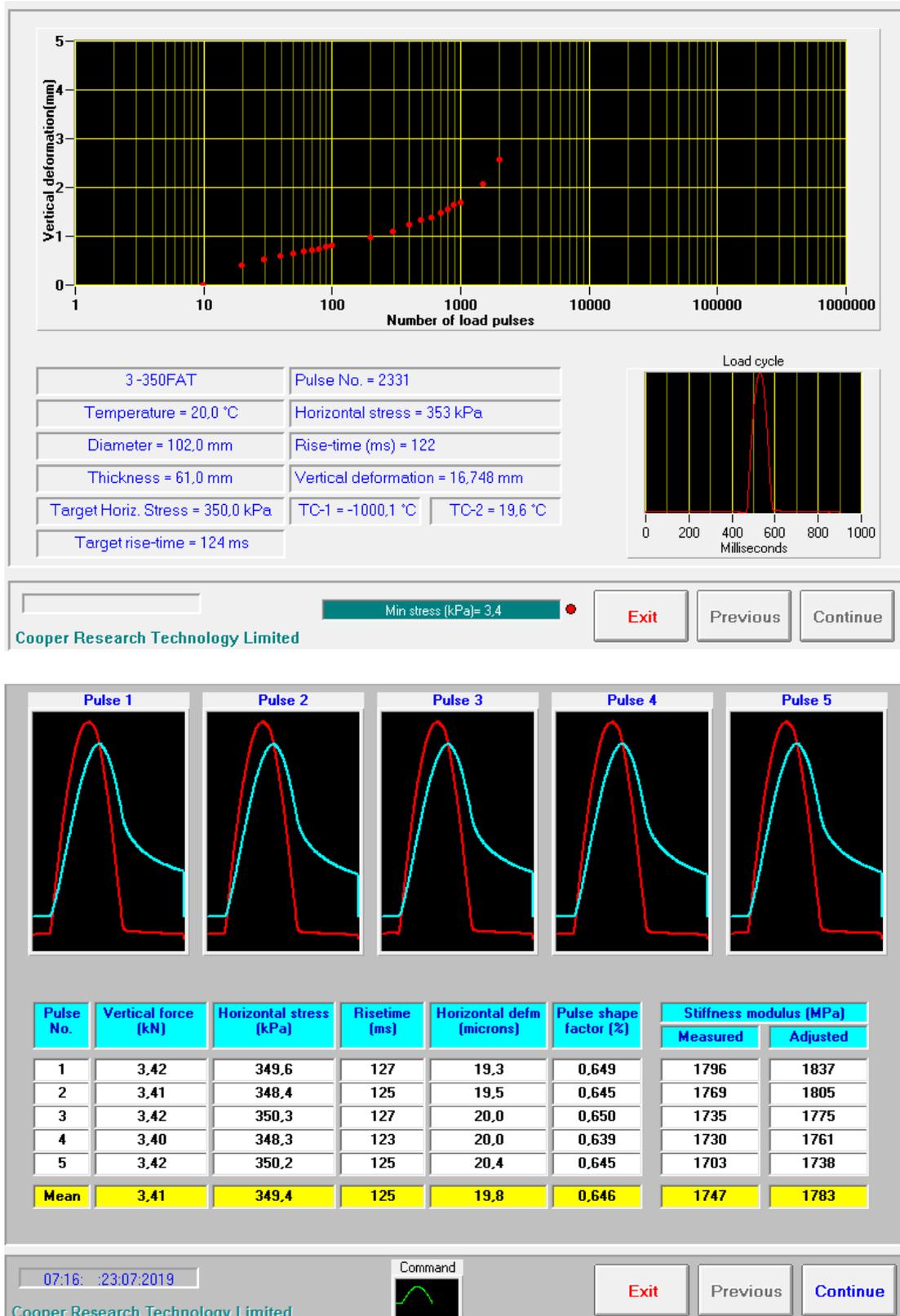
08:15 :02:08:2019

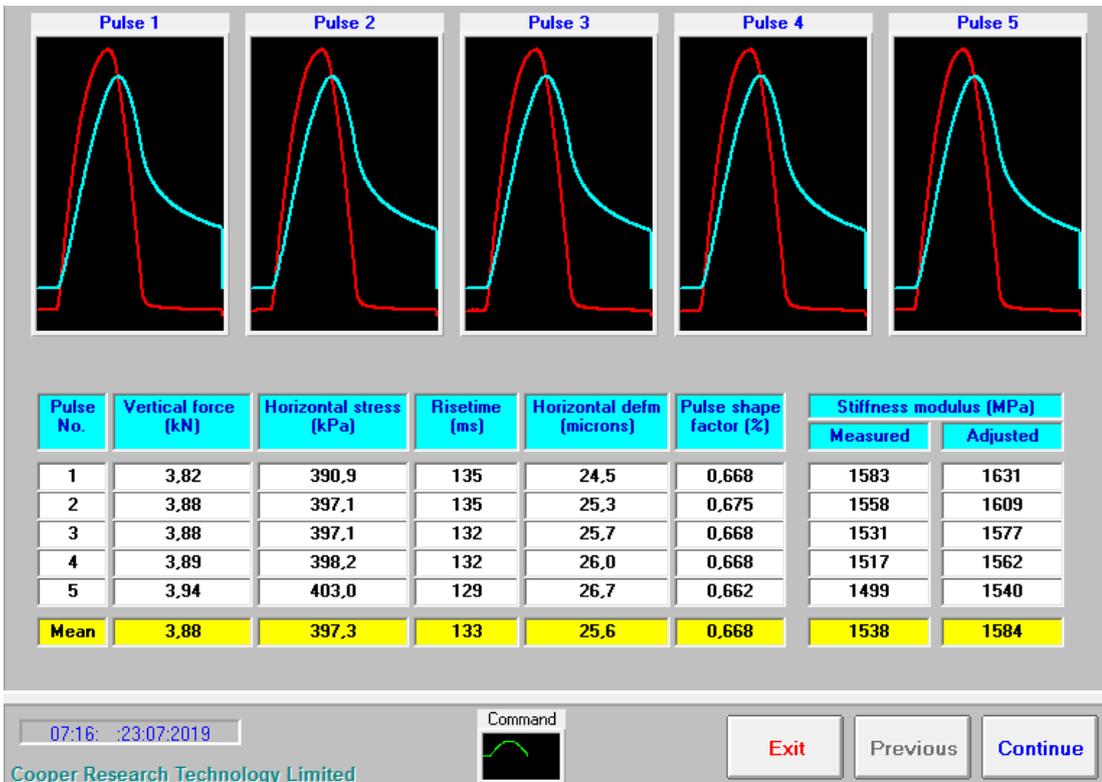
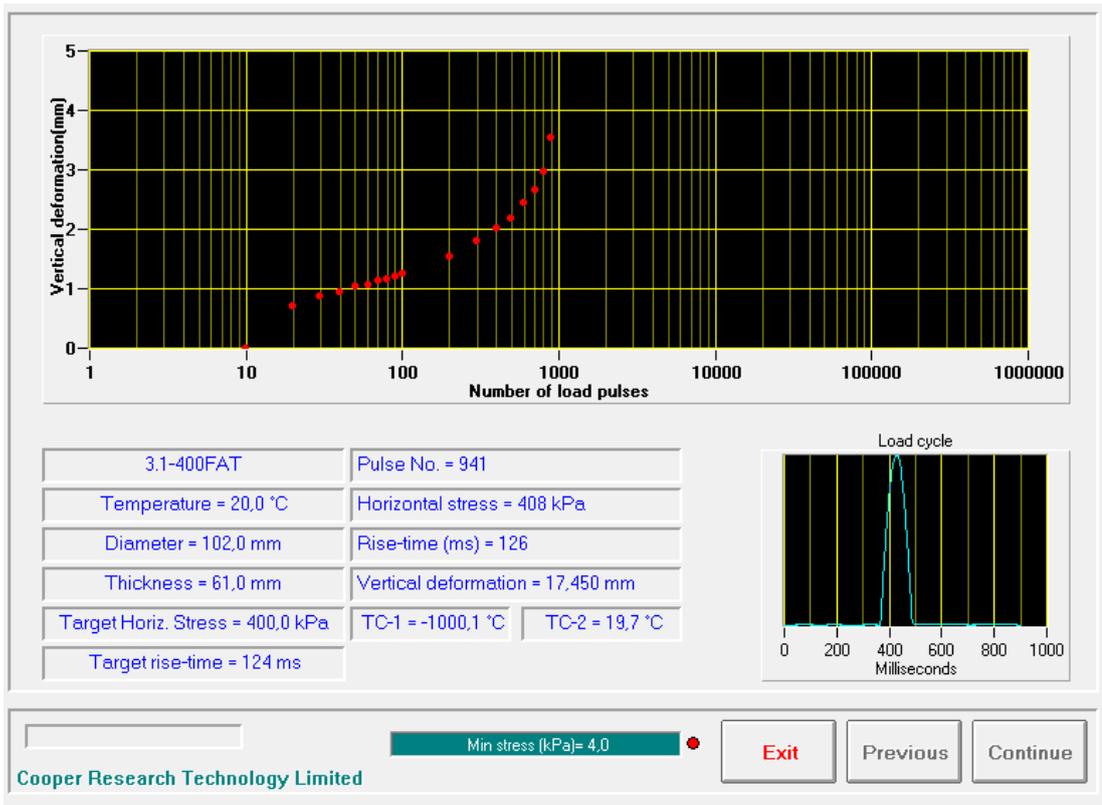
Command

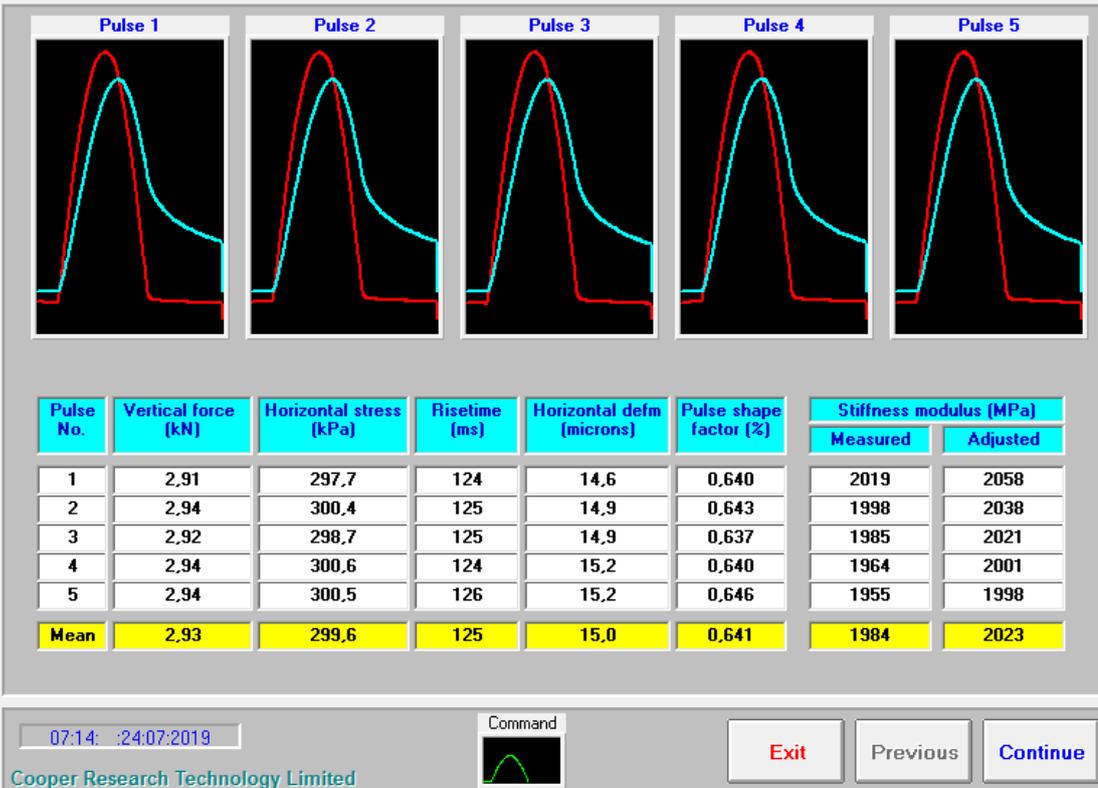
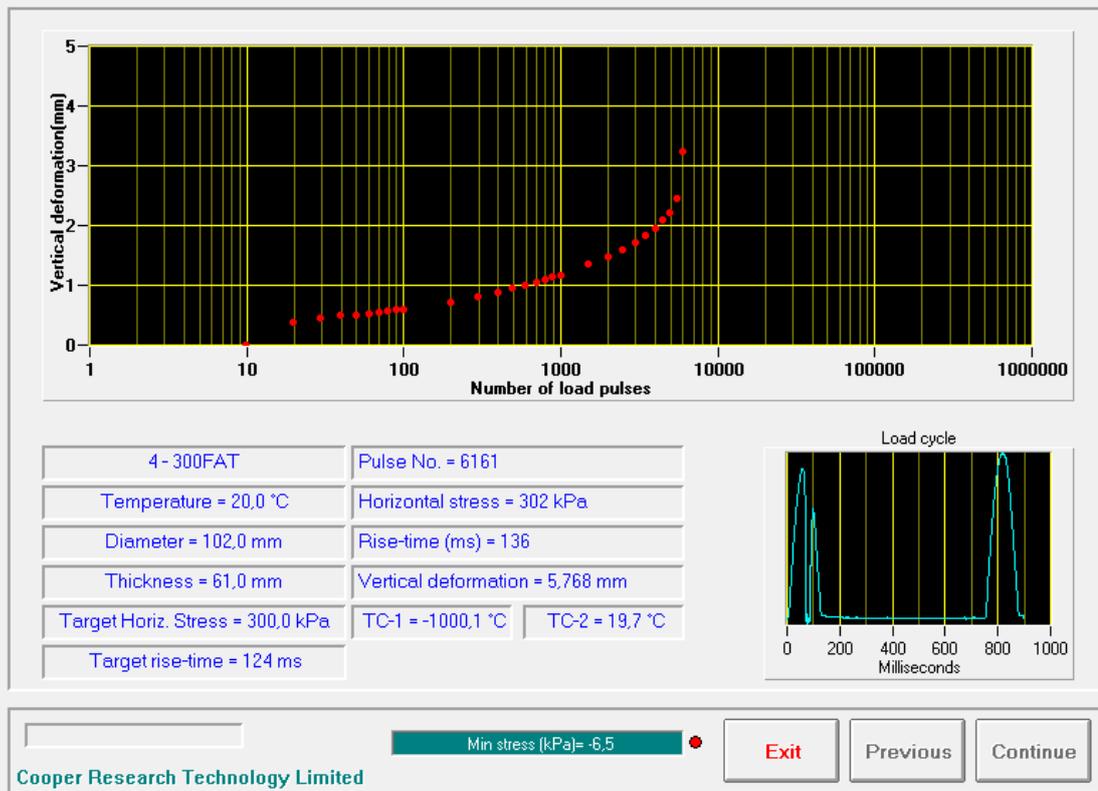
Exit Previous Continue

Cooper Research Technology Limited

Anexo 7.13 Resultados obtenidos del equipo NAT para fatiga en la mezcla con 1.5% de GCR









**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, **Karla Lizeth Ayala Cabrera**, con C.C: # **0927012955** y **Joel Heriberto Heredia Miranda**, con C.C: # **1725545238** autores del trabajo de titulación: **Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca** 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 18 días del mes de septiembre del año 2019

Nombre: **Karla Ayala Cabrera**

C.C: **0927012955**

Nombre: **Joel Heredia Miranda**

C.C: **1725545238**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Mezclas asfálticas mejoradas con caucho de llantas añadido por vía seca		
AUTORES	Karla Ayala Cabrera; Joel Heredia Miranda		
TUTOR	Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	18 de septiembre del 2019	No. DE PÁGINAS:	129
ÁREAS TEMÁTICAS:	Mezcla asfáltica modificada, Grano de caucho reciclado, vía seca		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Mezcla asfáltica modificada, Grano de caucho reciclado, vía seca		

RESUMEN

A nivel internacional las mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) son comúnmente empleadas en obras viales, obteniéndose resultados favorables. Sin embargo, en Ecuador se han realizado estudios experimentales por la vía húmeda donde los resultados no han sido buenos. El objetivo de este trabajo es evaluar de manera experimental el efecto que tiene el GCR añadido por la vía seca en diferentes porcentajes en el comportamiento de mezclas asfálticas densas, manteniendo constantes las características del asfalto y los agregados minerales en su elaboración. Se realizaron diseños de mezclas asfálticas con 0, 0.75 y 1.5% de caucho, a partir de los cuales se realizaron pruebas de estabilidad y flujo Marshall, módulo de rigidez, compresión cíclica y fatiga, además de evaluar el daño en agua a través de la resistencia a la tracción indirecta retenida. De los resultados obtenidos se determinó que para la granulometría empleada no es conveniente añadir 1.5% de GCR a la mezcla asfáltica puesto que sus propiedades resistentes disminuyen y añadiendo 0.75% de GCR no difieren mucho de la mezcla tradicional, excepto por la deformación creep,



pudiendo emplearse con los afinamientos requeridos, como capas para control de fisuras en espesores delgados y capas superficiales en vías de poco tráfico, como calles de tierra en zonas urbanas, también con espesores pequeños donde el impacto del ahuellamiento sería muy reducido.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTORES:	Teléfono: +593-4-600-3061 +593-984147979	E-mail: karla.ayala@hotmail.es
	Teléfono: +593-2-2424221 +593-997905794	E-mail: jheredia27@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		