

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO**

ESTEBAN GOMEZ VARGAS

000272026

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO**

ESTEBAN GOMEZ VARGAS

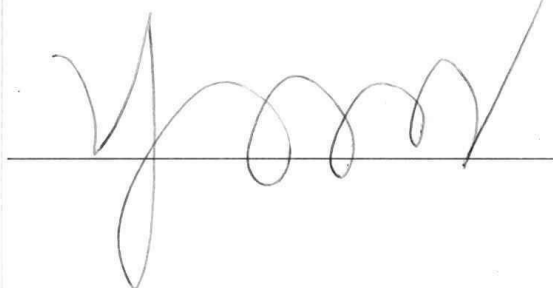
000272026

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

A handwritten signature in dark ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke, positioned above a solid horizontal line.

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN ⁱⁱⁱ

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado No. 1

Firma del Jurado No. 2

Bucaramanga, marzo 2019

Quiero dedicar este trabajo a todos aquellos que han empezado a estudiar el maravilloso mundo de la ingeniería civil; espero que nunca se rindan y que todas las dificultades, decepciones que afronten durante sus estudios los ayuden a crecer tanto como personas como ingenieros. Espero que sus corazones jamás se corrompan y que sus sueño y metas siempre estén centradas en hacer de este mundo un mejor lugar.

Quiero agradecer primero que todo a mi familia, en especial a mis padres que, a pesar de todas las dificultades y fracasos, siempre creyeron y jamás perdieron sus esperanzas en mí. Su apoyo incondicional fue de gran ayuda, sin ellos este logro jamás se hubiera hecho realidad.

A mis compañeros de clase, que a pesar de ser mis amigos fueron mi sombra, gracias por haber cuidado y estar pendientes de mí, haberlos conocido fue una maravillosa experiencia, los llevare siempre en mi corazón.

A la empresa Multinsa S.A y a la facultad de ingeniería civil de la universidad Pontificia Bolivariana por haberme proporcionado los recursos y los materiales necesarios para llevar a cabo esta investigación. A mi directora de tesis, por su tiempo y paciencia. Gracias por haberme ofrecido esta gran oportunidad.

A Dios, quien siempre me ha acompañado a pesar mis faltas, porque a pesar de todo, es su amor el que me regocija en la soledad y en los momentos más difíciles. Gracias por darle sentido a mi existencia.

1.INTRODUCCIÓN.....	3
2.OBJETIVOS.....	4
3.MARCO TEÓRICO.....	5
3.1Agregados Pétreos.....	5
3.2Asfalto	6
3.3Mezcla Asfáltica.....	7
3.4Mezcla De Asfalto Caucho	8
3.5Proceso De Modificación Del Asfalto.....	12
3.6Metodología Marshall.....	13
3.7Susceptibilidad Al Agua De Una Mezcla Asfáltica	13
3.8Estudio De Ahuellamiento Mediante La Rueda De Hamburgo.....	14
3.9Traccion Indirecta.....	14
4.METODOLOGÍA	16
4.1CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR	17
a. Granulometría de los agregados grueso y finos.	17
b. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.....	18
c. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.....	18
d. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos. ..	19
e. Determinación del valor del 10% finos.	19
f. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval.	20
g. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles.	20
h. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	21
i. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso.....	21
j. Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	22
k. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados.	22
4.2CARACTERIZACION DEL ASFALTO	23
METODOLOGIA MARSHALL	24
4.3Preparacion De Briquetas	24
4.4Determinacion De Parametros Volumetricos	26
4.5Determinación Del Peso Especifico “Bulk”	26
4.6Evaluacion De La Estabilidad Y Flujo	29
4.7Evaluacion De La Susceptibilidad Al Agua De Las Mezclas De Concreto Asfáltico Utilizando La Prueba De Traccion Indirecta.	29
4.8Evaluacion Del Ahuellamiento Por Medio De La Rueda De Hamburgo En Pista De Mezcla	31
4.9Determinacion Del Modulo Resilente Por Medio Del Ensayo De Traccion Indirecta En Probetas Cilindricas.....	32
5.RESULTADOS.....	34
5.1Características Del Material Granular	34
5.2Características De Los Asfaltos	43
5.4Parametros Volumetricos.....	48

5.5Valores De Estabilidad Y Flujo	53vii
5.6Susceptibilidad Al Agua.	63
5.7Ahuellamiento	66
5.8Modulos De Rigidez	71
6.ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
6.1Estabilidad.....	77
6.2Flujo	79
6.3Porcentaje De Vacios Con Aire	80
6.4Porcentaje De Vacios En Agregados Minerales	81
6.5Densidad	82
6.6Susceptibilidad Al Agua	83
6.7Resistencia Al Ahuellamiento.....	86
6.8Ensayo De Traccion Indirecta (Modulo Resiliente).....	88
7.CONCLUSIONES.....	91
8.RECOMENDACIONES.....	92
9.BIBLIOGRAFÍA.....	93
10.ANEXOS.....	95

Lista de tablas

viii

Tabla 1 Tipos de Mezcla	7
Tabla 2 Composición de las llantas.....	8
Tabla 3 Franjas Granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.	25
Tabla 4 Gravedad específica y absorción del agregado grueso.	35
Tabla 5 Porcentaje de caras fracturadas.	35
Tabla 6 Proporción de partículas planas y alargadas en agregados gruesos.	36
Tabla 7 Determinación de finos en condición seca.....	36
Tabla 8 Determinación de finos en condición húmeda.	37
Tabla 9 Ensayo de Micro-Deval.	37
Tabla 10 Resultados máquina de los ángeles.	38
Tabla 11 Porcentajes de Perdida.	39
Tabla 12 Limpieza superficial	40
Tabla 13 Equivalente de Arena.....	40
Tabla 14 Datos obtenidos por el método A- Muestra gradada estándar	41
Tabla 15 Ensayos realizados para los agregados pétreos.....	42
Tabla 17 Dosificación para briquetas convencionales.	46
Tabla 18 Dosificación para mezclas modificadas con grano de caucho.	46
Tabla 19 Densidad Especifica "Bulk" para briquetas convencionales.....	48
Tabla 20 Densidad Especifica "Bulk" para briquetas modificadas.....	49
Tabla 21 Gravedades específicas máximas para mezclas convencionales.....	49
Tabla 22 Gravedades específicas máximas para mezclas modificadas.	50
Tabla 23 Análisis volumétrico para mezcla convencional.	50
Tabla 24 Análisis volumétrico para mezcla modificada.	51
Tabla 25 Porcentaje de vacíos para briquetas convencionales.	51
Tabla 26 Porcentaje de vacíos para briquetas modificadas.	52
Tabla 27 Datos Ensayo Marshall - Mezcla convencional.	53
Tabla 28 Datos Ensayo Marshall - Mezcla modificada.	54
Tabla 29 Porcentaje óptimo de asfalto para mezcla convencional.	59
Tabla 30 Porcentaje óptimo de asfalto para mezcla modificada.	62
Tabla 31 Resultados de susceptibilidad sobre la mezcla convencional	63
Tabla 32 Resultados de resistencia a la tensión en mezcla convencional	64
Tabla 33 Resultados de susceptibilidad sobre la mezcla modificada	64
Tabla 34 Resultados de resistencia a la tensión en mezcla modificada	65
Tabla 35 Resultados del módulo dinámico en mezcla convencional.....	72
Tabla 36 Resultados del módulo dinámico en mezcla modificada.....	73

Lista de graficas

ix

Grafica 1 Granulometría del material pétreo	34
Grafica 2 Curva Granulométrica de la mezcla patrón MSC-25	44
Grafica 3 Estabilidad vs % Asfalto (Mezcla Convencional)	56
Grafica 4 Flujo vs % Asfalto (Mezcla Convencional)	56
Grafica 5 Vacíos en el agregado mineral vs % asfalto (Mezcla Convencional)	57
Grafica 6 Vacíos con aire vs % Asfalto (Mezcla Convencional)	57
Grafica 7 Vacíos llenos de asfalto vs % asfalto (Mezcla Convencional)	58
Grafica 8 Densidad vs % asfalto (Mezcla Convencional)	58
Grafica 9 Estabilidad vs % Asfalto (Mezcla Modificada)	59
Grafica 10 Flujo vs % Asfalto (Mezcla Modificada)	60
Grafica 11 Vacíos con aire vs % asfalto (Mezcla Modificada)	60
Grafica 12 Vacíos llenos de asfalto vs % asfalto (Mezcla Modificada)	61
Grafica 13 Vacíos en el agregado mineral vs % asfalto (Mezcla Modificada)	61
Grafica 14 Densidad vs % Asfalto (Mezcla Modificada)	62
Grafica 15 Resistencia al ahuellamiento (Mezcla Convencional)	67
Grafica 16 Zona de inflexión (Mezcla convencional)	68
Grafica 17 Resistencia al ahuellamiento (Mezcla Modificada)	69
Grafica 18 Zona de inflexión (Mezcla Modificada)	70
Grafica 19 Deformación vs tiempo (Mezcla Convencional)	74
Grafica 20 Carga vs Deformación (Mezcla Convencional)	74
Grafica 21 Deformación vs tiempo (Mezcla Modificada)	75
Grafica 22 Carga vs Deformación (Mezcla Modificada)	75
Grafica 23 Estabilidad en mezcla convencional vs mezcla modificada	78
Grafica 24 Flujo en mezcla convencional vs mezcla modificada	79
Grafica 25 Vacíos con aire en mezcla convencional vs mezcla modificada	80
Grafica 26 Vacíos en el agregado mineral en mezcla convencional vs mezcla modificada	81
Grafica 27 Densidad en mezcla convencional vs mezcla modificada	82
Grafica 28 Resistencia a la tensión en mezcla convencional vs mezcla modificada	83
Grafica 29 Daño por humedad luego de la fractura (Mezcla Convencional)	84
Grafica 30 Daño por humedad luego de la fractura (Mezcla Modificada)	84
Grafica 31 Resistencia al ahuellamiento en Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada	86
Grafica 32 Escala logarítmica de la Resistencia al ahuellamiento.	87
Grafica 33 Deformaciones Resilientes de Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada	88
Grafica 34 Deformaciones Plásticas de la Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada	89
Grafica 35 Módulos Resilientes en Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada	89

Lista de figuras

Figura 1 Digestión del caucho con el asfalto	10
Figura 2 Estructura del asfalto modificado con caucho	11
Figura 3 Separación por tamaño del agregado pétreo	45
Figura 4 Mezcla Caliente	45
Figura 5 Preparación de la mezcla pasa su compactación.....	47
Figura 6 Matraz de vacío.....	50
Figura 7 Briqueta fallada por la prensa Marshall.	55
Figura 8 Grupo húmedo de briquetas.....	63
Figura 9 Muestra y dispositivo de seguimiento de la rueda de Hamburgo.	66
Figura 10 Equipo de ensayo de Tracción Indirecta	71

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Calculo del cemento asphaltico por briqueta.	25
Ecuación 2 Gravedad especifica Bulk.....	26
Ecuación 3 Porcentaje de agua absorbida por volumen.	26
Ecuación 4 Gravedad especifica del agregado	27
Ecuación 5 Porcentaje de asfalto absorbido.	27
Ecuación 6 Porcentaje de asfalto efectivo	28
Ecuación 7 Porcentaje de vacíos de aire	28
Ecuación 8 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	28
Ecuación 9 Porcentaje de vacíos llenos de ligante asphaltico.....	28
Ecuación 10 Volumen de agua absorbida	29
Ecuación 11 Volumen de vacíos con aire.	30
Ecuación 12 Porcentaje de saturación.....	30
Ecuación 13 Resistencia a la tensión.	30
Ecuación 14 Relación de resistencia a la tensión.....	30
Ecuación 15 Modulo de rigidez	32
Ecuación 16 Modulo de rigidez ajustado	33

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO

AUTOR(ES): ESTEBAN GOMEZ VARGAS

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue realizado con el fin de estudiar el desempeño mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica semidensa MSC-25 modificada con grano de caucho residual (GCR). Para realizar el estudio fue necesario diseñar dos tipos de mezcla, convencional y modificada mediante el método Marshall planteado en las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS. Antes de empezar los diseños de mezcla fue necesario que los materiales cumplieran con las especificaciones planteadas, por lo cual se llevó a cabo su respectiva caracterización. Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto se necesitó del cálculo de diferentes parámetros volumétricos además del flujo y la estabilidad, valores que se tomaban al fallar con la prensa Marshall briquetas que contenían diferentes porcentajes de asfalto los cuales estaban en el rango del 4% al 6% para convencionales y del 5.5% a 8% para las briquetas modificadas. El porcentaje óptimo de asfalto obtenido fue del 5% para la mezcla convencional y del 6.5% para la mezcla modificada. Con estos porcentajes óptimos se procedió a la elaboración de las briquetas necesarias para la evaluación y comparación del comportamiento de ambas mezclas frente a los ensayos de tracción indirecta, la resistencia al ahuellamiento y la susceptibilidad al agua. Los resultados obtenidos demuestran que la mezcla modificada presenta una mejora del 5% frente a la susceptibilidad al agua además de presentar una mejor adherencia de los agregados con el asfalto, en cuanto la resistencia al ahuellamiento la profundidad máxima de la mezcla convencional fue de 1.1 mm mientras que la mezcla modificada solo presentó un ahuellamiento de 0.39 mm. Los módulos resilientes obtenidos en el ensayo de tracción indirecta indican que la mezcla modificada es menos rígida que la mezcla convencional, presentado en si una mezcla asfáltica más flexible frente a las cargas dinámicas.

PALABRAS CLAVE:

Mezcla asfáltica, Grano de Caucho Residual, Susceptibilidad, Ahuellamiento, Modulo Resiliente.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF A MODIFIED ASPHALTIC MIX WITH RUBBER GRAIN

AUTHOR(S): ESTEBAN GOMEZ VARGAS

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

ABSTRACT

The present research work was carried out in order to study the mechanical and dynamic performance of a MSC-25 semi-dense asphalt mix modified with residual rubber grain (GCR). To carry out the study it was necessary to design two types of mixture, conventional and modified by the Marshall method proposed in the general construction specifications of INVIAS roads. Before starting the mixing designs, it was necessary for the materials to comply with the proposed specifications, for which reason their respective characterization was carried out. To determine the optimum percentage of asphalt it was necessary to calculate different volumetric parameters in addition to flow and stability, values that were taken when failing with the Marshall press briquettes containing different percentages of asphalt which were in the range of 4% to 6%. % for conventional and from 5.5% to 8% for modified briquettes. The optimum percentage of asphalt obtained was 5% for the conventional mixture and 6.5% for the modified mixture. With these optimum percentages, the briquettes necessary for the evaluation and comparison of the behavior of both mixtures were compared to the indirect tensile tests, the resistance to rutting and the susceptibility to water. The results obtained show that the modified mixture presents an improvement of 5% against the water susceptibility in addition to presenting a better adherence of the aggregates with the asphalt, as the resistance to rutting the maximum depth of the conventional mixture was 1.1 mm while the modified mixture only showed a rut of 0.39 mm. The resilient modules obtained in the indirect tensile test indicate that the modified mixture is less rigid than the conventional mixture, presented in itself a more flexible asphalt mixture compared to the dynamic loads.

KEYWORDS:

Asphalt Mix, Ground Tire Rubber (GTR), Susceptibility, Rutting, Resistant Module.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un país se basa principalmente en su economía, de tal forma que, si un país como Colombia que desea mejorar su desarrollo económico es de gran importancia contar con grandes redes viales, las cuales puedan cumplir con las necesidades y exigencias de los usuarios.

Tal misión implicaría lidiar con diferentes factores tanto económico como ambientales; entre estos la obtención de asfalto debido a la disminución de reservas de petróleo, los costos de mantenimiento de carreteras, la liberación de gases de efecto invernadero y el aumento del flujo vehicular que lleva consigo la disposición inadecuadas de llantas usadas. Así que para adaptar la infraestructura y alcanzar las metas de competitividad en el país, la ingeniería de pavimentos está obligada a ofrecer soluciones eficientes en cuanto a la construcción de nuevas redes viales.

Una solución ha sido la modificación del asfalto con polímeros, los cuales han demostrado mejorar sus propiedades mecánicas, químicas y reológicas; además de su buen desempeño ante diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Dentro de estos desempeños, el daño por humedad, la deformación causada por rodadura y la respuesta del asfalto ante una carga máxima han sido tema de gran importancia y de estudio. Por tal razón el propósito de este trabajo se basa en estudiar el desempeño mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica modificada con GCR (Grano Caucho Reciclado) mediante diferentes ensayos como la resistencia al ahuellamiento por medio de la rueda de Hamburgo, la susceptibilidad al agua y el ensayo de tracción indirecta. Los valores obtenidos se analizaron con respecto a los valores de una mezcla convencional obteniendo esta forma un análisis comparativo de sus comportamientos. El desempeño por parte de la mezcla modificada representa una gran alternativa para la elaboración de mezclas asfálticas además de una gran oportunidad en el manejo de residuos y desechos sólidos.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

-Comparar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional con el de una mezcla asfáltica con grano de caucho como ligante.

Objetivos Específicos

- Determinar el porcentaje óptimo de contenido de asfalto evaluando los parámetros necesarios tanto para una mezcla convencional como para una mezcla modificada.
- Desarrollar los correspondientes ensayos de laboratorio de acuerdo con las normas INVIAS para evaluar la competencia de los materiales que se utilizaran en los diseños.
- Evaluar el desempeño mecánico y dinámico de la mezcla convencional frente a la mezcla modificada.

3. MARCO TEÓRICO

El principal objetivo al modificar asfaltos es mejorar las propiedades mecánicas; las cuales no son posibles de obtener con técnicas convencionales. Una manera de modificarlos es por medio de la incorporación de polímeros, entre ellos los granos de caucho residuales; los cuales pueden ser básicamente fabricados o pueden resultar de la recuperación de fragmentos en desuso como por ejemplo los neumáticos de vehículos. (Ramirez Villamizar, Ladino Rubio, & Rosas Ramirez, 2014)

3.1 AGREGADOS PÉTREOS

Un material pétreo es un material que se usa en forma de partículas graduadas o fragmentadas para la construcción de capas granulares y la elaboración de mezclas asfálticas. El agregado constituye casi el 90% en peso y el 80% en la cantidad de volumen en casi todas las estructuras de pavimento; por tal razón el agregado cumple un papel importante en el comportamiento del pavimento.

Para evaluar si un agregado pétreo es apropiado para una mezcla asfáltica se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

-Gradación y tamaño máximo de partículas: Para la gradación las partículas deben estar en cierto margen de tamaños y cada tamaño debe estar presente en ciertas proporciones.

-Limpieza: La mayoría de los agregados contienen partículas indeseables que pueden afectar el comportamiento de un pavimento. Dentro de estas partículas se encuentran restos de vegetación, arcillas, partículas blandas, materia orgánica etc.

-Dureza: El agregado debe resistir el desgaste y degradación durante la elaboración, colocación y compactación de la mezcla; además del tiempo de servicio del pavimento.

-Forma y textura de las partículas: Este factor es de gran importancia en la trabajabilidad de la mezcla y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas irregulares y angulares suelen proporcionar las mejores características.

-Capacidad de absorción: La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es una propiedad importante para evaluar, ya que un agregado muy poroso requiere cantidades mayores de asfalto.

-Afinidad con el cemento asfáltico: Es la capacidad que tiene un agregado de aceptar y retener el cemento asfáltico.

(Amaya Marrugo & Soto Calle, 2015)

3.2 ASFALTO

El asfalto es un material aglomerante, viscoso, impermeable, adhesivo y resistente de color negro, puede proceder de yacimientos naturales o de la refinación de crudos de petróleo, aunque en la actualidad más del 90% de los asfaltos que se utilizan en la pavimentación se obtienen por destilación fraccionada del petróleo crudo.

Podemos caracterizar el asfalto por grado de viscosidad, grado de penetración y por grado de desempeño; independientemente lo que se busca es evaluar la consistencia de asfalto a una o varias temperaturas, así como evaluar propiedades relacionadas con pureza, seguridad y la susceptibilidad al agua y al envejecimiento.

El asfalto se utiliza en mayor parte en la construcción de carreteras ya que tiene ciertas propiedades que lo hacen comportarse como aglutinante y porque además es impermeable, adherente y cohesivo. Sus propiedades hacen que este pueda resistir altos esfuerzos provocados por diferentes tipos de cargas. Así que para la construcción de pavimentos el asfalto debe cumplir ciertas funciones como:

-Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.

-Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir las cargas producidas por los vehículos. Además de permitir la disminución de el espesor de la carpeta asfáltica. (Amaya Marrugo & Soto Calle, 2015)

3.3 MEZCLA ASFALTICA

Las mezclas asfálticas son la union de un ligante de origen bituminoso y un agregado pétreo, cuyas proporciones ya han sido adecuadas y definidas. Estas pueden ser producidas en caliente, semi-caliente, tibia o en frio, incluso preparadas en la propia vía en plantas móviles.

En estas mezclas, la resistencia se deriva de la fricción entre las partículas del agregado, de la viscosidad del asfalto en las condiciones de servicio y de la adhesión ligante-agregado, el cual da como origen a una cohesión en masa, siempre y cuando se observe la mezcla de manera integral.

En los revestimientos asfálticos se suelen usar mezclas densas en caliente (MDC) y mezclas semidensas en caliente (MSC), cuya granulometría del agregado se encuentra entre unos límites ya establecidos. Por ejemplo, una MSC-25, es una mezcla semidensa, cuyos agregados tienen un tamaño máximo de 25 milímetros y desde ese tamaño se inicia la gradación hacia inferiores tamaños.

En la siguiente tabla se presentan los tipos de mezcla según granulometría:

Tabla 1 Tipos de Mezcla

Tipo de Mezcla	Denominación	Definición
Mezclas densas	MDC	Tiene una curva granulométrica continua y bien gradada, en el cual lo que se busca en el menor número de vacíos posibles.
Mezclas Semidensas	MSC	Tienen una curva granulometría continua. Sin embargo, presenta insuficiencia en algunos tamaños lo cual le genera un porcentaje de vacíos controlado
Mezclas gruesas	MGC	El tamaño de partículas es mayor y por lo tanto es apreciable a nivel superficial, tienen un acabado más rugoso y un porcentaje de vacíos por encima de la mezcla semidensa.

Por lo tanto, una mezcla en caliente de gradación semidensa (MSC) se caracteriza por la diversidad de tamaños que poseen los agregados, haciendo que las partículas más pequeñas se ubiquen entre los intersticios de las más grandes, provocando así una estructura parcialmente cerrada con un contenido de vacíos controlados que podrían variar entre el 3% y 8%; diferenciándola así de las mezclas densas que tienen un porcentaje de vacíos mínimo. (Arao, 2016)

3.4 MEZCLA DE ASFALTO CAUCHO

Los cauchos que más se utilizan en las mezclas asfálticas modificadas provienen de las llantas desechadas; estas llantas están compuestas principalmente de caucho sintético, caucho natural, fibra textil y acero, además se le agregan otros materiales que mejoran sus propiedades como los son: óxido de Zinc y de Magnesio, y negro de humo. El caucho natural brinda maleabilidad, resistencia mecánica y adherencia, mientras el sintético prolonga su vida útil, y el negro de humo hace el material más resistente a la rotura y a la abrasión. (Alcaldía Mayor de Bogotá., 2005)

Tabla 2 Composición de las llantas.

MATERIAL	AUTOMOVILES Y CAMIONETAS	CAMIONES Y MICROBUSES
Caucho natural	14%	27%
Caucho sintético	27%	14%
Negro de humo	28%	28%
Acero	14-15%	14-15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16-17%	16-17%
Peso promedio	8,6 kg	45,4 kg
Volumen	0,06 m ³	0,36 m ³

Fuente: (Angulo & Duarte, 2005)

La adición de materiales al asfalto busca mejorar sus propiedades mecánicas y químicas; entre estas la rigidez, la susceptibilidad térmica y la resistencia bajo diferentes tipos de carga; asimismo se pretende dar solución a los problemas típicos de este material, como el ahuellamiento, la fatiga y el envejecimiento. Para el caso de la modificación del asfalto con caucho, se han estado probando diferentes tamaños de grano y con cauchos de diferentes orígenes. El mejor resultado se ha obtenido con polvo de caucho obtenido por trituración ambiental, debido a que la partícula posee una mayor superficie específica y esto la hace más reactiva. (Interempresas, 2018)

El cemento asfáltico modificado (asfalto-caucho) resulta de la interacción del caucho con el ligante; el caucho reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos.

El grado de modificación del ligante depende de muchos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura, proporción del caucho, tipo del cemento asfáltico, tiempo, 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.

El polvo del caucho interacciona con el asfalto, en un proceso llamado digestión, mediante el cual el caucho capta partes de las fracciones más volátiles del asfalto. Además, la digestión rebosa desde la superficie de la partícula hacia el interior convierte al caucho en un modificador del asfalto que mejora el tiempo de reacción y temperatura de mezclado; haciendo del grano del caucho una buena alternativa a utilizar. (Medina Gallego & Prieto Muñoz, 2003)

Los factores que influyen en la digestión del caucho con el asfalto son los siguientes:

- Incorporación de aceites compatibilizantes
- Porcentaje de caucho
- Superficie específica
- Granulometría del caucho
- Características del Betún asfáltico original
- Tiempo de temperatura de reacción.

- Mezclador empleado
- Impurezas del caucho

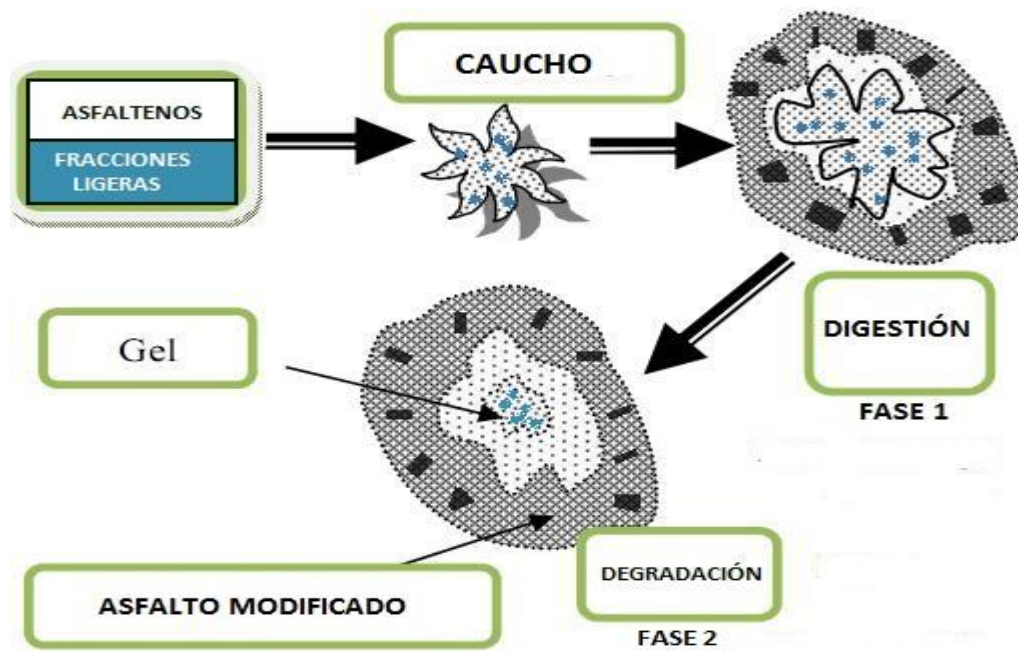


Figura 1 Digestión del caucho con el asfalto

Fuente: (Medina)

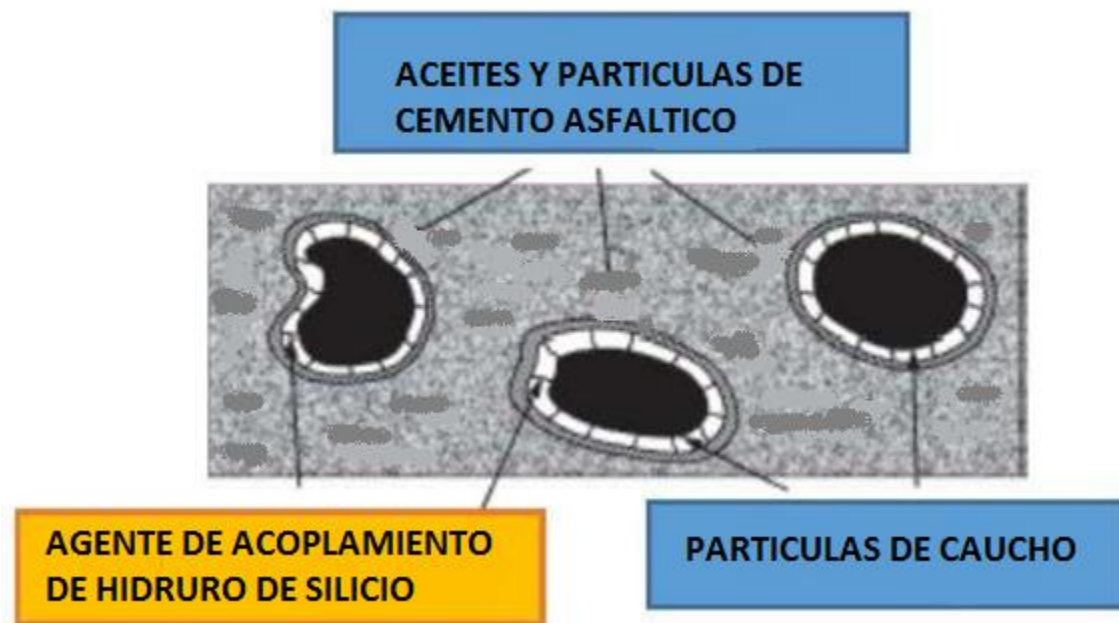


Figura 2 Estructura del asfalto modificado con caucho

(Orozco Zambrano & Alfonso Florez, 2015)

Algunas ventajas y desventajas que presenta el asfalto-caucho son:

- No es soluble, debido a que no se altera dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
- Cuando se mezcla a temperaturas elevadas con el asfalto, adquiere componentes livianos de éste, produciendo una partícula abultada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando una capa de asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.
- Proporciona a la mezcla asfalto-caucho mayor resistencia a la humedad y al calor debido a la vulcanización de la llanta.
- Mejora la elasticidad de la mezcla, haciéndola más resistente al ahuellamiento ya que incrementa su capacidad de recuperación.
- Se requiere de maquinaria especial para la elaboración del asfalto-caucho.

- Para la producción de asfalto-caucho está limitada a la cantidad de caucho reciclado disponible en el mercado.

3.5 PROCESO DE MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

Para la incorporación del caucho a las mezclas asfálticas existen dos métodos:

- Proceso por vía seca: En este proceso el caucho se adiciona directamente a la mezcla asfáltica caliente ya que es un proceso en el que no se modifica completamente el ligante, usualmente se mezclan los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el caucho como agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el uno y tres por ciento del peso total de los agregados de la mezcla. Para este método existen dos tecnologías muy comunes como PlusRide y tecnología Genérica.
- Proceso por vía húmeda: En el proceso por vía húmeda, el caucho es mezclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada asfalto-caucho que es usada de la misma manera que un ligante modificado, en este caso la proporción de grano de caucho se encuentra usualmente entre el 14% y el 20%, dependiendo de las especificaciones requeridas. Las tecnologías más usadas para el proceso húmedo son el mezclado por batchadas o McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

3.6 METODOLOGIA MARSHALL

La metodología Marshall consiste en encontrar una combinación adecuada entre los agregados pétreos y el cemento asfáltico. Esta combinación debe garantizar que la mezcla asfáltica pueda soportar los cambios volumétricos debidos a las cargas del tránsito y los efectos del clima.

La norma INVIAS establece ciertos procesos y requerimientos basados en esta metodología, los cuales permite garantizar los diferentes parámetros de densidades, contenidos de vacíos de la mezcla, estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA) y demás características físicas mecánicas las cuales son de gran importancia para la obtención del contenido óptimo de asfalto.

Los parámetros Marshall como contenido de vacíos, densidad, VFA, VMA, estabilidad y flujo) deben cumplirse dentro del rango de los porcentajes de asfalto a utilizar; estos parámetros se deben graficar con respecto al contenido de asfalto para así calcular las líneas de tendencia y entender mejor su comportamiento.

3.7 SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE UNA MEZCLA ASFALTICA

El estudio de la susceptibilidad o estudio del daño por humedad es uno de los problemas más analizados en el área de carreteras, ya que la presencia de agua en el interior de una mezcla afecta considerablemente su desempeño.

Este problema no ha fácil de tratar ya que hay que tener en cuenta ciertos factores como los agregados, el asfalto, el porcentaje de vacíos, la adhesión y cohesión, los cuales se deben tener en cuenta durante la etapa de diseño y etapa de servicio. Por eso este problema se ha venido estudiando y mejorando con diferentes ensayos y diferentes adiciones tanto en el material pétreo como en el asfáltico. (Figuerola Infante & Reyes Liscano, 2015)

3.8 ESTUDIO DE AHUELLAMIENTO MEDIANTE LA RUEDA DE HAMBURGO

El Método Hamburgo, se conoce como Sperbildungsgerat en Alemania, este se ha venido trabajando como una herramienta de especificación desde los años 70's en Hamburgo, Alemania. La prueba consta en dos ruedas de acero de 47 mm las cuales se mueven de forma axial sobre una probeta de 32 X 26 cm o en una muestra extraída de campo de 250 mm (10"). La carga en cada rueda es de 0.71 KN o 158 lb con una presión de contacto de 217 psi. Las probetas se ensayan a una temperatura de 50 °C y son sumergidas completamente en agua. El agua sirve para mantener más exacta la temperatura, además se puede determinar la susceptibilidad al agua de la mezcla. Adicionalmente se desarrolla un análisis volumétrico de la mezcla compactada.

La velocidad de la rueda es de 30 pasadas por minutos. La prueba se corre a 20,000 ciclos o a una deformación límite de 20 mm. El valor de falla en la norma es de 4 mm de deformación máxima en autopistas y 2.5 mm en zonas industriales. (Catarina Udlap)

3.9 TRACCION INDIRECTA

El ensayo de tracción indirecta es un método que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y así de esta manera poder obtener la máxima carga que puede aguantar una mezcla antes de romperse. En un tiempo sólo se utilizó para determinar la resistencia a tracción indirecta, pero ahora se ha venido profundizando en su estudio y ha llegado a ser uno de los ensayos con grandes perspectivas hacia el futuro.

El procedimiento se basa en aplicar una compresión diametral a una probeta cilíndrica, de manera que pueda provocar un esfuerzo de tracción uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y de esta manera poder determinar o medir el desplazamiento vertical, la deformación horizontal de diámetro y la carga de rotura.

Este ensayo no solo nos brinda información de la resistencia a la tracción indirecta, sino que también se puede aplicar para obtener información de las propiedades elásticas

resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y evaluar el efecto de la humedad en mezclas asfálticas. (Villar)

4. METODOLOGÍA

Para el proceso experimental de este proyecto se llevó a cabo la indagación de la información necesaria para el desarrollo adecuado de los ensayos; tanto para los agregados como para el diseño de mezcla y la utilización del asfalto modificado con grano de caucho. Se inicia desde la caracterización de los materiales, el diseño y hasta el estudio de las propiedades mecánicas que obtendrá la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho y su respectiva comparación con la mezcla convencional.

El proyecto se dividió en las siguientes etapas:

1. Caracterización de los agregados mediante los ensayos de: Porcentaje de Caras Fracturadas, Partículas Alargadas y Planas, Equivalente de Arena, 10% de finos, Angularidad, Abrasión y Granulometría el cual serán realizados de acuerdo con sus respectivas normas.
2. Con base a la metodología Marshall y las normas INV-E 450, INV-E 748 se diseñaron las mezclas convencionales y modificadas; el cual por medio de los parámetros de estabilidad, flujo y vacíos se lo logro obtener el porcentaje óptimo de asfalto.
3. Calculados los porcentajes óptimos de la convencional y modificada se procede a realizar las briquetas correspondientes para los diferentes ensayos como la evaluación a la susceptibilidad al agua, resistencia al ahuellamiento y el ensayo de traccion indirecta para la determinación del módulo de rigidez.
4. Con los resultados obtenidos de los ensayos realizados se procedió a realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de las dos mezclas.

4.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR

Para la caracterización del material granular se llevó a cabo los siguientes ensayos:

- a. Granulometría de los agregados grueso y finos.
- b. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
- c. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.
- d. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.
- e. Determinación del valor del 10% finos.
- f. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval.
- g. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles.
- h. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.
- i. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso. (INV.E-237)
- j. Equivalente de arena de suelos y agregados finos.
- k. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados.

a. Granulometría de los agregados grueso y finos.

El ensayo de granulometría es de gran importancia para el diseño de una mezcla asfáltica debido a que los agregados tienen relevante influencia en el comportamiento de una mezcla.

Por lo dicho anteriormente la norma (INV.E-213) propone ciertos criterios que tienen como objetivo determinar de forma cuantificada la distribución del tamaño de las partículas de los agregados fino y grueso por medio del tamizado.

Para empezar el ensayo la norma establece extender el agregado en una superficie plana el cual una vez seca se dividirá en cuatro partes de forma manual o mecánica; luego se toman dos cuartas partes para someterlas a un lavado que eliminará todo material que pueda pasar

por el tamiz N 200 [0.075 mm] y después se seca en un horno a 110 °C por un periodo de 24 horas (Se deben tener en cuenta los pesos antes y después del lavado).

Una vez secado el material se suministra a través de una serie de tamices cuyas aberturas estarán ordenadas de forma descendente; así se garantizará la correcta retención de material en cada tamiz. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

b. Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.

Una de las características más importantes de los agregados pétreos es su densidad y densidad relativa ya que con ella se puede determinar el volumen que ocupa un agregado en mezclas que serán dosificadas sobre la base de un volumen absoluto. La densidad relativa también se usa para el cálculo de vacíos, humedad superficial y demás cálculos requeridos.

El método consiste en llenar un picnómetro con agua. Luego se introduce en el picnómetro 500 gr de agregado fino ya saturado y superficialmente seco, se añade agua hasta un completar un 90 % de la capacidad del picnómetro y se rueda para eliminar el aire atrapado. Se procede a tomar el peso del picnómetro más la muestra. Se remueve todo el agregado fino del picnómetro y se seca a una temperatura de 110 °C para luego tomar su peso. (Instituto Nacional de vías., 2013)

c. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

Para los agregados es de gran importancia determinar su porcentaje de caras fracturadas ya que la forma de las partículas puede afectar su trabajabilidad, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a una densidad requerida y la resistencia del pavimento durante su vida de servicio. La norma INV.E-227 adopta un método para calcular el porcentaje de partículas fracturadas de un agregado grueso.

Para el ensayo se toma 1500 gr el material retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$; esta masa que ya debe estar lavada y seca. Para considerar una partícula como cara fracturada la cara debe corresponder a un cuarto de la mayor sección transversal; luego se determina la masa y el

número de partículas clasificadas como fracturadas y no fracturadas. (Instituto Nacional de Vías., 2013)

d. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

El comportamiento de una mezcla puede verse afectado por el porcentaje de partículas planas o alargadas de su agregado, por eso la norma INV.E-240 establece ciertos métodos para verificar las relaciones de largo/ancho, ancho/espesor, o largo espesor.

Para realizar el ensayo la muestra debe haberse secado a una temperatura de 110°C y haber pasado por el tamizado según la norma INV.E-213; con el 10% o más del material retenido en los tamices de (3/8”) o (N°4) se determinará el aplanamiento y el alargamiento de acuerdo al siguiente proceso: Se adapta la abertura del calibrador al máximo ancho para las partículas planas y a la más grande longitud para partículas alargadas. La partícula se denomina alargada si al ser colocada por su ancho máximo atraviesa la abertura más pequeña y se denomina plana si al ser colocada por su espesor máximo atraviesa la abertura más pequeña. Se determinarán las proporciones de alargadas o planas por su masa total respectiva. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

e. Determinación del valor del 10% finos.

Las cargas del tránsito someten al pavimento asfáltico con elevados esfuerzos constantemente; por eso la carpeta asfáltica y demás capas tiene como fin disipar estos esfuerzos y transmitirlos en magnitud apropiada capas subyacentes de modo que no puedan desintegrarse. El ensayo de 10% de finos evalúa como el agregado pétreo se comporta ante una degradación mecánica.

El procedimiento consiste en usar un cilindro de 77 mm de radio interno y 140 mm de altura y un espesor de 16mm. Allí se compactará una muestra que estará seca al aire y tamizada por las mallas de 1/2” y 3/8”, el cilindro se debe llenar en tres niveles consecutivos de una misma altura, aplicando a cada nivel 25 golpes con una varilla para compactación.

Luego de insertar el pistón se coloca en conjunto entre las platinas de la máquina de compresión y se aplica la carga a una velocidad uniforme hasta alcanzar la penetración deseada. Se exime la carga y se transfiere el material del cilindro a una bandeja que será pesada y nombrada como M1. Luego M1 se criba en el tamiz N°8 y se denominara como M2 la parte pasante y M3 como la retenida para así analizar que las relaciones M2/M1 se encuentren en el rango del 7.5% y 12.5%. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

f. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval.

La finalidad de la prueba Micro Deval es determinar la perdida por abrasión de los agregados por medio de una acción combinada de fricción y molienda con esferas de acero en presencia de agua. La prueba consiste en sumergir una muestra seca de 1500 gramos en dos litros de agua por una hora y que luego será lleva al recipiente cilíndrico de la maquina Micro Deval con 5000 gramos de esferas de acero. Esta procede a rotar a una velocidad de 100 rpm por un periodo de dos horas.

Una vez que la muestra se haya extraído y esté completamente seca; se procederá a medir las pérdidas que serán la cantidad de material que pase por el tamiz N°16. (Intituto Nacional de Vias., 2013)

g. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles.

Para determinar la resistencia a fragmentación de las partículas de tamaños menores de 33.7mm o de 1 ½ pulgadas se utiliza la máquina de los ángeles.

Para esto se debe utilizar una muestra representativa que estará lavada y secada a una temperatura constante de 110 °C para así introducirla a la máquina que rotará a 33 rpm hasta completar 100 y 500 revoluciones. Una vez completo el número de vueltas se procede a separar la muestra pasándola por el tamiz mayor al N°12 y la fina que pase por la N°12. El material que no paso por el tamiz N°12 se seca para determinar así su masa. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

h. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

Para hacer una valoración de la resistencia a la intemperie de los agregados de los agregados pétreos en diferentes aplicaciones de concreto, la norma INV.E-220 establece un procedimiento que simula los agentes atmosféricos. Este consiste en someter los agregados a repetidas inmersiones en soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio, además de secados al horno para deshidratar de los poros permeables la sal que se encuentra allí.

Para el ensayo se debe preparar una mezcla de agua con sulfato de sodio o magnesio; el agua debe estar a una temperatura de 25 a 30 °C y el volumen total debe ser como mínimo cinco veces mayor a la muestra de agregados.

Para la muestra del agregado fino, este debe haber pasado en su totalidad el tamiz de 3/8" y su peso debe ser de 100 gr para los tamices N° 4,8,16,30,50.

Para la muestra del agregado grueso deben haberse retirado todas las partículas menores al tamiz N° 4 y para el ensayo unas cantidades retenidas de 300 gr en el tamiz N° 3/8, 330gr para el N° 1/2 y 670 gr en el N° 3/4.

Después de haber terminado los ciclos de inmersión y secado se pasan de nuevo por los tamices ya nombrados; se determina la masa del material retenido en cada tamiz y se registra cada cantidad. La diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la muestra ensayada es la pérdida durante el ensayo, la cual se debe expresar como un porcentaje de la masa inicial. (Instituto Nacional de Vías, 2013)

i. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso.

Las partículas menores a 0.5 mm que se encuentran adheridas o mezcladas en las superficies de las partículas del agregado grueso son consideradas como impurezas. Así que para la determinación estas cantidades la norma establece realizar una limpieza superficial que consiste en separar por lavado mediante un tamiz las partículas menores a

0.5 mm y que luego después de secada la muestra se calculara el porcentaje de impurezas respecto a la masa total tomada al inicio. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

j. Equivalente de arena de suelos y agregados finos.

Tomo material granular está compuesto por partículas gruesas deseables y partículas finas indeseables. Entre las indeseables encontramos las proporciones de polvo, el material de apariencia arcilloso, finos plásticos y aquellos inferiores a 4.75 mm.

El ensayo consiste en encontrar un equivalente de arena y agregados fino; por lo tanto, se tomará una muestra de 1500 gr el cual debe ser humedecida para evitar la pérdida de finos durante de cuarteo. La muestra se pasará por el tamiz N°4 para así obtener el material deseado. El material se verterá en el cilindro con una solución de cloruro de calcio que se graduará hasta una altura de 101.6 mm durante un periodo de 10 minutos, luego se colocará en el agitador mecánico por 45 segundos, se mantiene en posición vertical y se introduce el tubo irrigador en el cilindro hasta el fondo para impulsar el material fino que se encuentra en el fondo, se lavan los finos hasta la marca de 381 mm y se dejar reposar otros 20 minutos, luego se toma lectura de la arcilla y se introduce el disco, la barra y el sobrepeso hasta que llegue donde se encuentra la arena para así tomar la lectura de la arena. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

k. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados.

La textura del agregado fino y la forma de las partículas influyen en el contenido de vacíos, es decir que un contenido muy grande de vacíos indica que hay mayor angulosidad, menor esfericidad o una textura de superficie muy áspera.

La norma INV.E-239 establece un método que provee el contenido porcentual de estos vacíos y consiste en llenar un cilindro calibrado de 100 ml con un agregado fino que se verterá desde una altura fijar atreves de un embudo. Se extraerá el agregado fino del recipiente para determinar su masa. Para calcular el contenido de vacíos se determina la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor; también se puede calcular usando la densidad relativa seca del agregado fino. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

4.2 CARACTERIZACION DEL ASFALTO

La caracterización del asfalto es un factor muy importante a la hora de diseñar una mezcla asfáltica, para esto es importante conocer ciertas características como la penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, viscosidad absoluta, ductilidad y demás.

Los asfaltos utilizados en este proyecto son el asfalto 60-70 y el asfalto caucho el cual ha sido modificado con grano de caucho; su caracterización ha sido previamente realizada por la empresa Multinsa; sus asfaltos se caracterizan por cumplir con todas las especificaciones de la norma INVIAS además de otras normas internacionales. Sus propiedades vienen presentadas en sus respectivas fichas por lo cual su caracterización se presentará más adelante.

4.3 METODOLOGIA MARSHALL

4.3.1 PREPARACION DE BRIQUETAS

Para llevar a cabo la elaboración de las briquetas, se empleó el procedimiento explicado en la norma INV.E-748 el cual aplica el método de diseño Marshall. Este método tiene como fin la determinación del contenido óptimo de asfalto en una cantidad específica de agregados. El método consiste en preparar una serie que briquetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico con el fin de obtener los resultados más característicos en la determinación del valor óptimo.

Las preparaciones de briquetas se realizan con incrementos del 0.5% de asfalto y cada briqueta debe contener 1200 gramos en su totalidad de materiales; en total por cada porcentaje de asfalto se fabricarán 3 briquetas. Para su preparación los agregados de colocaran en una bandeja y se calentaran hasta cierta temperatura para así verter ya caliente el cemento asfáltico y obtener entonces una mezcla homogénea. Al mismo tiempo de la preparación de la mezcla, el molde, collar y placa de base también se calientan a una temperatura de 150 °C, antes de la compactación se arma el conjunto del molde y se unta con varsol, se coloca un papel filtro en el fondo del molde para introducir el material y otro encima después de haber acomodado la mezcla con un palustre; con el martillo de compactación se procederá a compactar la mezcla con el número de golpes específicos para ambas caras y una vez finalizada la compactación se dejan enfriar el molde a temperatura ambiente por 24 horas para luego extraerla, identificarla y determinar la gravedad específica Bulk.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se desarrollaron dos procedimientos Marshall; uno para el desarrollo de briquetas convencionales y otro para briquetas con asfalto modificado con grano de caucho; en las briquetas convencionales se escogieron cinco porcentajes de asfalto, 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje y en las briquetas modificadas se escogieron 6 porcentajes, 5.5%, 6%, 6.5%, 7%, 7.5% y 8%, realizando también 3 briquetas por cada una. La elaboración de las briquetas consistía en que el material seco debería mantener la gradación especificada en

la tabla 450-6 para mezclas semidensas MSC-25 de las especificaciones generales de la construcción de carreteras (artículo 450). (Intituto Nacional de Vias, 2013)

Tabla 3 Franjas Granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

Tipo de Mezcla		TAMIZ(mm / U.S. Standard)									
		37,5	25,5	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
% PASA											
Densa	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSA	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-90	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MODULO	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
Tolerancias en produccion sobre la formula de trabajo(+/-)			4%					3%			2%

Fuente: (Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradacion Continua., 2013)

En el cálculo de la gradación el peso del cemento asfáltico se determina de la siguiente manera:

$$\text{Peso del Cemento Asfáltico} = \frac{(1200 \text{ gr}) * \text{Peso del cemento} [\%]}{100}$$

Ecuación 1 Calculo del cemento asfáltico por briqueta.

Así calculado el peso del cemento asfáltico y la granulometría, se procede a calentar el agregado y el cemento para realizar la respectiva mezcla.

DETERMINACION DE PARAMETROS VOLUMETRICOS

4.3.2. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO “Bulk”

Para la determinación de la gravedad especifica bulk y la densidad de los especímenes se aplica la normativa INV.E-733.

Una vez que las briquetas alcanzaron la temperatura ambiente se tomaron los diámetros, alturas y pesos secos. Después se procedió a sumergir las briquetas en agua para tomar pesos sumergidos y luego pesos superficialmente secos; una vez tomados estos datos se procede a calcular la densidad Bulk y demás datos para cada una de las muestras con las siguientes formulas:

$$\text{Gravedad especifica bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 2 Gravedad especifica Bulk.

Donde:

A: Masa del espécimen seco en el aire, g;

B-C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C;

B: Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco (SSS), g;

C: Masas del espécimen sumergido con agua, g.

$$\text{Densidad} = \text{Gravedad especifica bulk} * 997.0$$

Dónde: 997.0 = Densidad del agua a 25°C en Kg/m³ (0.9970 g/cm³)

$$\% \text{ de agua absorbida por volumen} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

Ecuación 3 Porcentaje de agua absorbida por volumen.

4.3.3 DETERMINACION DE RELACIONES VOLUMETRICAS

Las proporciones volumétricas de asfalto y los componentes del agregado son de gran importancia a la hora de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica relativa del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (VA); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA). Para su determinación se aplicará para cada uno de los valores la formula correspondiente.

$$(G_{se}) \text{Gravedad específica efectiva del agregado} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}}}{\frac{P_b}{G_b}}$$

Ecuación 4 Gravedad específica del agregado

Donde:

G_{mm}: Gravedad específica máxima de la mezcla

P_{mm}: Porcentaje en masa de la mezcla total suelta

G_b: Gravedad específica del cemento asfáltico.

P_b: Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla.

$$P_{ba} (\text{Porcentaje de asfalto absorbido}) = 100 \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) G_b$$

Ecuación 5 Porcentaje de asfalto absorbido.

Donde:

G_{se}: Gravedad específica efectiva del agregado combinado

G_{sb}: Gravedad específica Bulk del agregado combinado

$$P_{be}(\text{Porcentaje de asfalto efectivo}) = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

Ecuación 6 Porcentaje de asfalto efectivo

Donde:

P_b : Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla.

P_{ba} : Porcentaje de asfalto absorbido

P_s : Porcentaje de agregado en la mezcla

$$\%V_a(\text{Porcentaje de vacíos de aire}) = 100 \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

Ecuación 7 Porcentaje de vacíos de aire

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla

G_{mb} : Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

$$VAM(\text{Porcentaje de vacíos en el agregado mineral}) = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} P_s$$

Ecuación 8 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Donde:

G_{mb} : Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

G_{sb} : Gravedad específica Bulk del agregado combinado

P_s : Porcentaje de agregado en la mezcla

$$VFA(\text{Porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico}) = 100 \left(\frac{VAM - V_a}{VAM} \right)$$

Ecuación 9 Porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico.

Donde:

VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

V_a = Porcentaje de vacíos de aire.

$$\text{Relación llenante / ligante efectivo} = \frac{\text{Porcentaje de tamiz \#200}}{\text{Porcentaje de asfalto efectivo}}$$

4.3.4 EVALUACION DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO

Después de la determinación de la densidad de las briquetas se procede a realizar el ensayo de estabilidad y flujo; para esto se introducen las briquetas a baño maría a unos 60°C por intervalo de 30 a 40 minutos para luego con el equipo Marshall ensayar las briquetas; la carga que se aplica tiene una rata de deformación constante de 50 mm/min. La carga máxima que tiene la biqueta al momento de romperse se denomina estabilidad Marshall y la deformación que se presenta se denomina flujo Marshall.

4.3.5 EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFALTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA.

La finalidad de este ensayo es medir el efecto que tiene el agua sobre la resistencia a la tracción indirecta en mezclas asfálticas. Así que, para establecer el potencial de daño por humedad, la norma INV.E-725 establece un método que consiste en preparar un grupo de briquetas cuyo porcentaje de vacíos debe estar entre 6 y 8%. La mitad del grupo se mantendrá en condición seca, mientras que el otro se satura en un baño de agua por 24 horas, luego para ambos subgrupos se determina la resistencia a la tensión por la prueba de tracción indirecta. (Instituto Nacional de Vias, 2013)

Para el cálculo de la resistencia a la tensión y grado de saturación se procede a utilizar las siguientes formulas:

$$V_{wa} = \text{Masa SSS} - \text{Masa seca al aire}$$

Ecuación 10 Volumen de agua absorbida

$$V_A = \frac{\% \text{ de vacíos con aire} * \text{volumen del espécimen}}{100}$$

Ecuación 11 Volumen de vacíos con aire.

$$\% \text{ de Saturación} = \frac{V_{wa}}{V_A} * 100$$

Ecuación 12 Porcentaje de saturación

$$R_T = \frac{2P}{\pi * t * D} * 100$$

Ecuación 13 Resistencia a la tensión.

Donde:

R_T : Resistencia a la tensión, [lb/bg²]

P: Carga máxima, [lb]

t: Altura espécimen, [in]

D: Diámetro espécimen, [in]

$$RTT = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100$$

Ecuación 14 Relación de resistencia a la tensión.

Donde:

RTT: Relación de resistencia a la tensión, %;

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua;

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión del subgrupo mantenido en seco.

4.3.6 EVALUACION DEL AHUELLAMIENTO POR MEDIO DE LA RUEDA DE HAMBURGO EN PISTA DE MEZCLA DE MEZCLA ASFALTICA

La norma ASSTHO T324-04 establece un procedimiento que permite medir el ahuellamiento y la susceptibilidad en mezclas de asfalto; el método consiste en tomar dos especímenes de mezcla asfáltica con diámetros de 150 mm y alturas de 60 mm; luego se colocaran en la bandeja de montaje para luego encender el dispositivo de prueba. Al iniciar el software se debe configurar ciertos criterios como la profundidad máxima permitida de ahuellamiento, la temperatura, que debe estar en el rango de 25°C a 70° C, siendo 50° la temperatura más común, y el número de pasadas, que en este caso serán de un total de 20000 pasadas.

Los resultados arrojados por la maquina representan la deformación del espécimen causada por la carga de la rueda; estos se deben graficar de tal manera que la profundidad de rodadura quede en función del número de pasadas y así obtener la pendiente e intersección de la primera y segunda porción de estado estable de la curva. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007)

4.3.7 DETERMINACION DEL MODULO RESILENTE POR MEDIO DEL ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA EN PROBETAS CILINDRICAS

El ensayo de tracción indirecta permite determinar el módulo de rigidez de una mezcla asfáltica, para esto es necesario contar con probetas cilíndricas cuyos diámetros sean de 100 mm aproximadamente, además que tengan alturas entre 30 mm y 75 mm; al ensayar las probetas el entorno debe estar a una temperatura específica por lo cual se necesita de previo control. La temperatura de la probeta se debe determinar por sensores de resistencia que estará fijados en la superficie curva y en el centro de una probeta patrón; para así proceder a realizar el ensayo.

Para determinar la rigidez y obtener la deformación diametral horizontal en el tiempo especificado, se deben aplicar como mínimo 10 impulsos de acondicionamiento para que el equipo se ajuste a la magnitud y duración de la carga; luego para el cálculo de la rigidez se utilizarán las mediciones obtenidas 5 impulsos de carga posteriores a los 10 de acondicionamiento. Así para cada uno de los cinco impulsos se determinará el módulo de rigidez. (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2005)

Para el cálculo del módulo de rigidez se utilizará la siguiente fórmula:

$$S_m = \frac{F * (v + 0.27)}{(z * h)}$$

Ecuación 15 Modulo de rigidez

Dónde:

S_m : Modulo de rigidez [Mpa]

F: Carga máxima vertical [N]

z: deformación horizontal[mm]

h: espesor de la probeta [mm]

v: coeficiente de Poisson = 0.35.

Una vez calculado el módulo de rigidez se debe ajustar a un factor de superficie de carga de 0.6; y para esto se debe aplicar la siguiente formula:

$$S'_m = S_m * (1 - 0.322 * (\log(S_m) - 1.82) * (0.60 - k))$$

Ecuación 16 Modulo de rigidez ajustado

Donde:

S'_m : Módulo de rigidez ajustado para un factor de superficie de carga de 0.6

k: Factor de superficie de carga

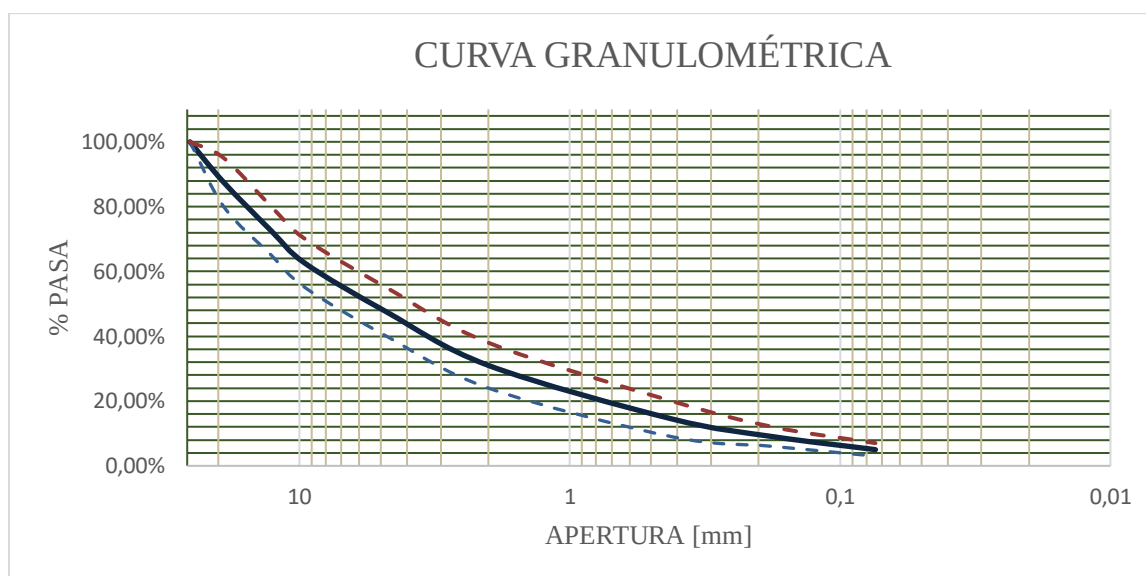
S_m : Módulo de rigidez [Mpa]

5. RESULTADOS

5.1 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL GRANULAR

a. Granulometría de los agregados.

Grafica 1 Granulometría del material pétreo



La grafica anterior nos presenta la granulometría que se utilizara para la gradación de cada una de las briquetas y sus diferentes porcentajes de asfalto. Esta representa el valor medio entre los límites propuesto en la tabla 450-6 del INVIAS para mezclas MSC-25.

b. Densidad, densidad relativa (gravedad especifica) y absorción del agregado.

Después de haber realizado el ensayo de acuerdo con la norma se determinaron los siguientes valores:

A	Peso seco. [gr]	492
-	Peso picnómetro. [gr]	160
S	Peso superficialmente seco. [gr]	497
C	Picnómetro + material + agua. [gr]	997
B	Picnómetro + agua. [gr]	689

Tabla 4 Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Descripción	Resultados	Unidades
Densidad Relativa (Gravedad específica) Seca al horno (SH)	2,603	gr/cm ³
Densidad Relativa (Gravedad específica) (SSS)	2,630	gr/cm ³
Densidad Relativa Aparente (Gravedad específica Aparente)	2,674	gr/cm ³
Absorción, %	1,016	%

c. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

El porcentaje obtenido es de 95% lo cual nos indica que está por encima del mínimo establecido por la norma, el cual se encuentra entre el 60% y 75% de cara fracturadas.

Tabla 5 Porcentaje de caras fracturadas.

Peso Muestra [gr]	1500
Peso Fracturadas [gr]	1430
Peso Lisas [gr]	70
Caras Fracturadas [%]	95

d. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

La tabla n se determinan los porcentajes de aplanamiento y alargamiento de dos tolvas de este agregado cuya muestra consistía en 100 partículas para cada una.

Tabla 6 Proporción de partículas planas y alargadas en agregados gruesos.

Muestra	Total, de Partículas	# de Partículas planas y alargadas	% de Partículas planas y alargadas [%]
Tolva de 1/2 - Tamiz 3/8	100	3	3
Tolva de 1/2- Tamiz 1/2	100	4	4
Tolva de 3/4- Tamiz 1/2	100	3	3
Tolva de 3/4- Tamiz 3/4	100	5	5
Porcentaje total de partículas planas y alargadas			3,75

El porcentaje total de partículas planas y alargadas es de un 3.75 %; por lo cual cumple con los requisitos de los agregados para mezclas asfálticas ya que el máximo permitido es de un 10%.

e. Determinación del valor del 10% finos.

Después de realizar el procedimiento de la norma en condiciones secas y húmedas se obtienen los siguientes datos:

Tabla 7 Determinación de finos en condición seca.

CONDICION SECA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Masa inicial [gr]	2718	Masa inicial [gr]	2717
Masa 2 (pasa N°8) [gr]	297	Masa 2 (pasa N°8) [gr]	298
Masa 3 (retenido N°8) [gr]	2420	Masa 3 (retenido N°8) [gr]	2418
Fuerza (f) [kN]	220	Fuerza (f) [kN]	217
Fuerza (F) [kN]	206	Fuerza (F) [kN]	203
Valor 10% finos		205	

Tabla 8 Determinación de finos en condición húmeda.

CONDICION HUMEDA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Masa inicial [gr]	2700	Masa inicial [gr]	2698
Masa 2 (pasa N°8) [gr]	337	Masa 2 (pasa N°8) [gr]	308
Masa 3 (retenido N°8) [gr]	2361	Masa 3 (retenido N°8) [gr]	2388
Fuerza (f) [kN]	200	Fuerza (f) [kN]	221
Fuerza (F) [kN]	170	Fuerza (F) [kN]	201
Valor 10% finos		185	

Relación húmedo seco

Relación húmedo/seco [%]	91
--------------------------	----

La relación húmeda/seco, mínima establecida en la tabla 450-3 de los requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de la norma INV.E; establece que esta relación debe ser como mínimo del 75%; por lo tanto, la relación obtenida cumple lo establecido.

f. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval.

Después de haber ensayado el material dentro de la maquina Micro-Deval encontramos que el porcentaje de abrasión es de un 7.5 %; lo cual es un valor aceptable ya que se encuentre en el rango del 5% y 20 % que está estipulado en la norma INV.E-238.

Tabla 9 Ensayo de Micro-Deval.

ENSAYO DE MICRO-DEVAL	
PESO MUESTRA [gr]	1500
PESO FINAL [gr]	1387
PORCENTAJE POR ABRASION [%]	7,5
DEGRADACION MICRO-DEVAL MAXIMA (%)	30,0

g. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles.

Al haber sometido el material pétreo a la degradación brindada por la máquina de los ángeles se obtienen los siguientes valores:

Tabla 10 Resultados máquina de los ángeles.

Ensayos	Peso inicial de la muestra [gr]	Peso final de la muestra [gr]	Porcentaje de desgaste	Rango permitido	Porcentaje de desgaste promedio
Ensayo a 500 revoluciones.	5000	3628	27	[25-35]	16,42
Ensayo a 100 revoluciones.	5000	4730	5,4	[5-7]	

Los porcentajes de desgaste se encuentran dentro de los rangos establecidos en la tabla 450-3 de la norma INV.E.

h. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

Una vez removido todo el sulfato de sodio y haber secado las muestras, se procedió a tamizar y a tomar las masas de nuevo para así determinar las diferencias de masa antes y después.

Tabla 11 Porcentajes de Perdida.

Ensayo de solidez con sulfato de magnesio			
Ensayo Solidez con Sulfato de Magnesio Máximo (%)		18	
Agregado fino		Agregado grueso	
#4	100 gr	3/8.	300 gr
#8	100 gr	1/2.	330 gr
#16	100 gr	3/4.	670 gr
#30	100 gr		
#50	100 gr		
PORCENTAJES DE PERDIDA		PORCENTAJES DE PERDIDA	
#4	1%	3/8.	2%
#8	1%	1/2.	2%
#16	1%	3/4.	2%
#30	1%	-	-
#50	1%	-	-

Los porcentajes de pérdida obtenidos del ensayo de solidez son menores al 18 %; lo cual nos da a entender que el agregado tiene una buena resistencia ante las condiciones de intemperie y además cumple con lo establecido en la norma Invias.

i. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso.

Cumpliendo con el procedimiento descrito en la norma INV.E-237 se logran determinar los siguientes datos deseados.

Tabla 12 Limpieza superficial

Peso Inicial [gr]	3900
Muestra Húmeda [gr]	1957
Muestra Seca [gr]	1953
Masa Húmeda Ensayo [gr]	1943
Masa	1936
Humedad (W)	0,002
Masa Seca (Mse) [gr]	1939
Impureza (I) [gr]	3
% de impurezas.	0,16

El porcentaje de impurezas obtenido fue del 0.16% lo cual nos indica que es menor al 0.5 % máximo permitido en la Norma INV.E-450.

j. Equivalente de arena de suelos y agregados finos.

Se calcula el equivalente de arena de acuerdo con los datos obtenidos después de realizar en ensayo descrito en la norma INV.E-133

Tabla 13 Equivalente de Arena

N° Ensayos	Lectura Arena	Lectura Arcilla	Equivalente de Arena	Equivalente de Arena Promedio
1	83,82	119,38	70	67
2	81,28	127	64	

k. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados.

Tabla 14 Datos obtenidos por el método A- Muestra gradada estándar

Peso inicial [gr]	190
Molde + material [gr]	474,8
Molde [gr]	318,8
Masa Agregado fino [gr]	156
Volumen Cilindro [ml]	107,13
Peso seco [gr]	492
Peso picnómetro [gr]	160
Peso SSS [gr]	497
Picnómetro + Material + Agua [gr]	997
Picnómetro + Agua [gr]	689
Gravedad específica	2,6
Angularidad [%]	44

El porcentaje mínimo permitido de angularidad permitida se encuentra en el rango del 35% y 45%; por lo tanto, la angularidad obtenida es aceptable.

Tabla 15 Ensayos realizados para los agregados pétreos.

CARACTERISTICA	NORMA INV	NIVEL DE TRANSITO	MIN	MAX	RESULTADO	CUMPLE
Dureza, agregado grueso(o)						
Desgaste en la máquina de los Ángeles -Capa de: rodadura / intermedia /base, 500 revoluciones	E-218	NT2	--	35	16,42	Si
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval. -Capa de: rodadura / intermedia /base	E-238	NT2	--	30	7,5	Si
Resistencia mecánica por el método de 10% de finos. -Capa de: rodadura / intermedia /base Relación húmedo/seco. [%]	E-224	NT2	--	--	91	Si
Durabilidad (O)						
Perdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, Max [%]	E-220	NT2	--	18	--	Si
Limpieza, agregado grueso (F)						
Impurezas en agregado grueso, máximo [%]	E-237	NT2	--	0,5	0,16	Si
Limpieza, gradación combinada (F)						
Equivalente de arena, mínimo [%]	E-133	NT2	50	--	67	Si
Índice de Plasticidad, máximo [%]	E-125	NT2	NP	NP	--	--
Geometría de las partículas, agregado grueso(F)						
Partículas planas y alargadas, máximo [%]	E-240	NT2	10	--	3,75	Si
Caras fracturadas [%] -Una cara: rodadura / intermedia /base	E-227	NT2	75	--	95	Si
Geometría de las partículas, agregado fino(F)						
Angularidad de la fracción fina, mínimo [%] -Capa de: rodadura / intermedia /base	E-239	NT2	40	--	44	Si

Fuente: Autor

La caracterización del material tenía como objetivo cumplir con requisitos exigidos por la norma INVIAS para una capa intermedia y un nivel de tránsito NT2, aun así, los valores obtenidos se ajustan para cualquier tipo de capa y cualquier nivel de tránsito.

5.2 CARACTERISTICAS DE LOS ASFALTOS

Los asfaltos que se utilizaron en este proyecto fueron el asfalto 60-70 el cual está constituido por la fracción más pesada obtenida en la destilación del crudo, y el asfalto caucho, que es una mezcla de asfalto con grano de caucho reciclado a partir de llantas en desuso, además de aditivos que promueven la compatibilidad entre estos dos componentes.

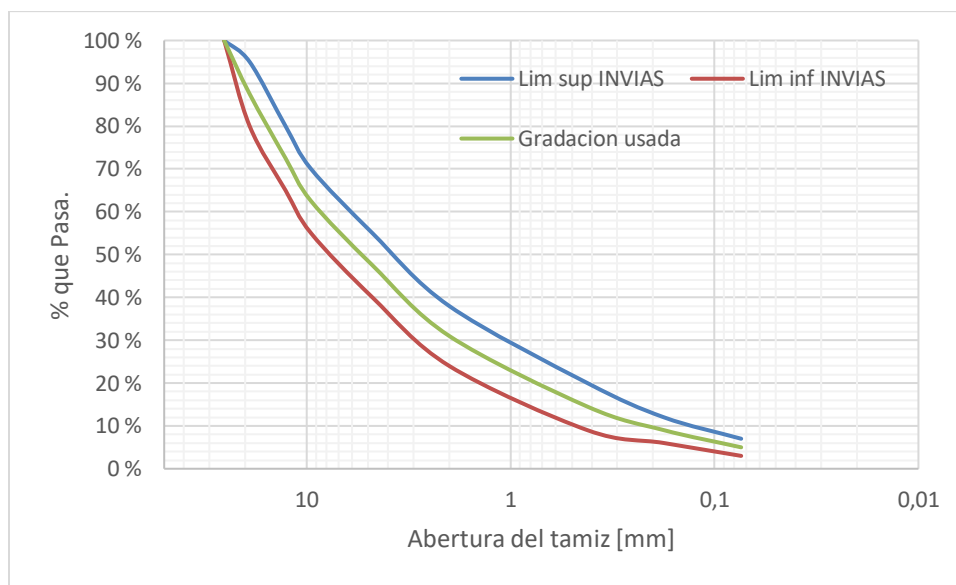
Característica	Norma de ensayo	Unidad	Asfalto /Min-Max	Asfalto Caucho / Min-Max
Penetración (25°C, 100 g 5s)	E-706	(0.1mm)	60-70	36
Penetración (4° C, 200 g 60s)	E-706	(°C)	60-70	19
Punto de Ablandamiento (°C)	E-712	(°C)	48-54	52
Índice de Penetración (-)	E-724	(-)	1,2-0,6	-
Viscosidad absoluta (60°C)	E-716 o E-717	(P)	1500	-
Viscosidad aparente (175°C)	E-716 o E-717	(P)	1500	1,7
Ductilidad	E-702	(cm)	15	-
Solubilidad en tricloroetileno	E-713	(%)	99	-
Contenido de agua	E-704	(%)	0,2	-
Punto de inflamación mediante la copa abierta Cleveland	E-709	(°C)	230	230
Contenido de parafinas (%)	E-718	(%)	3	3
Asfalto Residual luego de la Prueba de Película Delgada Rotatoria				
Pérdida de Masa por calentamiento	E-720	(%)	0,8	-0,1
Penetración del residuo, en % de la penetración original	E-706	(%)	50	85
Incremento en el punto de ablandamiento	E-712	(°C)	9	-
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717	(-)	4	-
Recuperación elástica utilizando el ductilómetro %	E-742	(%)	-	50
Penetración %(de la original)	E-706	(%)	-	65

PREPARACION DE BRIQUETAS

En la preparación de briquetas se necesita de un parámetro fijo para la gradación del material granular y la fórmula de trabajo; en este caso se utilizó la línea media presente entre las franjas granulométricas de la tabla 450 del INV.E para mezclas MSC-25. También se debe considerar que para los pesos de cada tamiz en la elaboración de una briketa se determinan a partir de un peso total de 1200 [gr].

La grafica siguiente nos presenta la granulometría de la mezcla patrón para la gradación de cada una de las briquetas y sus diferentes porcentajes de asfalto.

Grafica 2 Curva Granulométrica de la mezcla patrón MSC-25



Así que para llevar a cabo la dosificación y la preparación de las briquetas y obtener el porcentaje óptimo de asfalto; se ensayaron cinco porcentajes de asfalto para briquetas convencionales y seis porcentajes para briquetas con asfalto modificado con grano de caucho.

En las tablas 17 y 18 se presentan las dosificaciones respectivas para la briquetas convencionales y modificadas.



Figura 3 Separación por tamaño del agregado pétreo.



Figura 4 Mezcla Caliente

Tabla 16 Dosificación para briquetas convencionales.

# Tamiz	Ws para 4% de asfalto	Ws para 4,5% de asfalto	Ws para 5% de asfalto	Ws para 5,5% de asfalto	Ws para 6% de asfalto
1"	0	0	0	0	0
3/4"	144	143,25	142,5	141,75	141
1/2"	172,8	171,9	171	170,1	169,2
3/8"	115,2	114,6	114	113,4	112,8
N°4	172,8	171,9	171	170,1	169,2
N°10	190,08	189,09	188,1	187,11	186,12
N°40	190,08	189,09	188,1	187,11	186,12
N°80	63,36	63,03	62,7	62,37	62,04
N°200	46,08	45,84	45,6	45,36	45,12
Fondo	57,28	57,19	57,1	57,01	56,92
Ws Asfalto	48	54	60	66	72
Peso total	1200	1200	1200	1200	1200

Tabla 17 Dosificación para mezclas modificadas con grano de caucho.

# Tamiz	Ws para 5,5% de asfalto	Ws para 6% de asfalto	Ws para 6,5% de asfalto	Ws para 7% de asfalto	Ws para 7,5% de asfalto	Ws para 8% de asfalto
1"	0	0	0	0	0	0
3/4"	141,75	141	140,25	1548,36	138,75	138
1/2"	170,1	169,2	168,3	1858,032	166,5	165,6
3/8"	113,4	112,8	112,2	1238,688	111	110,4
N°4	170,1	169,2	168,3	1858,032	166,5	165,6
N°10	187,11	186,12	185,13	2043,8352	183,15	182,16
N°40	187,11	186,12	185,13	2043,8352	183,15	182,16
N°80	62,37	62,04	61,71	681,2784	61,05	60,72
N°200	45,36	45,12	44,88	495,4752	44,4	44,16
Fondo	57,01	56,92	56,83	667,4032	56,65	56,56
Ws Asfalto	66	72	78	84	90	96
Peso total	1200	1200	1200	1200	1200	1200



Figura 5 Preparación de la mezcla pasa su compactación.

La figura 5 representa la preparación de una mezcla dentro del molde justo antes de la aplicación de los 75 golpes del martillo de compactación.

5.3 PARAMETROS VOLUMETRICOS

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO “Bulk”

La determinación del peso específico Bulk es un factor importante en la metodología Marshall, por eso 24 horas después de la compactación de las probetas se procede al cálculo de los pesos secos, sumergidos y pesos superficialmente secos.

Tabla 18 Densidad Especifica "Bulk" para briquetas convencionales.

% de Asfalto	Peso Seco[gr]	Peso Sumergido[gr]	Peso SSS	Gravedad específica "Bulk"	Densidad Kg/m3
4	1195,64	704	1211,2	2,36	2350,26
4	1190,64	699	1199,1	2,38	2373,66
4	1168,2	690	1188,4	2,34	2336,87
4,5	1197,02	703	1210,4	2,36	2352,05
4,5	1240,42	731	1251	2,39	2378,27
4,5	1181,13	698	1208,7	2,31	2305,83
5	1193,12	704	1209,5	2,36	2353,2
5	1191,97	707	1200,2	2,42	2409,56
5	1125,35	667	1155,8	2,3	2295,36
5,5	1146,32	680	1177,1	2,31	2299,1
5,5	1183,02	704	1205,2	2,36	2353,29
5,5	1192,96	709	1207,5	2,39	2385,92
6	1193,54	704	1206,1	2,38	2369,96
6	1181,66	697	1194,3	2,38	2369,02
6	1050,69	611	1070,8	2,29	2278,25

Tabla 19 Densidad Especifica "Bulk" para briquetas modificadas.

% de Asfalto	Peso Seco[gr]	Peso Sumergido[gr]	Peso SSS	Gravedad específica "Bulk"	Densidad [Kg/m3]
5,5	1185,44	687	1186,02	2,38	2368,41
5,5	1176,87	681	1177,6	2,37	2362,75
5,5	1185,95	683	1186,2	2,36	2349,75
6	1153,29	665	1154,04	2,36	2351,20
6	1120,59	650	1121,01	2,38	2371,98
6	1139,03	653	1140,05	2,34	2331,61
6,5	1120,1	652	1120,1	2,39	2385,69
6,5	1191,54	693	1192,9	2,38	2376,41
6,5	1190,05	689	1190,6	2,37	2365,39
7	1077,25	619	1077,2	2,35	2343,99
7	1265,5	727	1266	2,35	2340,82
7	1210,08	695	1212,1	2,34	2333,11
7,5	1097,93	630	1097,8	2,35	2339,97
7,5	1160,96	668	1169,7	2,31	2307,11
7,5	1173,67	670	1175,2	2,32	2316,21
8	1199	686	1199,7	2,33	2327,04
8	1184,52	680	1185,9	2,34	2334,39
8	1133,66	644	1134,7	2,31	2303,36

Tabla 20 Gravedades específicas máximas para mezclas convencionales.

% Asfalto	Masa seca [gr]	Masa matraz con agua [gr]	Masa Matraz, agua y mezcla [gr]	Gmm
4	805,19	1311	1793,05	2,492
4,5	983,75	1310,9	1896,53	2,471
5	668,6	1310,8	1708,8	2,471
5,5	805,11	1310,16	1788,27	2,462
6	1011,23	1311,3	1910,41	2,454

Tabla 21 Gravedades específicas máximas para mezclas modificadas.

% Asfalto	Masa seca [gr]	Masa matraz con agua [gr]	Masa Matraz, agua y mezcla [gr]	Gmm
5,5	924,44	1310,9	1872,24	2,546
6	826,21	1311,8	1812,22	2,536
6,5	616,72	1311,8	1681,17	2,49
7	674,47	1312,11	1712,11	2,457
7,5	772,5	1311,6	1766,15	2,430
8	769,91	1311,7	1764,22	2,426



Figura 6 Matraz de vacío.

Tabla 22 Análisis volumétrico para mezcla convencional.

% Asfalto	Gse	Pba	Pbe	Relación llenante / ligante efectivo
4	2,649	0,73363481	3,29571058	1,062
4,5	2,646	0,69129679	3,83981156	0,912
5	2,668	1,0101154	4,04039037	0,866
5,5	2,625	0,37031783	5,15004965	0,680
6	2,633	0,49237057	5,53717166	0,632

Tabla 23 Análisis volumétrico para mezcla modificada.

% Asfalto	Gse	Pba	Pbe	Relación llenante / ligante efectivo
5,5	2,79	2,6340375	3,01083456	1,162
6	2,80	2,80157033	3,36652389	1,040
6,5	2,77	2,39813871	4,2577403	0,822
7	2,75	2,08826086	5,0579174	0,692
7,5	2,73	1,91096475	5,73235761	0,611
8	2,75	2,17678803	5,99735502	0,584

Tabla 24 Porcentaje de vacíos para briquetas convencionales.

% de Asfalto	Gravedad específica "Bulk"	% VA	% VAM	% VFA
4	2,36	5,40	12,96	58,37
4	2,38	4,45	12,09	63,18
4	2,34	5,93	13,46	55,90
	2,36	5,26	12,84	59,15
4,5	2,36	4,53	13,35	66,08
4,5	2,39	3,46	12,38	72,03
4,5	2,31	6,40	15,05	57,45
	2,35	4,80	13,59	65,19
5	2,36	4,47	13,76	67,49
5	2,42	2,19	11,69	81,31
5	2,30	6,82	15,88	57,04
	2,36	4,49	13,78	68,61
5,5	2,31	6,34	16,19	60,83
5,5	2,36	4,13	14,21	70,92
5,5	2,39	2,80	13,02	78,47
	2,35	4,42	14,47	70,07
6	2,38	3,12	14,06	77,79
6	2,38	3,16	14,09	77,57
6	2,29	6,87	17,38	60,47
	2,35	4,39	15,18	71,94

Tabla 25 Porcentaje de vacíos para briquetas modificadas.

% de Asfalto	Gravedad específica "Bulk"	% VA	% VAM	% VFA
5,5	2,38	6,69	13,66	50,99
5,5	2,37	6,92	13,86	50,11
5,5	2,36	7,43	14,34	48,19
	2,37	7,01	13,95	49,76
6	2,36	7,01	14,74	52,45
6	2,38	6,19	13,99	55,76
6	2,34	7,78	15,45	49,62
	2,36	6,99	14,72	52,61
6,5	2,39	4,03	13,95	71,12
6,5	2,38	4,40	14,28	69,18
6,5	2,37	4,85	14,68	67,00
	2,38	4,43	14,30	69,10
7	2,35	4,33	15,90	72,80
7	2,35	4,46	16,02	72,19
7	2,34	4,77	16,30	70,73
	2,35	4,52	16,07	71,90
7,5	2,35	3,40	16,50	79,39
7,5	2,31	4,76	17,67	73,08
7,5	2,32	4,38	17,35	74,75
	2,33	4,18	17,17	75,74
8	2,33	3,78	17,41	78,29
8	2,34	3,48	17,15	79,73
8	2,31	4,76	18,25	73,92
	2,33	4,01	17,60	77,31

5.4 VALORES DE ESTABILIDAD Y FLUJO

Las briquetas después de haberlas sometido a un curado en agua se ensayaron en la prensa Marshall para así determinar su estabilidad y flujo.

Tabla 26 Datos Ensayo Marshall - Mezcla convencional.

% de Asfalto	Estabilidad [kN]	Flujo [mm]	Prom. Estabilidad	Prom. Flujo
4	25,91	4,66	25,62	4,37
4	25,03	4,39		
4	25,91	4,05		
4,5	29,30	4,96	29,34	4,92
4,5	29,49	4,90		
4,5	29,24	4,90		
5	27,02	5,44	27,14	4,96
5	27,13	4,98		
5	27,26	4,48		
5,5	24,08	4,48	26,84	4,76
5,5	28,35	4,50		
5,5	28,08	5,31		
6	23,95	5,61	23,53	5,03
6	23,21	4,50		
6	23,43	4,99		

Tabla 27 Datos Ensayo Marshall - Mezcla modificada.

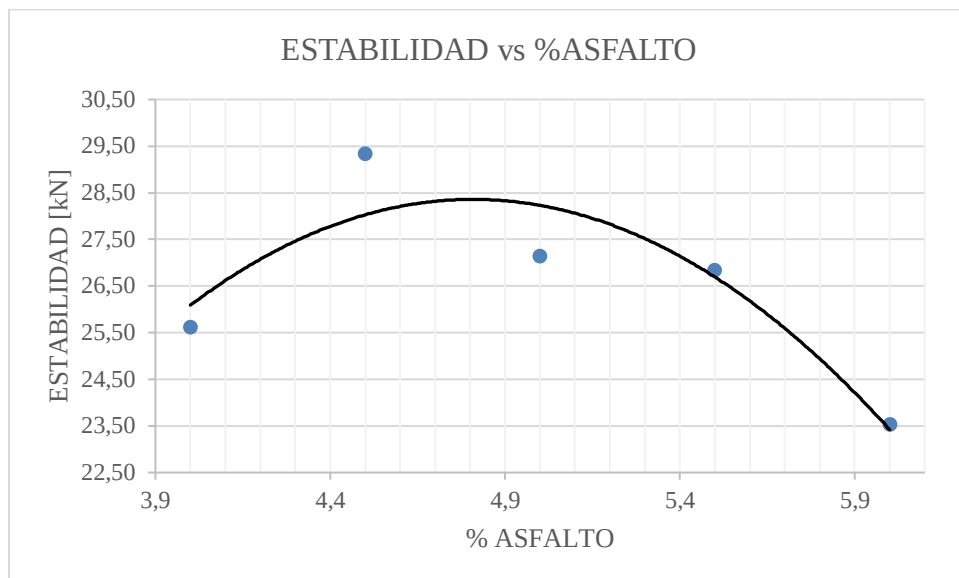
% de Asfalto	Estabilidad [kN]	Flujo [mm]	Prom Estabilidad	Prom Flujo
5,5	19,26	4,52	19,17	4,50
5,5	18,91	4,41		
5,5	19,34	4,57		
6	21,45	4,12	21,07	4,33
6	21,33	4,30		
6	20,43	4,56		
6,5	21,79	4,84	23,00	4,84
6,5	24,81	5,12		
6,5	22,41	4,55		
7	22,10	4,52	20,61	4,83
7	21,66	5,49		
7	18,06	4,47		
7,5	17,98	5,33	18,02	5,86
7,5	17,68	6,76		
7,5	18,41	5,49		
8	17,00	5,31	17,52	5,78
8	17,87	5,72		
8	17,69	6,32		



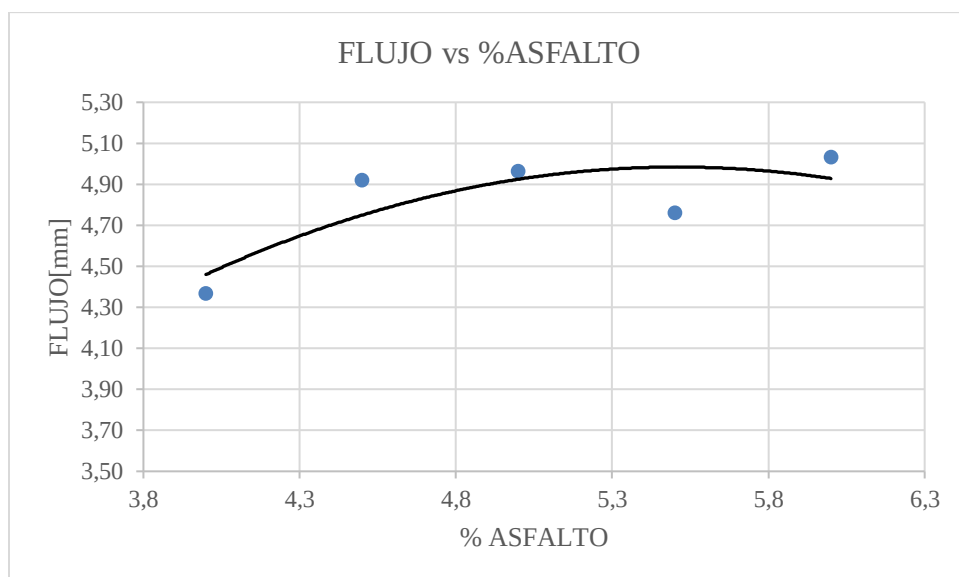
Figura 7 Briqueta fallada por la prensa Marshall.

Una vez determinados los valores de estabilidad, flujo y vacíos de las briquetas convencionales y modificadas, se deben graficar sus promedios con respecto al porcentaje de asfalto; para así calcular el porcentaje óptimo de asfalto.

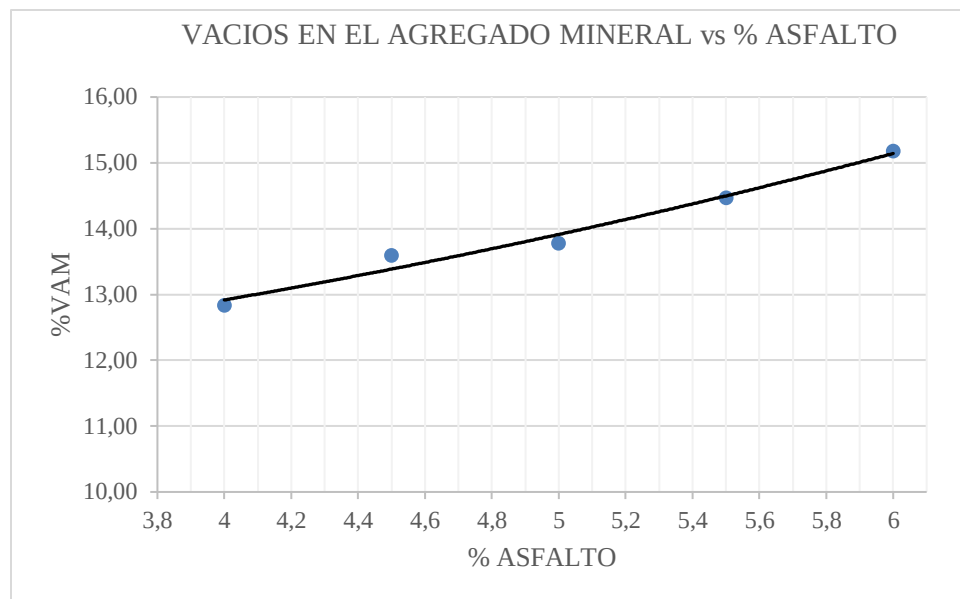
Grafica 3 Estabilidad vs % Asfalto (Mezcla Convencional)



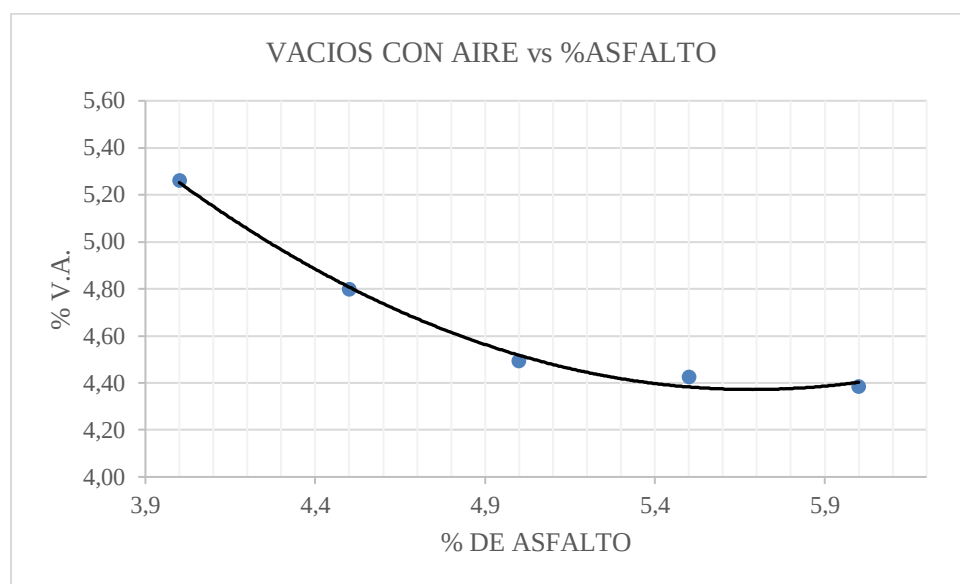
Grafica 4 Flujo vs % Asfalto (Mezcla Convencional)



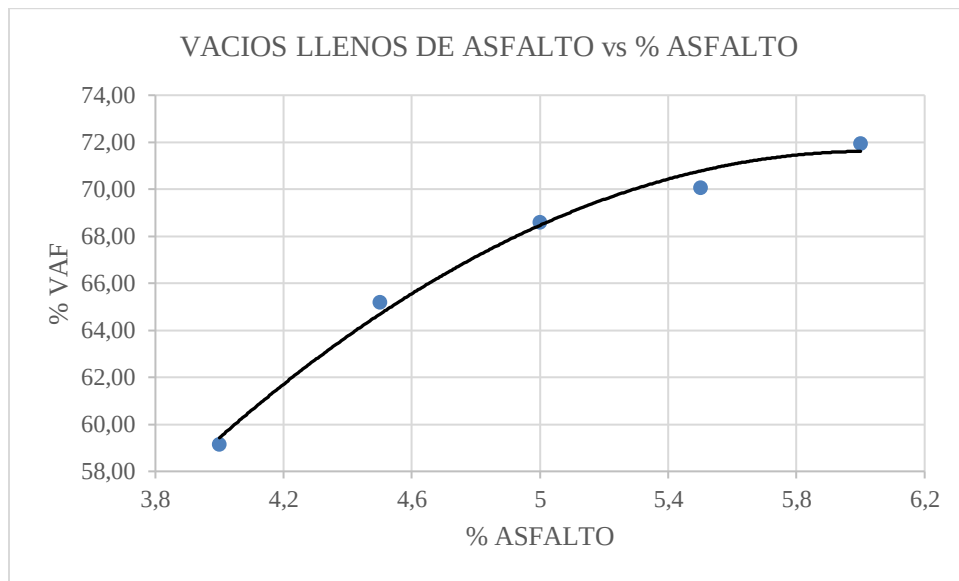
Grafica 5 Vacíos en el agregado mineral vs % asfalto (Mezcla Convencional)



Grafica 6 Vacíos con aire vs % Asfalto (Mezcla Convencional)



Grafica 7 Vacíos llenos de asfalto vs % asfalto (Mezcla Convencional)



Grafica 8 Densidad vs % asfalto (Mezcla Convencional)

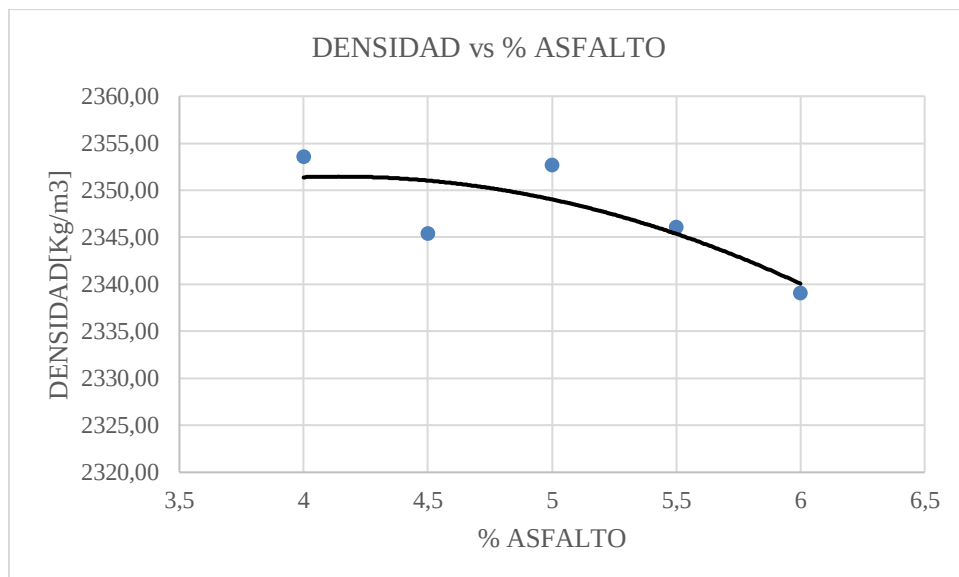
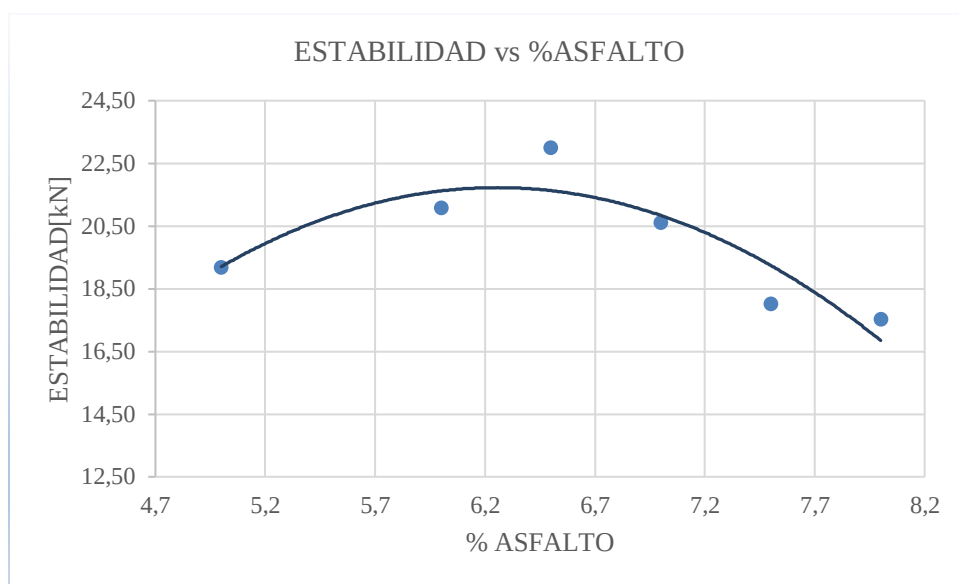


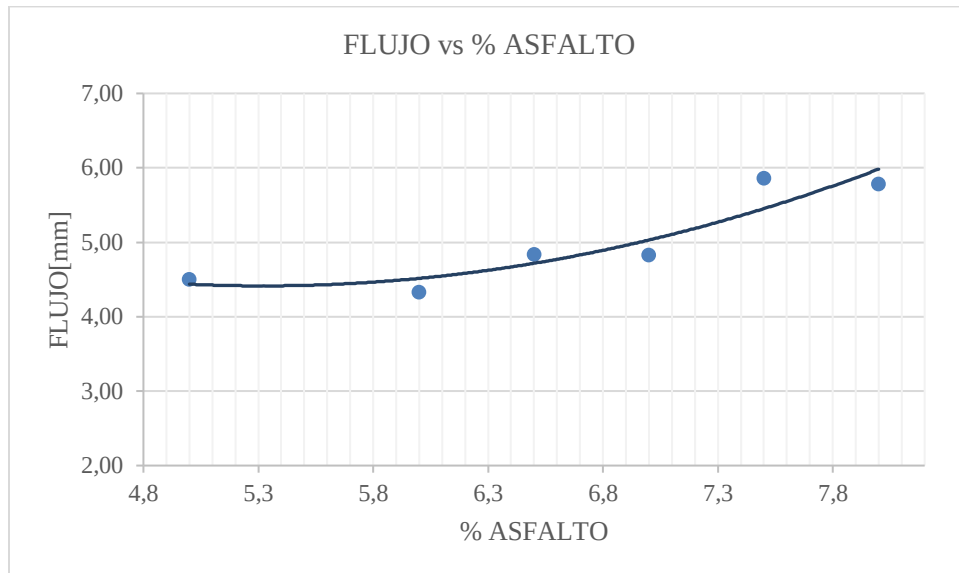
Tabla 28 Porcentaje óptimo de asfalto para mezcla convencional.

Mezcla convencional	PORCENTAJE OPTIMO SE ASFALTO	
	Parámetro	Porcentaje de Asfalto
	Vacíos en la mezcla(aire)	6
	Vacíos en los agregados	4
	Vacíos llenos con asfalto	5,5
	Estabilidad	4,5
	Flujo	4
	Promedio	5

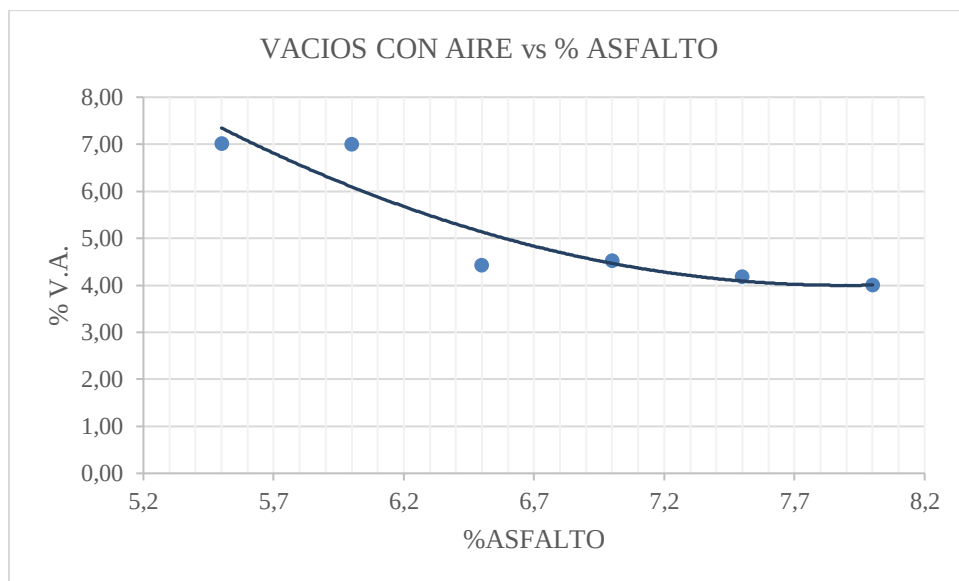
Grafica 9 Estabilidad vs % Asfalto (Mezcla Modificada)



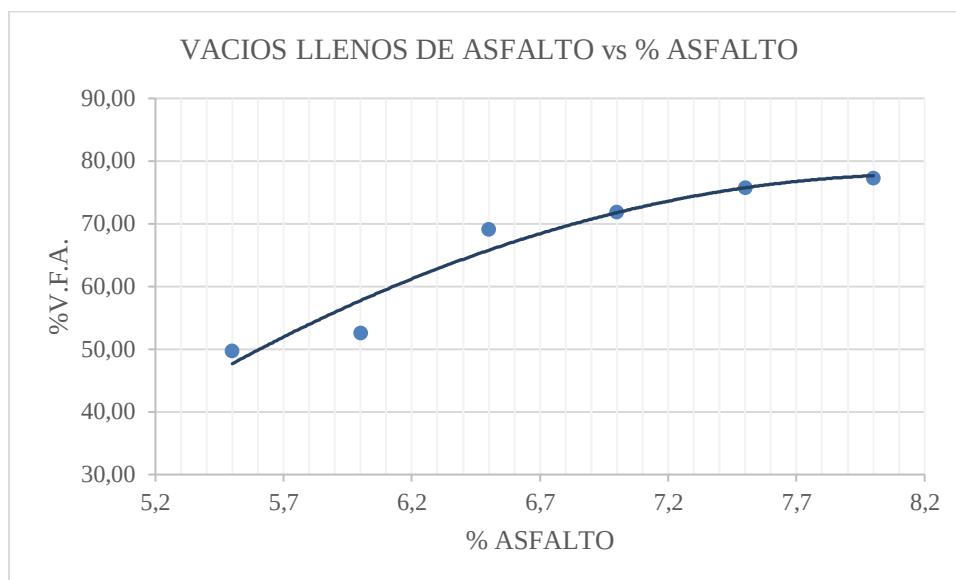
Grafica 10 Flujo vs % Asfalto (Mezcla Modificada)



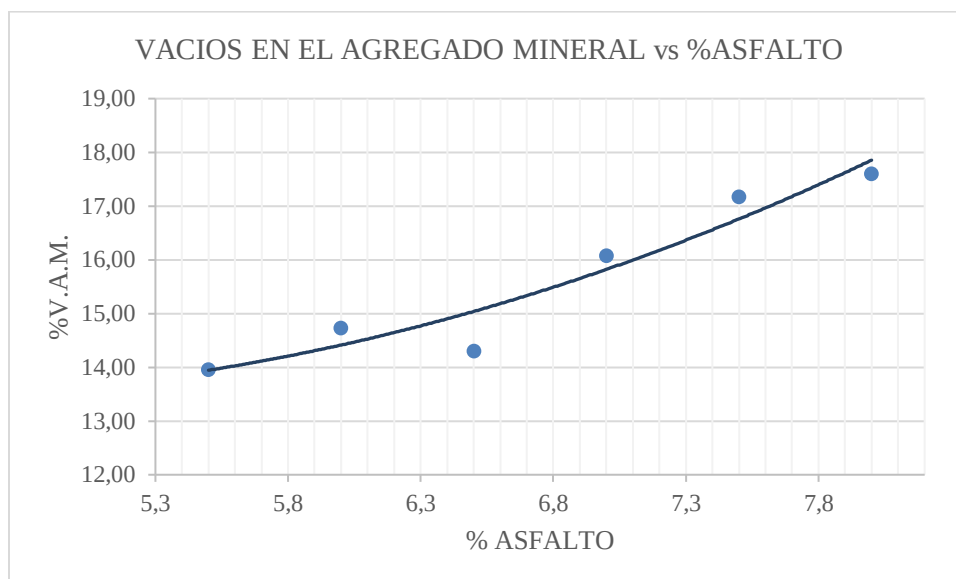
Grafica 11 Vacíos con aire vs % asfalto (Mezcla Modificada)



Grafica 12 Vacíos llenos de asfalto vs % asfalto (Mezcla Modificada)



Grafica 13 Vacíos en el agregado mineral vs % asfalto (Mezcla Modificada)



Grafica 14 Densidad vs % Asfalto (Mezcla Modificada)

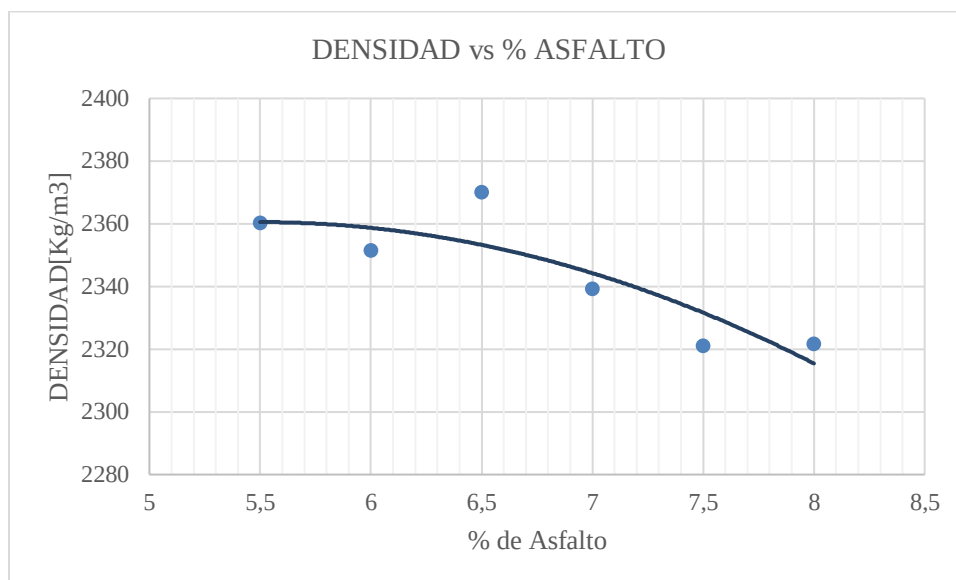


Tabla 29 Porcentaje óptimo de asfalto para mezcla modificada.

Mezcla Modificada	PORCENTAJE OPTIMO SE ASFALTO	
	Parámetro	Porcentaje de Asfalto
	Vacíos en la mezcla(aire)	8
	Vacíos en los agregados	5,5
	Vacíos llenos con asfalto	6
	Estabilidad	6,5
	Flujo	6
	Promedio	6,5

Realizando el análisis de los datos mediante el método de regresión polinomial se determinaron los valores máximos de cada una de las gráficas y se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto es del 5% para briquetas convencionales y del 6.5% para briquetas modificadas.

5.5 SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto para cada uno de los tipos de mezcla, se procede a evaluar la susceptibilidad al agua de un subgrupo de probetas que han sido expuestas a condiciones húmedas; para esto se evaluará de resistencia a la tensión ambos subgrupos, los secos y húmedos y así establecer el potencial de daño por humedad.



Figura 8 Grupo húmedo de briquetas

Tabla 30 Resultados de susceptibilidad sobre la mezcla convencional

Especímenes	Grupo Húmedo				Grupo Seco			
Diámetro [mm]	102	102	101		102	102	102	
Altura [mm]	62	61	61		59	66	65	
Masa seca al aire [gr]	1152,82	1163,6	1160,23		1099,5	1188,99	1145,09	
Masa SSS [gr]	1183	1175	1177		1109	1197	1161	
Masa en el agua [gr]	684	673	677		634	685	662	
Volumen	499	502	500	Prom	475	512	499	Prom
Gravedad específica bulk	2,31	2,32	2,32	2,32	2,31	2,32	2,29	2,31
Gravedad específica máxima	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
% de Vacíos con aire	6,5	6,19	6,08	6,26	6,32	6,01	7,12	6,48
Carga [N]					13456	13115	12838	12936

Tabla 31 Resultados de resistencia a la tensión en mezcla convencional

Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C				
Grupo Húmedo				
Altura [mm]	62	61	61	Prom
Masa SSS [gr]	1184	1177	1179	
Masa en el agua [gr]	653	635	641	
Volumen	531	542	538	
Volumen absoluto de agua	30,18	11,4	16,77	
% Saturación	48,4	18,86	27,43	31,56
%Expansión	6,41	7,97	7,60	7,33
Carga N	11374	12086	10742	11467,33
Resistencia seca [Kpa]	1423,46	1240,24	1232,72	1298,80
Resistencia húmeda [Kpa]	1144,99	1236,61	1109,98	1163,86
RRT, 100*[Rth/Rts]	80,44	99,71	90,04	90,06

Tabla 32 Resultados de susceptibilidad sobre la mezcla modificada

Especímenes	Grupo Húmedo				Grupo Seco			
Diámetro [mm]	103	102	102	Prom	103	102	102	Prom
Altura [mm]	62	65	64		59	62	64	
Masa seca al aire [gr]	1172,47	1214,18	1173,79		1201,85	1132,81	1198,5	
Masa SSS [gr]	1178	1215	1175		1208,45	1145,84	1205	
Masa en el agua [gr]	677	690	673		690	662	686	
Volumen	501	525	502	Prom	518,45	483,84	519	Prom
Gravedad especifica bulk	2,34	2,31	2,34	2,33	2,32	2,34	2,31	2,32
Gravedad especifica máxima	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
% de Vacíos con aire	6,14	7,24	6,22	6,53	7,02	6,1	7,38	6,83
Carga [N]					14301,03	14309,92	13767,24	14126

Tabla 33 Resultados de resistencia a la tensión en mezcla modificada

Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C				
Grupo Húmedo.				
Altura [mm]	62	65	64	Prom
Masa SSS [gr]	1180	1219	1179	
Masa en el agua [gr]	679	697	679	
Volumen	501	526	503	
Volumen absoluto de agua	5,53	0,82	1,21	
% Saturación	24,49	13,76	17,83	18,69
%Expansión	0	0,19	0,20	0,13
Carga N	14754,75	13842,86	13165,88	13921,16
Resistencia seca [Kpa]	1498,16	1440,54	1342,60	1427,10
Resistencia húmeda[Kpa]	1470,90	1329,21	1283,96	1328,85
RRT, 100*(Rth/Rts)	98,18	92,27	95.63	92,94

5.6 AHUELLAMIENTO

El ensayo de la rueda de Hamburgo nos proporciona un poco más de información de cómo puede ser el rendimiento de una mezcla asfáltica. Por eso para cada una de las mezclas, la convencional y la modificada sometidas a este ensayo, se deben graficar cada una de las profundidades respecto al número de pasadas; de modo que se pueda obtener una curva suave; la cual nos dará una idea de cómo puede ser su comportamiento elástico.



Figura 9 Muestra y dispositivo de seguimiento de la rueda de Hamburgo.

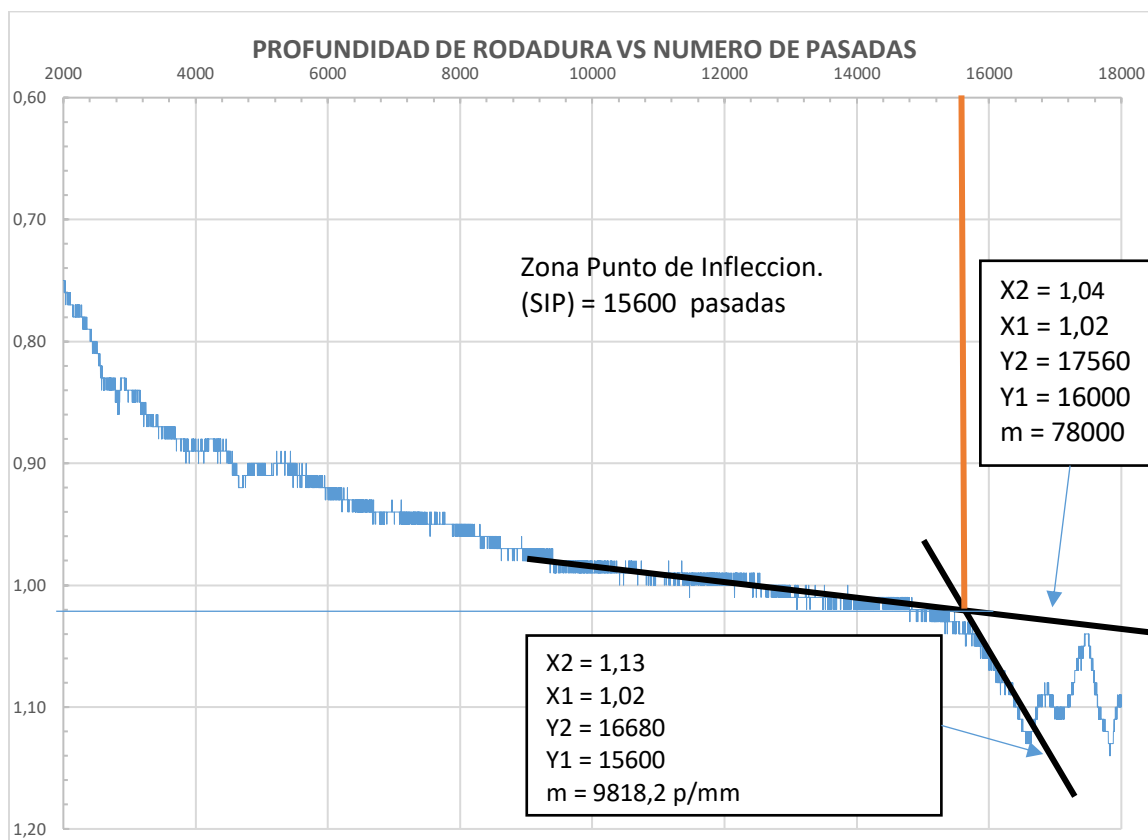
En las siguientes graficas se representan dos etapas; la primera es la consolidación después de la compactación el cual se produce durante las primeras 1000 pasadas de la rueda en el transcurso del ensayo; hecho que ocurre rápidamente a medida que la rueda de prueba hace que la briqueta o muestra sea más densa debido a la carga aplicada.

La segunda ocurre en la zona de inflexión donde encontramos dos pendientes que se interceptan; la primera es la pendiente de fluencia que nos indica la susceptibilidad de la muestra a sufrir hendiduras; y la segunda en la pendiente de desmonte que indica una acumulación de daños y deformaciones causados por la humedad y por el número de pasadas.

Grafica 15 Resistencia al ahuellamiento (Mezcla Convencional)

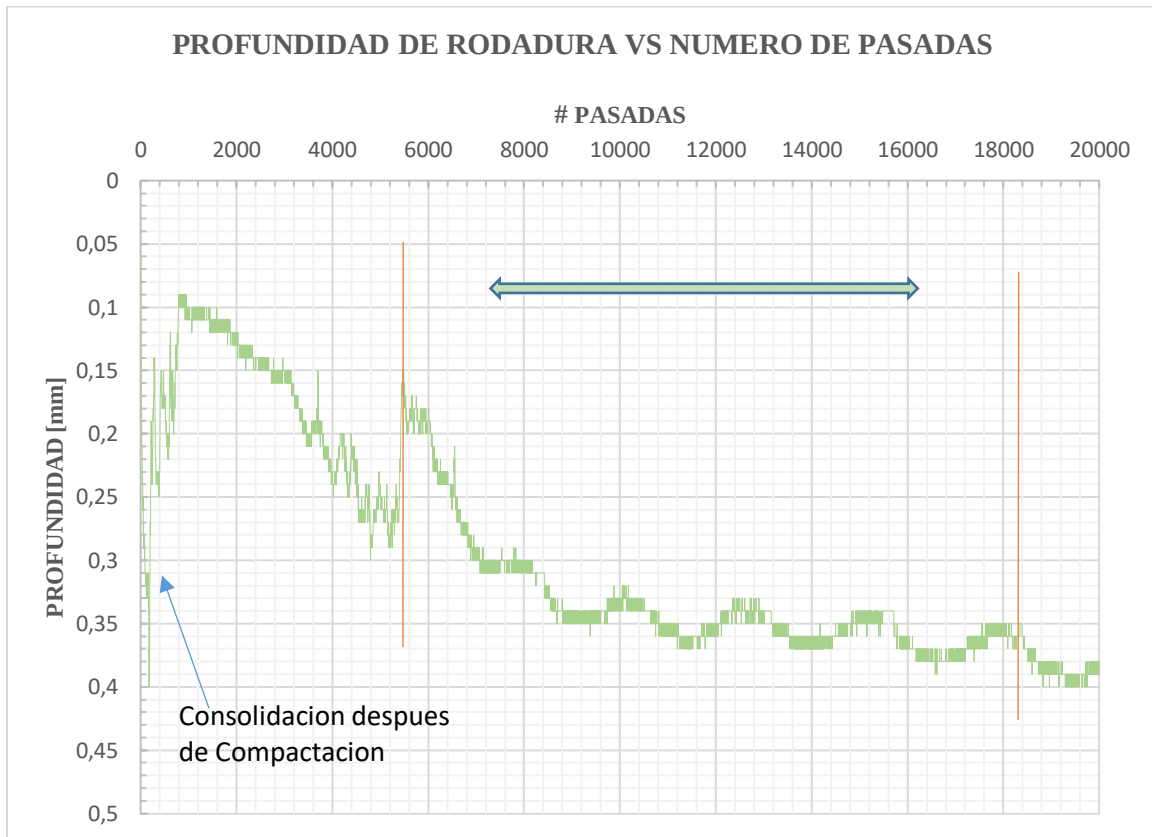


Grafica 16 Zona de inflexión (Mezcla convencional)

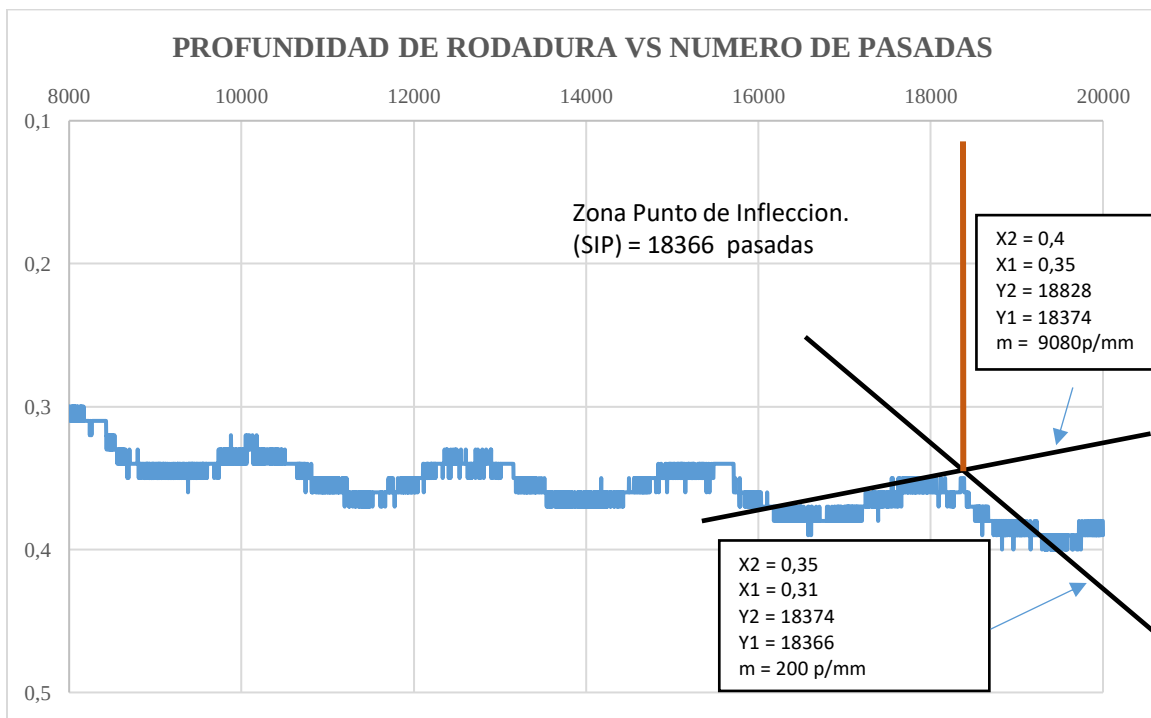


Mezcla	T.Condicionamiento	Temperatura	Velocidad	# Pasadas	Profundidad de rodadura
Convencional	30 [min]	50 °C	35 [p/min]	20000	1,1 [mm]

Grafica 17 Resistencia al ahuellamiento (Mezcla Modificada)



Grafica 18 Zona de inflexión (Mezcla Modificada)



Mezcla	T.Condicionamiento	Temperatura	Velocidad	# Pasadas	Profundidad de rodadura
Modiificada	30 [min]	50 °C	35 [p/min]	20000	0,39 [mm]

ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA

5.7 MODULOS DE RIGIDEZ

La determinación del módulo de rigidez consiste en aplicar una carga vertical cuyo comportamiento se asemejará a la de una onda de medio seno. Esta carga actuará mediante cinco impulsos sobre el plano diametral de la probeta y así para cada impulso se registrará la variación de carga y la deformación horizontal en función del número de ciclos.

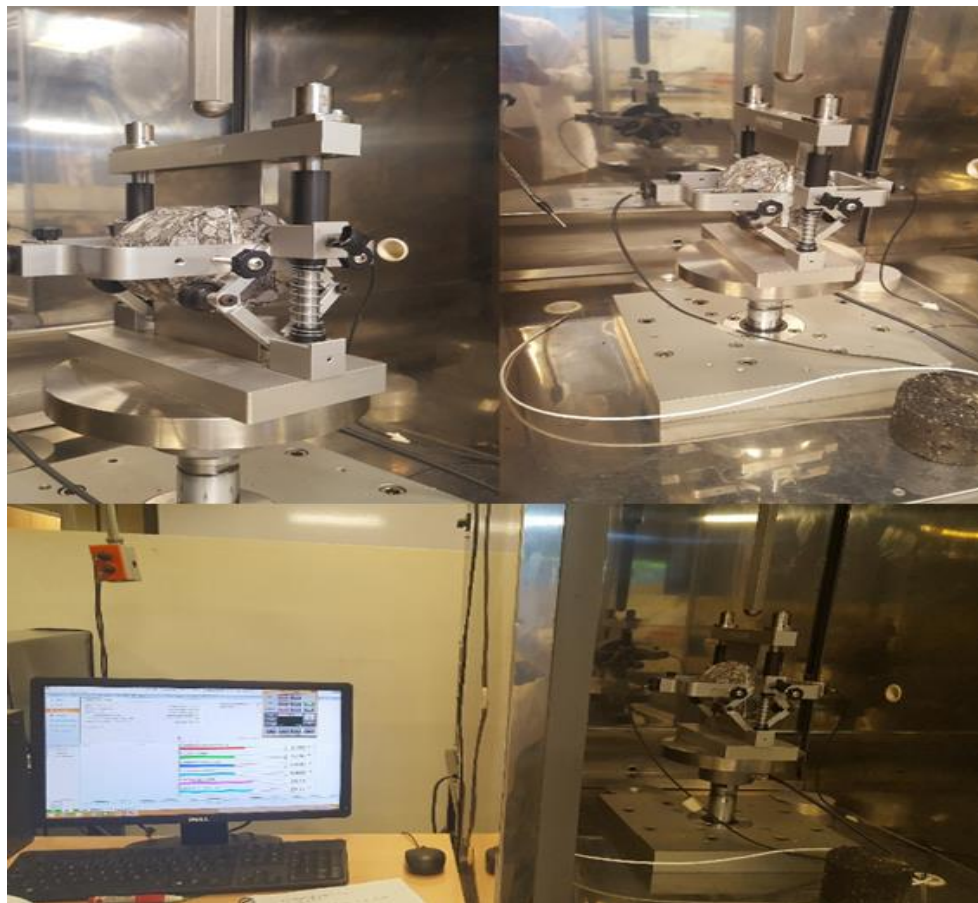


Figura 10 Equipo de ensayo de Tracción Indirecta

Los ensayos se realizaron a una temperatura aproximada a los 30°C, con una misma frecuencia de carga y un tiempo total de 15 segundos para la aplicación de los cinco impulsos.

Las siguientes tablas muestra los resultados de fuerza vertical, esfuerzo horizontal, tiempo de subida, deformación horizontal, factor de área de carga y módulo dinámico o resiliente medido y ajustado.

Tabla 34 Resultados del módulo dinámico en mezcla convencional

Ciclos		1	2	3	4	5	Promedio
Módulo de rigidez	[MPa]	2799,311	2840,495	2822,122	2869,826	2798,900	2826,131
Módulo de rigidez ajustado	[MPa]	2654,917	2680,067	2700,500	2741,644	2660,851	2687,596
Fuerza de carga	[N]	1469,193	1470,108	1452,942	1440,125	1431,656	1452,805
Tiempo de subida	[ms]	124,000	120,000	122,000	124,000	120,000	122,000
Factor de área de carga	-	0,502	0,493	0,518	0,515	0,506	0,507
Deformación horizontal total	[μm]	5,165	5,093	5,067	4,939	5,034	5,060
Deformación horizontal 1	[μm]	4,140	4,227	4,078	3,870	3,963	4,055
Deformación horizontal 2	[μm]	1,025	0,867	0,989	1,069	1,071	1,004
Fuerza de asiento	[N]	51,498	48,065	48,752	51,498	50,354	50,034

Tabla 35 Resultados del módulo dinámico en mezcla modificada

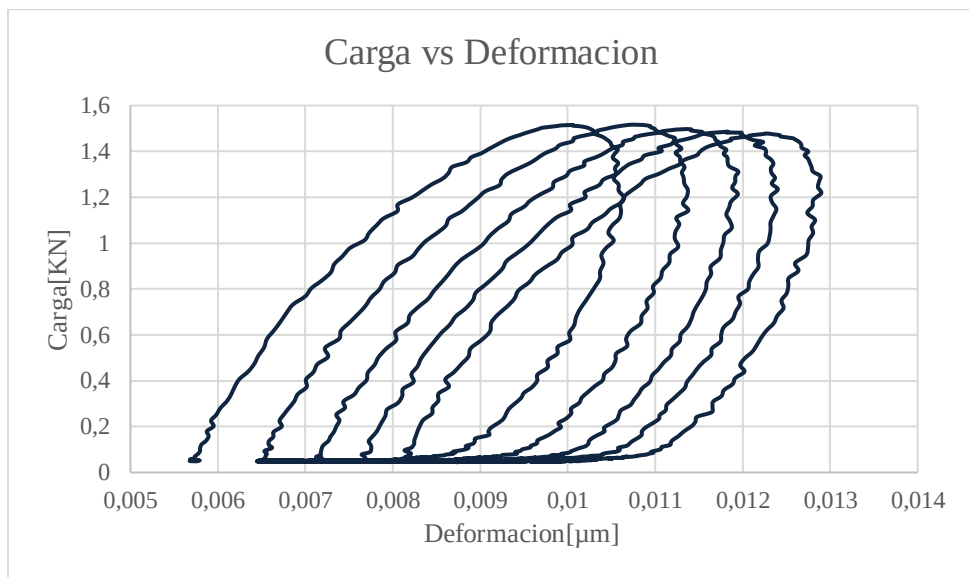
Ciclos		1	2	3	4	5	Promedio
Módulo de rigidez	MPa	2407,831	2417,057	2423,433	2354,322	2366,254	2393,779
Módulo de rigidez ajustado	MPa	2290,782	2277,557	2286,153	2219,872	2211,323	2257,137
Fuerza de carga	N	1498,196	1498,654	1498,425	1496,823	1497,739	1497,968
Tiempo de subida	ms	124,000	122,000	121,333	120,667	120,000	121,600
Factor de área de carga		0,503	0,485	0,488	0,486	0,469	0,486
Deformación horizontal total	µm	4,884	4,868	4,854	4,990	4,968	4,913
Deformación horizontal 1	µm	2,857	2,882	2,780	2,885	2,859	2,853
Deformación horizontal 2	µm	2,027	1,985	2,074	2,104	2,109	2,060
Fuerza de asiento	N	51,270	49,438	48,752	49,667	49,210	49,667

Las tablas 35 y 36 corresponden a dos briquetas que fueron sometidas bajo tracción indirecta; los datos son medidos y calculados por el software del equipo; los demás datos obtenidos se analizarán en el siguiente capítulo.

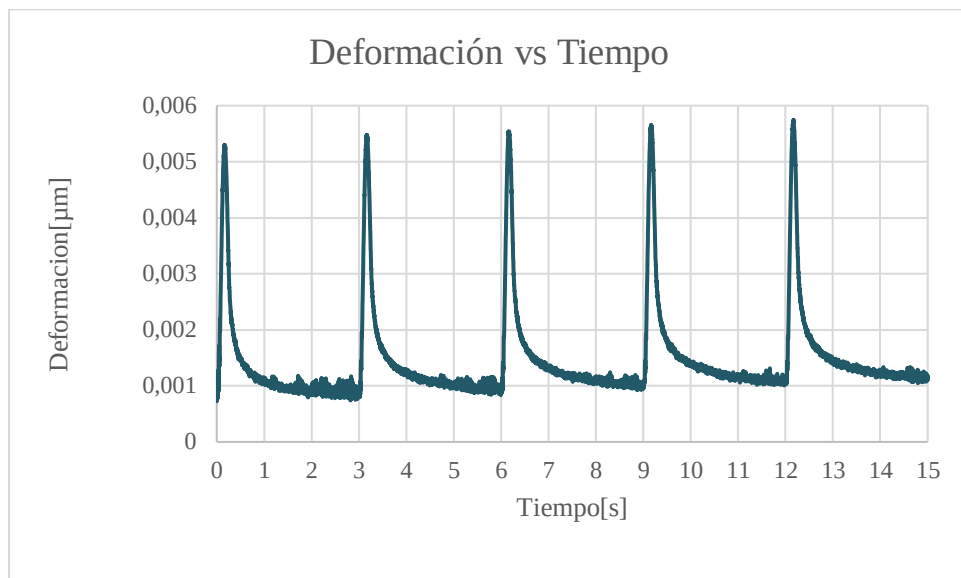
Grafica 19 Deformación vs tiempo (Mezcla Convencional)



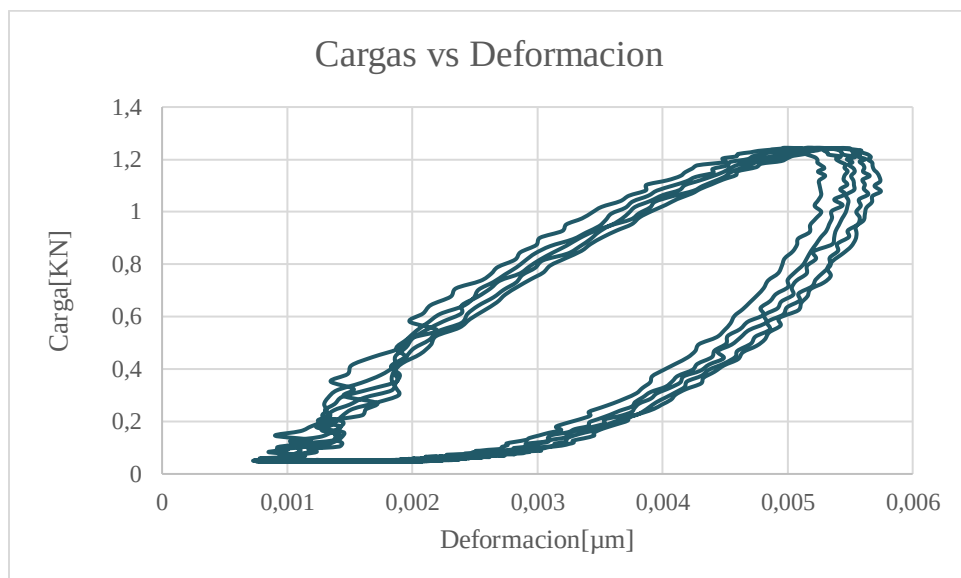
Grafica 20 Carga vs Deformación (Mezcla Convencional)



Grafica 21 Deformación vs tiempo (Mezcla Modificada)



Grafica 22 Carga vs Deformación (Mezcla Modificada)



Las gráficas 17 y 19 representan las deformaciones máximas que sufren las briquetas durante cada ciclo, estas deformaciones tienen una recuperación instantánea pero no total ya que tal como se puede observar al final de cada ciclo se presenta una deformación permanente la cual se va acumulando; las gráficas 18 y 20 muestran este comportamiento de mejor manera ya que ilustra como la deformación permanente se va acumulando durante la aplicación de la carga repetitiva o cíclica.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con grano de caucho; se representaron gráficamente los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

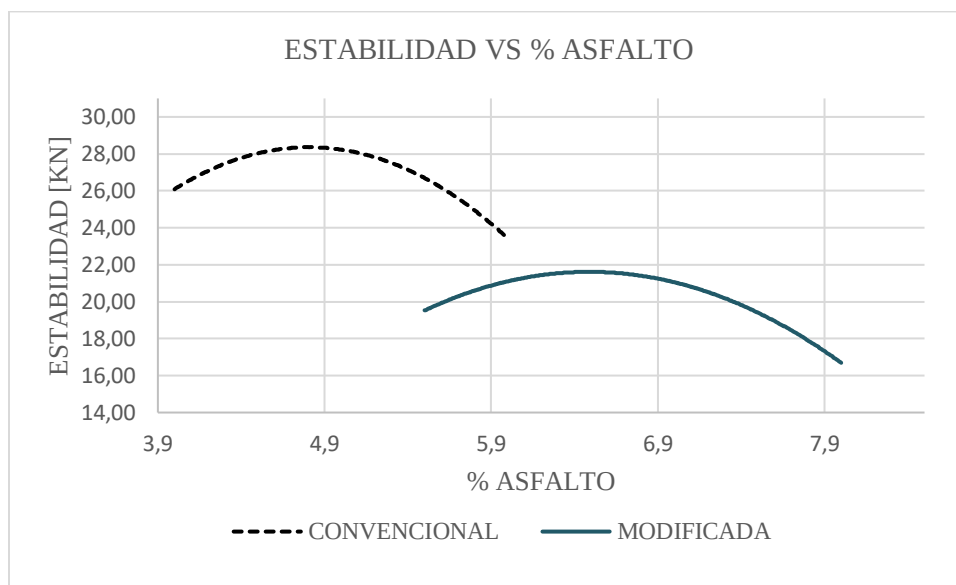
RESULTADOS ENSAYO MARSHALL

Las siguientes graficas representa el comportamiento de ambas mezclas frente a diferentes porcentajes de asfalto; los valores a analizar representan la estabilidad, flujo, porcentajes de vacíos, VAF, VAM y densidades. Se debe tener en cuenta que los porcentajes de asfalto utilizados para el diseño de una mezcla convencional son menores a los de una mezcla modificada con grano de caucho.

6.1 ESTABILIDAD

Como se puede ver en la gráfica la mezcla convencional presenta una estabilidad mayor a la mezcla modificada con asfalto con grano de caucho; esto se debe a que el contenido de asfalto de la mezcla convencional es menor a la modificada, sin embargo, el asfalto modificado con grano de caucho podría estar afectando la fricción y la cohesión interna, factores que influyen en la estabilidad. Aun así, el comportamiento en ambas es semejante a medida que incrementa el porcentaje de asfalto.

Grafica 23 Estabilidad en mezcla convencional vs mezcla modificada.

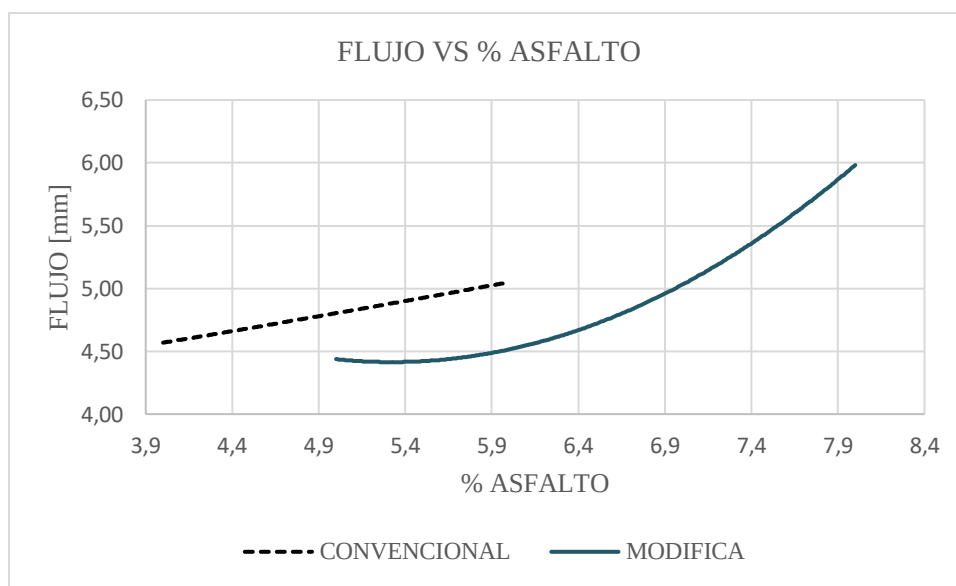


A pesar de que los valores de estabilidad de la mezcla modificada son mucho menores a los de la mezcla convencional, se encuentra por encima de lo requerido por la norma.

6.2 FLUJO

La mezcla modificada presenta un crecimiento de fluencia mayor que la mezcla convencional; pero observando el flujo dentro el rango del 5% y 6,5% de asfalto, la mezcla modifica presentan una menor deformación respecto a la convencional.

Grafica 24 Flujo en mezcla convencional vs mezcla modificada.

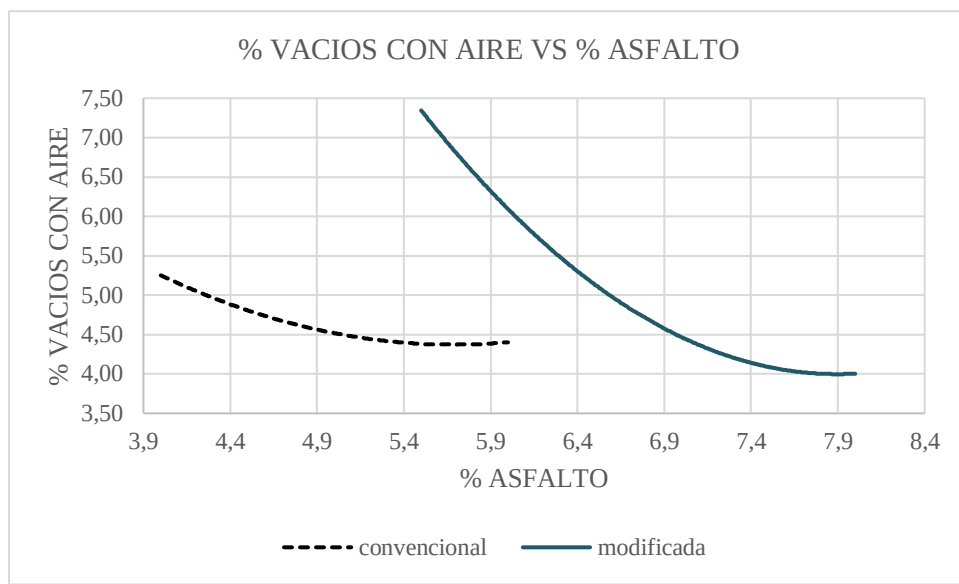


El asfalto con grano de caucho parece haber mejorado la mezcla para tener una menor fluencia, pero es importante tener en cuenta que el flujo depende de acuerdo con el comportamiento de la estabilidad, aun así, las relaciones de estabilidad/flujo de ambas mezclas cumple con las especificaciones.

6.3 PORCENTAJE DE VACIOS CON AIRE

La grafica evidencia como el porcentaje de vacíos de ambas mezclas disminuye respecto al aumento del porcentaje de asfalto; presentado así un comportamiento inversamente proporcional; esto significa una disminución en la porosidad en las briquetas, provocando así una menor penetración del aire.

Grafica 25 Vacíos con aire en mezcla convencional vs mezcla modificada



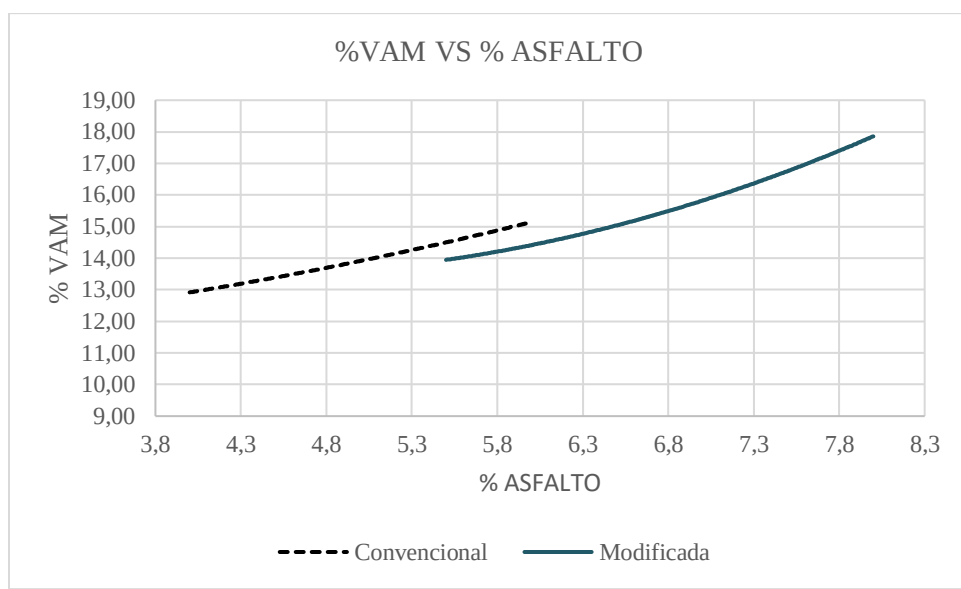
Para tener un dato más exacto del porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla modificada se utilizaron dos porcentajes de más; los cuales fueron del 5.5 % y 6%. Entonces si al comparar el porcentaje de vacíos después de este rango, se podría decir que los porcentajes de vacíos de ambas mezclas son casi iguales; por lo cual la adición de un asfalto modificado con grano de caucho puede no tener gran impacto en la disminución de vacíos.

6.4 PORCENTAJE DE VACIOS EN AGREGADOS MINERALES

A la hora de evaluar el porcentaje de vacíos en agregados minerales se espera que este valor sea lo más mínimo posible, ya que se piensa que a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico, este se encargue de desplazar los vacíos existentes.

Pero al observar la gráfica se nota que ocurre todo lo contrario; sobre todo en la mezcla modificada con grano de caucho, aun así, los porcentajes de vacíos se encuentran por encima del mínimo requeridos por la norma INVIAS.

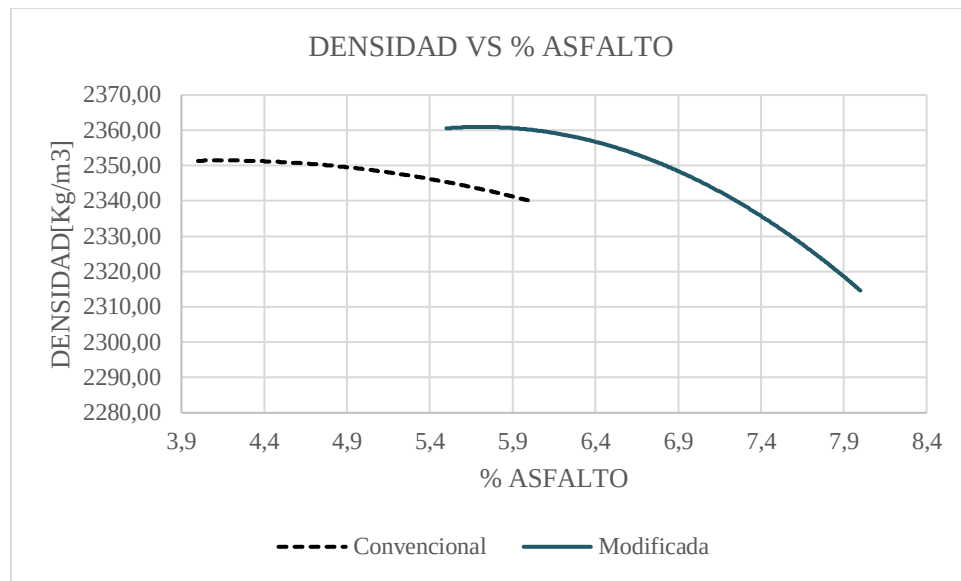
Grafica 26 Vacíos en el agregado mineral en mezcla convencional vs mezcla modificada



6.5 DENSIDAD

Ambas mezclas alcanzan su densidad máxima en su menor contenido de asfalto, sus comportamientos son similares a pesar de que la mezcla modificada presenta un mayor porcentaje de asfalto, la densidad de la modificada se asemeja mucho a la convencional excepto cuando el porcentaje de asfalto excede el 7 %; allí su densidad disminuye considerablemente.

Grafica 27 Densidad en mezcla convencional vs mezcla modificada

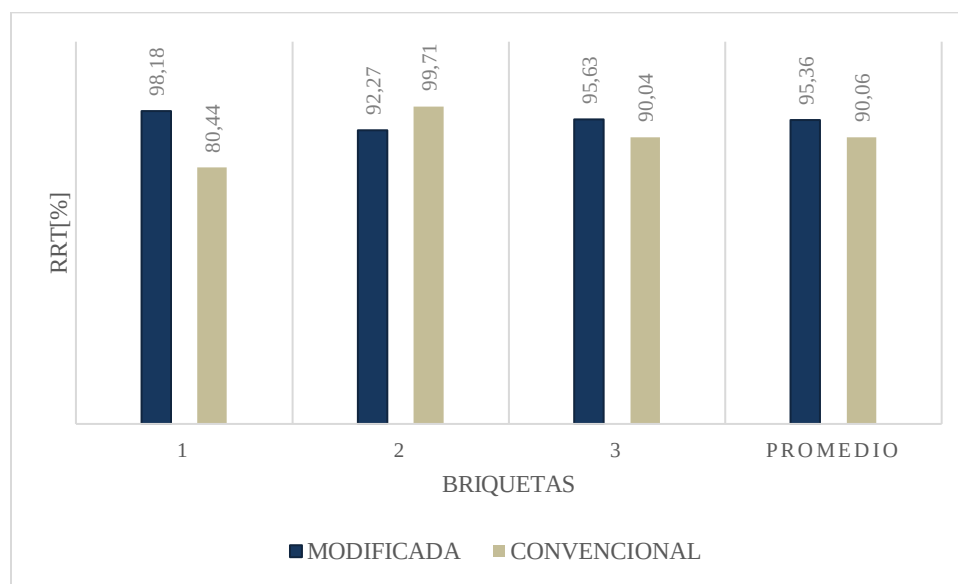


6.6 SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA

Para evaluar la susceptibilidad al agua de una mezcla asfáltica es necesario determinar la relación entre el esfuerzo de tensión en la condición húmeda respecto al esfuerzo de tensión en la condición seca.

La siguiente grafica representa las relaciones de resistencias de tensión (RRT) de las mezclas convencionales y modificada bajo las condiciones húmeda y seca.

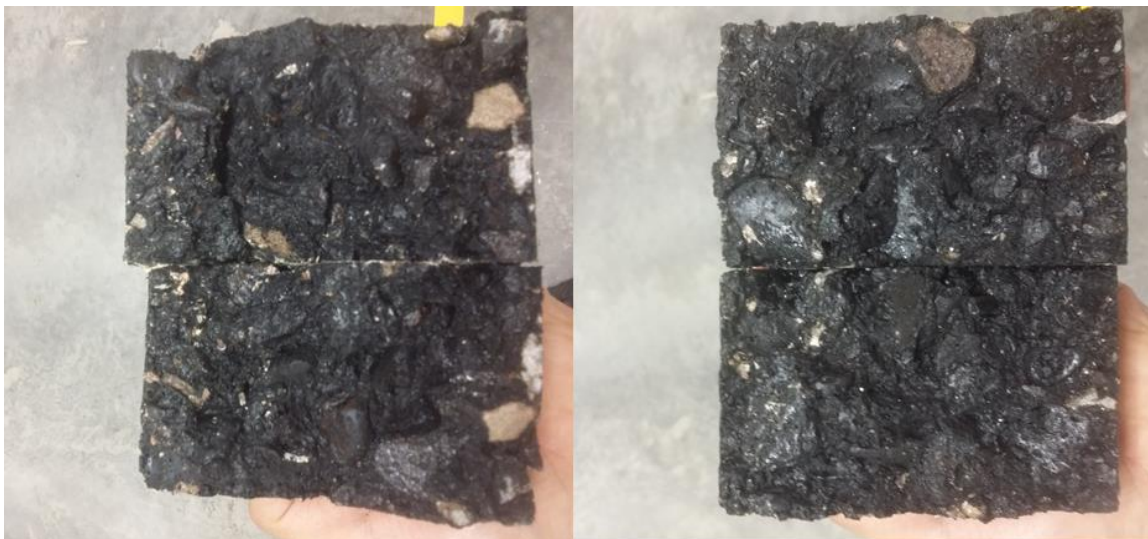
Grafica 28 Resistencia a la tensión en mezcla convencional vs mezcla modificada



Tal como se observa la mezcla modificada presenta un mejor comportamiento ante la resistencia a la tensión, evidenciando así el mejoramiento que puede tener un asfalto modificado con grano de caucho sobre el efecto del agua en mezclas asfálticas.

Como es de saberse el daño por humedad ocurre principalmente cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo, así que, para analizar este fenómeno, se presentan dos imágenes la cuales representan las caras fracturadas de dos briquetas fallidas cuando fueron sometidas a tensión; las de la izquierda estuvieron bajo condición seca y las de la derecha en condición húmeda.

Grafica 29 Daño por humedad luego de la fractura (Mezcla Convencional)



Fuente: Autor

Grafica 30 Daño por humedad luego de la fractura (Mezcla Modificada)



Fuente: Autor

Comparando los dos tipos de mezclas se puede ver claramente con el asfalto modificado con grano de caucho mejora la adherencia del agregado pétreo con el asfalto incluso después de haber estado sometida condiciones de humedad; resultado que no se ve en la mezcla convencional.

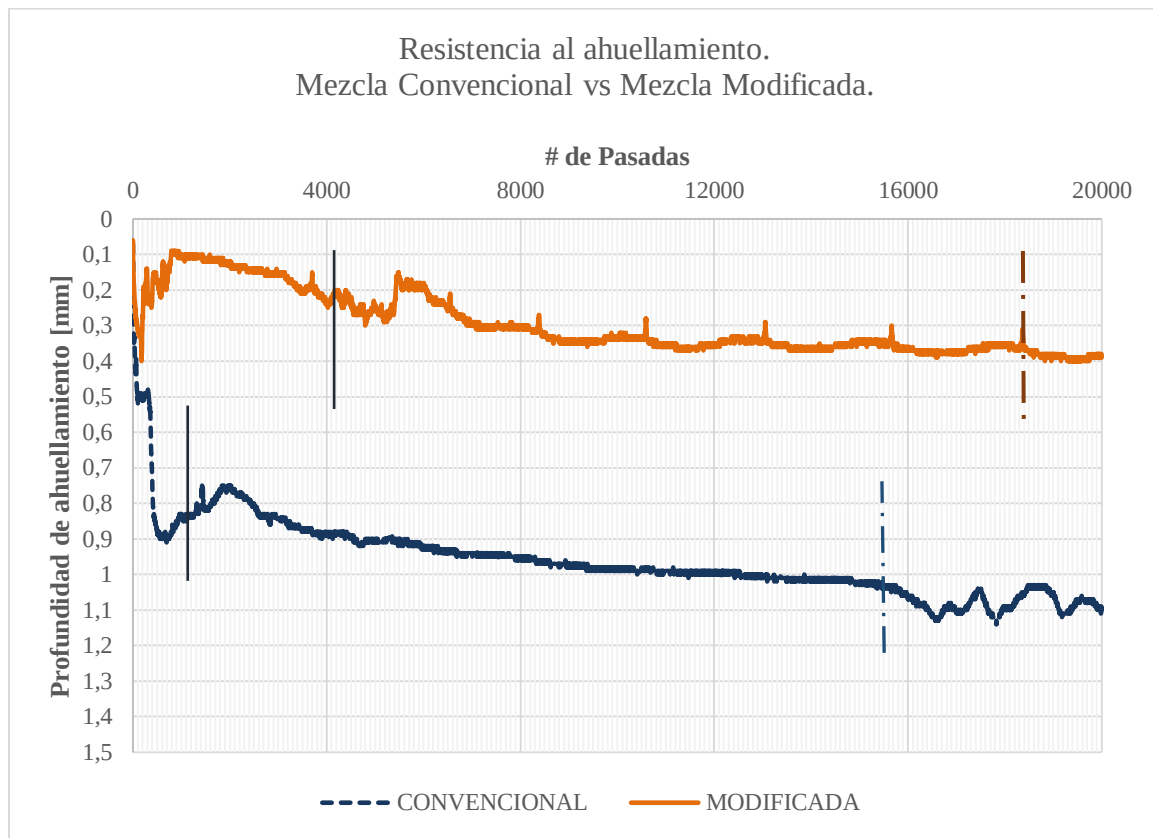
ENSAYOS DINAMICOS

Los ensayos como la resistencia al ahuellamiento por medio de la rueda de Hamburgo y el ensayo de tracción indirecta para el cálculo del módulo resiliente son considerados ensayos dinámicos debido a que las cargas que se aplican allí tienen cierta variación en el transcurso de sus ciclos.

6.7 RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO

Las siguiente grafica representa el comportamiento de dos mezclas frente a la aplicación repetitiva de una carga de rodadura. Se puede notar en la gráfica que ambas mezclas se comportan de manera elástica frente a una carga dinámica que después de varias repeticiones provocan una deformación permanente.

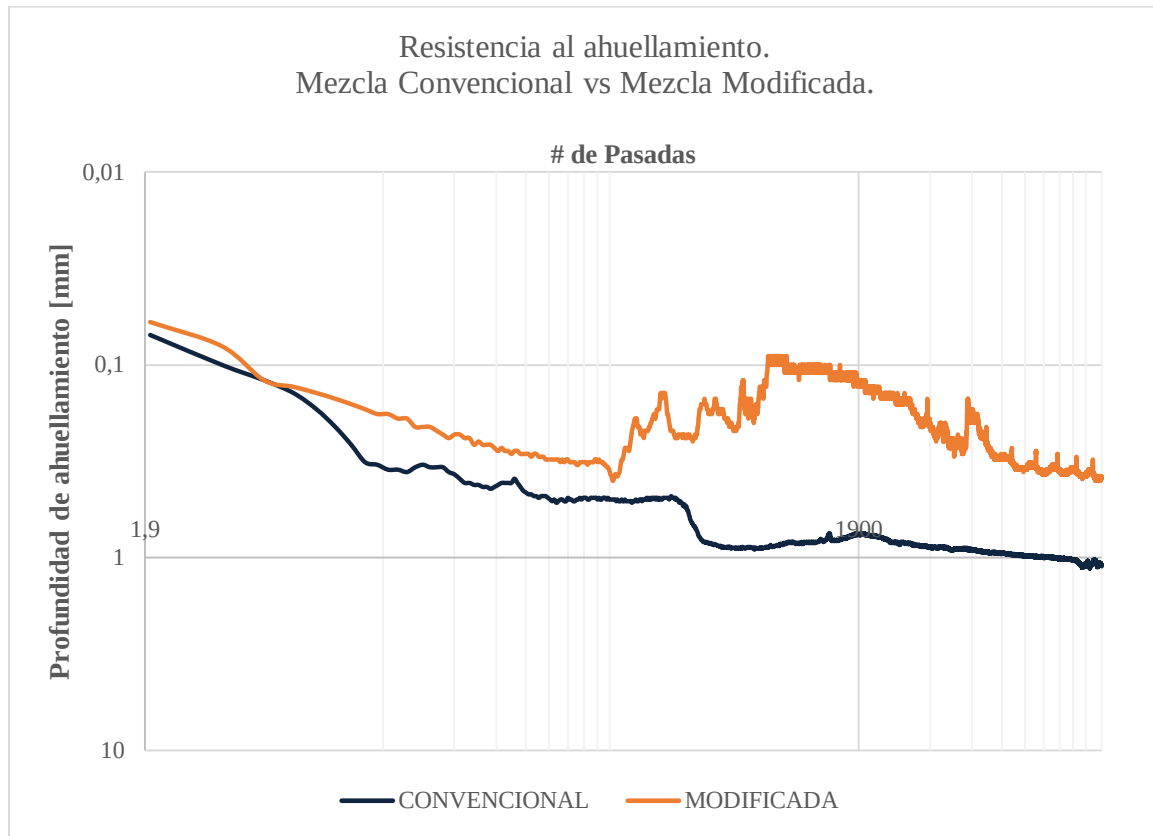
Grafica 31 Resistencia al ahuellamiento en Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada.



Como se describe en la gráfica 31 la mezcla convencional presenta un comportamiento más lineal que la mezcla modificada además de una mayor deformación; las primeras líneas verticales representan la zona de consolidación después de compactación y las segunda es la zona donde la briqueta empieza a sufrir una deformación permanente.

Para analizar con más detalle este comportamiento y precisar con más detalle las zonas de elasticidad y plasticidad se graficó de forma logarítmica esta grande gama de valores.

Grafica 32 Escala logarítmica de la Resistencia al ahuellamiento.

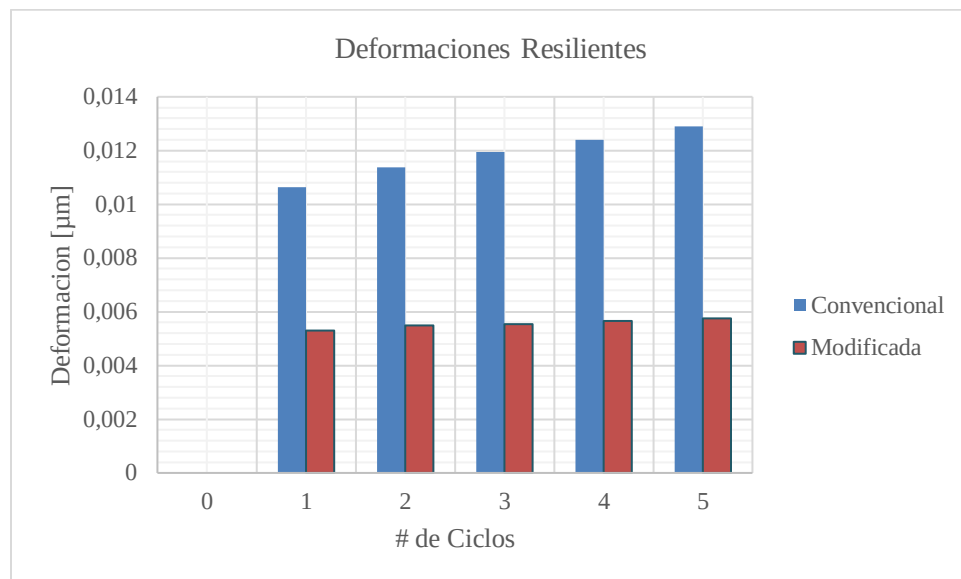


Se puede notar que el comportamiento de mezcla asfáltica modificada con grano de caucho es más elástico y resistente que la mezcla convencional, además su zona de deformación permanente se presenta en un promedio de 3000 pasadas después que la mezcla convencional con una pendiente de fluencia mucho menor.

6.8 ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (MODULO RESILIENTE)

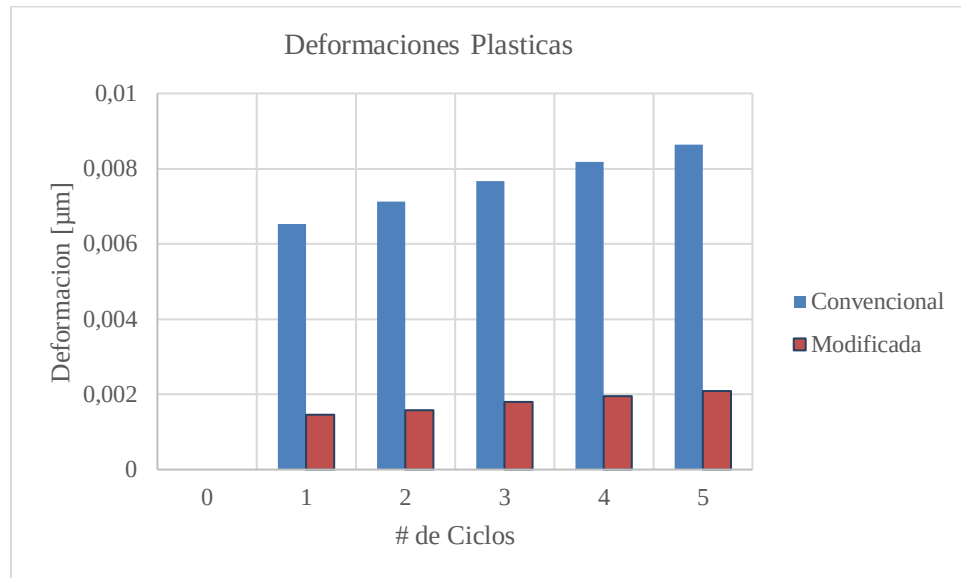
Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de suspender la causa deformadora. El ensayo de tracción indirecta nos permite observar la variación de la deformación en función de tiempo o en función del número de ciclos.

Grafica 33 Deformaciones Resilientes de Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada



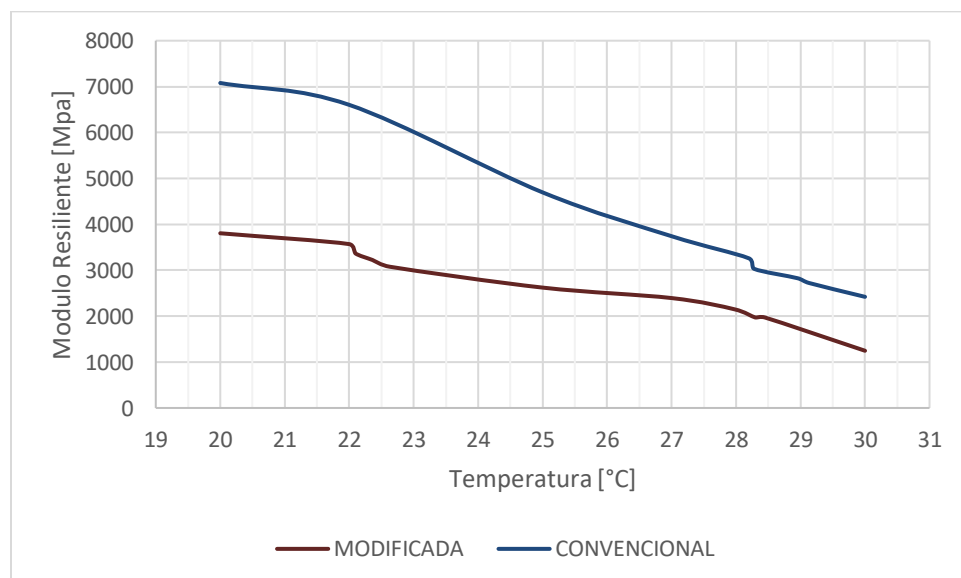
La grafica 33 representa las deformaciones resilientes (máximas) de ambas mezclas durante cada uno de los ciclos. Tal como se ve en la gráfica la mezcla convencional presenta una mayor deformación que la modificada durante cada uno de los ciclos.

Grafica 34 Deformaciones Plásticas de la Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada



La grafica 34 ilustra la deformación permanente de ambas mezclas. Estas deformaciones se van acumulando durante cada ciclo y tal como se ve en el ciclo 5 se presenta la deformación total acumulada. La diferencia entre ambas mezclas es de un del 25%, siendo la mezcla convencional la que presenta una mayor deformación.

Grafica 35 Módulos Resilientes en Mezcla Convencional vs Mezcla Modificada



Cabe recordar que el módulo resiliente nos permite estudiar la rigidez en mezclas asfálticas; además del hecho que entre mayor sea el módulo resiliente mayor será la rigidez de la mezcla. La grafica 35 nos muestra que los valores en módulo resiliente de la mezcla modificada son menores que los de la mezcla convencional, datos que eran de esperarse ya que la adición de grano de caucho en mezclas asfálticas nos representaría un comportamiento más flexible.

Hay que tener en cuenta que la temperatura también juega un papel muy importante en el módulo resiliente ya que como se ve en la gráfica el módulo resiliente disminuye a medida que aumenta la temperatura; es decir que a mayor temperatura mayor elasticidad presentara las mezcla.

7. CONCLUSIONES

Cuando se compararon los resultados obtenidos de ambas mezclas en el ensayo Marshall fue importante recalcar que ambas contenían diferentes porcentajes de asfalto, por lo cual se presentaron grandes diferencias entre el comportamiento de ambas. La razón por la cual se utilizaron diferentes porcentajes fue se tenía como objetivo determinar un porcentaje optimo que balanceara todas las propiedades de la mezcla y que cumpliera los requerimientos establecidos.

En el ensayo de susceptibilidad al agua la mezcla modificada no solo presenta un mejor desempeño que la mezcla convencional, sino que también demuestra la efectividad que tiene la adición de grano de caucho en su adherencia con los demás agregados.

La mezcla modificada con grano de caucho presenta una mejora del 35% respecto a la convencional en el ensayo de resistencia de ahuellamiento, además presenta un pendiente de fluencia mucho menor que la convencional, lo que significa que el tiempo que tomará la mezcla modificada en presentar una huella será mucho mayor de la que toma una mezcla convencional.

A pesar de que ambas mezclas cumplen con los parámetros de carga establecidos en la norma INVIAS, se notó que el uso de cemento asfáltico con grano de caucho afecta considerablemente la estabilidad de la mezcla frente a la aplicación de cargas estáticas o cargas directas. Pero al estudiar la mezcla modificada frente a los ensayos de cargas dinámicas como el ensayo de tracción indirecta y resistencia al ahuellamiento por medio de la rueda de Hamburgo, su desempeño fue totalmente diferente; la mezcla modifica tiene un comportamiento muy elástico presentando así un mayor número de deformaciones recuperables y un menor número de deformaciones permanentes.

8. RECOMENDACIONES

Las temperaturas aplicadas en los especímenes de prueba nos proporcionaron gran información sobre el comportamiento de ambas mezclas bajo los ensayos de tracción indirecta y resistencia al ahuellamiento. Sin embargo, se pueden aplicar otras temperaturas de ensayo con el fin de profundizar más en el comportamiento de estas o en el caso de estudiar otros tipos de mezcla.

Los resultados de los módulos resilientes nos dan una idea de que este parámetro no es un valor constante y que puede depender de muchos factores; por eso para futuras investigaciones se recomienda abarcar este ensayo teniendo en cuenta diferentes variables como el contenido de vacíos, contenido de asfalto, tipo de agregado, temperaturas y frecuencias de carga.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldia Mayor de Bogota. (2005). *Segunda Fase de Estudio de la Mejoras Mecanicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas*. Bogota D.C.
- Amaya Marrugo, W. U., & Soto Calle, J. A. (2015). *Evaluacion de las propiedades mecanicas de una mezcla* . Cartagena.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *Rueda de hamburgo en pista de mezcla de asfalto compactado en caliente. (Texto- 324)*. Washington .
- Angulo, R., & Duarte, J. (2005). Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Bucaramanga, Santander-Colombia.
- Arao, M. (Agosto de 2016). *Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado* . Rio de Janeiro, Brasil.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2005). *Ensayo de traccion indirecta sobre probetas cilindricas. UNE-EN 12697-26 Anexo C*. Madrid: AENOR.
- Catarina Udlap. (s.f.). Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo4.pdf
- Diaz Claros, C., & Castro Celis, L. C. (2017). Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas usadas. Bogota D.C. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>
- Figueroa Infante, A. S., & Reyes Liscano, F. A. (Diciembre de 2015). Analisis de la Susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfaltica apartir del ensayo MYST y del programa iPAS 2D. Bogota , Colombia.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso. (Art-237)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados. (Art-239)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Determinación del valor del 10% finos. (Articulo-224)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Ensayo de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfaltico utilizando la prueba de traccion indirecta(Art-725)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Equivalente de arena de suelos y agregados finos. (Art-133)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Granulometría de los agregados grueso y finos. (Articulo 213)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos. (Articulo-240)*. Bogota D.C.

- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.7 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles. (Art-218)*. Bogota.
- Instituto Nacional de Vias. (2013). *Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. (Art-220)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de vias. (2013). *Densidad, densidad relativa "gravedad específica" y absorción del agregado fino. (Articulo-222)*. Bogota D.C.
- Instituto Nacional de vias. (2013). *Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. (Articulo-227)*. Bogota D.C.
- Interempresas. (24 de Agosto de 2018). *Interempresas.net*. Obtenido de [8]www.interempresas.net/Automocion/Articulos/113169-Betunes-mejorados-y-modificados-con-caucho-por-via-humeda.html
- Intituto Nacional de Vias. (2013). *Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas en Caliente Empleando el Aparato Marshall*. Bogota D.C.
- Intituto Nacional de Vias. (2013). *Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato de Micro-Deval(Articulo 238)*. Bogota D.C.
- Medina Gallego, J., & Prieto Muñoz, J. (2003). *Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos*. . Madrid.
- Medina, J. G. (s.f.). *Jornada sobre aplicaciones de caucho reciclado*. Universidad Politecnica de Madrid.
- Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradacion Continua*. (2012). Bogota D.C.
- Orozco Zambrano, L. E., & Alfonso Florez, A. M. (2015). *Análisis del comportamiento del asfalto normal y modificado con caucho por medio de ensayos dinámicos*. Bucaramanga.
- Ramirez Villamizar, A., Ladino Rubio, I. L., & Rosas Ramirez, J. P. (2014). UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA. *diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED*. Bogota D.C, Colombia.
- Villar, E. G. (s.f.). *upcommons*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

10. ANEXOS

ANEXO 1 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO

W total de 1 briqueta (gr)	1200	Porcentaje Asfalto	0 %	Tipo mezcla	MSC-25
---	------	-------------------------------	-----	------------------------	--------

# Tamiz	Límite mínimo	Límite máximo	Valor Medio	W retenido (%)	W retenido (gr)
1"	100	100	100	0	0
3/4"	80	95	87,5	12,5	150
1/2"	65	80	72,5	15	180
3/8"	55	70	62,5	10	120
N°4	40	55	47,5	15	180
N°10	24	38	31	16,5	198
N°40	9	20	14,5	16,5	198
N°80	6	12	9	5,5	66
N°200	3	7	5	4	48
Fondo	0	7	3,5	1,5	58
				Total	1198

ANEXO 2 REPORTE ENSAYO MEZCLA CONVENCIONAL

% Asfalto	Altura Briqueta (mm)	Diámetro Briqueta (mm)	Peso (g)			Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Estabilidad / Flujo (KN/mm)	Gravedad Especifica Bulk	Gravedad Especifica Máxima de la Mezcla Gmm	Vacíos con Aire Va (%)	Vacíos en los Agregados Minerales (%) VAM	Vacíos llenos de Asfalto (%) VFA
			Seca en Aire	En Agua	S.S.S								
4	65	103	1195,64	704	1211,2	25,91	4,66	5,56	2,36	2,492	5,40	12,96	58,37
4	63	102	1190,64	699	1199,1	25,03	4,39	5,70	2,38	2,492	4,45	12,09	63,18
4	63	102	1168,2	690	1188,4	25,91	4,05	6,39	2,34	2,492	5,93	13,46	55,90
						25,62	4,37	5,86	2,36		5,26	12,84	59,15
4,5	65	102	1197,02	703	1210,4	29,30	4,96	5,91	2,36	2,471	4,53	13,35	66,08
4,5	67	103	1240,42	731	1251	29,49	4,90	6,02	2,39	2,471	3,46	12,38	72,03
4,5	63	102	1181,13	698	1208,7	29,24	4,90	5,96	2,31	2,471	6,40	15,05	57,45
						29,34	4,92	5,96	2,35		4,80	13,59	65,19
5	65	102	1193,12	704	1209,5	27,02	5,44	4,97	2,36	2,471	4,47	13,76	67,49
5	64	102	1191,97	707	1200,2	27,13	4,98	5,45	2,42	2,471	2,19	11,69	81,31
5	60	102	1125,35	667	1155,8	27,26	4,48	6,09	2,30	2,471	6,82	15,88	57,04
						27,14	4,96	5,47	2,36		4,49	13,78	68,61
5,5	60	102	1146,32	680	1177,1	24,08	4,48	5,38	2,31	2,462	6,34	16,19	60,83
5,5	62	102	1183,02	704	1205,2	28,35	4,50	6,31	2,36	2,462	4,13	14,21	70,92
5,5	63	102	1192,96	709	1207,5	28,08	5,31	5,29	2,39	2,462	2,80	13,02	78,47
						26,84	4,76	5,64	2,35		4,42	14,47	70,07
6	64	102	1193,54	704	1206,1	23,95	5,61	4,27	2,38	2,454	3,12	14,06	77,79
6	64	103	1181,66	697	1194,3	23,21	4,50	5,16	2,38	2,454	3,16	14,09	77,57
6	57	102	1050,69	611	1070,8	23,43	4,99	4,70	2,29	2,454	6,87	17,38	60,47
						23,53	5,03	4,67	2,35		4,39	15,18	71,94

ANEXO 3 REPORTE ENSAYO MEZCLA MODIFICADA

% Asfalto	Altura Briqueta (mm)	Diámetro Briqueta (mm)	Peso (g)			Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Estabilidad / Flujo (KN/mm)	Gravedad Especifica Bulk	Gravedad Especifica Máxima de la Mezcla Gmm	Vacíos con Aire Va (%)	Vacíos en los Agregados Minerales (%) VAM	Vacíos lentos de Asfalto (%) VFA
			Seca en Aire	En Agua	S.S.S								
5,5	66	102	1195,44	687	1186,02	19,26	4,52	4,26	2,38	2,546	6,69	13,66	50,99
5,5	63	102	1176,87	681	1177,6	18,91	4,41	4,29	2,37	2,546	6,92	13,86	50,11
5,5	68	102	1185,95	683	1186,2	19,34	4,57	4,23	2,36	2,546	7,43	14,34	48,19
						19,17	4,50	4,26	2,37		7,01	13,95	49,76
6	66	102	1164,29	665	1154,04	21,45	4,12	5,20	2,36	2,536	7,01	14,74	52,45
6	64	102	1140,59	650	1121,01	21,33	4,30	4,96	2,38	2,536	6,19	13,99	55,76
6	65	102	1144,03	653	1140,05	20,43	4,56	4,48	2,34	2,536	7,78	15,45	49,62
						21,07	4,33	4,87	2,36		6,99	14,72	52,61
6,5	60	103	1120,1	652	1120,1	21,79	4,84	4,50	2,39	2,493	4,03	13,95	71,12
6,5	65	102	1191,54	693	1192,9	24,81	5,12	4,84	2,38	2,493	4,40	14,28	69,18
6,5	64	102	1190,05	689	1190,6	22,41	4,55	4,92	2,37	2,493	4,85	14,68	67,00
						23,00	4,84	4,75	2,38		4,43	14,30	69,10
7	58	102	1077,25	619	1077,2	22,10	4,52	4,89	2,35	2,457	4,33	15,90	72,80
7	63	102	1265,5	727	1266	21,66	5,49	3,95	2,35	2,457	4,46	16,02	72,19
7	67	102	1210,08	695	1212,1	18,06	4,47	4,04	2,34	2,457	4,77	16,30	70,73
						20,61	4,83	4,27	2,35		4,52	16,07	71,90
7,5	59	102	1097,93	630	1097,8	17,98	5,33	3,37	2,35	2,430	3,40	16,50	79,39
7,5	62	102	1160,96	668	1169,7	17,68	6,76	2,62	2,31	2,430	4,76	17,67	73,08
7,5	65	102	1173,67	670	1175,2	18,41	5,49	3,35	2,32	2,430	4,38	17,35	74,75
						18,02	5,86	3,07	2,33		4,18	17,17	75,74

8	65	102	1199	686	1199,7	17,00	5,31	3,20	2,33	2,426	3,78	17,41	78,29
8	65	102	1184,52	680	1185,9	17,87	5,72	3,13	2,34	2,426	3,48	17,15	79,73
8	61	102	1133,66	644	1134,7	17,69	6,32	2,80	2,31	2,426	4,76	18,25	73,92
						17,52	5,78	3,03	2,33		4,01	17,60	77,31

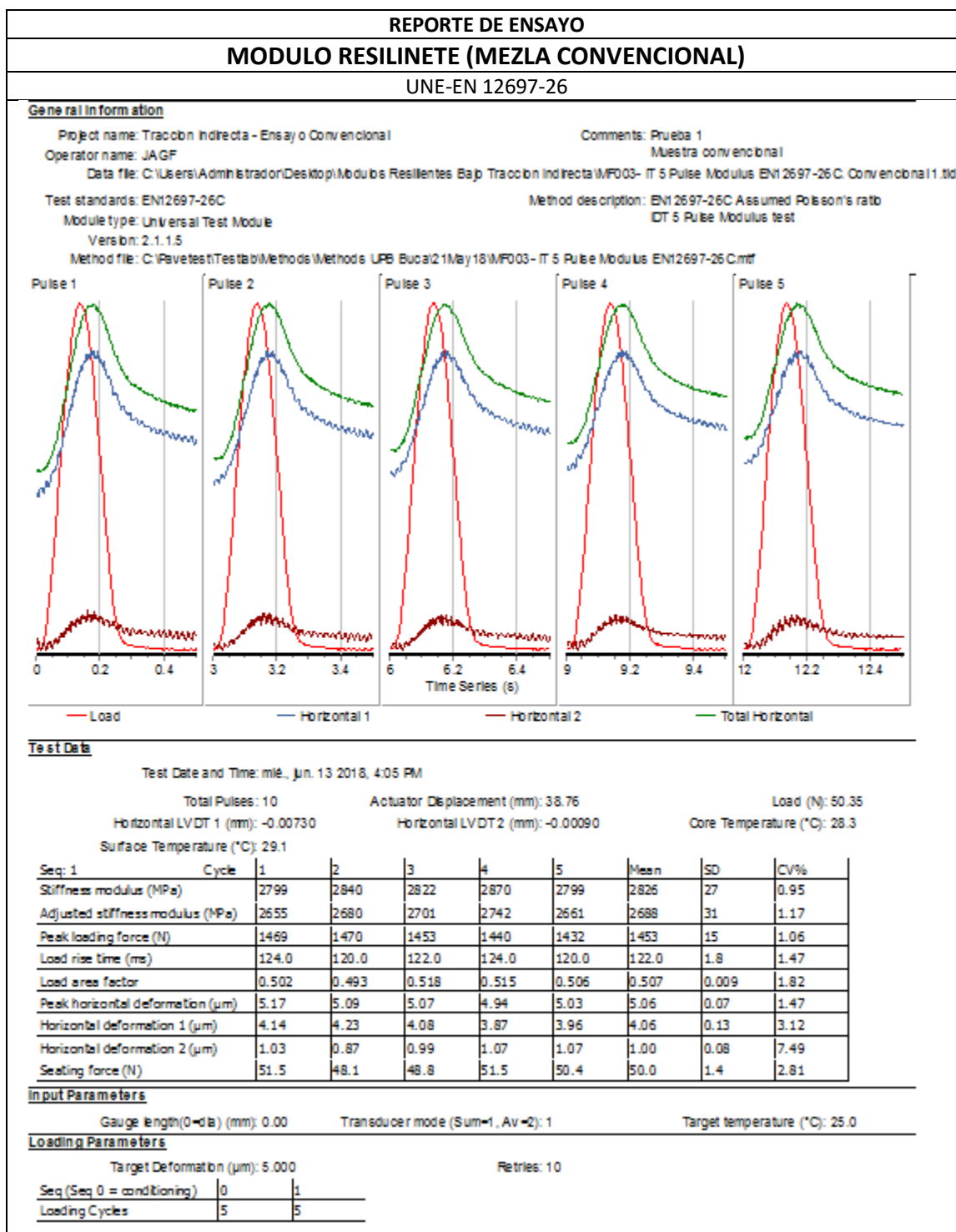
ANEXO 4 CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO

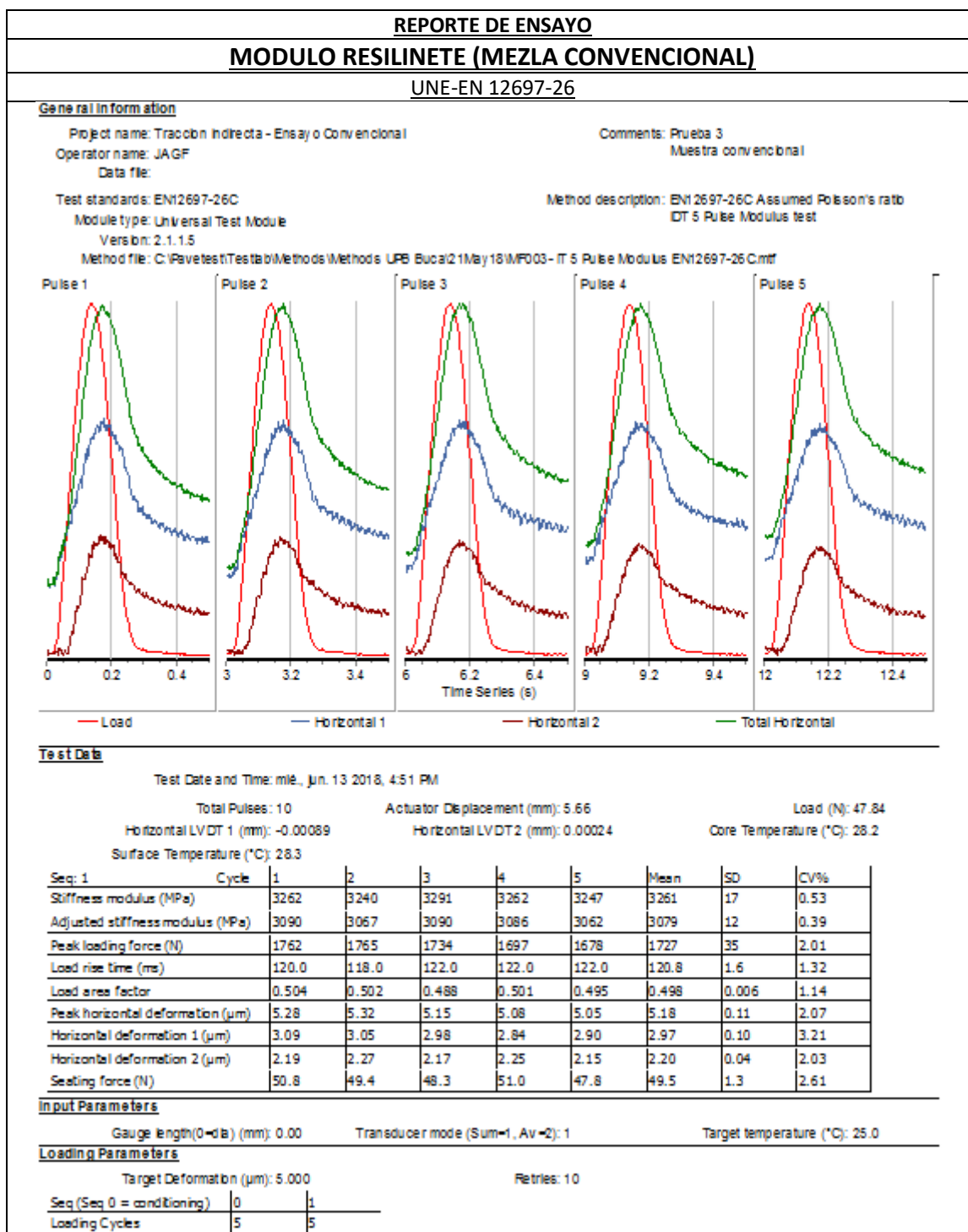
CARACTERÍSTICAS	REQUISITOS
Humedad	-Máximo 0.75% de la masa total de la mezcla. -El GCR debe fluir libremente
Gravedad Especifica	1.15 ± 0.05
Contenido de metales no ferrosos	No debe haber presencia visible
Contenido de metales ferrosos, en masa	Máximo 0.01%
Contenido de fibra en masa, en masa: -Para mezclas en caliente -Para riegos	Máximo 0.5% Máximo 0.1%
Contenido de polvo mineral (como talco): se suele usar para prevenir que los granos se peguen	Máximo 4.0%
Contenido total de otros elementos extraños, en masa; incluye: -Vidrio -Arena -Madera, etc.	Máximo 0.25%

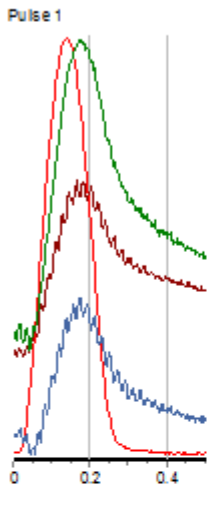
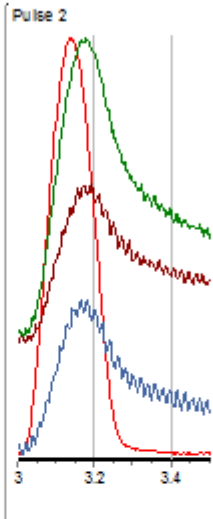
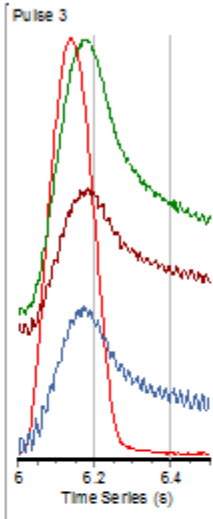
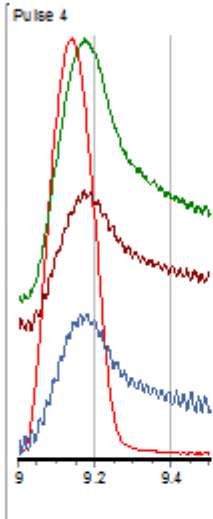
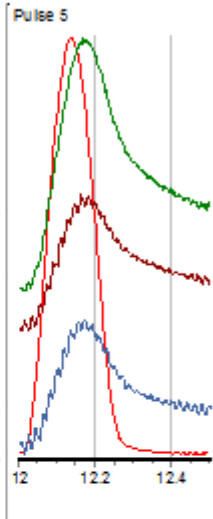
ANEXO 5 INTERVALO DE VALORES CARACTERISTICOS PARA MODIFICAR EL LIGANTE CON GCR

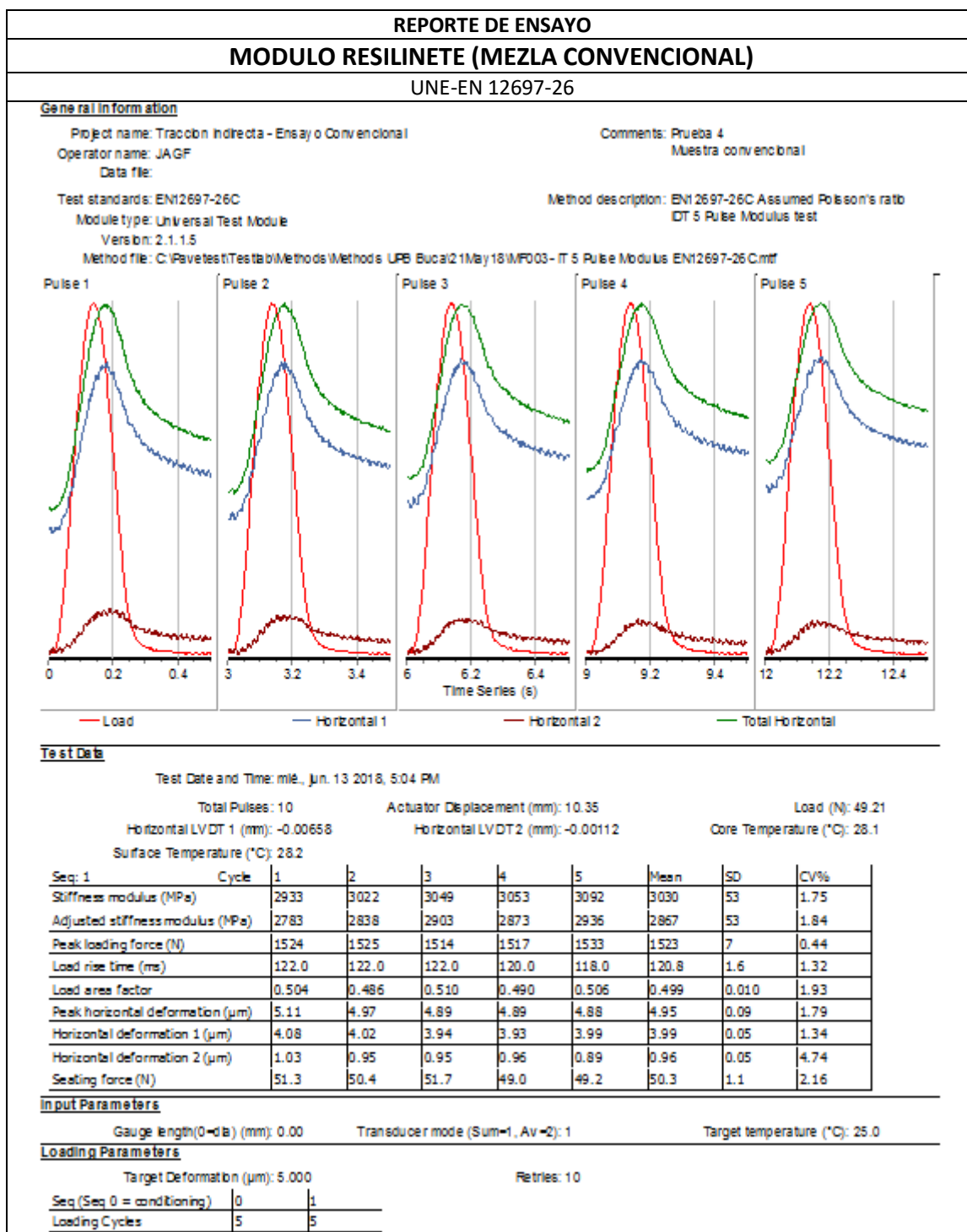
Variable	MIN	MAX
Porcentaje de GCR sobre el peso del ligante	10	20
Tiempo de reacción, min	55	75
Velocidad de agitación, rpm	100	750
Temperatura de mezclado, °C	155	170

INTERVALO DE VALORES CARACTERISTICOS PARA MODIFICAR EL LIGANTE CON GCR		
Variable	MIN	MAX
Porcentaje de GCR sobre el peso del ligante	10	20
Tiempo de reacción, min	55	75
Velocidad de agitación, rpm	100	750
Temperatura de mezclado, °C	155	170





REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA CONVENCIONAL) UNE-EN 12697-26																																																																																																							
General Information Project name: Traccion Indirecta - Ensayo Convencional Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\TestTab\Methods\Methods_LPB_Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 2 Muestra convencional Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																							
 Pulse 1  Pulse 2  Pulse 3  Pulse 4  Pulse 5 — Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal																																																																																																							
Test Data Test Date and Time: mié., Jun. 13 2018, 4:25 PM Total Pulses: 10 Actuator Displacement (mm): 9.14 Load (N): 48.98 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00277 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00560 Core Temperature (°C): 28.6 Surface Temperature (°C): 29.0 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2684</td> <td>2725</td> <td>2754</td> <td>2749</td> <td>2691</td> <td>2721</td> <td>29</td> <td>1.06</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2552</td> <td>2587</td> <td>2594</td> <td>2619</td> <td>2562</td> <td>2583</td> <td>24</td> <td>0.93</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1420</td> <td>1422</td> <td>1403</td> <td>1391</td> <td>1395</td> <td>1406</td> <td>13</td> <td>0.90</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>120.0</td> <td>118.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>120.8</td> <td>2.0</td> <td>1.69</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.505</td> <td>0.503</td> <td>0.489</td> <td>0.510</td> <td>0.508</td> <td>0.503</td> <td>0.007</td> <td>1.48</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>5.17</td> <td>5.10</td> <td>4.97</td> <td>4.94</td> <td>5.07</td> <td>5.05</td> <td>0.08</td> <td>1.62</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>2.64</td> <td>2.45</td> <td>2.58</td> <td>2.35</td> <td>2.55</td> <td>2.51</td> <td>0.10</td> <td>4.09</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.53</td> <td>2.64</td> <td>2.39</td> <td>2.60</td> <td>2.52</td> <td>2.54</td> <td>0.08</td> <td>3.33</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>51.3</td> <td>51.0</td> <td>50.4</td> <td>51.0</td> <td>49.0</td> <td>50.5</td> <td>0.8</td> <td>1.66</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		2684	2725	2754	2749	2691	2721	29	1.06	Adjusted stiffness modulus (MPa)		2552	2587	2594	2619	2562	2583	24	0.93	Peak loading force (N)		1420	1422	1403	1391	1395	1406	13	0.90	Load rise time (ms)		120.0	118.0	120.0	122.0	124.0	120.8	2.0	1.69	Load area factor		0.505	0.503	0.489	0.510	0.508	0.503	0.007	1.48	Peak horizontal deformation (µm)		5.17	5.10	4.97	4.94	5.07	5.05	0.08	1.62	Horizontal deformation 1 (µm)		2.64	2.45	2.58	2.35	2.55	2.51	0.10	4.09	Horizontal deformation 2 (µm)		2.53	2.64	2.39	2.60	2.52	2.54	0.08	3.33	Seating force (N)		51.3	51.0	50.4	51.0	49.0	50.5	0.8	1.66
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		2684	2725	2754	2749	2691	2721	29	1.06																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2552	2587	2594	2619	2562	2583	24	0.93																																																																																														
Peak loading force (N)		1420	1422	1403	1391	1395	1406	13	0.90																																																																																														
Load rise time (ms)		120.0	118.0	120.0	122.0	124.0	120.8	2.0	1.69																																																																																														
Load area factor		0.505	0.503	0.489	0.510	0.508	0.503	0.007	1.48																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		5.17	5.10	4.97	4.94	5.07	5.05	0.08	1.62																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		2.64	2.45	2.58	2.35	2.55	2.51	0.10	4.09																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		2.53	2.64	2.39	2.60	2.52	2.54	0.08	3.33																																																																																														
Seating force (N)		51.3	51.0	50.4	51.0	49.0	50.5	0.8	1.66																																																																																														
Input Parameters Gauge length (0-10) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																							
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>				Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																					
Loading Cycles	5	5																																																																																																					



REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA MODIFICADA) UNE-EN 12697-26																																																																																																					
General information Project name: Tracolin Indirecta - Ensayo Modificada Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\Testabi\Methods\Methods\UPB Bucal21May18\MF003 - IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 1 Muestra modificada Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																					
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 — Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal																																																																																																					
Test Data Test Date and Time: vie., Jun. 15 2018, 10:25 AM Total Pulses: 15 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00080 Surface Temperature (°C): 28.0 Actuator Displacement (mm): 19.17 Horizontal LVDT2 (mm): -0.00039 Load (N): 49.21 Core Temperature (°C): 26.8 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2408</td> <td>2417</td> <td>2423</td> <td>2354</td> <td>2366</td> <td>2394</td> <td>28</td> <td>1.17</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2291</td> <td>2278</td> <td>2286</td> <td>2220</td> <td>2211</td> <td>2257</td> <td>34</td> <td>1.52</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1198</td> <td>1199</td> <td>1198</td> <td>1197</td> <td>1198</td> <td>1198</td> <td>1</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>124.0</td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>1.3</td> <td>1.04</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.503</td> <td>0.485</td> <td>0.488</td> <td>0.486</td> <td>0.469</td> <td>0.486</td> <td>0.011</td> <td>2.23</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>4.88</td> <td>4.87</td> <td>4.85</td> <td>4.99</td> <td>4.97</td> <td>4.91</td> <td>0.06</td> <td>1.13</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>2.86</td> <td>2.88</td> <td>2.78</td> <td>2.89</td> <td>2.86</td> <td>2.85</td> <td>0.04</td> <td>1.34</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.03</td> <td>1.99</td> <td>2.07</td> <td>2.10</td> <td>2.11</td> <td>2.06</td> <td>0.05</td> <td>2.30</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>51.3</td> <td>49.4</td> <td>48.8</td> <td>49.7</td> <td>49.2</td> <td>49.7</td> <td>0.9</td> <td>1.72</td> </tr> </tbody> </table>		Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		2408	2417	2423	2354	2366	2394	28	1.17	Adjusted stiffness modulus (MPa)		2291	2278	2286	2220	2211	2257	34	1.52	Peak loading force (N)		1198	1199	1198	1197	1198	1198	1	0.05	Load rise time (ms)		124.0	122.0	122.0	122.0	120.0	122.0	1.3	1.04	Load area factor		0.503	0.485	0.488	0.486	0.469	0.486	0.011	2.23	Peak horizontal deformation (µm)		4.88	4.87	4.85	4.99	4.97	4.91	0.06	1.13	Horizontal deformation 1 (µm)		2.86	2.88	2.78	2.89	2.86	2.85	0.04	1.34	Horizontal deformation 2 (µm)		2.03	1.99	2.07	2.10	2.11	2.06	0.05	2.30	Seating force (N)		51.3	49.4	48.8	49.7	49.2	49.7	0.9	1.72
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																												
Stiffness modulus (MPa)		2408	2417	2423	2354	2366	2394	28	1.17																																																																																												
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2291	2278	2286	2220	2211	2257	34	1.52																																																																																												
Peak loading force (N)		1198	1199	1198	1197	1198	1198	1	0.05																																																																																												
Load rise time (ms)		124.0	122.0	122.0	122.0	120.0	122.0	1.3	1.04																																																																																												
Load area factor		0.503	0.485	0.488	0.486	0.469	0.486	0.011	2.23																																																																																												
Peak horizontal deformation (µm)		4.88	4.87	4.85	4.99	4.97	4.91	0.06	1.13																																																																																												
Horizontal deformation 1 (µm)		2.86	2.88	2.78	2.89	2.86	2.85	0.04	1.34																																																																																												
Horizontal deformation 2 (µm)		2.03	1.99	2.07	2.10	2.11	2.06	0.05	2.30																																																																																												
Seating force (N)		51.3	49.4	48.8	49.7	49.2	49.7	0.9	1.72																																																																																												
Input Parameters Gauge length (0-dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																					
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>10</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>		Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	10	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																			
Loading Cycles	10	5																																																																																																			

REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA MODIFICADA) UNE-EN 12697-26																																																																																																							
General Information Project name: Tracción Indirecta - Ensayo Modificada Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\Testtab\Methods\Methods_LPB_Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 4 Muestra modificada Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																							
Pulse 1 Pulse 2 Pulse 3 Pulse 4 Pulse 5 Time Series (s) — Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal																																																																																																							
Test Data Test Date and Time: Jun., Jun. 18 2016, 11:57 AM Total Pulses: 10 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00027 Surface Temperature (°C): 22.6 Actuator Displacement (mm): 13.23 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00108 Load (N): 50.81 Core Temperature (°C): 24.4 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>3012</td> <td>3408</td> <td>2873</td> <td>2809</td> <td>3279</td> <td>3076</td> <td>231</td> <td>7.52</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>2881</td> <td>3193</td> <td>2736</td> <td>2657</td> <td>3110</td> <td>2915</td> <td>208</td> <td>7.12</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1674</td> <td>1680</td> <td>1611</td> <td>1638</td> <td>1566</td> <td>1634</td> <td>42</td> <td>2.58</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>120.0</td> <td>121.2</td> <td>1.0</td> <td>0.81</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.518</td> <td>0.486</td> <td>0.510</td> <td>0.496</td> <td>0.506</td> <td>0.503</td> <td>0.011</td> <td>2.25</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>5.47</td> <td>4.85</td> <td>5.52</td> <td>5.74</td> <td>4.70</td> <td>5.26</td> <td>0.40</td> <td>7.70</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.91</td> <td>1.85</td> <td>2.10</td> <td>2.02</td> <td>1.86</td> <td>1.95</td> <td>0.10</td> <td>5.08</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.56</td> <td>3.01</td> <td>3.42</td> <td>3.71</td> <td>2.84</td> <td>3.31</td> <td>0.33</td> <td>10.07</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>50.8</td> <td>49.4</td> <td>52.0</td> <td>49.9</td> <td>50.8</td> <td>50.6</td> <td>0.9</td> <td>1.72</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		3012	3408	2873	2809	3279	3076	231	7.52	Adjusted stiffness modulus (MPa)		2881	3193	2736	2657	3110	2915	208	7.12	Peak loading force (N)		1674	1680	1611	1638	1566	1634	42	2.58	Load rise time (ms)		122.0	122.0	120.0	122.0	120.0	121.2	1.0	0.81	Load area factor		0.518	0.486	0.510	0.496	0.506	0.503	0.011	2.25	Peak horizontal deformation (µm)		5.47	4.85	5.52	5.74	4.70	5.26	0.40	7.70	Horizontal deformation 1 (µm)		1.91	1.85	2.10	2.02	1.86	1.95	0.10	5.08	Horizontal deformation 2 (µm)		3.56	3.01	3.42	3.71	2.84	3.31	0.33	10.07	Seating force (N)		50.8	49.4	52.0	49.9	50.8	50.6	0.9	1.72
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		3012	3408	2873	2809	3279	3076	231	7.52																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2881	3193	2736	2657	3110	2915	208	7.12																																																																																														
Peak loading force (N)		1674	1680	1611	1638	1566	1634	42	2.58																																																																																														
Load rise time (ms)		122.0	122.0	120.0	122.0	120.0	121.2	1.0	0.81																																																																																														
Load area factor		0.518	0.486	0.510	0.496	0.506	0.503	0.011	2.25																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		5.47	4.85	5.52	5.74	4.70	5.26	0.40	7.70																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		1.91	1.85	2.10	2.02	1.86	1.95	0.10	5.08																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		3.56	3.01	3.42	3.71	2.84	3.31	0.33	10.07																																																																																														
Seating force (N)		50.8	49.4	52.0	49.9	50.8	50.6	0.9	1.72																																																																																														
Input Parameters Gauge length(0-da) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																							
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Seq (Seq 0 = conditioning) 0 1 Loading Cycles 5 5 Retries: 10																																																																																																							

REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA MODIFICADA) UNE-EN 12697-26																																																																																																							
General information Project name: Traccon Indirecta - Ensayo Modificada Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\Testlab\Methods\Methods_LPB\Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 4 Muestra modificada Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																							
Test Data Test Date and Time: vie., Jun. 15 2018, 2:50 PM Total Pulses: 10 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.01184 Surface Temperature (°C): 28.3 Actuator Displacement (mm): 13.50 Horizontal LVDT2 (mm): -0.01501 Load (N): 51.50 Core Temperature (°C): 27.3 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>1233</td> <td>1290</td> <td>1320</td> <td>1222</td> <td>1165</td> <td>1246</td> <td>54</td> <td>4.36</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>1144</td> <td>1196</td> <td>1212</td> <td>1124</td> <td>1078</td> <td>1151</td> <td>49</td> <td>4.23</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>803</td> <td>806</td> <td>641</td> <td>501</td> <td>532</td> <td>657</td> <td>129</td> <td>19.68</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>114.0</td> <td>122.0</td> <td>124.0</td> <td>120.8</td> <td>3.5</td> <td>2.89</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.423</td> <td>0.425</td> <td>0.404</td> <td>0.405</td> <td>0.413</td> <td>0.414</td> <td>0.009</td> <td>2.12</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>6.43</td> <td>6.16</td> <td>4.79</td> <td>4.05</td> <td>4.51</td> <td>5.19</td> <td>0.94</td> <td>18.10</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>3.40</td> <td>3.24</td> <td>1.95</td> <td>1.28</td> <td>1.68</td> <td>2.31</td> <td>0.85</td> <td>37.01</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.03</td> <td>2.92</td> <td>2.84</td> <td>2.77</td> <td>2.83</td> <td>2.88</td> <td>0.09</td> <td>3.10</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.0</td> <td>49.7</td> <td>49.0</td> <td>51.0</td> <td>51.5</td> <td>50.0</td> <td>1.0</td> <td>2.10</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		1233	1290	1320	1222	1165	1246	54	4.36	Adjusted stiffness modulus (MPa)		1144	1196	1212	1124	1078	1151	49	4.23	Peak loading force (N)		803	806	641	501	532	657	129	19.68	Load rise time (ms)		122.0	122.0	114.0	122.0	124.0	120.8	3.5	2.89	Load area factor		0.423	0.425	0.404	0.405	0.413	0.414	0.009	2.12	Peak horizontal deformation (µm)		6.43	6.16	4.79	4.05	4.51	5.19	0.94	18.10	Horizontal deformation 1 (µm)		3.40	3.24	1.95	1.28	1.68	2.31	0.85	37.01	Horizontal deformation 2 (µm)		3.03	2.92	2.84	2.77	2.83	2.88	0.09	3.10	Seating force (N)		49.0	49.7	49.0	51.0	51.5	50.0	1.0	2.10
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		1233	1290	1320	1222	1165	1246	54	4.36																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1144	1196	1212	1124	1078	1151	49	4.23																																																																																														
Peak loading force (N)		803	806	641	501	532	657	129	19.68																																																																																														
Load rise time (ms)		122.0	122.0	114.0	122.0	124.0	120.8	3.5	2.89																																																																																														
Load area factor		0.423	0.425	0.404	0.405	0.413	0.414	0.009	2.12																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		6.43	6.16	4.79	4.05	4.51	5.19	0.94	18.10																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		3.40	3.24	1.95	1.28	1.68	2.31	0.85	37.01																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		3.03	2.92	2.84	2.77	2.83	2.88	0.09	3.10																																																																																														
Seating force (N)		49.0	49.7	49.0	51.0	51.5	50.0	1.0	2.10																																																																																														
Input Parameters Gauge length(0-dia) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																							
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>				Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																					
Loading Cycles	5	5																																																																																																					

REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA MODIFICADA) UNE-EN 12697-26																																																																																																							
General Information Project name: Tracción Indirecta - Ensayo Modificada Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\TestTab\Methods\Methods_LPB_Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 4 Muestra modificada Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																							
— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal																																																																																																							
Test Data Test Date and Time: vie., Jun. 15 2018, 2:55 PM Total Pulses: 10 Horizontal LVDT 1 (mm): 0.00690 Surface Temperature (°C): 28.4 Actuator Displacement (mm): 19.04 Horizontal LVDT2 (mm): -0.01226 Load (N): 48.98 Core Temperature (°C): 27.4 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>1681</td> <td>1955</td> <td>2079</td> <td>2093</td> <td>2043</td> <td>1970</td> <td>153</td> <td>7.74</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>1561</td> <td>1802</td> <td>1903</td> <td>1912</td> <td>1867</td> <td>1809</td> <td>130</td> <td>7.18</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1068</td> <td>1068</td> <td>917</td> <td>863</td> <td>974</td> <td>978</td> <td>81</td> <td>8.32</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>118.0</td> <td>116.0</td> <td>118.0</td> <td>114.0</td> <td>116.0</td> <td>116.4</td> <td>1.5</td> <td>1.29</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.442</td> <td>0.435</td> <td>0.424</td> <td>0.421</td> <td>0.421</td> <td>0.429</td> <td>0.009</td> <td>2.03</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>6.27</td> <td>5.39</td> <td>4.35</td> <td>4.07</td> <td>4.71</td> <td>4.96</td> <td>0.79</td> <td>15.94</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>3.58</td> <td>2.54</td> <td>1.56</td> <td>1.33</td> <td>1.84</td> <td>2.17</td> <td>0.81</td> <td>37.48</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>2.68</td> <td>2.85</td> <td>2.80</td> <td>2.73</td> <td>2.86</td> <td>2.79</td> <td>0.07</td> <td>2.46</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.0</td> <td>50.6</td> <td>52.6</td> <td>52.0</td> <td>49.0</td> <td>50.6</td> <td>1.5</td> <td>2.96</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		1681	1955	2079	2093	2043	1970	153	7.74	Adjusted stiffness modulus (MPa)		1561	1802	1903	1912	1867	1809	130	7.18	Peak loading force (N)		1068	1068	917	863	974	978	81	8.32	Load rise time (ms)		118.0	116.0	118.0	114.0	116.0	116.4	1.5	1.29	Load area factor		0.442	0.435	0.424	0.421	0.421	0.429	0.009	2.03	Peak horizontal deformation (µm)		6.27	5.39	4.35	4.07	4.71	4.96	0.79	15.94	Horizontal deformation 1 (µm)		3.58	2.54	1.56	1.33	1.84	2.17	0.81	37.48	Horizontal deformation 2 (µm)		2.68	2.85	2.80	2.73	2.86	2.79	0.07	2.46	Seating force (N)		49.0	50.6	52.6	52.0	49.0	50.6	1.5	2.96
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		1681	1955	2079	2093	2043	1970	153	7.74																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1561	1802	1903	1912	1867	1809	130	7.18																																																																																														
Peak loading force (N)		1068	1068	917	863	974	978	81	8.32																																																																																														
Load rise time (ms)		118.0	116.0	118.0	114.0	116.0	116.4	1.5	1.29																																																																																														
Load area factor		0.442	0.435	0.424	0.421	0.421	0.429	0.009	2.03																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		6.27	5.39	4.35	4.07	4.71	4.96	0.79	15.94																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		3.58	2.54	1.56	1.33	1.84	2.17	0.81	37.48																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		2.68	2.85	2.80	2.73	2.86	2.79	0.07	2.46																																																																																														
Seating force (N)		49.0	50.6	52.6	52.0	49.0	50.6	1.5	2.96																																																																																														
Input Parameters Gauge length(0-da) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																							
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Retries: 10 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Seq (Seq 0 = conditioning)</th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Loading Cycles</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>				Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1	Loading Cycles	5	5																																																																																														
Seq (Seq 0 = conditioning)	0	1																																																																																																					
Loading Cycles	5	5																																																																																																					

REPORTE DE ENSAYO MODULO RESILINETE (MEZLA MODIFICADA) UNE-EN 12697-26																																																																																																							
General Information Project name: Tracoon Indirecta - Ensayo Modificada Operator name: JAGF Data file: Test standards: EN12697-26C Module type: Universal Test Module Version: 2.1.1.5 Method file: C:\Pavetest\TestTab\Methods\Methods\UPB_Bucal21May18\MF003-IT 5 Pulse Modulus EN12697-26 C.mtf Comments: Prueba 4 Muestra modificada Method description: EN12697-26C Assumed Poisson's ratio DT 5 Pulse Modulus test																																																																																																							
— Load — Horizontal 1 — Horizontal 2 — Total Horizontal																																																																																																							
Test Data Test Date and Time: Jun., Jun. 18 2018, 12:01 PM Total Pulses: 10 Horizontal LVDT 1 (mm): -0.00071 Surface Temperature (°C): 22.1 Actuator Displacement (mm): 17.91 Horizontal LVDT 2 (mm): -0.00115 Load (N): 50.81 Core Temperature (°C): 23.9 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>Seq: 1</th> <th>Cycle</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>Mean</th> <th>SD</th> <th>CV%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>3586</td> <td>3428</td> <td>3514</td> <td>3274</td> <td>3043</td> <td>3369</td> <td>193</td> <td>5.74</td> </tr> <tr> <td>Adjusted stiffness modulus (MPa)</td> <td></td> <td>3382</td> <td>3282</td> <td>3326</td> <td>3112</td> <td>2885</td> <td>3198</td> <td>180</td> <td>5.63</td> </tr> <tr> <td>Peak loading force (N)</td> <td></td> <td>1891</td> <td>1890</td> <td>1866</td> <td>1807</td> <td>1776</td> <td>1846</td> <td>46</td> <td>2.52</td> </tr> <tr> <td>Load rise time (ms)</td> <td></td> <td>120.0</td> <td>120.0</td> <td>120.0</td> <td>122.0</td> <td>122.0</td> <td>120.8</td> <td>1.0</td> <td>0.81</td> </tr> <tr> <td>Load area factor</td> <td></td> <td>0.498</td> <td>0.523</td> <td>0.504</td> <td>0.509</td> <td>0.503</td> <td>0.508</td> <td>0.009</td> <td>1.68</td> </tr> <tr> <td>Peak horizontal deformation (µm)</td> <td></td> <td>5.19</td> <td>5.43</td> <td>5.23</td> <td>5.43</td> <td>5.74</td> <td>5.40</td> <td>0.20</td> <td>3.65</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 1 (µm)</td> <td></td> <td>1.78</td> <td>1.69</td> <td>1.95</td> <td>1.66</td> <td>1.96</td> <td>1.81</td> <td>0.13</td> <td>7.08</td> </tr> <tr> <td>Horizontal deformation 2 (µm)</td> <td></td> <td>3.41</td> <td>3.74</td> <td>3.28</td> <td>3.77</td> <td>3.78</td> <td>3.60</td> <td>0.21</td> <td>5.87</td> </tr> <tr> <td>Seating force (N)</td> <td></td> <td>49.7</td> <td>51.0</td> <td>48.1</td> <td>52.0</td> <td>50.8</td> <td>50.3</td> <td>1.3</td> <td>2.66</td> </tr> </tbody> </table>				Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%	Stiffness modulus (MPa)		3586	3428	3514	3274	3043	3369	193	5.74	Adjusted stiffness modulus (MPa)		3382	3282	3326	3112	2885	3198	180	5.63	Peak loading force (N)		1891	1890	1866	1807	1776	1846	46	2.52	Load rise time (ms)		120.0	120.0	120.0	122.0	122.0	120.8	1.0	0.81	Load area factor		0.498	0.523	0.504	0.509	0.503	0.508	0.009	1.68	Peak horizontal deformation (µm)		5.19	5.43	5.23	5.43	5.74	5.40	0.20	3.65	Horizontal deformation 1 (µm)		1.78	1.69	1.95	1.66	1.96	1.81	0.13	7.08	Horizontal deformation 2 (µm)		3.41	3.74	3.28	3.77	3.78	3.60	0.21	5.87	Seating force (N)		49.7	51.0	48.1	52.0	50.8	50.3	1.3	2.66
Seq: 1	Cycle	1	2	3	4	5	Mean	SD	CV%																																																																																														
Stiffness modulus (MPa)		3586	3428	3514	3274	3043	3369	193	5.74																																																																																														
Adjusted stiffness modulus (MPa)		3382	3282	3326	3112	2885	3198	180	5.63																																																																																														
Peak loading force (N)		1891	1890	1866	1807	1776	1846	46	2.52																																																																																														
Load rise time (ms)		120.0	120.0	120.0	122.0	122.0	120.8	1.0	0.81																																																																																														
Load area factor		0.498	0.523	0.504	0.509	0.503	0.508	0.009	1.68																																																																																														
Peak horizontal deformation (µm)		5.19	5.43	5.23	5.43	5.74	5.40	0.20	3.65																																																																																														
Horizontal deformation 1 (µm)		1.78	1.69	1.95	1.66	1.96	1.81	0.13	7.08																																																																																														
Horizontal deformation 2 (µm)		3.41	3.74	3.28	3.77	3.78	3.60	0.21	5.87																																																																																														
Seating force (N)		49.7	51.0	48.1	52.0	50.8	50.3	1.3	2.66																																																																																														
Input Parameters Gauge length(0-dB) (mm): 0.00 Transducer mode (Sum=1, Av=2): 1 Target temperature (°C): 25.0																																																																																																							
Loading Parameters Target Deformation (µm): 5.000 Seq (Seq 0 = conditioning) 0 1 Loading Cycles 5 5 Retries: 10																																																																																																							