

**COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA
ASFALTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL
ENSAYO DE AHUELLAMIENTO REEMPLAZANDO ENTRE EL 1% Y 4% DEL
AGREGADO FINO.**

**MARÍA FERNANDA JIMÉNEZ FLETCHER
INGRID NATALIA MELO ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA
ASFALTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL
ENSAYO DE AHUELLAMIENTO REEMPLAZANDO ENTRE EL 1% Y 4% DEL
AGREGADO FINO.**

**MARÍA FERNANDA JIMÉNEZ FLETCHER
INGRID NATALIA MELO ROJAS**

Trabajo de grado para optar a título de Ingeniero Civil

**Director
SANDRA MILENA COTE VARGAS
MSc. Ing. Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar nos gustaría agradecerle a Dios por su infinito acompañamiento y fortaleza a lo largo de nuestra carrera, por permitir el cumplimiento de un objetivo más.

Un agradecimiento muy especial a nuestras familias por su apoyo y confianza incondicional durante todos estos años, por enseñarnos, motivarnos y brindarnos su más sincero cariño.

Así mismo un agradecimiento a nuestra directora de tesis, MSc. Sandra Milena Cote Vargas y codirector MSc. Ludwing Pérez Bustos por su orientación, supervisión y apoyo constante, por compartirnos sus conocimientos y de esta manera permitirnos terminar con éxito el presente trabajo.

Nuestro más sincero agradecimiento a la empresa MPI, Manufacturas y Procesos Industriales Ltda por la valiosa colaboración y acompañamiento, por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo experimental de la investigación en sus instalaciones permitiéndonos hacer uso de sus laboratorios.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
3. MARCO TEORICO	17
3.1 ASFALTO.....	17
3.2 MEZCLA ASFÁLTICA.....	17
3.2.1 Mezcla asfáltica en caliente	18
3.2.1.1 Método Marshall	18
3.4 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GCR.....	19
3.4.1 Proceso Por Vía Húmeda	19
3.4.2.1 Tecnologías para la incorporación del Grano de Caucho por vía seca. (Tomado idu 2002.).....	20
3.5 AHUELLAMIENTO.....	21
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	23
4.1 MATERIALES	23
4.2.1 Asfalto 60-70.....	23
4.2.2.1 Granulometría	25
4.2.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	26
4.2.3.1 Granulometría	27
4.2.4 Mezcla de Materiales	28
4.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE TRABAJO	34

4.2.1 Elaboración de Probetas.....	35
4.2.2 Ensayos de las Probetas Compactadas	37
4.3.1 Proceso de incorporación del GCR.....	38
4.3.2 Elaboración de Probetas con GCR	38
4.3.3 Ensayos de las Probetas Compactadas con GCR.....	39
4.4 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	39
4.4.1 Velocidad de Deformación Media	41
4.4.2 Procedimiento	42
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
5.1 PORCENTAJE ÓPTIMO GCR.....	44
5.2 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO.....	45
5.2.1 Mezcla Asfáltica Sin Adiciones	45
5.2.2 Mezcla Asfáltica Con GCR.....	47
5.2.3 Análisis de Gráficas	48
6. CONSLUSIONES	51
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	56

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Propiedades Fisicoquímicas del Asfalto 60-70	24
Ilustración 2. Curva Reológica del Asfalto	25
Ilustración 3. Propiedades de Materiales Pétreos Combinados.....	29

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva Granulométrica Materiales Pétreos.....	26
Gráfica 2. Curva Granulométrica GCR	28
Gráfica 3. Curva Granulométrica Combinación Sin Adiciones	30
Gráfica 4. Curva Granulométrica Combinación con 4% GCR.....	31
Gráfica 5. Curva Granulométrica Combinación con 2%GCR.....	32
Gráfica 6. Curva Granulométrica Combinación con 1.5%GCR.....	33
Gráfica 7. Curva Granulométrica Combinación con 1%GCR.....	34
Gráfica 8. Deformación vs Tiempo.....	48
Gráfica 9. Deformación Total de las Mezclas	49
Gráfica 10. Velocidad de Deformación Media vs Tiempo	50

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Compactación Marshall	36
Fotografía 2. Extracción Marshall	36
Fotografía 3. Elaboración probetas con GCR	39
Fotografía 4. Equipo Wheel Tracker Tester	40
Fotografía 5. Equipo Roller Compactor.....	41
Fotografía 6. Probetas en horno a $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ antes del ensayo de Ahuellamiento...	43

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría Materiales Pétreos	26
Tabla 2. Granulometría GCR	27
Tabla 3. Granulometría Combinación Sin Adiciones.....	30
Tabla 4. Granulometría Combinación con 4%GCR	31
Tabla 5. Granulometría Combinación con 2%GCR	32
Tabla 6. Granulometría Combinación con 1.5%GCR	33
Tabla 7. Granulometría Combinación con 1%GCR	34
Tabla 8. Parámetros Marshall Mezclas con GCR	44
Tabla 9. Características de las Mezclas Ensayadas.....	45
Tabla 10. Resultados de Deformaciones MDC-19.....	46
Tabla 11. Resultados Deformación Total MDC-19.....	46
Tabla 12. Resultados Velocidades de Deformación MDC-19	47
Tabla 13. Resultados de Deformaciones MDC-19 con GCR	47
Tabla 14. Resultados Deformación Total MDC-19 con GCR.....	48
Tabla 15. Resultados velocidad de Deformación MDC-19 con GCR.....	48

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN ADICIONES Y MEZCLA ASFALTICA CON GCR (GRANO DE CAUCHO RECICLADO) EMPLEANDO EL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO REEMPLAZANDO ENTRE EL 1% Y 4% DEL AGREGADO FINO*

AUTORES: MARÍA FERNANDA JIMÉNEZ FLETCHER, INGRID NATALIA MELO ROJAS**

PALABRAS CLAVE: Asfalto, Mezcla asfáltica Modificada, Caucho, Vía seca, Deformación plástica.

DESCRIPCIÓN:

La capa de rodadura de un pavimento es la encargada de proporcionar una superficie segura, cómoda y económica. Una de las principales fallas que se presentan en ella son las deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga. En los últimos años se ha demostrado que la modificación de materiales empleados en las mezclas asfálticas logra cambios significativos en su composición haciendo el material más resistente y a la misma vez proporcionando beneficios al medio ambiente.

Este trabajo de investigación busca aportar nueva información en el área de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR) empleando el proceso de vía seca, se utiliza un asfalto 60-70 para los diferentes tipos de mezclas y caucho pulverizado malla 30 (apertura nominal de 0.590 mm) que reemplaza parte del agregado fino en un rango del 1% al 4% para obtener un porcentaje óptimo de GCR en la mezcla asfáltica modificada.

Se presenta comparación entre los diseños de mezclas asfálticas sin adiciones y mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado mediante el ensayo de ahuellamiento; Además, muestra procedimiento detallado del diseño de las mezclas, características de los materiales empleados, ejecución del ensayo bajo la norma **INVIAS I.N.V. E-756-13 Resistencia A La Deformación Plástica De Las Mezclas Asfálticas Mediante La Pista De Ensayo De Laboratorio** y los criterios que afectan directamente el producto final.

* Trabajo De Grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas .Escuela de ingeniería civil, Director M.Sc Sandra Milena Cote Vargas

ABSTRACT

TITLE: THIS DOCUMENT COMPARE THE MIXTURE OF ASPHALT WITHOUT ADDITIONS AND MIXTURE ASPHALT WITH GCR (GRAIN OF RECYCLED RUBBER) USING THE ASSAY OF AHUPELLAMIENTO REPLACING BETWEEN 1% AND 4% OF THE FINE AGGREGATE *

AUTHORS: MARÍA FERNANDA JIMÉNEZ FLETCHER, INGRID NATALIA MELO ROJAS**

KEYWORDS: Asphalt, modified asphalt mixture, rubber, dry way, plastic deformation.

DESCRIPTION:

The tread layer of a pavement is responsible for providing a safe, comfort and economical surface. One of the main failures that occur in it are the permanent deformations produced by load applications. In recent years it has been shown that the modification of materials used in asphalt mixtures achieve significant changes in their composition making it more resilient while adding benefit to the environment.

This research work seeks to provide new information in the area of modified asphalt mixtures with recycled rubber grain (GCR) using the dry-track process, it uses a 60-70 asphalt for different types of mixtures and rubber powdered mesh 30 (Nominal opening of 0.590 mm) that replaces part of the fine aggregate in a range of 1% to 4% to obtain an optimum percentage of GCR in the modified asphalt mixture.

There is a comparison between the designs of asphalt mixtures without additions and asphalt mixtures with recycled rubber grain by the ahuellamiento assay; In addition, it shows detailed procedure of the design of the mixtures, characteristics of the materials used, execution of the assay under the standard ***INVIAS I.N.V. E-756-13 resistance to the plastic deformation of the asphalt mixtures by means of the test track of the laboratory*** and the criteria that directly affect the fine product.

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical engineering. School of Civil Engineering, Director M.Sc Sandra Milena Cote Vargas

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de firmes y su función principal es proporcionar una superficie de rodamiento segura y resistente. Una de las fallas más frecuentes en los pavimentos son las deformaciones permanentes, estas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, para esto se necesita que la mezcla esté elaborada con un cemento asfáltico consistente, lo más próximo posible a un sólido elástico. ^[1]

Actualmente existen procesos de elaboración de concreto asfáltico en los que se incorpora desecho de llantas usadas, en Colombia la fabricación de mezclas bituminosas para carreteras utilizando grano de caucho molido se ha convertido en un tema de constante investigación debido a que los neumáticos aportan mejoras en su comportamiento y es una alternativa que permite consumir una considerable cantidad de residuo.

Este documento está orientado a la implementación del grano de caucho como mejorador de la mezcla asfáltica, para ello se presenta comparación entre los diseños de mezclas asfálticas sin adiciones y con GCR ante el paso repetitivo de cargas por medio del ensayo de ahuellamiento, controlando los parámetros que afectan el producto final.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente en nuestra región nos vemos enfrentados al problema ambiental de la disponibilidad de las llantas o neumáticos después de su vida útil; en Colombia, es un común denominador que este problema ambiental se vea generado por actividades inadecuadas respecto a la gran cantidad de llantas usadas de automotores que se almacenan en distintos lugares del país; es importante resaltar que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expidió la Resolución No. 1457 de 29 de julio de 2010, la cual plantea que en Colombia gran parte de las llantas utilizadas, son almacenadas en depósitos clandestinos, techos, patios de viviendas y en espacios públicos (lagos, ríos, calles y parques) con graves efectos en términos ambientales, económicos y sanitarios.

Por otro lado, el gran consumo de materiales de construcción como el asfalto, genera un consumo alto de materias primas, las cuales crecen exponencialmente a medida que se construyen y se mejoran las vías pavimentadas.

Debido a las problemáticas expuestas, nace la necesidad de buscar paralelamente una solución a la gran contaminación que presenta el país por estos factores, considerando así la reutilización de las llantas como material reciclado dentro de las mezclas asfálticas, contribuyendo al beneficio ambiental, técnico y económico para la sociedad.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar la mezcla asfáltica sin adiciones y mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado empleando el ensayo de ahuellamiento reemplazando entre el 1% y 4% del agregado fino.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el contenido óptimo de GCR entre el 1 y 4 % para la elaboración de la mezcla asfáltica.
- Diseñar la mezcla de asfalto sin adiciones y mezcla de asfalto con el porcentaje óptimo de GCR mediante el proceso de vía seca.
- Someter las probetas elaboradas a ensayo de ahuellamiento con las respectivas especificaciones.
- Comparar los resultados de la mezcla de asfalto sin adiciones y mezcla de asfalto con grano de caucho reciclado.

3. MARCO TEORICO

3.1 ASFALTO

El asfalto es un material aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente, Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. [2]

El asfalto es un material capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes [3], se utiliza ampliamente en pavimentación de carreteras, revestimiento de obras hidráulicas, impermeabilización de edificios, etc. [4]. El asfalto se produce en una variedad de tipos y grados que va desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. La forma semisólida, conocida como betún asfáltico, es el material básico. [5]

3.2 MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. [6]

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura. El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. [7]

3.2.1 Mezcla asfáltica en caliente Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica [8] asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. [9]

3.2.1.1 Método Marshall El método Marshall permite determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método solo es aplicable en mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm. Los parámetros que se estudian durante el diseño son la estabilidad y el flujo Marshall, vacíos de la mezcla asfáltica y vacíos en el agregado mineral. [10]

3.3 CAUCHO DE LLANTAS RECICLADO

Las llantas viejas son contaminantes, atentan contra la salud pública y generan peligro por ser generadoras de incendio. Las llantas están compuestas principalmente de caucho natural, caucho sintético, acero y fibra textil, además se

le agregan otros materiales que mejoran sus propiedades como lo son: óxido de zinc y magnesio, y negro de humo.^[11] EL grano de caucho reciclado (GCR) es un material obtenido de las llantas en desuso que se obtiene mediante procesos de trituración mecánica y separación de materiales que componen las llantas.

3.4 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GCR

El constante aumento de solicitudes en los pavimentos hace que se requiera un ligante con mejores propiedades reológicas y mecánicas. Al igual que la utilización de polímeros el grano de caucho reciclado puede mejorar propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

El caucho de llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como proceso húmedo y proceso seco.

3.4.1 Proceso Por Vía Húmeda El GCR mezclado con el asfalto genera una reacción entre estos dos elementos formando una mezcla modificada llamada “asfalto-caucho”, cuando el polvo de caucho se incorpora a un betún a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del betún y se hinchan. Con el hinchamiento disminuyen la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso.^[12]

3.4.2 Proceso Por Vía Seca El proceso seco es cualquier método donde el GCR es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el GCR como un agregado en la mezcla asfáltica. A diferencia del proceso húmedo, este proceso no requiere un equipo especial, sólo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de

GCR y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado. [13]

En el proceso por vía seca puede diferenciarse dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho. La primera utiliza tamaños máximo-elevados, de hasta 2 mm. Como la superficie específica del polvo es reducida y el periodo de interacción es limitado, no hay tiempo suficiente para que la maduración se desarrolle en toda la masa de las partículas más gruesas del caucho. Por tanto, el polvo del caucho funciona como un sistema de dos componentes en el que las partículas finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0.5 mm) interaccionan con el betún a elevada temperatura y modifica su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda. Por otro lado, las partículas gruesas se comportan como un árido elastómero dentro del esqueleto mineral de la mezcla bituminosa, aunque superficialmente también reacciona con el betún y se crea una interfase betún/caucho que cohesiona ambos materiales.

La segunda técnica utiliza polvo de caucho de menor tamaño (todo pasa por el tamiz 0.5 mm) y en menor proporción. El polvo de caucho más fino actúa como un modificador del betún añadido al mezclador. Se trata de un sistema que se puede considerar intermedio entre la vía seca y la vía húmeda. [14]

3.4.2.1 Tecnologías para la incorporación del Grano de Caucho por vía seca. (Tomado idu 2002.) En Estados Unidos para la incorporación del GCR por la vía seca se utilizan dos tipos de tecnologías, tecnología PlusRide y la tecnología Genérica o sistema TAK, por otro lado, en España fue desarrollada una tecnología que emplea granulometrías convencionales y es actualmente usada en muchos países. [15]

- **PlusRide.** Con esta tecnología el caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados y se utilizan contenidos de ligante entre 7.5 a 9 por ciento. Los granos de caucho utilizados son gruesos para sustituir fracciones específicas de los agregados de la mezcla. El tamaño de las partículas de caucho va desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz N°10).
- **Genérica.** En esta tecnología se utiliza caucho reciclado tanto en fracciones gruesas como finas para compatibilizar o ajustar la granulometría del caucho a la de los agregados de una mezcla asfáltica. Aquí la granulometría del caucho se divide en dos fracciones, la fracción fina interactúa con el cemento asfáltico mientras la fracción gruesa se comporta como un agregado elástico. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no supera el 2 por ciento del peso total de la mezcla.
- **Convencional.** Tecnología desarrollada en España con el objeto de utilizar caucho reciclado en la mejora de mezclas asfálticas, en la cual se emplean granulometrías convencionales. El porcentaje de adición no supera un dos por ciento del peso total de los agregados y el caucho utilizado es generalmente de granulometría fina, con tamaños de granos no superior a 0.5 mm.

3.5 AHUELLAMIENTO

Una de las fallas más frecuentes en un pavimento son la acumulación de deformaciones plásticas en todas las capas del pavimento, estas deformaciones se van transformando con el paso del tiempo en ahuellamiento.

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de

los vehículos. Se crea por combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio.

El asfalto (y por ende la mezcla) exhibe un comportamiento visco elástico a temperaturas de servicio, esto es, las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula. ^[16]

El ahuellamiento puede tener su origen en deformaciones de la mezcla asfáltica de Superficie, o en deformaciones en capas subyacentes. ^[17]

- **Ahuellamiento en la capa asfáltica.** El efecto se presenta en los primeros 7 a 10 cm. de mezcla más cercanos a la superficie. La mezcla asfáltica bajo esta profundidad se encuentra aislada térmicamente y además está sometida a esfuerzos menores que las capas superiores. Este tipo de ahuellamiento es independiente del diseño estructural del pavimento.
- **Ahuellamiento producido en capas subyacentes.** En este caso las causas pueden ser, principalmente, una mala compactación de las bases granulares o tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este ítem se detalla el procedimiento utilizado para la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente sin adiciones y mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado reemplazando entre el 1% y 4% del agregado fino.

Se describe las características de los materiales utilizados, la elaboración de probetas, los criterios utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado, la incorporación de este y la ejecución del ensayo de ahuellamiento.

4.1 MATERIALES


Los materiales que se utilizaron en el desarrollo de la investigación fueron:

- Asfalto 60-70
- Agregados Pétreos
- Grano de Caucho Reciclado (GCR)

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.2.1 Asfalto 60-70 El asfalto que se empleo fue obtenido de la empresa MPI de Barrancabermeja. En la ilustración 1 se presenta el reporte de calidad suministrado y las temperaturas de manejo en laboratorio:

Ilustración 1. Propiedades Fisicoquímicas del Asfalto 60-70

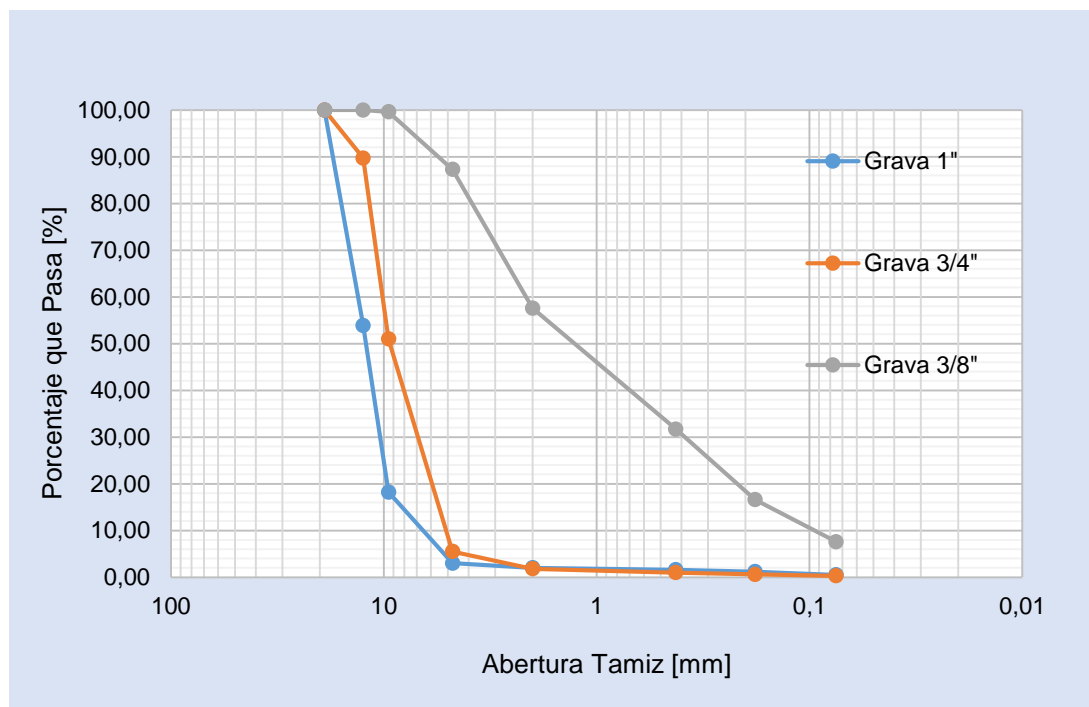
 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. Especialistas en Asfaltos	R DT 09	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS			
	N.R: 15 2016-05-31	REPORTE DE CALIDAD DE ASFALTOS DE PENETRACION 60-70 MPI/CON MEJORADOR DE ADHERENCIA			
FECHA :		OCTUBRE 27 DE 2017	LOTE No.		373_17
CLIENTE :		N.A	DESPACHO No.		N.A
TIPO DE ASFALTO:		ASFALTO MPI 60/70 NORMALIZADO			
PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACION		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Penetración @ 25°C, 100 gr, 5 seg, (mm/10)	E-706	60	70	66	LOTE
Punto de ablandamiento, (°C)	E-712	48	54	49,6	LOTE
Indice de Penetración (IP)	E-724	-1,2	+0,6	-0,63	LOTE
Viscosidad Absoluta @60°C (P)	E-716	1500	--	2318	LOTE
Viscosidad Brookfield @ 60°C (P) Aguja 27, Torque >90%	E-717	1500	--	2159	LOTE
Pérdida por Calentamiento Pelicula Delgada en mov. @ 163°C, 85 min (%)	E-720	----	0,8	0,22	SEMANTAL
Ductilidad @ 25°C, 5 cm / min, (cm)	E-702	100	----	134	QUINCENAL
Peso Especifico	E-707	----	----	1,012	MENSUAL
Punto de Chispa, (°C)	E-709	230	----	304	LOTE
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	E-713	99	----	99,29	SEMESTRAL
Contenido de agua, (%)	E-704	----	0,2	0,00	TRIMESTRAL
Contenido de Parafinas, (%)	E-718	----	3,0	2,14	MENSUAL
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, % de la penetración original	E-706	50	----	59,0	SEMANTAL
Incremento en el Punto de Ablanda/to después de pérdida por calentamiento en pelicula delgada, °C	E-712	----	9	6,2	SEMANTAL
Indice de envejecimiento relacion de viscosidades a 60°C del asfalto residual y el asfalto original (%)	E-717	----	4	2,7	SEMANTAL

Fuente: MPI Manufacturas y Procesos Industriales

Tabla 1. Granulometría Materiales Pétreos

TAMIZ		% PASA			
mm	No.	MDC-19	GRAVA 1"	GRAVA 3/4"	ARENA 3/8"
19	3/4"	100	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80 - 95	53.90	89.70	100.00
9.5	3/8"	70 - 88	18.20	51.00	99.60
4.75	No.4	49 - 65	3.00	5.50	87.30
2	No.10	29 - 45	2.00	1.80	57.60
0.425	No.40	14 - 25	1.60	1.00	31.70
0.18	No.80	8 - 17	1.20	0.60	16.60
0.075	No.200	4 - 8	0.50	0.30	7.60

Gráfica 1. Curva Granulométrica Materiales Pétreos



4.2.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR) El GCR empleado proviene de la empresa Mundo Limpio del Carmen de Viboral-Antioquia, es caucho vulcanizado pulverizado, proveniente de la unidad estratégica orientada al reciclaje, aprovechamiento y valoración de las llantas en desuso. Tamizado en malla No.30

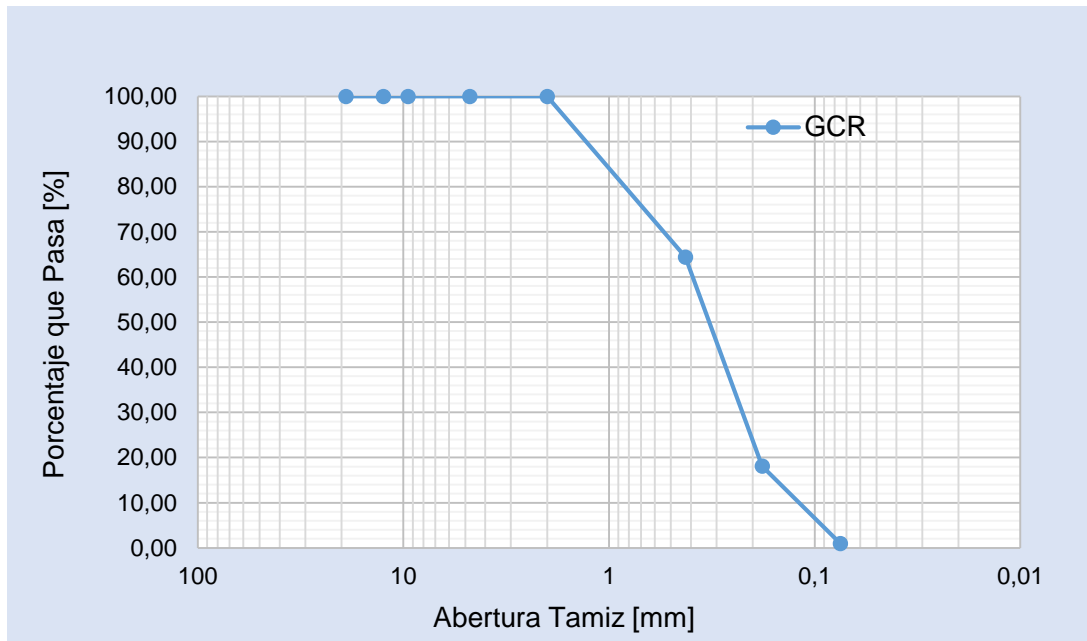
(apertura nominal de 0.590 mm). Es homogéneo, flexible, no compactado, no presenta impurezas, poca humedad y no se altera fácilmente con el tiempo.

4.2.3.1 Granulometría Se manejó la misma franja granulométrica utilizada en los agregados pétreos para la mezcla MDC-19 Se muestra el resultado del análisis granulométrico y la respectiva curva del material.

Tabla 2. Granulometría GCR

TAMIZ		% PASA	
mm	No.	MDC-2	GCR
19	3/4"	100	100.00
12.5	1/2"	80 - 95	100.00
9.5	3/8"	70 - 88	100.00
4.75	No.4	49 - 65	100.00
2	No.10	29 - 45	100.00
0.425	No.40	14 - 25	64.40
0.18	No.80	8 - 17	18.10
0.075	No.200	4 - 8	1.00

Gráfica 2. Curva Granulométrica GCR



4.2.4 Mezcla de Materiales Se muestra tabla suministrada por la empresa MPI con las propiedades obtenidas de los diferentes ensayos realizados a la mezcla de áridos y de esta forma se permite cumplir con la normativa INVIAS.

Ilustración 3. Propiedades de Materiales Pétreos Combinados

<i>PROPIEDAD</i>	<i>NORMAS INVIAS</i>	<i>VALOR</i>
DUREZA AGREGADO GRUESO		
<i>Desgaste en máquina de los ángeles, 500 Revoluciones (%)</i>	<i>E-218</i>	25
<i>Degradación por abrasión en el equipo Microdeval (%)</i>	<i>E-238</i>	15
<i>Resistencia Mecánica por el método del 10% de finos, (KN)</i>	<i>E-224</i>	175
<i>Relación húmedo / seco, mínima (%)</i>		88
DURABILIDAD		
<i>Perdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, (%)</i>	<i>E-220</i>	1,9
LIMPIEZA GRADACIÓN COMBINADA		
<i>Índice de plasticidad, (%)</i>	<i>E-126</i>	N.P
<i>Equivalente de arena (%)</i>	<i>E-133</i>	72
<i>Valor de azul de metileno (mg/g)</i>	<i>E-245</i>	5
<i>Impurezas del agregado grueso (%)</i>	<i>E-237</i>	0,4
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS		
<i>Partículas Planas y Alargadas relación 5:1, (%)</i>	<i>E-240</i>	3,2
<i>% Caras fracturadas (1cara/ 2 caras)</i>	<i>E-227</i>	95 / 91
<i>Angularidad del agregado fino (%)</i>	<i>E-239</i>	46
VOLUMETRÍA		
<i>Densidad Bulk del Llenante Mineral en Kerosene, (g/cm³)</i>	<i>E-225</i>	0,8
ADHESIVIDAD		
<i>Efecto del agua sobre mezclas asfálticas sueltas, cubrimiento (%)</i>	<i>E-757</i>	100
<i>Adhesividad del ligante a los agregados finos – Riedel Weber</i>	<i>E-774</i>	4 – 7

Fuente: MPI Manufacturas y Procesos Industriales

Se presenta combinación de los áridos y análisis granulométrico para la mezcla MDC-19, con 15% Grava 1", 20% Grava 3/4" y 65% Arena 3/8" para la mezcla sin adiciones; así mismo, se presenta la distribución para la combinación de áridos reemplazando porcentaje de agregado fino por los diferentes porcentajes de GCR. (4.0%, 2.0%, 1.5% y 1.0%).

Tabla 3. Granulometría Combinación Sin Adiciones

TAMIZ		% PASA		
mm	No.	MDC-19		COMBINACIÓN SIN ADICIONES
		Mín.	Máy.	
19	3/4"	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80.00	95.00	91.00
9.5	3/8"	70.00	88.00	77.70
4.75	No.4	49.00	65.00	58.30
2	No.10	29.00	45.00	37.50
0.43	No.40	14.00	25.00	21.00
0.18	No.80	8.00	17.00	11.10
0.08	No.200	4.00	8.00	5.10

Gráfica 3. Curva Granulométrica Combinación Sin Adiciones

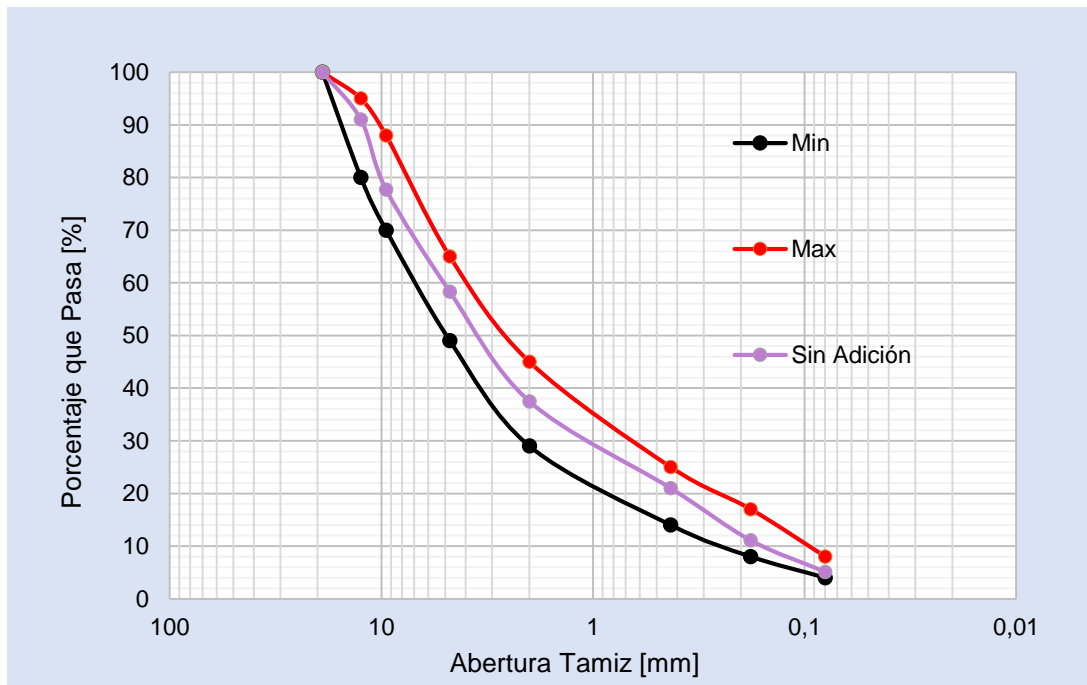


Tabla 4. Granulometría Combinación con 4%GCR

TAMIZ		% PASA		
mm	No.	MDC-19		COMBINACIÓN
		Mín.	Máy.	4.0% GCR
19	3/4"	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80.00	95.00	91.00
9.5	3/8"	70.00	88.00	77.70
4.75	No.4	49.00	65.00	58.80
2	No.10	29.00	45.00	38.20
0.425	No.40	14.00	25.00	22.40
0.18	No.80	8.00	17.00	11.20
0.075	No.200	4.00	8.00	4.80

Gráfica 4. Curva Granulométrica Combinación con 4% GCR

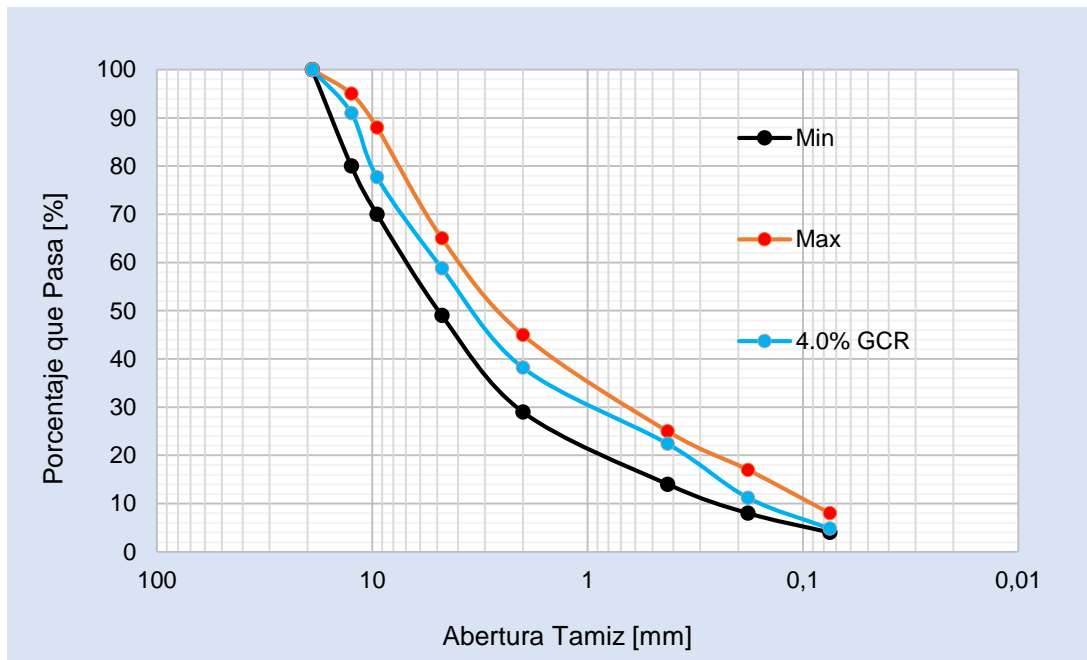


Tabla 5. Granulometría Combinación con 2%GCR

TAMIZ		% PASA		
mm	No.	MDC-19		COMBINACIÓN
		Mín.	Máx.	2.0% GCR
19	3/4"	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80.00	95.00	91.00
9.5	3/8"	70.00	88.00	77.70
4.75	No.4	49.00	65.00	58.50
2	No.10	29.00	45.00	38.40
0.425	No.40	14.00	25.00	21.70
0.18	No.80	8.00	17.00	11.10
0.075	No.200	4.00	8.00	4.90

Gráfica 5. Curva Granulométrica Combinación con 2%GCR

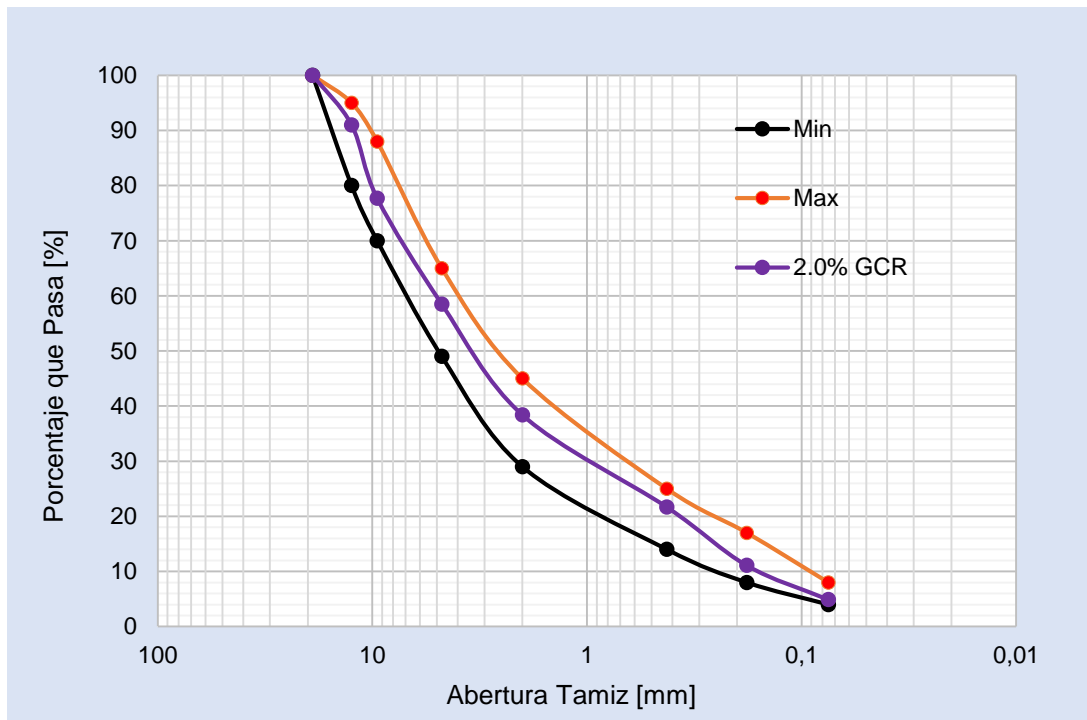


Tabla 6. Granulometría Combinación con 1.5%GCR

TAMIZ		% PASA		
mm	No.	MDC-19		COMBINACIÓN
		Mín.	Máx.	1.5% GCR
19	3/4"	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80.00	95.00	91.00
9.5	3/8"	70.00	88.00	77.70
4.75	No.4	49.00	65.00	58.50
2	No.10	29.00	45.00	38.20
0.425	No.40	14.00	25.00	21.50
0.18	No.80	8.00	17.00	11.10
0.075	No.200	4.00	8.00	5.00

Gráfica 6. Curva Granulométrica Combinación con 1.5%GCR

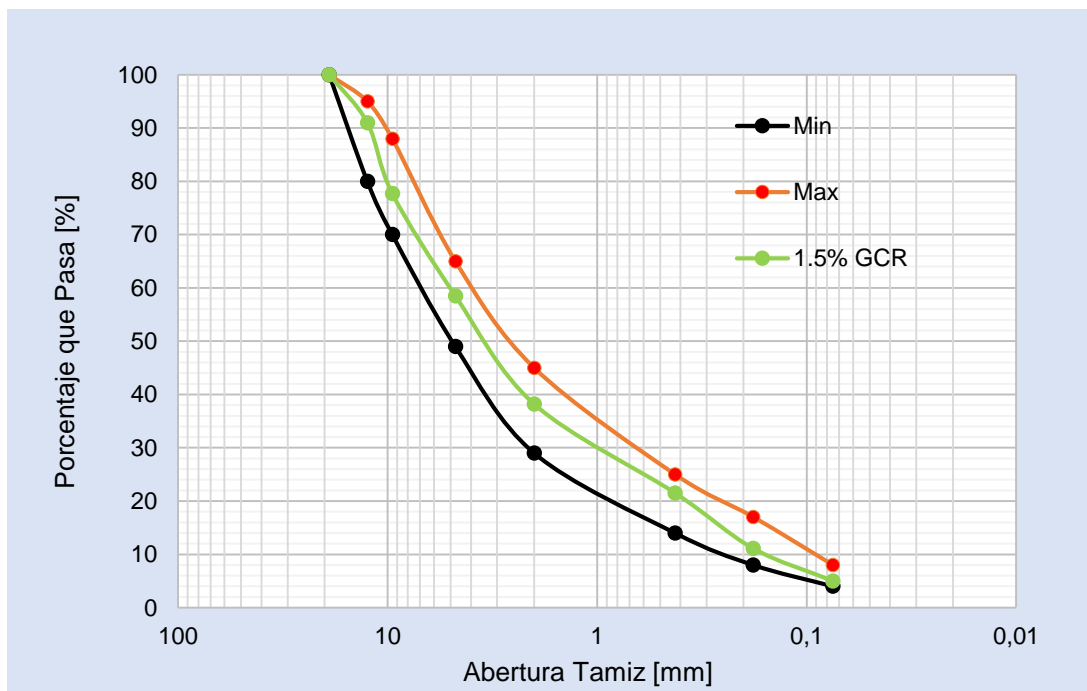
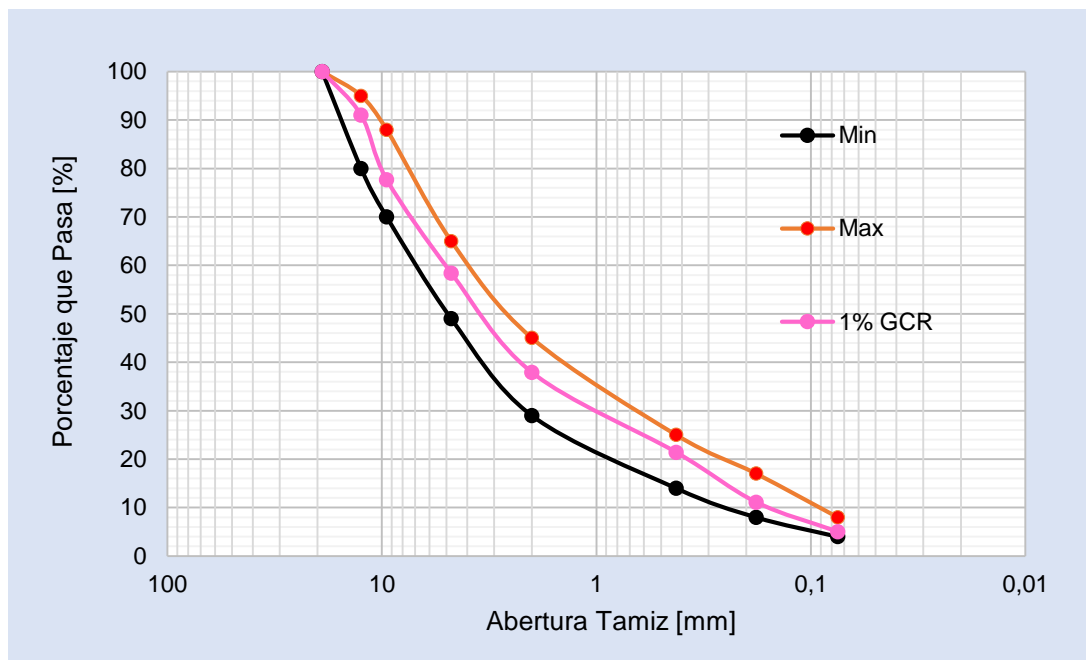


Tabla 7. Granulometría Combinación con 1%GCR

TAMIZ		% PASA		
mm	No.	MDC-19		COMBINACIÓN
		Mín.	Máy.	1.0% GCR
19	3/4"	100.00	100.00	100.00
12.5	1/2"	80.00	95.00	91.00
9.5	3/8"	70.00	88.00	77.70
4.75	No.4	49.00	65.00	58.40
2	No.10	29.00	45.00	37.90
0.425	No.40	14.00	25.00	21.40
0.18	No.80	8.00	17.00	11.10
0.075	No.200	4.00	8.00	5.00

Gráfica 7. Curva Granulométrica Combinación con 1%GCR



4.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE TRABAJO

Para obtener la mezcla de trabajo, se selecciona la granulometría mostrada en la *Tabla 3.* y un porcentaje de asfalto. El método de dosificación que se utilizó para

determinar el porcentaje óptimo de asfalto fue el *Método Marshall* para mezclas asfálticas en caliente, este consiste en fabricar una serie de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2 ½") de altura con diferentes porcentajes de asfalto, posteriormente se ensayan para determinar su estabilidad, fluencia, densidad y vacíos; se grafican los resultados determinando el contenido óptimo de asfalto a utilizar en la mezcla.

4.2.1 Elaboración de Probetas Se fabrican tres (3) probetas para los porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%; para un total de 15 probetas.

- Se calienta los agregados en horno a temperatura de 175°C.
- Se calienta el asfalto a temperatura de 155°C, y se mezcla con las cantidades necesarias de cada fracción de agregados, aproximadamente durante un minuto, minuto y medio hasta obtener una mezcla completa y homogénea.
- Se compacta a una temperatura de 141°C (según curva reológica), se colocan las probetas en un molde para aplicar 75 golpes en caída libre por cada cara.
- Se dejan en reposo a temperatura ambiente por 24 horas y luego se extraen las probetas del molde.

Fotografía 1. Compactación Marshall



Fotografía 2. Extracción Marshall



4.2.2 Ensayos de las Probetas Compactadas

- Determinación del peso específico, este se determina al instante en que las probetas compactadas se hayan enfriado a temperatura ambiente.
- Estabilidad, es el valor de la carga máxima en Newton que alcanzará al ensayarla a compresión. El ensayo consiste básicamente en calentar la probeta en un baño maría a 60°C, posteriormente la probeta se retira del agua, se seca y coloca en la prensa Marshall, aplicando una carga a velocidad constante sobre la probeta hasta que falle. La falla será la carga máxima que la briqueta resiste.
- Fluencia, es la deformación en milímetros, que ocurre desde que se aplica una carga hasta lograr la máxima.
- Análisis densidad - vacíos, una vez se complete los ensayos de Estabilidad-Fluencia se procede a determinar el porcentaje de vacíos de las probetas, este se calcula a partir del peso específico total de cada probeta y del peso específico teórico de la mezcla (sin vacíos).
- Finalmente se grafica los resultados obtenidos de los ensayos mencionados y de esta manera se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla.

4.3 DISEÑO DE LA MEZCLA CON GCR

Para obtener el contenido de GCR a emplear en la mezcla, se utiliza parámetros *Marshall*. Inicialmente se escoge el porcentaje de caucho de 2.0% siendo este el valor promedio de los porcentajes consultados en la recopilación bibliográfica y valores del 4.0%, 1.5% y 1.0% para llegar a una mejor fórmula de trabajo y obtener el porcentaje más óptimo de GCR.

4.3.1 Proceso de incorporación del GCR El proceso utilizado para la incorporación del grano de caucho reciclado es por vía seca, esta consiste en reemplazar una porción del agregado fino por el caucho, se mezcla inicialmente con los agregados pétreos antes de adicionar el asfalto; sin embargo, al considerar el grano de caucho como un árido más, no se considera un material inerte, debido a que el caucho alcanza a interaccionar con el asfalto, siendo así un modificador de la mezcla.

4.3.2 Elaboración de Probetas con GCR Se fabrican cuatro (4) probetas con el porcentaje de asfalto óptimo obtenido en el diseño de la mezcla de trabajo y con porcentajes de GCR de 4.0%, 2.0%, 1.5% y 1.0% para un total de 16 probetas.

- Se Calienta los agregados en horno a temperatura de 175°C.
- Se mezcla los porcentajes correspondientes de GCR con las cantidades necesarias de cada fracción de agregados y se colocan en el horno.
- Se calienta el asfalto a temperatura de 160°C, y se mezcla con los áridos, hasta obtener una mezcla completa y homogénea.
- Se compacta a una temperatura de 141°C, se colocan las probetas en moldes para aplicar 75 golpes en caída libre por cada cara.
- Se dejan en reposo a temperatura ambiente por 24 horas y luego se extraen las probetas del molde.

Fotografía 3. Elaboración probetas con GCR



4.3.3 Ensayos de las Probetas Compactadas con GCR

- Determinación del peso específico.
- Ensayo de estabilidad - fluencia.
- Análisis densidad - vacíos.

Se verifica los resultados obtenidos de los ensayos mencionados con parámetros *Marshall* y de esta manera se obtiene el porcentaje óptimo de GCR.

4.4 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

El ensayo se realiza a la mezcla asfáltica sin adiciones y a la mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado, diseñadas a partir de las granulometrías especificadas y de los porcentajes óptimos de asfalto y GCR obtenidos de parámetros *Marshall*.

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla asfáltica al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de temperatura y presión, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida en la probeta.

El equipo que se utiliza está ajustado a la norma **INVIAS I.N.V. E-756-13 Resistencia A La Deformación Plástica De Las Mezclas Asfálticas Mediante La Pista De Ensayo De Laboratorio.**

Fotografía 4. Equipo Wheel Tracker Tester



- **Características del Equipo**

Marca	COOPER	-
Carga ejercida sobre la probeta	900	kN/m ²
Frecuencia	21	ciclos/minuto
Número de pistas	2	-
Ancho de llanta	5	cm
Tamaño del molde	30x30x5	cm
Distancia del Empotramiento a la llanta	30.5	cm
Distancia del Empotramiento a la pesa	84.3	cm
Masa de la pesa	24.081	kg

- **Características de la Compactación**

La compactación de las probetas se realiza con un compactador de rodillo estándar que simula la compactación de la mezcla en campo.

Fotografía 5. Equipo Roller Compactor



El equipo funciona de forma neumática y permite variar la presión de compactación y el número de ciclos de compactación mediante un controlador digital para lograr las densidades y los vacíos totales en la mezcla deseados. También cuenta con un sistema de vibración que mejora el acomodamiento de las partículas y la compactación. Su principal función es elaborar las probetas para fallarlas en el equipo de deformación plástica.

4.4.1 Velocidad de Deformación Media Sirve para determinar la velocidad de deformación de la probeta durante y al final del ensayo de deformación plástica en el intervalo de 105-120 minutos.

$$V_{t_2/t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} [\mu\text{m}/\text{minuto}]$$

Donde:

V_{t_2/t_1} : Velocidad de deformación media correspondiente al intervalo $t_2 - t_1$ $\mu\text{m}/\text{minuto}$

d_{t_2} y d_{t_1} : Deformaciones correspondientes a t_1 y t_2 , respectivamente en μm .

t_2 y t_1 : Tiempos en que las especificaciones recomiendan registrar la velocidad de deformación.

4.4.2 Procedimiento

- Se fabrican cuatro (4) probetas, dos para la mezcla asfáltica sin adiciones y dos para la mezcla asfáltica con grano de caucho.
- Se compacta las probetas en el rodillo estándar.
- Se introducen las probetas en un horno a $60 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 4 horas.
- Se colocan las probetas de la mezcla asfáltica sin adiciones en el equipo de ensayo durante 120 minutos sin interrupciones o hasta que la deformación alcance 20 mm de deformación.
- Se retiran las probetas ensayadas de la mezcla asfáltica sin adiciones.
- Se extraen los resultados del equipo.

- Se colocan las probetas de la mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado en el equipo de ensayo durante 120 minutos sin interrupciones o hasta que la deformación alcance 20 mm de deformación.
- Se retiran las probetas ensayadas de la mezcla asfáltica con grano de caucho.
- Se extraen los resultados del equipo.

Fotografía 6. Probetas en horno a $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ antes del ensayo de Ahuellamiento



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO

Con los datos obtenidos de los ensayos y graficas realizadas según parámetros Marshall, se determinó que el contenido óptimo de asfalto es de 5.3% para un nivel de transito NT- 3 y capa de rodadura.

Características de control

Estabilidad	13797	N
Flujo	2.8	mm
Relación estabilidad/Flujo	4.9	kN/mm
Gravedad Específica (Bulk)	2.296	-
Vacíos Agregado Mineral	15.2	%
Vacíos con aire	4.6	%
Vacíos llenos de Asfalto	69	%
Relación Filler / Ligante	1.1	-
Espesor Prim. Película asfalto	8.6	µm

5.1 PORCENTAJE ÓPTIMO GCR

En la *tabla. 8* se presentan los resultados obtenidos por el método Marshall para las mezclas con distintos porcentajes de GCR y con 5.3% de asfalto.

Tabla 8. Parámetros Marshall Mezclas con GCR

Parámetros	Norma	Mezcla 4% GCR	Mezcla 2% GCR	Mezcla 1,5% GCR	Mezcla 1% GCR
Estabilidad [N]	> 9000	10500	11010	12440	13250
Densidad [T/m3]	-	2,193	2,243	2,263	2,282

Parámetros	Norma	Mezcla 4% GCR	Mezcla 2% GCR	Mezcla 1,5% GCR	Mezcla 1% GCR
Gmm-Rice	-	2,351	2,382	2,383	2,387
Vacíos con aire (%)	4 - 6	6,7	5,8	5,0	4,4
Flujo [mm]	2 - 3,5	4,2	3,5	3,0	2,7
Relación Estab./Flujo	3 - 6	2,5	4,6	3,8	4,9

Analizando los datos obtenidos y verificando los parámetros Marshall para las diferentes mezclas, se escoge el porcentaje de GCR que más se ajuste a los promedios de los límites de vacíos con aire, flujo y relación estabilidad/flujo, por tanto, se determinó el contenido óptimo de 1.5% de GCR.

5.2 ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

En la siguiente tabla se presentan las características de las probetas sometidas al ensayo.

Tabla 9. Características de las Mezclas Ensayadas

Muestra	Probeta	Asfalto %	Vacíos %	Densidad de Bulk	Gmm Rice	Temperatura de ensayo	Presión de contacto
MDC-19 Sin GCR	1	5,3	5	2,287	2,408	60°C	900 kN/m ²
	2		5,1	2,285			
MDC-19 1,5% GCR	1	5,3	4,8	2,269	2,384	60°C	900 kN/m ²
	2		4,9	2,266			

5.2.1 Mezcla Asfáltica Sin Adiciones En las tablas 10, 11, 12 se muestran los datos tabulados de la deformación sufrida por las probetas sin contenido de GCR después de ser sometidas al ensayo de resistencia a la deformación plástica.

Tabla 10. Resultados de Deformaciones MDC-19

N° de Pasada	t [min]	Probeta N°1	Probeta N°2	Prom. Deformac.
		Deformac. [mm]	Deformac. [mm]	
0	0	0	0	0.00
42	1	0.92	0.7	0.81
126	3	2.34	1.79	2.07
210	5	2.84	2.15	2.50
420	10	3.52	2.7	3.11
630	15	3.95	3.07	3.51
840	20	4.27	3.36	3.82
1050	25	4.53	3.61	4.07
1260	30	4.7	3.78	4.24
1470	35	4.89	3.96	4.43
1680	40	5.08	4.16	4.62
1890	45	5.19	4.31	4.75
2520	60	5.59	4.75	5.17
3150	75	5.94	5.14	5.54
3780	90	6.29	5.47	5.88
4410	105	6.7	5.87	6.29
5040	120	6.97	6.12	6.55

Tabla 11. Resultados Deformación Total MDC-19

Probeta	Deformación Total al Final del Ensayo [mm]
1	6.97
2	6.12
PROMEDIO	6.55

Tabla 12. Resultados Velocidades de Deformación MDC-19

Probeta	Velocidad de deformación [$\mu\text{m}/\text{minutos}$]		
	Intervalo [minutos]		
	30-45	75-90	105-120
1	32.27	23.33	17.73
2	35.60	22.60	16.80
PROMEDIO	33.94	22.97	17.27

5.2.2 Mezcla Asfáltica Con GCR En las siguientes tablas se muestran los datos tabulados de la deformación sufrida por las probetas con 1.5% GCR después de ser sometidas al ensayo de resistencia a la deformación plástica.

Tabla 13. Resultados de Deformaciones MDC-19 con GCR

N° de Pasada	t [min]	Probeta N°1	Probeta N°2	Prom. Deformac.
		Deformac. [mm]	Deformac. [mm]	
0	0	0	0	0.00
42	1	0.26	0.26	0.26
126	3	0.67	0.66	0.67
210	5	0.81	0.8	0.81
420	10	1.04	0.98	1.01
630	15	1.2	1.12	1.16
840	20	1.31	1.21	1.26
1050	25	1.42	1.29	1.36
1260	30	1.49	1.35	1.42
1470	35	1.55	1.4	1.48
1680	40	1.6	1.45	1.53
1890	45	1.66	1.48	1.57
2520	60	1.83	1.62	1.73
3150	75	1.97	1.73	1.85
3780	90	2.06	1.8	1.93
4410	105	2.16	1.87	2.02
5040	120	2.26	1.95	2.11

Tabla 14. Resultados Deformación Total MDC-19 con GCR

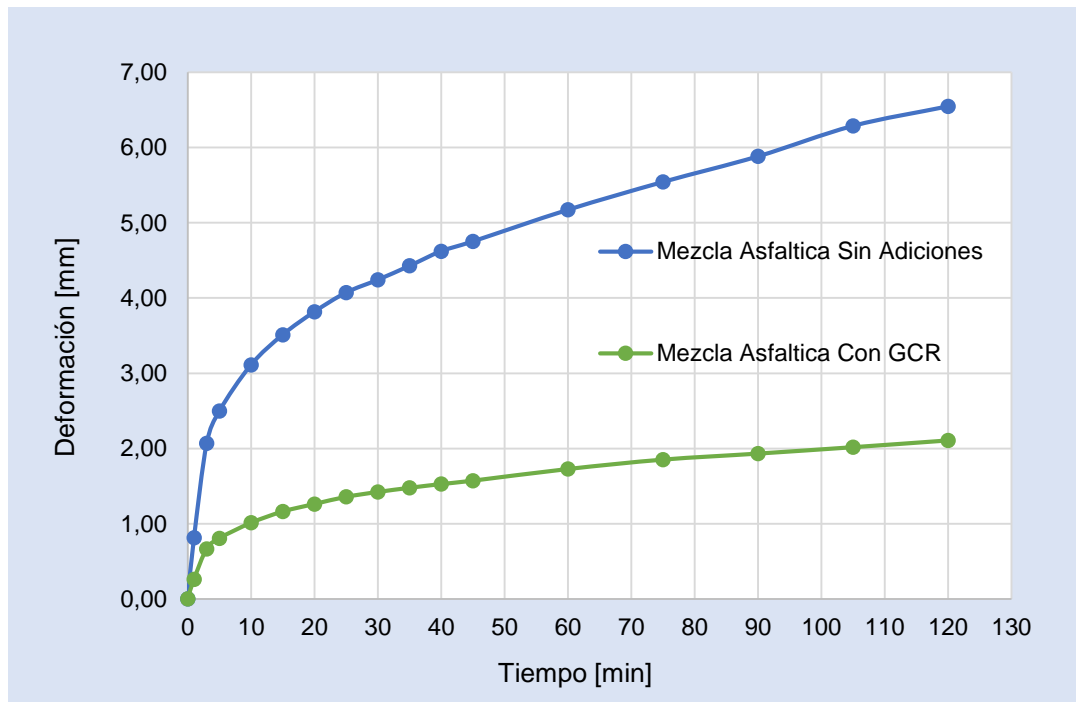
Probeta	Deformación Total al Final del Ensayo [mm]
1	2.26
2	1.95
PROMEDIO	2.11

Tabla 15. Resultados velocidad de Deformación MDC-19 con GCR

Probeta	Velocidad de deformación [$\mu\text{m}/\text{minutos}$]		
	Intervalo [minutos]		
	30-45	75-90	105-120
1	11.33	5.87	6.60
2	8.73	4.53	5.27
PROMEDIO	10.03	5.20	5.94

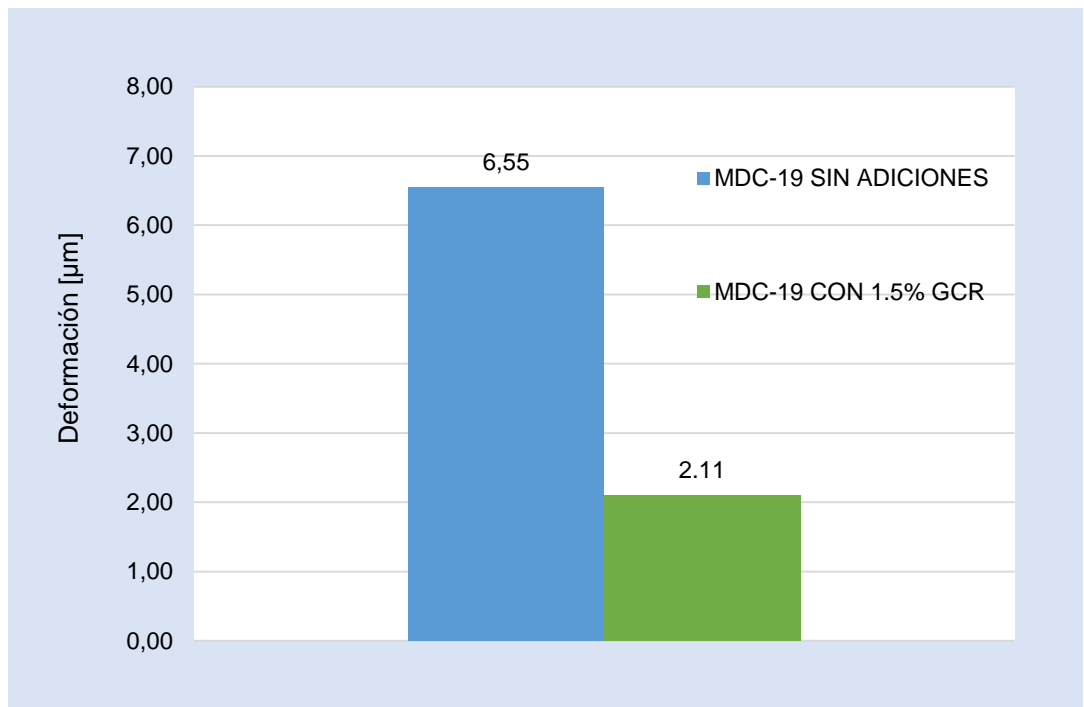
5.2.3 Análisis de Gráficas

Gráfica 8. Deformación vs Tiempo



En el *Gráfico 8* se puede observar que a medida que incrementa el tiempo, la mezcla MDC-19 con GCR presenta un mejor comportamiento, esto se debe a que el grano de caucho mejora las propiedades de la mezcla haciendo que el asfalto logre una mejor recuperación elástica evitando la acumulación de deformaciones plásticas permanentes.

Gráfica 9. Deformación Total de las Mezclas



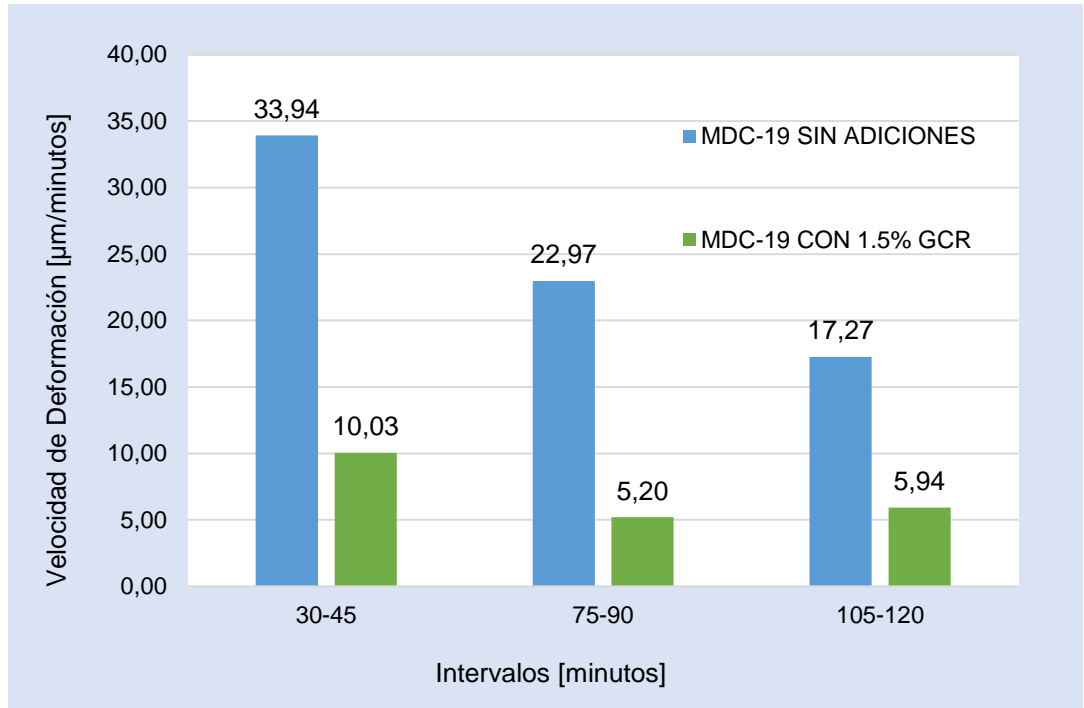
En el *Gráfico 9*. Se observa que la deformación total de la mezcla MDC-19 con GCR es menor a la obtenida en la mezcla MDC-19 sin adiciones, esta deformación se reduce aproximadamente en un 68% respecto a la mezcla sin adiciones; a continuación, se muestra fotografías del ahuellamiento presentado en ambas mezclas.



49



Gráfica 10. Velocidad de Deformación Media vs Tiempo



En el Gráfico 10 se presentan las velocidades de deformación media obtenidas en los intervalos de tiempo donde se presenta el comportamiento de las mezclas ensayadas, en estas se aprecia que la velocidad de deformación disminuye en los primeros intervalos de tiempo hasta que permanece casi constante al final de ensayo para la mezcla con GCR.

En la mezcla asfáltica con 1.5% de GCR se observa una disminución significativa de 70% en el intervalo de 30 a 45 minutos, de 77% en el intervalo de 75 a 90 minutos y de 66% en el intervalo de 105 a 120 minutos, respecto a las velocidades de deformación de la mezcla asfáltica sin adiciones.

6. CONCLUSIONES

- La combinación de agregados utilizada en las mezclas asfálticas sin adiciones y en las mezclas con porcentajes entre el 1% y 4% de grano de caucho reciclado, cumplen con la distribución granulométrica, límites y especificaciones según las exigencias de la normativa INVIAS para mezclas densas en caliente tipo MDC-19.
- Las mezclas modificadas con 4% y 2% de GCR presentan un contenido alto de vacíos lo que puede implicar problemas en la compactación facilitando la permeabilidad y presencia de asentamientos o hundimientos permanentes.
- Por medio del método de dosificación Marshall, el porcentaje de 5.3% de asfalto utilizado en las mezclas asfálticas sin adiciones y en las mezclas asfálticas con incorporación de grano de caucho en porcentajes del 1%, 1.5% y 2% cumplen con las propiedades óptimas de la mezcla, según las especificaciones del Art. 450-13 del INVIAS.
- Se concluye que, al sustituir porcentaje de agregado fino por grano de caucho reciclado, las mezclas asfálticas con el porcentaje de 1.5% de GCR sometidas al ensayo de ahuellamiento, presentan mejor comportamiento a la deformación que las mezclas asfálticas sin adiciones, esta mejora se da en un 68% equivalente a la disminución de la deformación total al final del ensayo.
- La velocidad máxima de deformación en el intervalo de 105 a 120 min para la mezcla asfáltica mejorada con 1.5% de GCR cumple con las especificaciones del Art. 450-13 del INVIAS para climas con temperaturas anuales inferiores y superiores a 24°C, por otro lado, la mezcla asfáltica sin adiciones solo cumple

con la especificación para climas con temperaturas anuales inferiores a 24°C.

- Las mezclas asfálticas con porcentaje de 1.5% de GCR presentan mayor resistencia al ahuellamiento, esto se puede evidenciar en la velocidad de deformación que disminuye en promedio un 71% respecto a la mezcla asfáltica sin adiciones.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004.

[2] INSTITUTO DE ASFALTO de los Estados Unidos de Norteamérica, “Manual del Asfalto” Ediciones URMO, Bilbao, 1973, 21p

[3] ECOPETROL, cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos, 1999,9p

[4] INSTITUTO DE ASFALTO de los Estados Unidos de Norteamérica, “Manual del Asfalto” Ediciones URMO, Bilbao, 1973, 2p

[5] INSTITUTO DE ASFALTO de los Estados Unidos de Norteamérica, “Manual del Asfalto” Ediciones URMO, Bilbao, 1973, 24 p

[6] PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 45 p.

[7] PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 41 p.

[8] PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 47 p.

[9] PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 45 p.

[10] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002, 73 p

[11] OROZCO, Lizsan Estefany y ALFONSO, Albert Mauricio. Análisis del comportamiento del asfalto normal y asfalto modificado con caucho por medio de ensayos dinámicos. [Tesis]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015.

[12] CEDEX, "Manual de empleo de caucho de un en mezclas bituminosas", España, 2007, 4p.

[13] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002, 20 p

[14] CEDEX, "Manual de empleo de caucho de un en mezclas bituminosas", España, 2007, 5p.

[15] UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002.

[16] ANALISIS DE CASOS DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFALTICAS CHILENAS. Disponible en:
http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf
[citado 25 Enero de 2018]

[17] SEGOVIA AIRAUDO, Raul. Estudio de variación granulométrica del caucho en mezclas asfálticas por vía seca. [Tesis]. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007, 31 p.

BIBLIOGRAFÍA

ANALISIS DE CASOS DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFALTICAS CHILENAS. Disponible en:

http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf

[citado 25 Enero de 2018]

CEDEX, “Manual de empleo de caucho de un en mezclas bituminosas”, España, 2007, 4p.

ECOPETROL, cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos, 1999,9p

INSTITUTO DE ASFALTO de los Estados Unidos de Norteamérica, “Manual del Asfalto” Ediciones URMO, Bilbao, 1973, 21p

OROZCO, Lizsan Estefany y ALFONSO, Albert Mauricio. Análisis del comportamiento del asfalto normal y asfalto modificado con caucho por medio de ensayos dinámicos. [Tesis]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2015.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el

ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 45 p.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 41 p.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 47 p.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. [Tesina] Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004, 45 p.

SEGOVIA AIRAUDO, Raul. Estudio de variación granulométrica del caucho en mezclas asfálticas por vía seca. [Tesis]. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007, 31 p.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002, 73 p

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002, 20 p

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, [Informe Final], Universidad De Los Andes, Santa Fe de Bogotá, 2002.