



Maestría en Infraestructura
del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**EVALUAR EL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE FIBRA
DE COLILLAS DE CIGARRILLO POR MEDIO DEL PROTOCOLO AMAAC NIVEL II**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA

Ing. Juan Camilo Salamanca

ASESOR

Dr. Rafael Soto Espitia

CO - ASESOR

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Octubre del 2023
Morelia, Michoacán, México

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecer a Dios por brindarme cada una de las oportunidades que a lo largo de mi vida han sido de gran enseñanza. De igual forma, quiero agradecer a mi madre Sandra Salamanca y padre Luis Trujillo por guiarme hacia el camino del bien, su apoyo incondicional, así como su tiempo, amor y cariño sincero. A mis hermanos: Andrés Felipe, Luis Alejandro y Emanuel por sus valiosos consejos.

A la Maestra Valentina Silva por su apoyo incondicional, paciencia, así como dedicación para cumplir este sueño juntos.

Así mismo agradecer al Dr. Rafael Soto Espitia por creer en mí y en este proyecto, por realizar la supervisión de este trabajo de investigación para llevarlo a cabo de la mejor manera, ser un ejemplo a seguir como persona y de forma profesional, mi admiración total.

A todo el equipo del laboratorio de la empresa Pruebas Ensayos y Proyectos PEPSA ubicado en la ciudad de Morelia Michoacán, por permitir desarrollar mi proyecto de investigación, tener la paciencia, dedicación y respeto, así como brindarme de su conocimiento y las pautas para cada día ser un mejor profesional, expreso mi entera gratitud.

Al equipo de Mega Asfaltos, en especial al Maestro Juan Adrián Ramírez por brindarme el conocimiento y permitir hacer las pruebas de caracterización al cemento Asfáltico en sus instalaciones.

Al Instituto Mexicano del Transporte IMT, en especial al Dr. Horacio Delgado Alamilla por permitir tener la oportunidad de estar en sus respetadas instalaciones, así como brindarme las pautas esenciales y el conocimiento para finalizar mi tema de investigación de una forma ordenada y clara.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnologías CONAHCYT por permitir obtener una beca para estudios de posgrado como extranjero, ya que me brindó el apoyo y la oportunidad de cumplir con mis estudios en el país.

Por último, agradezco el apoyo de mi familia y todas las personas que estuvieron siguiendo mi proceso académico y personal, realmente han sido muy valiosas, de igual forma al posgrado ya que me ofrecieron el conocimiento de forma incondicional, cabe resaltar que esto ha sido una muy bonita experiencia de vida.

CONTENIDO

RESUMEN	7
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN	9
1.1. Planteamiento Del Problema.....	10
1.2. Justificación	12
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo General.....	13
1.3.2. Objetivos Específicos	13
1.4. Propuesta de Solución	14
CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO	15
2.1. MARCO CONCEPTUAL	15
2.1.1. Agregado pétreo.....	15
2.1.1.1. Fuente de agregados	15
2.1.1.2. Propiedades de los agregados.....	15
2.1.2. Asfalto	16
2.1.2.1. Cemento asfáltico	17
2.1.2.2. Propiedades Químicas.....	17
2.1.2.3. Propiedades Físicas.....	17
2.1.3. Colillas de cigarrillo.....	18
2.1.4. Cal.....	18
2.2. MARCO NORMATIVO	18
2.2.1. Ensayos a los agregados pétreos.....	19
2.2.1.1. Ensayo para el análisis granulométrico de los agregados	19
2.2.1.2. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	19
2.2.1.3. Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Maquina de los Ángeles.....	20
2.2.1.4. Determinar la resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión en la Maquina Micro-Deval.....	22
2.2.1.5. Determinar la resistencia al intemperismo acelerado	23
2.2.1.6. Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso 24	
2.2.1.7. Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso 25	
2.2.1.8. Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos	27
2.2.1.9. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino.....	27
2.2.1.10. Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino ...	28
2.2.1.11. Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino.....	29
2.2.1.12. Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla	30
2.2.2. Ensayos al Cemento Asfáltico	31
2.2.2.1. Punto de Inflamación de Cleveland.....	31
2.2.2.2. Viscosidad Rotacional Brookfield	31
2.2.2.3. Punto de Reblandecimiento	32
2.2.2.4. Módulo Reologico de corte dinámico.....	33

2.2.2.5.	Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)	34
2.2.2.6.	Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)	35
2.2.2.7.	Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (Bending Beam Rheometer – BBR)	36
2.3.	PROTOCOLO AMAAC.....	37
2.3.1.	Mezcla asfáltica	37
2.3.2.	Diseño volumétrico	38
2.3.3.	Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR).....	38
2.3.4.	Susceptibilidad a la deformación permanente de una mezcla asfáltica.....	38
CAPÍTULO III – ESTADO DEL ARTE		39
CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA		44
4.1.	FASE 1	44
4.1.1.	Extracción y recolección de los materiales pétreos.....	44
4.1.1.1.	Método de Muestreo para agregados.....	45
4.1.1.2.	Secado del material	45
4.1.1.3.	Pruebas a los materiales pétreos	45
4.1.1.4.	Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba	46
4.1.1.5.	Pesos volumétricos	46
4.1.1.6.	Ensayo para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos....	46
4.1.1.7.	Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso.....	47
4.1.1.8.	Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Máquina de los Ángeles.....	47
4.1.1.9.	Determinar la resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión en la Máquina Micro-Deval.....	47
4.1.1.10.	Determinar la resistencia al intemperismo acelerado	47
4.1.1.11.	Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	48
4.1.1.12.	Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso	48
4.1.1.13.	Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos para mezclas asfálticas.....	49
4.1.1.14.	Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino.....	49
4.1.1.15.	Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino ...	49
4.1.1.16.	Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino.....	50
4.1.1.17.	Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla	50
4.1.2.	Caracterización del Cemento Asfáltico	50
4.1.2.1.	Punto de Inflamación de Cleveland.....	51
4.1.2.2.	Viscosidad Rotacional Brookfield	51
4.1.2.3.	Punto de Reblandecimiento	51
4.1.2.4.	Módulo Reológico de corte dinámico.....	52

4.1.2.5.	Envejecimiento del cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)	52
4.1.2.6.	Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión PAV	52
4.1.2.7.	Desgasificación al Vacío de las Muestras Envejecidas (Vacuum Degassing Oven - VDO)	53
4.1.2.8.	Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (Bending Beam Rheometer – BBR)	53
4.2.	FASE 2	53
4.2.1.	Recolección y tratamiento de colillas de cigarrillo	54
4.2.2.	Diseño de mezcla	54
4.3.	FASE 3	55
4.3.1.	Elaboración de especímenes.....	55
CAPÍTULO V - RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		56
5.1.	MUESTREOS DE LOS MATERIALES PÉTREOS	57
5.1.1.	Método de Muestreo para agregados	57
5.1.2.	Secado del material.....	58
5.2.	PRUEBAS A LOS MATERIALES PÉTREOS	59
5.2.1.	Pesos Volumétricos.....	59
5.2.2.	Peso Volumétrico seco y suelto.....	59
5.2.3.	Peso volumétrico seco y varillado.....	60
5.2.4.	Ensayo para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos	61
5.2.5.	Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso	65
5.2.5.1.	Gravedad Especifica del agregado grueso.....	65
5.2.5.2.	Absorción de agregado grueso	66
5.2.6.	Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Maquina de los Ángeles.....	67
5.2.7.	Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión en la Maquina Micro-Deval	69
5.2.8.	Determinar la resistencia al intemperismo acelerado.....	70
5.2.9.	Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	72
5.2.10.	Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso	72
5.2.11.	Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos para mezclas asfálticas.....	73
5.2.12.	Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino.....	75
5.2.12.1.	Gravedad Especifica del agregado fino.....	75
5.2.12.2.	Absorción del agregado fino.....	76
5.2.13.	Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino ...	77
5.2.14.	Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino.....	78
5.2.15.	Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla	79
5.3.	PRUEBAS AL CEMENTO ASFÁLTICO	81
5.3.1.	Punto de Inflamación de Cleveland	82
5.3.2.	Viscosidad Rotacional Brookfield.....	83

5.3.3.	Punto de Reblandecimiento.....	83
5.3.4.	Módulo reológico de corte dinámico	85
5.3.5.	Envejecimiento del cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)	86
5.3.6.	Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)	88
5.3.7.	Desgasificación al Vacío de las muestras envejecidas (Vacuum Degassing Oven -VDO).....	89
5.3.8.	Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (BBR).....	90
5.4.	RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE COLILLAS DE CIGARRILLO	92
5.5.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TEÓRICA	93
5.6.	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO	97
5.6.1.	MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA	97
5.6.1.1.	Cálculo de Volumetría.....	97
5.6.1.2.	Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)	100
5.6.1.3.	Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.....	102
5.6.2.	MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA	105
5.6.2.1.	Cálculo de Volumetría.....	106
5.6.2.2.	Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)	107
5.6.2.3.	Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.....	110
5.6.3.	MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA Y SUSTITUCIÓN TOTAL DEL FILLER POR CARBONATO DE CALCIO	114
5.6.3.1.	Cálculo de Volumetría.....	114
5.6.3.2.	Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)	116
5.6.3.3.	Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.....	119
5.6.4.	MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.3% DE FIBRA	122
5.6.4.1.	Cálculo de Volumetría.....	123
5.6.4.2.	Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)	125
5.6.4.3.	Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo.....	128
CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES		136
6.1.	TRABAJOS FUTUROS	137
REFERENCIAS		138

RESUMEN

En el área de las mezclas asfálticas se han presentado progresivas y constantes investigaciones las cuales buscan el mejoramiento de propiedades mecánicas, su objetivo ha sido el aumentar su desempeño y durabilidad con respecto al tiempo, para ello, se ha centrado en minimizar fallas comunes que presentan, tales como, desprendimiento por fricción, deformación permanente, agrietamiento, entre otras, ya que son en gran magnitud las más presentes y se deben a elementos como agentes externos, diseño y aplicabilidad.

Durante los últimos años adicionar elementos producto del reciclaje o que conllevan a un difícil reciclado se ha consolidado como un objetivo con doble labor de aprovechamiento. Por tal motivo, en esta investigación se logró la implementación de las fibras obtenidas de la colilla de cigarrillo en una mezcla asfáltica de granulometría densa. Para ello, se adicionó la fibra en diferentes porcentajes propuestos con el fin de realizar una comparación entre las mezclas con fibras y una única mezcla de referencia, de ellos se obtuvieron valores reales que se contrastaron y de esta manera, se analizó la existencia de un mejoramiento en el comportamiento mecánico y de desempeño.

Para llevar a cabo lo mencionado, primero, se evaluaron las características de los materiales a utilizar, este es el caso de los agregados y el cemento asfáltico. Posterior, se realizó una propuesta granulométrica que cumpliera con los requerimientos determinados por el Protocolo AMAAC, el cual es la metodología de diseño de Mezclas Asfálticas de Alto Desempeño en México. Así mismo, se estipuló un nivel de desempeño en función del nivel de tránsito, en donde se realizaron ensayos de volumetría, susceptibilidad al daño inducido por Humedad (TSR) y al daño por susceptibilidad a la deformación permanente (HWT) mediante la rueda cargada de Hamburgo.

Los resultados obtenidos fueron analizados con el propósito de determinar el comportamiento de la mezcla con fibra y observar el aporte que tuvo referente a una convencional, siendo así, se pudo determinar para las diferentes mezclas con fibra el cumplimiento de algunas de las propiedades mecánicas evaluadas, además de, observar su comportamiento mecánico cuando fue sometida a pruebas de desempeño como mediante TSR y el HWT.

Palabras Claves: Mezcla Asfáltica, Colilla de Cigarrillo, Medio Ambiente, Fibra de Celulosa

ABSTRACT

In the area of asphalt mixtures there have been progressive and constant investigations. That seek to improve mechanical properties to increase their performance and durability over time, for they have focused on minimizing common failures that occur in them, such as detachment by friction, permanent deformation, cracking, among others, since they are in large magnitude the most present and are due to elements such as external agents, design and applicability.

In recent years, adding elements that are the result of recycling or that lead to difficult recycling has been consolidated as an objective with a double use task. For this reason, in this research the implementation of the fibers obtained from cigarette butts in an asphalt mixture with dense granulometry was achieved. For this, the fiber was added in different proposed percentages, in order to make a comparison between the mixtures with fibers and a single reference mixture from which real values were obtained that were contrasted and, in this way, the existence of an improvement in the mechanical behavior and performance of the mixture.

To carry out the aforementioned, first, the characteristics of the materials to be used were evaluated, this is the case of aggregates and asphalt cement. Subsequently, a granulometric proposal was made that met the requirements determined by the AMAAC Protocol, which is the design methodology for High Performance Asphalt Mixtures in Mexico. Likewise, a performance level was stipulated based on the level of traffic, in which volumetric tests, susceptibility to moisture-induced damage (TSR) and damage due to susceptibility to permanent deformation (HWT) were carried out using the loaded wheel from Hamburg.

The results obtained were analyzed with the purpose of determining the behavior of the mixture with fiber and observing the contribution it had compared to a conventional one, thus, it was possible to determine for the different mixtures with fiber the compliance with some of the mechanical properties evaluated. In addition, observe its mechanical behavior when it was subjected to performance tests such as through TSR and the HWT.

Keywords: Asphalt mix, Cigarette But, Environment, Cellulose Fiber.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

En el área de las mezclas asfálticas se han presentado avances importantes en busca de minimizar problemas que tienen a diario los pavimentos tales como, desprendimiento de agregado, agrietamiento y deformación así como mejorar su desempeño, por tal motivo, una forma ha sido involucrar en su estructura materiales provenientes del reciclado y que en algún momento en el tiempo fueron de complejo reciclado debido a sus propiedades, entre ellos se encuentran los residuos de construcción y demolición (RCD), el vidrio, el caucho y productos derivados del plástico.

Actualmente materiales como los mencionados se han estudiado con el fin de desarrollar una adecuada incorporación en las estructuras de las mezclas asfálticas, esto debido a cambios físicos, químicos o mecánicos. A partir del 2016 se comenzó a realizar estudios con un desecho que ha tenido un gran impacto ambiental debido a su alta toxicidad y que no tiene una manera adecuada de reciclarlo, tal es el caso de las colillas de cigarrillo, un compuesto residual del cigarrillo el cual tiene miles de compuestos químicos en su filtro y estos se liberan una vez son desechados, contaminan espacios como el suelo, el aire, y potencialmente el agua, sin embargo, una característica a destacar es que su filtro está hecho por miles de fibras de celulosa apiladas entre sí y es producto termoplástico de un polímero natural de origen vegetal.

Adicionar las colillas de cigarrillo en estudios para el mejoramiento del cemento asfáltico y de las mezclas asfálticas a través de incorporación en su estado natural, trituradas o realizando una limpieza previa, así mismo como en cemento asfáltico y parafina, y evaluarlas a través de métodos conocidos como el Marshall, además de pruebas realizadas para medir los niveles de desempeño es lo que se ha logrado durante los últimos años, permitiendo obtener avances en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas y de forma paralela dando un valor agregado a este desecho con grandes índices de contaminación ambiental.

Por tal motivo, la investigación realizada se centra en el mejoramiento del desempeño de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica cuando se le adiciona colillas de cigarrillo con un tratamiento previo de secado, limpieza, corte y adecuación a la incorporación. Además, las colillas fueron cubiertas con cemento Asfáltico, el cual es un elemento que genera aporte a la mezcla. Se realizaron pruebas de desempeño según lo estipulado en el protocolo AMAAC cuyos ensayos se asemejan a la realidad que viven los pavimentos en campo. El valor agregado que tiene la investigación es proveer un uso adecuado a este pasivo ambiental.

1.1. Planteamiento del Problema

En el ámbito de las vías terrestres y particularmente enfocada en los pavimentos ha sido un tema con un continuo desarrollo cuyo fin es, proporcionar vías de alto nivel y calidad que estén aptas para el progreso de una ciudad o país.

Existen diferentes tipos de pavimentos tales como, rígidos, semi rígido y flexibles, entre los pavimentos flexibles encontramos las mezclas asfálticas. Las mezclas asfálticas es una combinación de cemento asfáltico y agregado pétreo, se utilizan comúnmente en carreteras de alto, medio y bajo desempeño, a pesar de su constante uso y desarrollo en el tiempo estas siguen presentando factores de deterioro como lo son desprendimiento de agregado, agrietamiento y deformación; los anteriores factores, han generado impulso a la investigación con el fin de encontrar posibles soluciones que ayuden a mejorar su desempeño.

En la actualidad hay un gran impulso por utilizar materiales de difícil reciclado, en donde se ha buscado la manera de darle un nuevo uso además de que contribuya al mejoramiento de las mezclas asfálticas, por ejemplo, a través de la incorporación en sus estructuras y estudiando la forma que sean provechosos, ya sea modificando propiedades físicas, mecánicas o químicas; este ha sido el caso para materiales como el vidrio, el caucho, el plástico, el RCD entre otros.

Existe un desecho en particular denominado colilla de cigarrillo, el cual, tiene un difícil reciclado y reutilización, esto ha presentado preocupantes índices de salud y contaminación a nivel mundial, entre las razones están: es un material no biodegradable y que además tiene una duración de 18 meses a 10 años en descomponerse, dependiendo de las condiciones ambientales; por otro lado, es considerado un material tóxico, que al ser mezclado con residuos orgánicos este los contamina por completo y de cierta manera anula la posibilidad de recuperarlos (Colillas de cigarrillo, s. f.).

A partir del año 2016 se desarrollaron diferentes estudios, cuyo propósito ha sido dar solución al reciclado de las colillas de cigarrillo en el área de la construcción, además de, buscar el aprovechamiento de su composición físico - química para ser reutilizada de la mejor manera (Mohajerani, 2016).

Para el aprovechamiento de este material en el ámbito de los pavimentos se debe destacar que, las colillas de cigarrillo son un desecho compuesto por acetato de celulosa (el material del filtro), el cual es, un polímero sintético elaborado a partir de celulosa (un polímero natural de origen vegetal) mediante un proceso conocido como acetilación que incluye la adición de anhídrido acético y ácido acético. Al final del proceso, se agregan plastificantes (polietilenglicol) (Araújo & Costa, 2019).

Entre los estudios más destacados referentes al uso de las colillas de cigarrillo en los pavimentos se encuentra el investigador Dr. Abbas Mohajerani de University Royal

Melbourne Institute of Technology (RMIT University) Australia, en el año 2017 publicó un artículo en donde utiliza este elemento con solo un proceso previo de secado en horno y lo incorporo en una mezcla asfáltica utilizando el método Marshall, allí busco la forma de agregarlas a través del encapsulamiento para evitar que liberen químicos tóxicos pero, que trabajen en la mezcla físicamente, y evaluar parámetros como estabilidad, flujo, vacíos y compararlos con una mezcla convencional; entre los resultados se encuentra un aumento en la estabilidad y el flujo de forma positiva, teniendo un aumento en los valores respecto a una mezcla convencional y los vacíos cumplen los rangos estipulados por la norma (Mohajerani et al., 2017).

Posteriormente, realizó un estudio en donde se adicionan colillas de cigarrillo con un proceso de limpieza en agua, secado en horno y trituración a un cemento asfáltico convencional y modificado con polímero. La variación de colillas fue distinta para cada muestra y se comparó con las propiedades de un cemento asfáltico sin aditivos, para ello se evaluó el grado de penetración, viscosidad reológica y porcentaje de aglutinante, entre los resultados se destaca que, la adición a una mezcla convencional mejoró el aglutinamiento y los valores de penetración respecto a la modificada con polímero y a la mezcla convencional, además los valores de la viscosidad reológica se encuentran en los rangos estipulados por la normativa ASTM y por las normas implementadas en el país de Australia (Rahman et al., 2020).

Con los resultados previos de diferentes investigaciones se puede analizar que: el tratamiento realizado a las colillas de cigarrillo aún sigue contaminando otros elementos como es el caso del agua debido a que, la limpieza ocasiona que los elementos concentrados en las colillas de cigarrillo se liberen y la contaminen en su totalidad haciéndola no aprovechable, así mimos, un ambiente en laboratorio se contamina cuando se introducen al horno a una temperatura elevada para secarlas liberando un olor a tabaco excesivo que resulta difícil de inhalar.

Por otro lado, el encapsulamiento de las colillas de cigarrillo con cemento asfáltico requiere de más asfalto en una mezcla ya que, estas tienen buen contenido de absorción debido a que son cientos de fibras apiladas entre sí, lo cual podría llevarlo a un exceso de asfalto desequilibrando la mezcla, además, las pruebas que se han realizado a la mezcla asfáltica no han sido del todo idóneas para una aplicabilidad correcta ya que, la metodología que se ha utilizado sigue siendo la Marshall y sus resultados son limitados para el análisis.

En el área de las mezclas asfálticas se ha presentado progresivas investigaciones que buscan el mejoramiento de sus propiedades mecánicas y su desempeño cuando se aplican en las vías terrestres de tal manera que, haya un aumento de durabilidad con respecto al tiempo. Durante los últimos años adicionar elementos producto del reciclaje o de difícil reciclado se ha consolidado como un objetivo con doble labor de aprovechamiento, el primero ayudando a una reducción de contaminación ambiental, y el segundo proveer de mejoras los pavimentos y que en la vida cotidiana su desempeño aumente, de esta manera se realiza la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el desempeño de una mezcla asfáltica cuando se le adiciona fibras de colilla de cigarrillo encapsuladas?

Mencionado lo anterior, la presente investigación busca evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica adicionando fibras de colilla de cigarrillo, las cuales estarán encapsuladas con cemento asfáltico generando un aporte adicional a la mezcla, por otro lado, se utilizará la metodología denominada “protocolo AMAAC” Nivel II para México, que provee pruebas y valores de desempeño que se asemejan a la realidad de los pavimentos.

1.2. Justificación

Una característica importante del uso de las colillas de cigarrillo es aprovechar el material del que está compuesto (95% fibras de celulosa), poder utilizarlo en el ámbito de los pavimentos y que sea un elemento que se pueda acoplar en la estructura y el diseño de las mezclas asfálticas. Más allá de ser un desecho con complejos índices de ser reciclado y con gran impacto al medio ambiente, puede funcionar como un elemento que proporcione mejoras a la mezcla asfáltica, mejorando sus propiedades mecánicas y el desempeño que proporciona a las vías terrestres.

Se tiene conocimiento respecto a otros materiales que en su momento fueron difíciles de reciclar debido a su composición, y se han introducido al ámbito de los pavimentos debido a una de sus propiedades que fue aprovechable, tales como: el polvo de neumático extraído de los neumáticos de vehículos y que funciona como aditivo para el cemento asfáltico, los RCD que son residuos de construcción y demolición y se ha implementado como sustituto de agregados pétreos en concreto hidráulico, otro ejemplar es el PET extraído de las botellas de plástico y se ha incorporado en las mezclas asfálticas.

El uso de las colillas de cigarrillo crearía un panorama en donde se le asigna un valor agregado a este elemento y funcione de manera positiva ya que, el volumen estimado de cigarrillos producidos en todo el mundo, la persistencia, así como el contenido tóxico después del uso, respaldan la necesidad de estrategias eficientes de eliminación y reciclaje para resolver una catástrofe global de este desecho.

Las estrategias de eliminación existentes para las colillas de cigarrillo recolectadas incluyen la incineración y el vertido, sin embargo, ambas técnicas se consideran insostenibles e ineficientes debido a preocupaciones ambientales y económicas. Por lo tanto, diferentes estudios han revisado posibles tecnologías sobre la valorización de las colillas de cigarrillo y examinan la viabilidad de las investigaciones en donde las involucran, tales propuestas han sido: mezcla en ladrillos de arcilla cocida, mezcla en hormigón asfáltico, producción de pulpa de celulosa y utilización como inhibidor de corrosión, las nombradas son algunas de las que le han dado la vuelta al mundo buscando la reutilización de este elemento (Kurmus, Mohajerani, 2020).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica con adición de fibra de colillas de cigarrillo, a través de los requerimientos propuestos por el protocolo AMAAC, enfocado en la mejora de sus propiedades mecánicas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar pruebas mecánicas a los materiales pétreos y al cemento asfáltico que se utilizarán en el diseño de una mezcla asfáltica, para determinar que cumplen con los requerimientos estipulados por la norma.
- Determinar el diseño de una mezcla asfáltica para diferentes adiciones de fibra de colillas de cigarrillo y cal hidratada que satisfaga el desempeño de las propiedades mecánicas.
- Realizar pruebas a la mezcla asfáltica siguiendo las pautas del protocolo AMAAC, para evaluar el desempeño que presenta al adicionar las fibras de colillas de cigarrillo.
- Realizar una comparación acerca del desempeño que presenta una mezcla asfáltica convencional respecto a una mezcla asfáltica con adición de fibras de colillas de cigarrillo, ambas realizadas a través del protocolo AMAAC.

1.4. Propuesta de Solución

Para evaluar el desempeño de las diferentes mezclas asfálticas con adición de colillas de cigarrillo se siguió un proceso estructurado, que llevó a cabo el desarrollo de las propuestas planteadas y además, obtener resultados que analizados satisficieran el desarrollo de esta investigación.

Para llevar a cabo el desarrollo de un diseño de mezcla asfáltica lo primero fue realizar la caracterización y respectivas pruebas mecánicas a los materiales pétreos, según los lineamientos requeridos y con base a la normativa ASTM o la del país de México, del mismo modo, se deben ejecutar las pruebas al cemento asfáltico que será utilizado en el diseño.

Una vez determinado los valores y que cumplan con los criterios de calidad que deben tener para el desarrollo de una mezcla asfáltica se procede a determinar el contenido necesario de asfalto que va a satisfacer el desempeño de una mezcla asfáltica, la cual lleva diferentes adiciones de colillas de cigarrillo y cal hidratada, que son determinadas con referencia a investigaciones realizadas y según el peso de los especímenes, para que no ocurra un desequilibrio y exceso en la mezcla, posterior se realiza cálculos que determinan el contenido mínimo de asfalto, el valor inicial con el que se realiza la mezcla, posterior graduarlo hasta llegar al valor máximo que puede contener una mezcla asfáltica según los criterio que se debe seguir para conformar un diseño de mezcla idóneo.

Una vez determinados los valores correspondientes y realizadas las pruebas a los materiales mencionados, se procede a diseñar la mezcla asfáltica siguiendo las pautas establecidas por el protocolo AMAAC - nivel II, en donde se evalúa el diseño mediante pruebas de diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente correspondiente a un nivel de tránsito medio de, 1 millón a 3 millones de ejes equivalente y así, analizar el desempeño que presenta la adición de colillas de cigarrillo a la mezcla asfáltica.

Finalmente, se realizará la comparación de una mezcla asfáltica con adición de colillas de cigarrillo con respecto a la de referencia, y analizar los valores que determinan el desempeño de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, a fin de destacar las mejoras que pueden presentarse.

CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Agregado pétreo

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado en forma de partícula graduadas o fragmentos como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, roca triturada, escoria y polvo de roca. (Medina, 2020)

2.1.1.1. Fuente de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

- **Agregados Naturales** – Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo, y los químicos. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y arena. (Osorio, s. f.)
- **Agregados Procesados** – Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y cribados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmento de lecho de roca y de rocas grandes que deben ser reducidas en tamaño antes de ser usados en la pavimentación. (Castillo, 2019)
- **Agregados Sintéticos** – Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado. (Castillo, 2019)

2.1.1.2. Propiedades de los agregados

Los agregados pétreos deben poseer ciertas propiedades para poder ser considerados apropiados para los pavimentos asfálticos de buena calidad, estas propiedades son:

- **Graduación y tamaño máximo de partícula** – Las especificaciones de pavimentos asfálticos requiere que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de

tamaños y que cada tamaño de partícula esté presente en ciertas porciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. (Asphalt Institute, 2014, p.42)

- **Limpieza y pureza** – Las cantidades excesivas de vegetación, arcilla, partículas blandas en el agregado pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento, por tal motivo esta se determina mediante inspección visual o a través de un tamizado por lavado en donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparada con su peso después de ser lavada. (Asphalt Institute, 2014, p51)
- **Dureza** – Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento. (Asphalt Institute, 2014, p51)
- **Forma de la partícula** – La forma de la partícula es una propiedad que puede afectar la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. (Asphalt Institute, 2014, p52)
- **Textura de la superficie** – Es un factor que puede determinar la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, una textura áspera, como la del papel lija aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento de tránsito sea más seguro. (Asphalt Institute, 2014, p53)
- **Capacidad de absorción** – La capacidad que tiene el agregado de absorber agua es un elemento importante de información ya que todos los agregados son porosos, y algunos más que otros, una forma de medirla es por medio de la cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño y con esto se puede determinar su porosidad. (Asphalt Institute, 2014, p53)
- **Afinidad con el asfalto** – La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, a esto se le conoce como hidrofóbica (repelen el agua). (Asphalt Institute, 2014, p54)

2.1.2. Asfalto

El asfalto es una mezcla natural o artificial en la que el betún está asociado con materia mineral inerte. Es de color negro o negro parduzco. A una temperatura entre 50 y 100 ° C está en estado líquido, mientras que a una temperatura inferior a esta permanece en estado sólido, debido a que es un material termoplástico. (Maldonado, 2021). Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales: cemento asfáltico, asfalto diluido y asfalto emulsificante.

2.1.2.1. Cemento asfáltico

El asfalto usado en pavimentación generalmente llamado cemento asfáltico es un material viscoso, espeso y pegajoso, son los que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites, se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unirlos. (secretaría de comunicación y Transporte [SCT], 2006)

2.1.2.2. Propiedades Químicas

La composición química de los asfaltos está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio, composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede, y en el análisis químico del asfalto es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfáltenos y máltenos. (SOL PETROLEO, s. f.)

- **Asfáltenos** – Son estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen además del carbón otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre, oxígeno, en general, son compuestos polares, de alto peso molecular.
- **Máltenos** - Son sustancias solubles en normal heptano y está constituido por resinas, saturados y aromáticos.

2.1.2.3. Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del asfalto las cuales tienen una gran importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de las vías terrestres son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento. (Asphalt Institute, 1992)

- **Durabilidad** – Se le conoce como durabilidad a la medida sobre que tanto puede retener el asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en término de las propiedades del asfalto.
- **Adhesión y cohesión** – Se le denomina adhesión a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación, y se le denomina cohesión a la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento.
- **Susceptibilidad a la temperatura** – Los asfaltos son termoplásticos, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura es disminuida, y más blandos

(menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta, esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura. Esta característica varía entre los asfaltos de petróleo de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

- **Envejecimiento y endurecimiento** – Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, este endurecimiento es causado por el proceso de oxidación (asfalto combinándose con oxígeno), el cual ocurre más fácil a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas, por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y poder disminuir el endurecimiento.

2.1.3. Colillas de cigarrillo

Los Filtros de cigarrillos están específicamente diseñados para absorber la acumulación de vapores y partículas de humo. Los filtros también impiden la entrada de tabaco en la boca de un fumador y una boquilla que permite que no colapse mientras se fuma.

(Guevara, 2010)

El filtro de los cigarrillos está constituido de acetato de celulosa, que se produce al hacer reaccionar la celulosa con el ácido acético. El acetato de celulosa es un material termoplástico relativamente duro y brillante, incoloro, transparente y amorfo con una buena claridad, estabilidad a los rayos UV y resistencia química moderadas.

(Salamanca et al, 2019)

2.1.4. Cal

Sustancia alcalina constituida por óxido de calcio, de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del agua se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma la argamasa o mortero. (- Asale, s. f.)

2.2. MARCO NORMATIVO

Para realizar la evaluación de los materiales como es el caso de los agregados pétreos y el cemento asfáltico se tiene en cuenta normativas tales como las ASTM, AASHTO, secretaria de comunicación y Transporte (SCT) y las del Instituto Mexicano de Transporte (IMT) para el respectivo desarrollo de los ensayos.

2.2.1. Ensayos a los agregados pétreos

2.2.1.1. Ensayo para el análisis granulométrico de los agregados

La prueba tiene como objetivo determinar la distribución de tamaños de las partículas de agregado fino y grueso por medio de tamices, se utiliza para establecer el cumplimiento de las partículas de agregado con los requerimientos de alguna especificación, así como, proveer datos necesarios para el control de la producción de la mezcla. (Instituto Mexicano del Transporte [IMT] et al, 2019)

Equipos y Herramientas:

- **Mallas (tamices):** montadas sobre un marco, de tal manera que se prevenga la pérdida de material durante el proceso de tamizado.
- **Balanza:** Con capacidad para determinar las masas del ensayo y con resolución de 0.1g.
- **Horno:** Capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- **Vibrador mecánico:** Este equipo puede ser opcional, el propósito es que se promueva el movimiento de los tamices.
- En la Tabla II-1 Tamaño de muestra del agregado grueso, se presenta la cantidad de agregado mínimo para la ejecución de la prueba de acuerdo a al tamaño nominal del mismo.

Tabla II-1. Tamaño de muestra del agregado grueso

Tamaño nominal, mm [pulg]	Tamaño mínimo de la muestra [g]
9.5 [3/8]	1 000
12.5 [1/2]	2 000
19.0 [3/4]	5 000
24.0 [1]	10 000
37.5 [1 1/2]	15 000

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

2.2.1.2. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso

El objetivo de la prueba es determinar la gravedad específica y la absorción de los agregados gruesos. Se le denomina gravedad específica a la relación de la masa del agregado respecto a la masa de un volumen de agua igual al volumen del agregado. La gravedad específica es adimensional, se puede expresar como gravedad específica bruta (G_{sb}) y la gravedad específica aparente como (G_{sa}). (ASTM C 127, 2001).

Equipo y Herramientas:

- **Balanza:** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1g o mayor.
- **Tamiz:** Designación del tamiz No.4 con abertura de 4.75mm

- **Canastilla:** De malla de alambre con abertura del No.6 o menores para evitar pérdida de material.
- **Horno:** Capas de mantener una temperatura de 110 ± 5 °c

Calculo:

- Cálculo de la gravedad específica bruta (G_{sb})

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

- G_{sb} (adimensional): Gravedad específica bruta
 - A (g): Masa de la muestra seca al horno.
 - B (g): Masa de la muestra saturada y superficialmente seca.
 - C (g): Masa de la muestra sumergida en agua.
- Cálculo de la gravedad específica aparente (G_{sa} [adimensional])

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$$

- Cálculo del porcentaje de absorción

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} * 100$$

2.2.1.3. Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Máquina de los Ángeles

El ensayo tiene como objetivo ensayar partículas de agregado gruesos con un tamaño máximo menor a 37.5 mm [1 1/2"], para evaluar su resistencia a la degradación utilizando la Máquina de Los Ángeles. Se utiliza como un indicador de la tenacidad del material para resistir el impacto de las cargas durante la fabricación, tendido y compactación de la mezcla. (ASTM C131, 2003)

Equipo y Herramientas:

- **Máquina de los Ángeles:** Debe tener un diseño especial según lo especifica las especificaciones, esta consiste en un cilindro hueco de acero con un espesor en las paredes de al menos 12 mm, un diámetro interior de 711 ± 5 mm, y una longitud interior de 508 ± 5 mm. (Ver Figura II 1. Máquina de los Ángeles)
- **Tamices:** Con aberturas según las especificaciones.

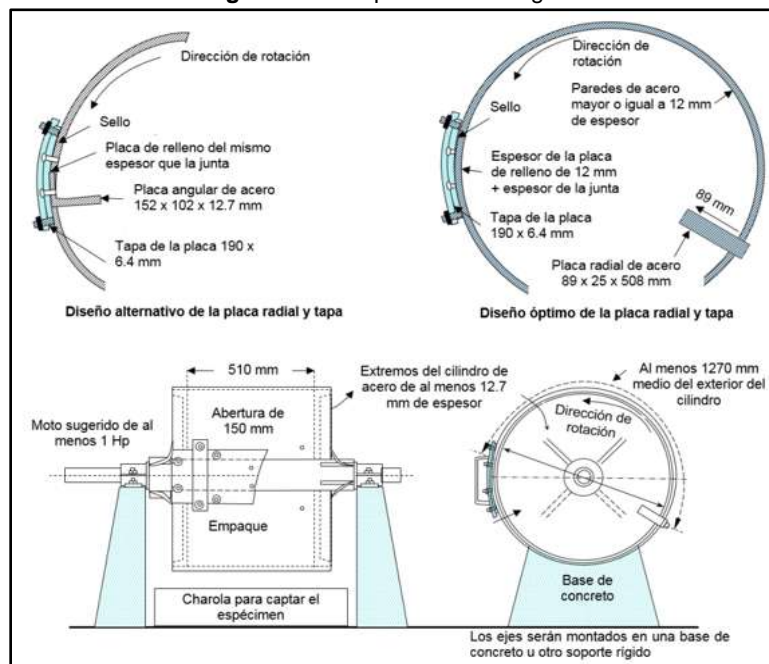
- **Carga Abrasiva:** Son esferas de acero con diámetro de 46.48mm y cada una con masa de 390 a 445 g, la masa de la carga abrasiva dependerá de la granulometría elegida a ensayar. (Ver tabla II 2. Masa de la carga abrasiva)
- **Balanza:** Capacidad suficiente para determinar las masas del ensayo.

Tabla II-2. Masa de la carga abrasiva

Granulometría	Numero de esferas	Masa de la carga abrasiva (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 25
D	6	2 500 ± 25

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Figura II-1. Máquina de los Ángeles



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Calculo:

$$\text{Desgaste de los Ángeles (\%)} = \frac{C - Y}{C} * 100$$

Donde:

- C (g): Masa de la muestra inicial, aproximación de 1.0 g
- Y (g): Masa de la muestra final, aproximación de 1.0 g

2.2.1.4. Determinar la resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión en la Máquina Micro-Deval

El ensayo cubre un procedimiento para determinar la resistencia por abrasión y durabilidad del agregado en presencia de agua utilizando la máquina Micro-Deval, este ensayo es útil para detectar cambios en las propiedades del agregado como parte de control de calidad. (ASTM D6928, 2017)

Equipo y Herramientas:

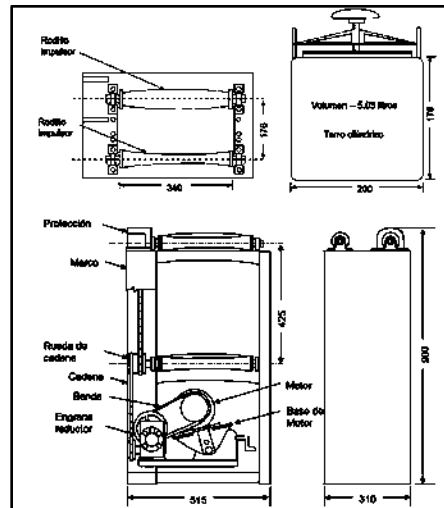
- **Máquina de abrasión Micro-Deval:** Molino giratorio capaz de efectuar 100 ± 5 rpm, se debe verificar la velocidad de giro calibrándola.
- **Contenedor:** de abrasión de acero inoxidable con capacidad de 5 litros, con tapa y anillo de hule capaz de sellar el recipiente y evitar la pérdida de agua.
- **Carga abrasiva:** de balines magnéticos de acero inoxidable. Cada recipiente requiere una carga de $5\,000 \pm 5$ g de balines.
- **Balanza:** Calibrar o verificar con una resolución de 0.1 g o mayor.
- **Termómetro:** Calibrar con un rango de medición suficiente para evaluar 20 ± 5 °C y con resolución mínima de 0.5°C.
- **Tamices:** con las siguientes aberturas, 19.0 mm [3/4"], 16.0 mm [5/8"], 12.5 mm [1/2"], 9.5 mm [3/8"], 6.3 mm [1/4"], 4.75 mm [No. 4], y 1.18 mm [No. 16].
- **Horno:** Capas de mantener una temperatura de hasta 110 ± 5 °C.

Tabla II-3. Combinación de muestras a ensayar

Tamaño nominal de 19 mm [3/4"], combinación de muestras a ensayar		
Pasa	Retiene	Masa (g)
19.0 mm [3/4"]	16.0 mm [5/8"]	375
16.0 mm [5/8"]	12.5 mm [1/2"]	375
12.5 mm [1/2"]	9.5 mm [3/8"]	750
Total		1 500 ± 5

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Figura II-2. Maquina Micro-Deval



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019

Calculo:

$$\text{Desgaste Micro - Deval (\%)} = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

- A (g): Masa de la muestra inicial, aproximación de 1.0 g
- B (g): Masa de la muestra final, aproximación de 1.0 g

2.2.1.5. Determinar la resistencia al intemperismo acelerado

El objetivo del ensayo es determinar la degradación esperada por intemperismo en materiales pétreos por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. (Instituto Mexicano del Transporte [IMT] et al., 2019)

Equipo y Herramientas:

- **Contenedores:** Estos deben permitir sumergir las muestras de agregado en la solución.
- **Densímetro:** Graduado capaz de medir la gravedad específica de la solución con una precisión de ± 0.001 .
- **Tamices:** Según especificaciones.
- **Regulador de temperatura:** adecuado para controlar la temperatura de las muestras durante la inmersión en el sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
- **Reactivos:** Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) o cristalino ($\text{Na}_2\cdot\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sulfato de magnesio anhidro (MgSO_4) o cristalino ($\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$), cloruro de bario (BaCl_2), agua destilada o desionizada.
- Balanza, Termómetro, Horno.

Tabla II-4. Masa de la muestra de agregado grueso

Fracción del agregado	Pasa	Retiene	Masa (g)
19.0 mm a 9.5 mm	16.0 mm [5/8"]	12.5 mm [1/2"]	670 ± 10
	12.5 mm [1/2"]	9.5 mm [3/8"]	330 ± 5
	Total		1000 ± 10
9.5 mm a 4.75 mm	9.5 mm [3/8"]	4.75 mm [No.4]	300 ± 5
	Total		300 ± 5

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Tabla II-5. Tamizado de material

Tamaño del agregado	Tamiz utilizado para determinar la pérdida
63.0 mm a 37.5 mm	31.5 mm [1 ¼"]
37.5 mm a 19.0 mm	16.0 mm [5/8"]
19.0 mm a 9.5 mm	8.0 mm [5/16"]
9.5 mm a 4.75 mm	4.0 mm [No.5]

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Calculo:

$$I (\%) = \frac{A - B}{A} * 100$$

Donde:

- A (g): Masa de la muestra inicial, aproximación de 1.0 g
- B (g): Masa de la muestra final, aproximación de 1.0 g

2.2.1.6. Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

Tiene como objetivo la determinación por masa del porcentaje de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso. La importancia de contar con un alto contenido de partículas fracturadas consiste en maximizar la resistencia al corte incrementando la fricción interna entre partículas en mezclas de agregados. (ASTM D5821-13, 2017)

Equipo y Herramientas:

- Balanza, Tamices, Espátula y Horno.

Tabla II-6. Masa de la muestra

Tamaño nominal	Masa mínima de ensayo (g)
9.5 mm [3/8"]	200
12.5 mm [1/2"]	500
19.0 mm [3/4"]	1 500
25.0 mm [1]	3 000
37.5 mm [1 ½"]	7 500

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, Edición: Propia

Calculo:

$$P_2(\%) = \frac{F}{F + U + N} * 100$$

$$P_1(\%) = \frac{U}{F + U + N} * 100$$

Donde:

- P₂ (%): Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas.
- P₁ (%): Porcentaje de partículas con una cara fracturada.
- F (g): Masa de las partículas con dos o más caras fracturadas.
- U (g): Masa de las partículas con una cara fracturada
- N (g): Masa de las partículas sin caras fracturadas.

2.2.1.7. Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

La forma de la partícula es un parámetro que influencia las propiedades de desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que, para un comportamiento adecuado, se busca contar con partículas esféricas y evitar las partículas planas y alargadas debido a que pudieran presentar tendencia a fracturarse durante la construcción y bajo la acción del tránsito. (ASTM D4791, 2010)

Equipo y Herramientas:

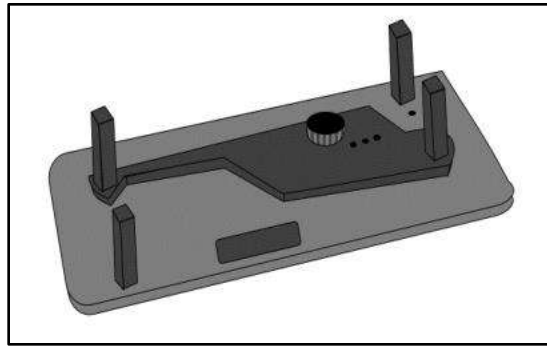
- **Dispositivo proporcional calibrador:** Es una placa base con dos postes fijos y un brazo libre montado entre ellos, de tal manera que, las aberturas entre los brazos y los postes mantengan una relación constante.
- Balanza, Tamices, Horno.

Tabla II-7. Masa de la muestra

Tamaño nominal	Masa mínima de ensayo (g)
9.5 mm [3/8"]	1 000
12.5 mm [1/2"]	2 000
19.0 mm [3/4"]	5 000
25.0 mm [1"]	10 000
37.5 mm [1 1/2"]	15 000

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019, **Edición:** Propia

Figura II-3. Dispositivo Calibrador



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte [IMT], 2019

Calculo:

- Cálculo del porcentaje de agregado retenido por tamiz de la granulometría (%RT_{tg})

$$\%RT_{tg}[C] = \frac{\text{Masa total de cada fracción [B]}}{\text{Masa inicial [A]}} * 100$$

- Cálculo del porcentaje de partículas planas y alargadas por tamiz de la muestra (%PyA_{tm})

$$\%PyA_{tm}[G] = \frac{\text{Masa de partículas planas y alargadas [E]}}{\text{Masa de cada fracción [D]}} * 100$$

- Cálculo del porcentaje de partículas planas y alargadas por tamiz ponderado a la granulometría (%PyA_{tg})

$$\%PyA_{tg}[H] = \frac{PyA_{tm}[G] * RT_{tg}[C]}{100}$$

- Cálculo de la sumatoria del porcentaje retenido (%RT_{total})

$$\%RT_{total}[Total C] = \sum_1^n \%RT_{tg}[C]$$

- Cálculo de la sumatoria del porcentaje de partículas planas y alargadas (%PyA_{total})

$$\%PyA_{total}[Total H] = \sum_1^n \%PyA_{tg}$$

- Cálculo del porcentaje de partículas planas y alargadas de la granulometría (%PyA)

$$\%PyA = \frac{PyA_{total}[Total H]}{RT_{total}[Total C]}$$

2.2.1.8. Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos

El objetivo de la prueba es determinar la pérdida de una película de asfalto en los materiales pétreos. (AMAAC RA 08/2010)

Equipo y Herramientas:

- **Frasco de vidrio:** De 500cm³ de capacidad, boca ancha con tapa hermética, aproximadamente de 6,5cm de diámetro y 16cm de altura.
- **Agitador Mecánico:** Para agitar la mezcla de prueba, consiste en una barra giratoria apoyada sobre dos soportes accionada por motores eléctricos con reductor de velocidad con razón de giro de 45 a 50 rpm.
- **Horno, termómetro, juego de mallas, balanza, Agua destilada.**
- **Vasos cilíndricos de aluminio:** De 2L de capacidad.
- **Fuente de calor:** Con capacidad suficiente para alcanzar y mantener temperaturas ligeramente mayores que la temperatura de aplicación del material Asfáltico.
- **Cemento Asfáltico:** En cantidad suficiente para cubrir los requisitos.

Calculo:

$$P_{FR} = \frac{\sum P_{fr}}{N}$$

Donde:

- P_{FR}: Pérdida por fricción promedio, (%)
- P_{fr}: Pérdida por fricción de cada una de las muestras consideradas.
- N: Numero de muestras consideradas, contenidas en los frascos.

2.2.1.9. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino

El objetivo de la prueba es determinar la gravedad específica y la absorción de los agregados finos. Se le denomina gravedad específica a la relación de la masa del agregado respecto a la masa de un volumen de agua igual al volumen del agregado. La gravedad específica es adimensional, se puede expresar como gravedad específica bruta (Gsb) y la gravedad específica aparente como (Gsa). (ASTM C128, 2015)

Equipo y Herramientas:

- **Picnómetro:** usado en el procedimiento gravimétrico, la muestra puede ser fácilmente introducida y el volumen contenido pueda ser reproducido dentro de ± 0.1 cm³.

- **Molde y pisón:** Molde metálico en forma de cono truncado con diámetro interior en la parte superior de 40 ± 3 mm, diámetro interior en la parte inferior de 90 ± 3 mm y 75 ± 3 mm de altura. El pisón deberá tener una masa de 340 ± 15 g y una superficie circular en la cara de apisonamiento de 25 ± 3 mm de diámetro.
- **Tamiz:** con aberturas de 4.75 mm (No. 4) conforme a lo estipulado por las especificaciones.
- **Balanza:** Capacidad de 1000g o mayor, y precisión de 0.1%.
- **Termómetro:** Rango de medición suficiente para evaluar 23 ± 2 °C y con una graduación mínima de 0.5 °C.
- **Baño de agua:** Debe ser capaz de mantener una temperatura de 23 ± 2 °C para que la muestra sea sumergida.
- **Horno:** Debe ser capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.

Cálculos:

- Cálculo de la gravedad específica bruta (G_{sb})

$$G_{sb} = \frac{A}{B + S - C}$$

Donde:

- G_{sb} (adimensional): Gravedad específica bruta
 - S (g): Masa de la muestra saturada y superficialmente seca.
 - A (g): Masa de la muestra seca al horno.
 - B (g): Masa del picnómetro con agua.
 - C (g): Masa del picnómetro con agua y muestra.
- Cálculo de la gravedad específica aparente (G_{sa} [adimensional])

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$$

- Cálculo del porcentaje de absorción

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100$$

2.2.1.10. Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino

Este método de ensayo consta en determinar el contenido de vacíos no compactados de una muestra de agregado fino. Este contenido de vacíos provee un indicio de la angularidad, esfericidad y textura del agregado fino, comparado con otros a los mismos tamaños. (IMT, et al., 2019)

Equipo y Herramientas:

- **Medidor cilíndrico de cobre**, con capacidad aproximada de 100 ml, diámetro interior de 39 mm y una altura interior de 86 mm.
- **Embudo** con superficie lateral del tronco inclinado a $60 \pm 4^\circ$ desde la horizontal y con una abertura de 12.7 ± 0.6 mm de diámetro. La pieza debe ser de metal, lisa en el interior con volumen de por lo menos 200 ml.
- **Soporte de embudo** con tres o cuatro patas capaz de mantener el embudo firmemente, su altura será de 115 ± 2 mm por encima de la parte superior del cilindro.
- **Tamices**
- **Placa de vidrio** de aproximadamente 60 x 60 y con espesor de 4 mm para calibrar el cilindro
- **Balanza, termómetro, espátula de metal y nivel**

Calculo:

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100$$

Donde:

- U (%): Vacíos no compactados en el material, con aproximación de 0,1%
- V (mL): Volumen del medidor cilíndrico, con aproximación de 0,1 mL
- F (g): Masa del agregado fino, con aproximación de 0,1 g
- G: Gravedad específica del agregado fino, con aproximación de 0,1

2.2.1.11. Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino

El propósito de este método de prueba es para indicar bajo condiciones estándar las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos respecto a polvos de suelos granulares en agregados finos que pasan la malla de 4.75 mm [No. 4]. (ASTM D 2419, 2009)

Equipo y Herramientas:

- **Agitador mecánico:** opcional
- **Instrumentos:** Probeta cilíndrica con tapón de hule, tubo irrigador, pisón lastrado y sifón.
- **Medido metálico:** De aproximadamente 57 mm de diámetro con una capacidad de 85 ± 5 mL.
- **Balanza, Horno.**
- **Tamiz:** Abertura No. 4.
- **Reactivo para solución de reserva con formaldehído:** Formaldehído, cloruro de calcio anhidro grado técnico, glicerina USP, y agua destilada.
- **Reactivo para solución de reserva con glutaraldehído:** Glutaraldehído, di hidrato de cloruro de calcio grado A.C.S., glicerina USP y agua destilada.

- **Misceláneos:** Papel filtro Whatman No. 2 o equivalente, embudo de boca ancha para transferir la muestra a la probeta, dos botellas de 1 galón (3.8 L) para almacenar la solución de reserva y la solución de trabajo.

Calculo:

$$SE = \frac{A}{B} * 100$$

Donde:

- SE (%): Equivalente de arena, reportar el valor como numero entero, redondeado al valor superior.
- A (cm): Lectura de arena.
- B (cm): Lectura de arcilla.

2.2.1.12. Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla

El índice de azul de metileno determina el grado de reactividad del material filler (pasa No. 200) que es utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas, el cual puede tener una influencia nociva en su desempeño. (AMAAC RA 05/2010)

Equipo y Herramientas:

- **Balanza, cronometro, horno, papel filtro.**
- **Agitador magnético:** Con distintos niveles de velocidad de agitación.
- **Barra magnética:** agitadora de tamaño suficiente para generar un buen mezclado.
- **Vaso de Precipitado:** capacidad de 100mL de vidrio
- **Bureta:** Capacidad de 50 mL con graduación de 0.1mL.
- **Tamiz:** Abertura No.200
- **Reactivos:** agua destilada, azul de metileno grado reactivo (C16H18C1N3S·3H2O).

Calculo:

$$MBV = \frac{C_{sol}}{C_{filler}}$$

Donde:

- MBV (mg/g): Valor de azul de metileno.
- C_{sol} (mg): Cantidad de azul de metileno necesario para alcanzar el punto final del ensayo.
- C_{filler} (g): Cantidad de material contenido en la suspensión.

2.2.2. Ensayos al Cemento Asfáltico

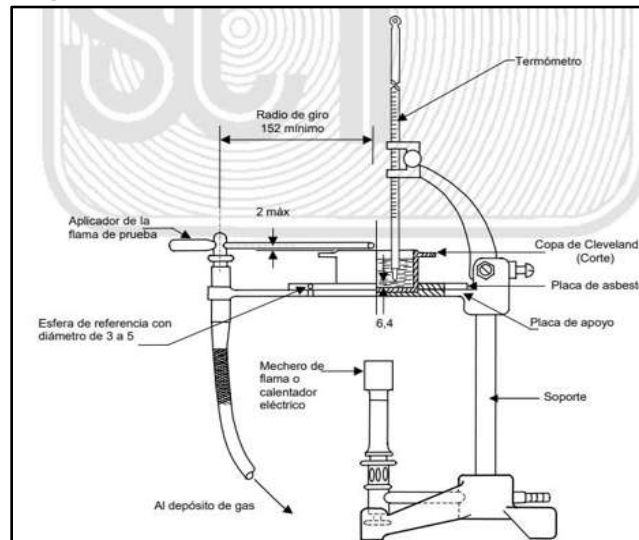
2.2.2.1. Punto de Inflamación de Cleveland

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión. La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar la flama por la superficie de la muestra se produzca en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. (Secretaría de comunicaciones y transporte SCT, M-MMP-4-05-007/00)

Equipo y Herramientas:

- Copa abierta de Cleveland de material como latón, bronce o acero inoxidable.
- Soporte para la copa provisto de una placa de apoyo metálica y otra de asbesto.
- Parilla eléctrica o mechero adaptado para controlar la aplicación de calor.
- Termómetro de inmersión parcial en un rango de -6 a 40°C.
- Aplicador de flama acoplado al soporte de tal forma que permita girar en un plano horizontal.

Figura II-4. Equipo para prueba de Punto de Inflamación.



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-007/00

2.2.2.2. Viscosidad Rotacional Brookfield

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260°C mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un

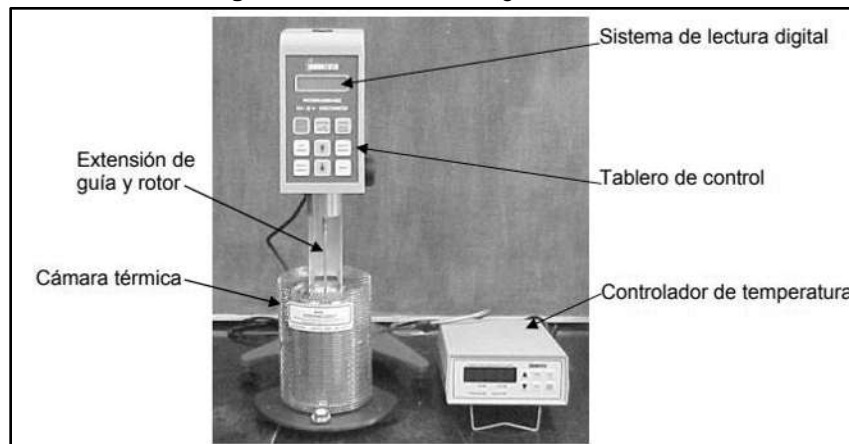
contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad. (secretaria de Comunicaciones y Transporte SCT, M-MMP-4-05-005/02)

Equipo y Herramientas:

El equipo para la ejecución de la prueba deberá estar en condiciones de operación, calibrado, limpio y con todas sus partes.

- Viscosímetro Brookfield estándar.
- Sistema de lectura digital.
- Extensión de guía y rotor.
- Sistema Thremosel formado por un contenedor y una cámara de prueba térmicos; un control de temperatura.

Figura II-5. Viscosímetro digital Brookfield



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-005/02

2.2.2.3. Punto de Reblandecimiento

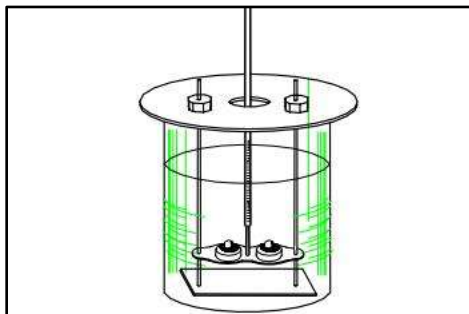
El objetivo de la prueba es estimar la consistencia de los cementos Asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT, M-MMP-4-05-009/00)

Equipo y Herramientas:

- Anillos, dos anillos de latón, con diseño y dimensiones determinadas según norma.
- Vaso de vidrio refractado, Vaso de precipitado.
- Sistema de Soporte, porta anillos de latón con soporte de metal resistente a la corrosión, integrado por dos columnas que los sostengan y una placa circular superior que sirva de tapa para el vaso refractario.

- Esferas, dos de acero de 9,5 mm de diámetro y de $3,5 \pm 0,05$ g de masa.
- Dos guías de latón para centrar las esferas.
- Parilla eléctrica o mechero.
- Termómetro de inmersión total con rango de -1 a 175°C .
- Agua limpia o glicerina.

Figura II-6. Montaje de la prueba de punto de reblandecimiento



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-009/00

2.2.2.4. Módulo Reológico de corte dinámico

Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el Angulo fase, como propiedades viscoelásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. Es aplicable a cementos Asfálticos con módulos complejos en el rango de $0,1$ a $1\ 000$ kPa, los que se obtienen en forma típica entre 5 y 85°C . (secretaria de Comunicaciones y Transporte SCT, M-MMP-4-05-025/02)

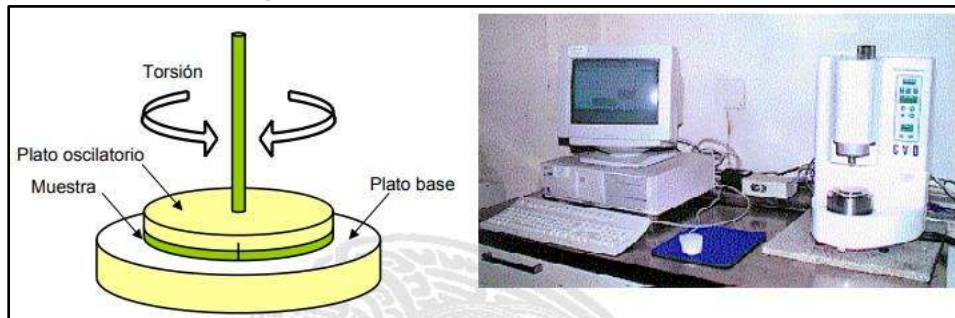
Equipo y Herramientas:

- Sistema de prueba del reómetro de corte dinámico (DSR)
 - Plato base metálico con superficies pulidas.
 - Platos oscilatorios metálicos con superficies pulidas, diámetro de $8 \pm 0,05$ mm o $25 \pm 0,05$ mm.
 - Cámara ambiental capaz de controlar la temperatura de la muestra mediante gas o líquido, tal como el nitrógeno o el agua que no afecte las propiedades de la mezcla.
 - Control de temperatura capaz de mantener la temperatura de la muestra para rangos de 5 a 85°C .
 - Detector de temperaturas, detector de resistencia termina (RTD), de platino o equivalente, con rango de 5 a 85°C .
 - Detector térmico de referencia, puede ser un termistor o un detector de resistencia térmica (RTD) montados en un sello de silicón o bien un termocople.
 - Dispositivo de carga capaz de proporcionar una carga sinusoidal de esfuerzo o deformación controlados, con frecuencia de $10 \pm 0,1$ rad/s, el dispositivo será

capaz de aplicar una torsión cíclica suficiente para causar una deformación rotacional angular con una precisión de $\pm 100 \mu\text{rad}$ de la deformación especificada.

- Sistema de control y registro de datos que cuente con dispositivos para registrar temperaturas, frecuencia, el ángulo de giro y la fuerza o deformación por torsión.
- Molde para formar la muestra
- Dispositivo para ajustar y recortar las muestras

Figura II-7. Reómetro de corte dinámico típico



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-025/02

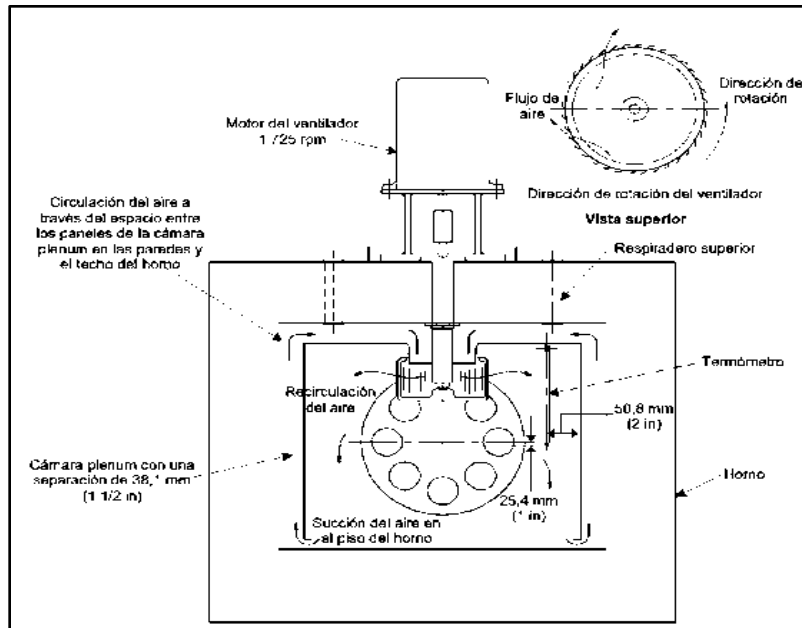
2.2.2.5. Envejecimiento del Cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)

El objetivo de esta prueba es mediante el efecto de calor y aire aplicar a una película de cemento Asfáltico semisólido, obtener un residuo que simula los efectos del envejecimiento a corto plazo que ocurren durante el transporte, mezclado en caliente, tendido y compactación de la mezcla, con el fin de determinar mediante la viscosidad, características reológicas el efecto de envejecimiento. (secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT, M-MMP-4-05-027/22)

Equipo y Herramientas:

- Horno Rotatorio de Película Delgada conocido como RTFO (Rolling Thin Film Oven)
- Medidor de flujo capaz de medir el flujo de aire a una velocidad de 4 000 ml/min.
- Termómetro
- Contenedores de vidrio, 8 contenedores transparentes y resistentes al calor que cumplan con dimensiones estipuladas.
- Rejilla de enfriamiento.
- Balanza.
- Cronometro.
- Herramientas de recuperación.
- Equipo de seguridad personal estándar para laboratorio

Figura II-8. Vista frontal del horno RTFO y su flujo de aire



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-027/22

Cálculos:

El cambio de masa para cada uno de los dos contenedores de vidrio destinado a tal fin se determina mediante la siguiente expresión.

$$\Delta m = \frac{m_f - m_i}{m_i - m_0} \times 100(\%)$$

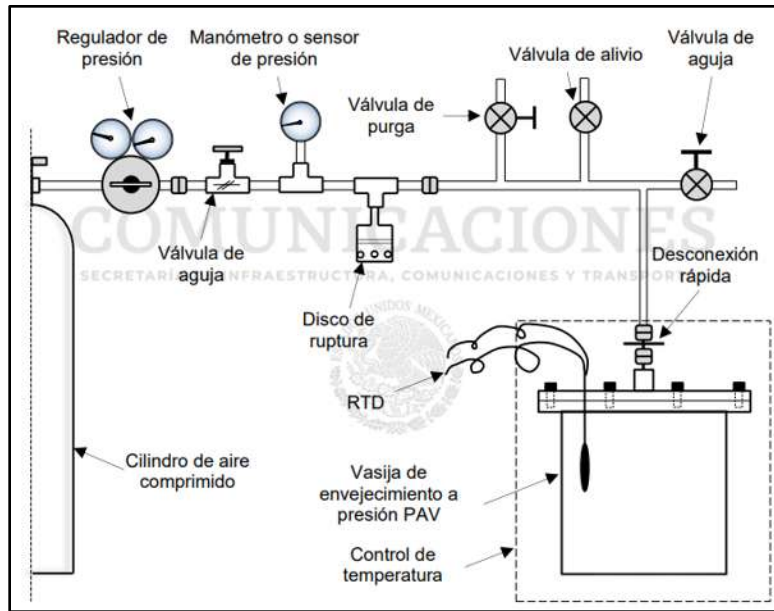
Donde:

- Δm : Pérdida o ganancia de masa, (%)
- m_0 : Masa del contenedor de vidrio vacío, (g)
- m_i : Masa de contenedor de vidrio con la muestra de cemento Asfáltico antes de la prueba de RTFO, (g)
- m_f : Masa del contenedor con el residuo Asfáltico después de ejecutar la prueba de RTFO, (g)

2.2.2.6. Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)

Esta prueba permite simular los cambios reológicos que pueden ocurrir en el asfalto durante su envejecimiento a largo plazo, la prueba consiste en colocar el residuo obtenido de la prueba del RTFO en bandejas estándar de acero inoxidable y acondicionarlo bajo una vasija a presión, a temperaturas y presión específicas. (secretaria de Comunicaciones y Transporte SCT, M-MMP-4-05-028/22)

Figura II-9. Equipo para envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión PAV



Fuente: SCT, M-MMP-4-05-028/22

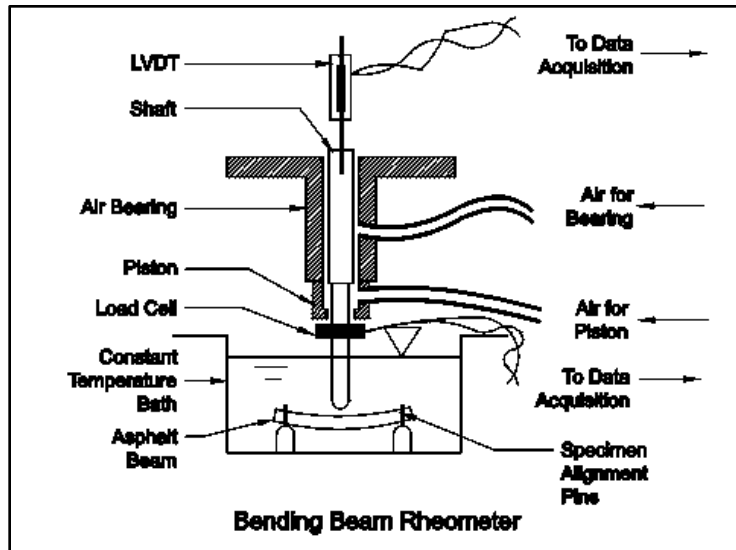
Equipo y Herramientas:

- Equipo para envejecimiento acelerado en vasija de envejecimiento a presión PAV, un sistema de equipamiento que consta de vasija de presión, hornos, dispositivo de control de presión, temperaturas, medición de presión y temperatura.
- Vasija de envejecimiento a presión PAV.
- Bandejas de acero inoxidable de forma cilíndrica.
- Horno de Vacío.
- Sistema de Vacío.
- Aire embotellado comercial.

2.2.2.7. Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (Bending Beam Rheometer – BBR)

Esta prueba determina la rigidez o fluencia en flexión del cemento asfáltico bajo cargas constantes mediante el equipo denominado reómetro de viga a flexión. Este ensayo es aplicable a materiales con valores de rigidez en flexión entre 20 MPa y 1 GPa, valores de deformabilidad en flexión de 50 nPa^{-1} a 1 nPa^{-1} , y puede ser usado con material original o envejecido, el equipo de ensayo está diseñado para operar en un rango de temperatura desde -36 hasta 0°C . (AASHTO T 313-12)

Figura II-10. Equipo de Reómetro de flexión de viga



Fuente: AASHTO T 313-12

Equipo y Herramientas:

- Sistema de ensayo Reómetro de viga de flexión (BBR), consiste en:
- Un marco de carga para la viga de ensayo
- Un baño líquido a temperatura controlada que permite a la viga tener la temperatura de ensayo, la cual deberá ser entre -36 y 0°C .
- Un componente de registro de datos controlado automáticamente, tal que registre la carga con una precisión de 2.5 mN, la deflexión de la viga con precisión de 2.5 μm y la temperatura del baño líquido de 0.1 $^{\circ}\text{C}$
- Moldes para las probetas, cuya dimensión una vez desmoldada sea de 6.35 ± 0.05 mm de espesor por 12.70 ± 0.05 mm de ancho y 127 ± 2.0 mm de largo.

2.3. PROTOCOLO AMAAC

El protocolo AMAAC contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño. El método lo establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica en función de la importancia de la carretera y determinada por el nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere.

2.3.1. Mezcla asfáltica

Una mezcla asfáltica es una mezcla elaborada con agregados pétreos y un material asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los componentes de su proporción relativa en mezcla. Puede elaborarse en frío o en caliente, en planta o en el lugar.

Para el diseño de la mezcla asfáltica de esta investigación se tiene en consideración que se llegara hasta el Nivel II con un tránsito entre 1.000.000 a 3.000.000 millones de ejes equivalentes y pruebas correspondientes al diseño volumétrico, susceptibilidad al daño inducido por la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente.

2.3.2. Diseño volumétrico

Se deben establecer los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica los cuales están en función del nivel de tránsito, densidad requerida, nivel de compactación, VMA, tamaño nominal, vacíos llenos de asfalto y la relación filler asfalto, además el contenido óptimo de asfalto será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla del 4%. La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio. (AMAAC PA-MA 01/2013, p.12)

2.3.3. Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)

Determina la resistencia al daño inducido por humedad, también conocida como resistencia retenida de una mezcla asfáltica compactada. La resistencia retenida es importante para establecer si una mezcla es susceptible a la acción de la humedad. Para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de TSR=80%. (AMAAC RA 04/2010)

2.3.4. Susceptibilidad a la deformación permanente de una mezcla asfáltica

Para revisar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se podrán emplear los siguientes ensayos: (AMAAC RA 01-02-03/2011)

- **Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera con el analizador de Rueda Cargada de Hamburgo (HWT) (AMAAC RA 01/2011):** Tiene por objeto determinar la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla asfáltica debido a la debilidad en la estructura del agregado pétreo, inadecuada rigidez del asfalto o daño por humedad.
- **Susceptibilidad a la deformación permanente por rodera por medio de analizador de pavimentos (APA) (AMAAC RA 02/2011):** Evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas, permitiendo predecir con mayor certeza el comportamiento en campo de dichas mezclas. Se busca tener carpetas asfálticas más durables, con mayor resistencia a los esfuerzos producidos por el paso de vehículos.
- **Resistencia a la deformación plástica mediante el ensayo de Pista Española (AMAAC RA 03/2011):** La prueba consiste en someter una mezcla asfáltica compactada, al paso de una rueda en condiciones predeterminadas de presión y temperatura, midiendo periódicamente la profundidad de la deformación producida.

CAPÍTULO III – ESTADO DEL ARTE

A continuación, en la tabla III-1, se presentan una serie de documentos que fueron de gran importancia en esta investigación.

Cada documento generó un panorama de las diferentes y posibles integraciones que tienen las colillas de cigarrillo en el ámbito de las mezclas asfálticas, es decir, han aportado los diferentes usos, ya sea en cemento asfáltico o mezclas, que tratamiento han tenido y cuales han presentado mejoras, de igual forma, propiedades mecánicas que mejoraron o decrecieron por su uso, en otros términos, los documentos fueron la base para estructurar un plan de desarrollo en donde las fibras de las colillas pudieran ser utilizadas de la forma más adecuada y que proporcionaran un aporte que permitiera mejoras en propiedades mecánicas del material como lo es en este caso la mezcla asfáltica.

El Dr. Abbas Mohajerani (Mohajerani, A., et al. 2017) profesor investigador de, The University Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT University) de Australia. Realizó una investigación acerca de una mezcla asfáltica en caliente con adición de colillas de cigarrillo cubiertas por diferentes tipos de cemento asfáltico y parafina.

Las cantidades utilizadas de colillas de cigarrillo cubiertas con parafina y cemento asfáltico en la investigación fueron de 10, 15 y 25 kg/m³, además, la metodología utilizada para realizar los especímenes y las pruebas de desempeño fue por el método Marshall. Por ejemplo, los valores evaluados de estabilidad y flujo, presentaron mejoras respecto a una mezcla de referencia, y los valores de VMA y VFA cumplieron los requisitos mínimos aprobados por la normativa utilizada en Australia. Finalmente, concluyeron que la adición de colillas de cigarrillo puede ser una alternativa de uso para mitigar el impacto ambiental que producen y además, aportan buenas propiedades a las mezclas asfálticas.

Adicional a lo anterior el Dr. Tareq Rahman en compañía del Dr. Abbas Mohajerani y el Dr. Filippo Giustozzi (Rahman et al., 2020) realizaron una investigación modificando un cemento asfáltico con colillas de cigarrillo.

Las colillas se adicionaron al asfalto en diferentes porcentajes con el fin de evaluar cuál representaría un mejor comportamiento en él, comparado con un convencional, a su vez los parámetros que se analizaron fueron: grado de penetración, viscosidad reológica, y el porcentaje de aglutinante. Al analizar los valores se concluyó que, un cemento asfáltico con adición de colillas de cigarrillo mejoró el aglutinamiento del asfalto cuando es transportado, así mismo, cumple con los rangos de viscosidad y adicional disminuye los grados de penetración, todo esto evaluado bajo la normativa ASTM y las estipuladas por el país de Australia.

Los investigadores Yi CUI, Zhao-rong WU, Yali LI y Hang YANG (Yi CUI et al., 2018) realizaron un estudio experimental para determinar el contenido óptimo de colillas de

cigarrillo en una mezcla bituminosa. En él se presenta un porcentaje de asfalto de 4.8% como el contenido óptimo, las cantidades propuestas de colillas de cigarrillo fueron de 1, 1.5 y 2% respectivamente, la metodología utilizada fue el método Marshall, se analizó la estabilidad, flujo y resistencia del pavimento por temperatura con y sin modificación, se concluyó que el porcentaje de 2% es el más adecuado para valores de estabilidad y resistencia por temperatura, y el de 1.5% es acorde para el flujo, por lo cual, se determina que el 2% es el contenido que más se acerca a satisfacer la mezcla con adición de colillas.

En el año 2021 el investigador Dr. Abbas Mohajerani (Mohajerani et al., 2021) realizó un análisis integral de lixiviados para examinar la efectividad y eficiencia del método de encapsulación para la prevención de lixiviados, de metales pesados de Colillas de cigarrillo, e investigar las propiedades físicas de estas cuando están encapsuladas en cera y betún, otra variable que se estudio fue la absorción de las colillas de cigarrillo. los resultados que se obtuvieron demostraron que la absorción de agua disminuyó significativamente del 383% para las colillas de cigarrillo sin encapsular al 4% y 5% cuando están encapsulados en betún y cera. Se utilizaron imágenes de TC de micro rayos X para estudiar y analizar la porosidad y la estructura de los poros, así mismo se determinó una disminución sustancial de la porosidad del 66% al 0,5% cuando las colillas están encapsuladas con betún.

Por otro lado, los investigadores Sen Han, Shihao Dong, Yuanyuan Yin, Mengmei Liu, Yamin Liu (Han et al., 2020), realizaron una investigación de un cemento asfáltico modificado con cal en diferentes proporciones y finura, la finura se determinó con la malla pasa No. 200, 300 y 400, se realizaron diferentes pruebas, para este caso la de penetración, viscosidad dinámica, ductilidad, densidad y módulo reológico, se pudo destacar que, a mayor finura de la cal mayor es la porosidad y más fuerte la adsorción, lo que hace que la distribución de los productos de reacción y de adsorción sea más uniforme en el asfalto. Finalmente, el efecto de modificación de la cal que pasa la malla No. 400 sobre el asfalto fue la que dio mejores resultados en este proceso y el asfalto alcanzó su valor máximo entorno al 10% de contenido de cal.

Los investigadores Halenur Kurmus y Abbas Mohajerani (Kurmus & Mohajerani, 2020) estudiaron acerca de los posibles usos en lo que se podría ver aplicada la fibra de colilla de cigarrillo, por tal motivo comentaron lo siguiente. El volumen estimado de cigarrillos producidos en todo el mundo, la persistencia, así como el contenido tóxico después del uso, respaldan la necesidad de estrategias eficientes de eliminación y reciclaje para resolver una catástrofe global de desechos de CB.

Entre las estrategias de eliminación existentes para los desechos CB recolectados incluyen la incineración y el vertido, sin embargo, ambas técnicas se consideran insostenibles e ineficientes debido a preocupaciones ambientales y económicas. Por lo tanto, este estudio ha revisado una posible tecnología sobre la valorización de residuos CB y examinó la viabilidad de la investigación realizada. De lo comentado se han estudiado once propuestas y prácticas de valorización de CB, las cuales incluyen; (1) mezcla en ladrillos de arcilla

cocida, (2) mezcla en hormigón asfáltico, (3) producción de pulpa de celulosa, (4) utilización como inhibidor de corrosión y (5) preparación de carbón poroso.

En el año 2020 los investigadores Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (Rahman & Mohajerani, 2020) se enfocaron en el posible reciclaje de CB encapsulados con betún en asfalto de masilla de piedra (SMA). Los CB residuales fueron procesados y encapsulados con betún clase PMB A10E. Las muestras de asfalto con masilla de piedra se prepararon reemplazando los agregados gruesos en un 1 %, 2 % y 3 % (en peso) con CB encapsulados con betún. Entre los valores analizados se encuentra la estabilidad de Marshall, el flujo, el módulo elástico, las propiedades volumétricas de las muestras fabricadas con SMA y los resultados se compararon con los de las muestras de SMA de control preparadas sin CB. Los resultados promedio muestran que el uso de CB encapsulados en las muestras fabricadas en este estudio mejoró la estabilidad y la resistencia a la deformación permanente. Además, la lixiviación de metales pesados de los CB encapsulados se redujo significativamente.

Para el año 2021 los investigadores Piergiorgio Tataranni and Cesare Sangiorgi (La Tataranni & Sangiorgi, 2021), realizaron un estudio preliminar sobre la aplicación directa de filtros de cigarrillo (CF) nuevos para la producción de concreto asfáltico (AC). En el estudio se planteó la posibilidad de que los filtros pueden tener doble función de actuar como agente estabilizador, la primera evitando la separación entre los áridos y el betún durante las operaciones de almacenamiento y transporte, y la segunda, mejorar las propiedades mecánicas del AC final.

Para evaluar los efectos se produjeron y probaron en el laboratorio dos SMA diferentes: uno (marcado SMA 0) con fibras estabilizadoras de celulosa comunes y otro (marcado SMA F) que contenía CF. Los resultados preliminares confirman que la adición de CF triturados como fibras estabilizadoras para mezclas bituminosas podría ser una aplicación factible. Sin embargo, vale la pena señalar que, en este estudio exploratorio, los CF simplemente se trituraron y se agregaron directamente a la mezcla en una sustitución total de las fibras comerciales. Esto podría representar una forma sencilla de reutilizar estos residuos, que pueden reproducirse fácilmente a escala industrial.

Las investigaciones recopiladas anteriormente, presentan un panorama del uso que se le puede dar a las colillas de cigarrillo en el ámbito de los pavimentos y el mejoramiento que pueden tener las mezclas asfálticas al involucrarlas en su estructura. Las evaluaciones realizadas para la obtención de datos fueron mediante diferentes pruebas ejecutadas al cemento asfáltico, así como a la mezcla asfáltica, las cuales, determinaron la existencia del mejoramiento de propiedades mecánicas. Sin embargo, la presente investigación prevé utilizar las colillas de cigarrillo con un pretratamiento, además de, evitar la contaminación de más elementos como el caso del agua, así mismo que estén cubiertas de cal hidratada como un aporte adicional de mejoras a la mezcla y que su evaluación sea a través del protocolo AMAAC, el cual provee por medio de pruebas de laboratorio valores de desempeño que se asemejan a la realidad de los pavimentos.

Tabla III-1. Estado del Arte

Cita	Uso de cal Hidratada	Uso de colillas de cigarrillo	Tratamiento realizado a las colillas de cigarrillo	Tipo de encapsulamiento	Técnica de Evaluación	Metodología usada	Valor de desempeño
Mohajerani, A., et al. (2017)	No	Si	Limpieza con agua y secado en horno a 120°C durante 24 horas	Cemento asfáltico y parafina	-	Método Marshall	Estabilidad, flujo y vacíos
Rahman et al., (2020)	No	Si	Limpieza con agua y secado en horno a 120°C durante 24 horas	Cemento asfáltico convencional y modificado con polímero	-	-	Aglutinamiento, grado de penetración, módulo reológico
Yi CUI et al., (2018)	No	Si	Secar en horno a 105°C, posterior se cortan de tres a cinco fracciones relativamente iguales	Cemento asfáltico	-	Método Marshall	Estabilidad, flujo, vacíos, resistencia a altas temperaturas
Han et al., (2020)	Si	No	-	-	Criterios de desempeño de los cementos asfálticos	-	Penetración, viscosidad dinámica, ductilidad, densidad, módulo reológico
Mohajerani et al., (2021)	No	si	Limpieza con agua y secado en horno a 120°C durante 24 horas	Cemento asfáltico y parafina	Análisis de lixiviados	-	Eficiencia del método de encapsulación, porosidad, absorción.
Kurmus & Mohajerani, (2020)	No	Si	Limpieza con agua y secado en horno a 120°C durante 24 horas	Cemento asfáltico y parafina	-	Propuestas del uso de las colillas de cigarrillo	Factibilidad del aprovechamiento de este residuo
Mathers & Loncar, (2006)	-	si	-	-	-	NA	Mortalidad debido al uso del cigarrillo
Araújo & Costa, (2019)	-	si	-	-	Análisis de la contaminación producida por el desecho de las colillas de cigarrillo en el ambiente marino	-	Nivel de contaminación en el ambiente marítimo
Salamanca & Silva (2019)	Si	Si	Limpieza, corte y acondicionamiento manual, secado a temperatura ambiente	No	Propiedades mecánicas	Método Marshall	Estabilidad, flujo y vacíos
Tataranni & Sangiorgi, (2021)	-	Si	Corte en varias fracciones sin extracción de papel	No	Propiedades mecánicas	Diseño de mezcla tipo SMA	Absorción de las colillas, Contenido de vacíos en la mezcla, resistencia a la tracción, módulo de rigidez, susceptibilidad al agua y resistencia a la deformación

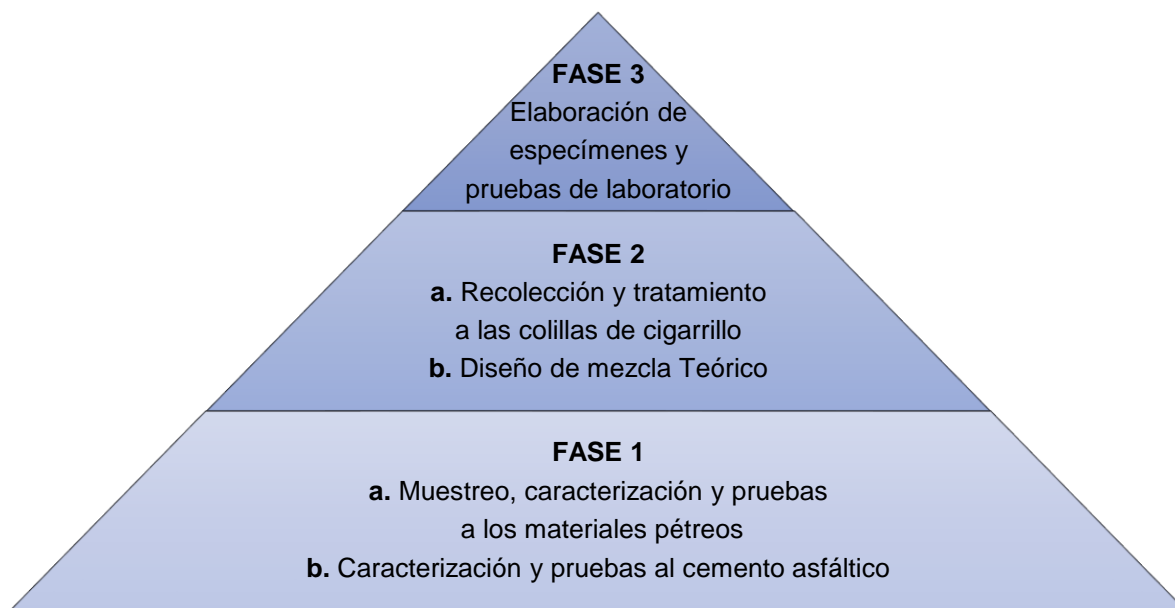
Cita	Uso de cal Hidratada	Uso de colillas de cigarrillo	Tratamiento realizado a las colillas de cigarrillo	Tipo de encapsulamiento	Técnica de Evaluación	Metodología usada	Valor de desempeño
Han et al., (2019)	Si	-	-	-	Diferencia de polaridad entre el asfalto y el agregado antes y después de la modificación con cal hidratada, y las variaciones del asfalto SFE antes y después de la modificación.	energía libre superficial (SFE).	Horno de película delgada rodante (RTFO) y recipiente de envejecimiento a presión (PAV).
Rahman & Mohajerani, (2021)	No	Si	Secado en horno a 110°C y lavado	Cemento asfáltico	El análisis microscópico y de superficie realizado con Leica DM2500 y Bruker alicona, conductividad térmica del asfalto utilizando TLS 100	Método Marshall	Análisis microscópico y de superficie, Conductividad Térmica, Resistencia eléctrica, porcentaje de vacíos, estabilidad y flujo
Rahman et al., (2020)	No	Si	Secado en horno a 110°C, limpieza y trituración	No	Propiedades mecánicas del asfalto y de la mezcla tipo SMA	Método Marshall	Análisis volumétrico, estabilidad y flujo Marshall, comportamiento viscoelástico dinámico del asfalto, barrido de amplitud (LAS) para criterios de fatiga
Hamood Al-Ameri & P.J. Ramadhansyah, (2022)	No	Si	Secado en horno a 130°C por 48h, trituración de fibras,	Cemento asfáltico	Evaluación de las propiedades mecánicas de un cemento asfáltico y una mezcla asfáltica	Método Marshall	Penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad, Estabilidad, Flujo, análisis volumétrico
Jin et al., (2019)	No	Si	Corte de colillas hasta una reducción de 0.6mm, Secado en horno a 105°C	No	Evaluación de las propiedades mecánicas	Método Marshall	Estabilidad, Flujo, Presencia de surcos
Liu et al., (2021)	No	Si	Desinfección y secado a 105°C durante 24 h en horno, desesterificación, dispersión, separación y secado en la producción de fibra de diacetato de celulosa de desecho	No	Evaluación de las propiedades mecánicas y de desempeño	Método Marshall	Estabilidad Marshall, ahuellamiento, flexión a baja temperatura, susceptibilidad a la humedad y fatiga
Rahman & Mohajerani, (2020)	No	Si	Se secaron en horno a 110°C durante 24 horas para desinfectarlas y eliminar humedad	Cemento asfáltico	Evaluación de las propiedades mecánicas	Método Marshall	Estabilidad Marshall, flujo, modulo elástico y propiedades volumétricas
Salamanca (2023)	Si	Si	Secado a temperatura ambiente, extracción de papel, corte longitudinal y desfibrar	Cemento asfáltico	Evaluación del desempeño de propiedades mecánicas	Protocolo AMAAC	Volumetría, Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente

Fuente: Propia

CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la metodología se dividió en 3 fases compuesta por cada paso a seguir para el buen desarrollo de la investigación. Cada fase describe la metodología de diseño para los materiales que serán utilizados con su respectiva norma de evaluación, así como para el diseño de mezcla que se propone y el cual provee mejorar el desempeño de las propiedades mecánicas, así como desempeño. La descripción se menciona a continuación.

Figura IV-1. Fases de la Metodología a desarrollar



Fuente: Propia

4.1. FASE 1

Para inicios de desarrollo se debe obtener los materiales pétreos de un banco de materiales, los cuales deben ser, grava triturada, Gravilla triturada y arena triturada. Estos son los materiales que van a componer el diseño de la mezcla asfáltica, posterior, se le deben realizar las respectivas pruebas de calidad para considerar que son adecuados y cumplen los criterios de diseño, de igual forma se debe elegir un tipo de cemento asfáltico convencional sin ningún tipo de aditivos o alteraciones y posterior realizar las respectivas pruebas de desempeño, con el fin de considerarlo en la mezcla. Las pruebas que se realizaran al agregado pétreo y cemento asfáltico se describen de forma posterior.

4.1.1. Extracción y recolección de los materiales pétreos

Para llevar a cabo la extracción, así como la recolección de los materiales pétreos fue necesario localizar dos bancos de materiales y posterior dirigirse a ellos. Estos bancos quedan ubicados en la vía Morelia – Salamanca llamados San Juan "SUPRA" y

“SUPRAMAX”, en ellos se adquirió todo el material necesario para el diseño de mezcla asfáltica y pruebas a los materiales.

4.1.1.1. Método de Muestreo para agregados

El objetivo del muestreo consiste en obtener una muestra o porción representativa del material a utilizar para el respectivo estudio. (ASTM D 75)

El muestreo se realizó directamente en el banco de material ubicado en la vía Morelia – Salamanca el cual lleva como nombre San Juan “SUPRA”, de este banco se obtuvo material como lo es: Grava triturada, Gravilla triturada y de otro Banco denominado “SUPRAMAX”, se obtuvo la arena Triturada, posterior se almacenaron en lonas y fueron llevados al lugar de destino.

4.1.1.2. Secado del material

El secado del material se estableció localizando una zona en donde se logrará extenderlo de manera uniforme y con gran exposición solar, con el fin de realizar un secado de forma natural previa a su uso.

Lo primero que se debe realizar es, limpiar la zona en donde será extendido el material, con el fin de eliminar cualquier elemento ajeno a este y evitar que se contamine, como segundo paso es moverlo en lapsos de tiempo aproximadamente de treinta a sesenta minutos, de esta manera todas las áreas estarán expuestas al sol.

Al finalizar el proceso se debe almacenar nuevamente el material en lonas, ubicarlos en una zona en donde este alejado de cualquier elemento que lo pueda contaminar y posterior, dosificarlo en las cantidades necesarias para las pruebas correspondientes.

4.1.1.3. Pruebas a los materiales pétreos

Los materiales pétreos deben ser producto de trituración y estos se dividen en fracción gruesa (grava) y fracción fina (arena), para cada uno existen pruebas específicas como requisitos de calidad que deben cumplir al momento de utilizarlos en el diseño de mezcla asfáltica.

Los materiales de fracción gruesa se le deben realizar las siguientes pruebas: Densidad, desgaste de los Ángeles, desgaste Microdeval, intemperismo acelerado, caras fracturadas, partículas planas y alargadas, desprendimiento por fricción, así como cumplir con todos los rangos y valores estipulados por la norma para su debido uso.

4.1.1.4. Práctica estándar para la reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba

El método de prueba del cuarteo tiene como objetivo reducir las muestras de gran tamaño de agregado, al tamaño apropiado para ensayos. El material se debe apilar en forma de cono truncado, mezclándolo desde la parte inferior hasta la superior, posterior se divide el cono en cuatro partes iguales, finalmente se toma material de los extremos opuestos las veces necesarias para la prueba, si se cambia de prueba se debe realizar nuevamente el cuarteo, otra forma es realizarla con el equipo de cuarteo.

4.1.1.5. Pesos volumétricos

La prueba de peso volumétrico que se le debe realizar a los agregados pétreos, tanto gruesos como finos se encuentra dividida en dos partes, la primera se denomina peso volumétrico seco y la segunda lleva como nombre peso volumétrico varillado, las cuales se explicaran a continuación: (ASTM C-29/C 29M-97)

- **Peso volumétrico seco (densidad seca mínima)**

La prueba consiste en llenar una tara de un volumen conocido, 2787 cm³ para las arenas y 5800 cm³ para las gravas, esto se debe hacer en capas constantes con una elevación de 5 cm para el vaciado del material, conforme a se llena la tara la altura debe ir aumentando cada 5 cm, una vez se llena por completo se debe enrasar y su peso se registra por medio de una balanza para cálculos pertinentes.

- **Peso volumétrico varillado (densidad seca máxima)**

La prueba consiste en llenar una tara de un volumen conocido, 2787 cm³ para las arenas y 5800 cm³ para las gravas, en capas constantes con una elevación de 5 cm para el vaciado del material, conforme se va llenando la tara por medio de una varilla se realizan 25 golpes de forma distribuida al material, su objetivo es reducir los vacíos y permitirle un mejor acomodo en el recipiente, la altura del vaciado debe ir aumentando cada 5 cm y una vez llenado se debe enrasar y su peso se registra por medio de una balanza para cálculos pertinentes.

4.1.1.6. Ensayo para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos

El método de prueba para en análisis granulométrico permite determinar la distribución de los tamaños de las partículas de agregado fino y gruesos por medio de un juego de mallas, para su desarrollo se debe tomar una porción de cada material pétreo según normativa y se pasa por las mallas correspondientes según si es agregado grueso o fino, posterior el material obtenido en cada malla se pesará en una balanza y su valor será registrado para cálculos respectivos.

4.1.1.7. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso

Este valor de gravedad específica bruta y aparente es necesario para el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla, así mismo el valor de absorción presenta un porcentaje de la cantidad de fluido (agua) a la cual puede estar expuesto el agregado.

Su procedimiento consta en sumergir el material en agua por 24h, posterior sacarlo del agua, secarlo superficialmente y registrar su masa, seguido se determina su masa sumergida en agua, por último, se debe secar en horno a una temperatura de 110°C hasta masa constante y se debe pesar en condición seca, finalmente se obtienen tres pesos y con esto concluye la prueba.

4.1.1.8. Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Máquina de los Ángeles

El método de prueba de desgaste de los ángeles requiere tener una granulometría previa con el fin de elegir la composición de los tamaños de la muestra, la masa y carga abrasiva. Para el presente trabajo se requiere material que pase la malla ¾" y se retenga en la malla ½" así mismo que pase la malla ½" y se retenga en la malla 3/8", posterior con la normativa designada para el desarrollo de la prueba se debe elegir la cantidad de material necesario para tamizarlo, así mismo el número de esferas requerido.

En la Máquina de los ángeles se debe introducir el material ya separado mediante tamiz, junto con las esferas, posterior ponerlo en marcha durante 500 revoluciones; una vez termina el proceso es necesario sacar el material y tamizarlo por la malla No.12, finalmente se pesa el material retenido en la malla y se registra la pérdida de material por la prueba.

4.1.1.9. Determinar la resistencia a la degradación del agregado pétreo grueso por abrasión en la Máquina Micro-Deval

El método de prueba consiste en obtener la muestra del agregado conforme a las especificaciones del ensayo, estas deben ser separadas en fracciones individuales de acuerdo al tamaño nominal del material, la cantidad debe ser de 1 500 g, seguidamente se debe lavar y secar en horno hasta masa constante, una vez se realice lo anterior, se deben preparar los contenedores del equipo con el material, agregar dos litros de agua y dejar acondicionar durante un lapso de tiempo, posterior adicionar la carga abrasiva que corresponde a los balines con un peso de 5000 g totales, ocurrido esto se pone en funcionamiento el equipo por un tiempo de 2h. Concluidas las horas se saca el material, se separa de los balines y se lava sobre el tamiz No. 16, luego es llevado al horno y se registra el peso final después de seco.

4.1.1.10. Determinar la resistencia al intemperismo acelerado

Para realizar la prueba lo primero que se debe preparar es el sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Para este caso, se utilizó el sulfato de sodio, fueron 350 g por litro de agua, se

prepara lo suficiente para realizar la prueba, una vez se tiene la solución, esta debe cumplir con una gravedad específica la cual se toma haciendo uso del densímetro y debe encontrarse en un rango de 1.151 a 1.174. Cumplido los parámetros para el uso del sulfato de sodio, se debe preparar el material pétreo, este debe ser separado según las mallas que recomienda el ensayo, seguidamente se lavara y se secura hasta masa constante.

El material pétreo debe ser sumergido en sulfato de sodio por un mínimo de 16 horas y no más de 18 horas cuidando de que este totalmente cubierto, pasado el tiempo se debe sacar y meter al horno a 110°C hasta masa constante, este proceso se realizó durante 5 ciclos, al final de la prueba se debe lavó el material con agua a temperatura de 43 ± 6 °C con el fin de eliminar todo el sulfato de sodio del agregad. Posterior se agrega un fragmento de roca en cloruro de bario y si genera un color blanco se debe seguir lavando el material, pero si queda transparente quiere decir que el material está totalmente limpio de sulfato de sodio, lo cual fue lo ocurrido, si es el caso se seca en horno a masa constante y se tamiza por la malla (5/16") designada para una TN de (3/4") tomando su masa final. Con la toma de la masa final se determina el cálculo de intemperismo acelerado y da por concluida la prueba.

4.1.1.11. Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

La prueba de porcentaje de particular fracturadas consistió en tamizar una cierta cantidad de material por la malla No.4, dependiendo del tamaño nominal del agregado debe haber una cantidad específica de retenido, que para este caso es de 1 500 g con un TN de $\frac{3}{4}$ ". Con esto se procedió a ejecutar la prueba, la cual consistió en extender todo el material y comenzar a analizar agregado por agregado, separando las partículas que tienen dos o más caras fracturadas, una cara fracturada y ninguna cara fracturada, al final del análisis se pesó el agregado obteniendo las masas y se utilizó la formula designada por el ensayo para calcular el porcentaje de partículas con una, dos o más caras fracturadas, así como de ninguna cara fracturada.

4.1.1.12. Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

El equipo utilizado en la prueba se estableció con una relación de abertura de 1:5, seguidamente se preparó la muestra de agregado según el tamaño nominal, que para este caso es de $\frac{3}{4}$ " igual a 5000 g, esta cantidad de material se tamizó por las mallas designadas para agregado grueso, con el fin de obtener 100 partículas aproximadamente para cada fracción, se debió registrar su masa, posterior se pasó cada fracción de agregado por la posición del calibrador verificando la longitud máxima y luego verificando el espesor; Si se cumple lo anterior se considera planas y alargadas de lo contrario es no planas y alargadas, al final se determinó las masas por cada grupo al igual que los cálculos correspondientes.

4.1.1.13. Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos para mezclas asfálticas

El ensayo consiste en separar la muestra en los tamices que pasa la malla 3/8" y retiene 1/4", lavarlo para quitar el polvo y secarlo al horno hasta masa constante. Una vez hecho lo anterior lo siguiente es separar dos porciones de 50 g para realizar la prueba por replica, teniendo el agregado se calentó a la temperatura indicada al igual que es asfalto, siendo por cada 50 g de agregado 2,5 g de asfalto, posterior se dejó enfriar para ser colocados en frascos de vidrio con 200 ml de agua a 25 grados por un periodo de 15 horas, pasado este tiempo se les extrae el agua y se agregan otros 200 ml, se instalan en el agitar mecánico por un periodo de 3 horas en agitación, finalizada la agitación se sacaron las partículas y se evaluó visualmente el desprendimiento de la película de asfalto para cada una.

Terminado los ensayos al agregado grueso, los materiales de fracción fina también deben cumplir unos requisitos de calidad los cuales son: Densidad relativa y absorción, equivalente de arena, porcentaje de angularidad y azul de metileno.

4.1.1.14. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino

El valor de densidad del agregado fino se requiere para determinar la relación de masa – volumen y para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla combinada al igual que la absorción, la cual indica la cantidad de asfalto que absorberá el agregado.

Su procedimiento se ejecutó agregando material fino con un contenido de agua del 6% en una bolsa térmica por un lapso de tiempo igual a 24h. Pasado el tiempo se extendió en una charola realizando movimientos para llegar a la condición saturada superficialmente seca por medio de un molde y pisón formando un cono con el material, el cual al retirar el molde cayó una fracción leve del material. Si no ocurre lo comentado es porque el material presente mucha humedad y el agregado retendrá la forma del molde, por otro lado, cuando existe la caída ligera del agregado indica que se ha alcanzado la condición superficialmente seca e inmediatamente se debe pesar 500 g.

El paso a seguir es llenar un frasco Le Chatelier con agua destilada a una altura de 200 ml, seguido se agregó una porción de arena y se llenó el frasco hasta una altura de 450 ml con agua, se dejó reposar por 15 minutos y se comenzó a mover de forma circular el frasco con el fin de eliminar burbujas, realizado esto, se pesó y se tomó el dato. Finalmente, el material se secó en horno hasta masa constante y se registró su peso.

4.1.1.15. Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino

La ejecución de la prueba consta en primer instancia en separar el material necesario para desarrollarla, para este trabajo se realizó por el método A con un total de $190 \pm 0,2$ g los cuales son separadas por los tamices que pasan la malla No.4 en cantidad diferentes, lo siguiente es calibrar el cilindro según lo descrito por el manual, seguidamente se debe lavar

y secar el medidor cilíndrico, registrar su masa y centrarle en el equipo, posterior verter a través del embudo la muestra total y ser enrasada con la espátula en un solo movimiento, se debe tener cuidado de no mover el cilindro, finalmente se debe registrar la masa del cilindro con agregado fino y estos valores considerarlos para los respectivos cálculos.

4.1.1.16. Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino

Para realizar la prueba de equivalente de arena lo primero que se debe hacer es llenar una probeta a una altura de 10 cm o 4" con solución de trabajo, seguido se llena una capsula con material fino (arena) y se agrega a través de un embudo a la probeta, realizado esto se deja reposar durante 10 minutos. Pasado el tiempo se coloca un corcho en la probeta y se deberá agitar de forma horizontal realizando 90 ciclos en un lapso de 30 segundos. Seguidamente se llena la probeta hasta una altura de 15" procurando limpiar las paredes de cualquier residuo de material, finalmente se deja reposar por un lapso de 20 minutos y se mide la altura del material arcilloso, así mismo se introduce el piso dejándolo asentar para registrar la altura del nivel superior el cual corresponde a las arenas.

4.1.1.17. Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla

La prueba de azul de metileno para ejecutarla se realizó lo siguiente. Lo primero fue obtener 1 gramo de material que pasa la malla numero 200 (0,075 mm) y agregarlo en un vaso de precipitado de 100 ml. Seguidamente se agregó 30 ml de agua destilada, esta mezcla se colocó en agitación a 360 Rpm durante 5 minutos, pasado el tiempo se agregaron 1 ml de azul de metileno recuperando una gota y realizando una esfera sobre un papel blanco, esto se debe hacer cada minuto hasta que la gota pinte un aro de color azul celeste. Si pasados 12 intentos desde la primera gota, y no se llega al azul celeste, la prueba termina y no cumple para azul de metileno por normativa, y hace referencia a la poca reactividad que tiene la arena y en especial los finos que la componen, si el caso es que el material cumple como ocurrió para el material seleccionado, se debe reportar cuantas gotas menores a 12 cumple el material para azul de metileno.

Una vez los requisitos de calidad de los materiales son acordes con los valores exigidos por la normativa para mezclas asfálticas de alto desempeño, ya se pueden considerar incluirlos en el diseño de la mezcla asfáltica sin problema alguno.

4.1.2. Caracterización del Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico se seleccionará en función del grado PG (Performance Grade). En este caso no tendrá ningún agente modificador, esto quiere decir que debe ser un asfalto original, posterior, se determina su carta de viscosidad usando el viscosímetro rotacional con el fin de obtener las temperaturas de mezclado y compactación adecuadas para el diseño de mezcla asfáltico.

4.1.2.1. Punto de Inflamación de Cleveland

Se debe verter en la copa abierta de Cleveland el cemento asfáltico previamente calentado hasta la marca de aforo que se requiere, seguidamente se enciende la flama y se ajusta la copa sobre un soporte sobre ella evitando el fuego directo, se debe aplicar calor a la muestra de manera que su temperatura aumente a razón de 14 a 17°C/min, hasta alcanzar una temperatura aproximada de 60°C abajo del punto de inflamación probable, a continuación, se reduce el calor a la copa de manera que al llegar la muestra a 30°C abajo del punto de inflamación probable, el incremento de temperatura sea de 5 a 6°C.

Se registrará la temperatura del termómetro ubicado en la muestra de asfalto cuando al pasar sobre ella un aplicador de llama, se presente una pequeña flama instantánea o destello en cualquier punto de la superficie.

4.1.2.2. Viscosidad Rotacional Brookfield

El ensayo de viscosidad consistió en lo siguiente: la muestra se debe preparar y vaciar a un recipiente predeterminado por norma, se agregaron 10.2 gramos de cemento asfáltico el cual se coloca en una cámara térmica de prueba durante 20 minutos a una temperatura de 135°C y con la aguja introducida en él para acondicionarlo, pasado el tiempo se corre la prueba ajustando el rotor de forma manual, y ajustando las revoluciones por minuto en el equipo, esto con el fin de estar en el rango permitido por el laboratorio para la toma de la viscosidad. Del equipo se tomaron tres lecturas, una por minuto, promediando las viscosidades para obtener la final, de igual forma se recomienda reportar el valor del rotor, las revoluciones por minuto y la viscosidad.

4.1.2.3. Punto de Reblandecimiento

La prueba consiste en agregar asfalto a la temperatura necesaria de fluidez en un par de anillos con dimensiones estipulados por norma, estos se dejan reposar por un lapso de tiempo igual a 30 minutos con el fin de que el cemento asfáltico este a temperatura ambiente, pasado el tiempo los anillos se pueden enrasar eliminando el exceso de asfalto con una espátula caliente para facilitar el corte, seguidamente se ingresan en agua a una temperatura de $5 \pm 1^\circ\text{C}$ por un lapso de 15 minutos, posterior, se sacan los anillos, se montan en el soporte designado con una esfera de peso estándar cada una y un termómetro que pueda leer las lecturas del cambio de temperatura en el agua, así mismo se agregan 500 ml de agua previamente fría y se realiza la prueba. Para la ejecutar el ensayo se debe colocar el vaso de precipitado en una parrilla eléctrica o mechero con incrementos de temperatura de 5 °C con lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 minutos. Posterior, se registra la caída de cada anillo con la temperatura a la cual se encuentra en ese momento, cabe resaltar que las temperaturas no deben diferir en más de 1°C de lo contrario se debe repetir la prueba.

4.1.2.4. Módulo Reológico de corte dinámico

La preparación de la muestra se realiza de la siguiente manera. De la muestra de cemento asfáltico se debe tomar una porción necesaria para llenar un molde de silicón con 10 g de material, se aplicará el calor indispensable para fluidificarlo cuidando que la temperatura alcanzada no sea mayor de 163°C y que no se formen burbujas de aire. Una vez se tiene la muestra se debe llevar al reómetro, sobre el plato inferior montado se vacía la muestra centrada, se acercan los platos del equipo para presionar la muestra en ellos, hasta generar una distancia entre plano de 0,05 mm, seguidamente se recorta cuidadosamente el exceso del material que sobresale del perímetro del plato superior utilizando una herramienta con filo y previamente calentada.

Una vez el equipo y la muestra han sido preparados, se calienta la muestra utilizando la cámara ambiental, con el fin de alcanzar la temperatura de prueba, posterior el ensayo iniciará cuando exista un rango de $\pm 0,1$ °C por lo menos 10 minutos. Iniciada la prueba se aplicarán 10 ciclos de una deformación o esfuerzo cíclico de valor predeterminado a una frecuencia de 10 rad/s. Hecho lo anterior se aplican otros 10 ciclos en las mismas condiciones y se registran las lecturas correspondientes. Con las lecturas registradas automáticamente, el sistema de control y registro de datos del reómetro, al procesarlas se obtiene el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ).

4.1.2.5. Envejecimiento del cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)

Para el envejecimiento del cemento Asfáltico mediante RTFO se deben agregar 35 g del material en unos recipientes de vidrio predeterminado por norma, posterior se debe registrar el peso del recipiente más asfalto una vez se encuentre a temperatura ambiente. Seguidamente se ubican en el horno el cual esta previamente acondicionado a 160°C durante 80 minutos, el número de contenedores utilizados será el necesario para obtener una muestra de residuo suficiente para evaluar pruebas posteriores. Pasado el tiempo comentado se sacan los contenedores, se dejan enfrían, y se registra su masa, con estos valores se puede calcular la pérdida de masa del material cuando están sometidos a un primer envejecimiento, de igual forma, el material de los vasos debe ser agregado a charolas para ser llevado al equipo PAV, lo cual comprende en una muestra 50,1 g. Con lo comentado culmina la prueba para un primer envejecimiento del cemento asfáltico.

4.1.2.6. Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión PAV

El envejecimiento mediante el PAV se debe emplear el residuo del cemento asfáltico que se obtiene en la prueba del horno rotatorio de película delgada RTFO. Cada bandeja utilizada en el equipo PAV debe contener $50 \pm 0,5$ g del cemento asfáltico tratando de hacer una distribución uniforme sobre la superficie, Posterior, se montan en el soporte para llevarlas dentro de la vasija de presión, hay que resaltar que antes de realizar este proceso

el equipo se debe calibrar hasta llegar a una temperatura de 100 °C, así mismo, debe aplicar una presión de aire de $2,1 \pm 0,1$ MPa para llegar a la temperatura de acondicionamiento. Durante el ensayo se debe cuidar que la presión no sea menor de 2,1 MPa o que la temperatura no disminuya ya que esto ocasiona que la muestra se dañe. La prueba se corre manteniendo la temperatura y la presión de aire controladas durante un tiempo estimado de $20 \text{ h} \pm 10$ minutos el cual genera un envejecimiento a largo plazo en el asfalto.

4.1.2.7. Desgasificación al Vacío de las Muestras Envejecidas (Vacuum Degassing Oven - VDO)

El ensayo en el equipo VDO se realizó considerando las siguientes pautas. El horno tuvo que ser precalentado a una temperatura de $170 \pm 5^\circ\text{C}$ con una presión igual a cero, por otro lado, las muestras que salieron del PAV son cambiadas de recipiente a los recomendados para el equipo VDO y son trasladadas a él cuando se alcance la temperatura mencionada el cual proporciona un acondicionamiento del equipo.

Una vez colocados los recipientes se realiza un pre acondicionamiento del material en el equipo durante 15 ± 1 minutos, seguidamente se debe abrir las válvulas del sistema de vacío para reducir la presión a presión absoluta de $15 \pm 2,5$ kPa durante 30 ± 1 minuto. Finalmente, al pasar el tiempo comentado se libera la presión de vacío y se retiran los recipientes, si llegasen a quedar burbujas en la superficie del material, se removerán pasando una flama caliente de un encendedor o un cuchillo caliente.

4.1.2.8. Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (Bending Beam Rheometer – BBR)

La determinación de la resistencia a la flexión mediante el equipo BBR se realiza tomando como muestra el material obtenido en el ensayo del VDO de las muestras envejecidas. Para esto se deben verter en unas viguetas previamente armadas conforme lo estipula la norma para ensayo BBR una muestra de asfalto obtenido del desgasificador vaciando cuidadosamente en las viguetas de forma líquida y tratando de llenarlas uniformemente con el propósito de que no vayan a quedar oquedades que alteren el resultado. Posterior, se deben dejar enfriar durante 1 hora a temperatura ambiente, luego se enrasar en una sola pasada y seguidamente se meten al congelador durante 5 minutos. Pasado el tiempo se retiran del congelador, se desmoldan y se pasan al equipo BBR cuidado de no tomar la viga en la parte central si no en sus extremos, así mismo ubicarla en los apoyos correctamente para dejar corre la prueba, al finalizar se registran los datos obtenidos digitalmente por el equipo y la muestra se dispone a desecharla.

4.2. FASE 2

La recolección de colillas de cigarrillo y el tratamiento que se le dará tienen una gran importancia para el diseño de la mezcla asfáltica, ya que será la principal adición que busca mejorar el mejoramiento de las propiedades mecánicas y de desempeño.

Para iniciar la fase dos se dio por culminado las pruebas a los materiales pétreos y cemento asfálticos, y se da inicio a la recolección y pre tratamiento de las colillas de cigarrillo, así mismo se procede a realizar el diseño de la mezcla asfáltica convencional y modificada. Lo tratado en este apartado se comentará a continuación.

4.2.1. Recolección y tratamiento de colillas de cigarrillo

La recolección de colillas de cigarrillo y su obtención adecuada se tuvo previsto en primera instancia reutilizar envases de plástico y cartón, los cuales fueron adecuados para que las personas depositen las colillas de cigarrillo en ellos, y en segunda instancia ubicarlos en lugares donde frecuentemente haya personas fumando, presentando la idea en establecimientos nocturnos como lo son bares y que quieran contribuir con la recolección.

Conforme se recolectaron las colillas de cigarrillo se les realiza el tratamiento que consta de: Separar la fibra que tiene las colillas de cigarrillo del papel que las envuelve, esto se realiza de forma manual ya que el papel tiene una manera de reciclado y no ser desechado, posterior se realiza un corte de forma longitudinal al filtro, se abre de forma transversal quedando como una especie de alfombra, posterior se limpian de cualquier elemento interno que lleve, como lo son esferas saborizantes, seguidamente se almacenan en contenedores de plástico y se ponen al sol con el fin de eliminar cualquier humedad, finalizado este procedimiento se almacenan y se preparan para ser desfibradas en tamaños menores conservando la longitud de las fibras, adicional poder tratarlas con cal hidratada para ser utilizadas y adicionadas en la mezcla asfáltica al momento de su elaboración.

4.2.2. Diseño de mezcla

Para realizar el diseño de la mezcla asfáltica de forma teórica, primero se deben proponer tres granulometrías con diferentes distribuciones, elegir el tipo de granulometría según la función requerida de la capa asfáltica, también según el número de ejes equivalentes que para este caso es de 1 millón a 3 millones correspondiente a un nivel II según el protocolo AMAAC, seguido determinar si la granulometría es una granulometría densa gruesa o granulometría densa fina, posterior elegir la granulometría adecuada la cual se encontrara dentro de los valores límites (puntos de control) de las mencionadas con el fin de que haya una distribución medianamente uniforme en los agregados.

Una vez realizado lo anterior se debe calcular la cantidad de agregado fino y grueso por espécimen y por la cantidad total de especímenes que se vayan a realizar, posterior la cantidad necesaria de colillas de cigarrillo y cal hidratada en función de la mezcla, para esto se utilizó la fórmula propuesta por el método para calcular la cantidad de material en función del peso de la mezcla, finalmente se deben determinar el contenido mínimo de asfalto para dar paso a la elaboración de los especímenes en laboratorio, así como los tanteos necesarios para realizar el diseño de mezcla cumpliendo con las especificaciones volumétricas que exige el protocolo.

4.3. FASE 3

4.3.1. Elaboración de especímenes

Para la elaboración de las muestras de referencia, así como las que contienen adición de colillas de cigarrillo, inicialmente se debe calcular un contenido de asfalto inicial lo cual se realiza numéricamente a partir de las propiedades medidas en los agregados pétreos y en el cemento Asfáltico, a partir de ello, se debe pesar la cantidad de agregado pétreo necesaria para el tipo de espécimen a realizar.

Seguidamente, se realiza una mezcla asfáltica sin compactar con el contenido de asfalto inicial calculado con anterioridad, en ella se evaluará la Gravedad específica teórica máxima de la mezcla sin compactar (Gmm), la cual sirve para determinar un valor de masa inicial y un valor de Gmb al cual se desea llegar para obtener un 4% de vacíos, posterior, se fabrica un primer tanteo de la mezcla asfáltica compactada con el mismo contenido de asfalto ya mencionado, esto con el fin de, determinar su volumetría y el valor de la Gravedad específica bruta de la mezcla compactada (Gmb). Una vez se tiene el valor del Gmm y el Gmb se procede a calcular la cantidad de vacíos de la mezcla, que para este caso se busca que sea de $4\pm 1\%$ de vacíos con respecto a la mezcla asfáltica.

Los vacíos y propiedades volumétricas deben estar acorde a lo teóricamente estipulado para mezclas de alto desempeño. Si ese no es el caso, se debe realizar un nuevo tanteo con un contenido de asfalto distinto, el cual se determina teniendo como referencia los resultados del primer tanteo, posteriormente se realiza nuevamente todo el procedimiento descrito, hasta lograr el contenido de asfalto óptimo necesario para cumplir con los valores volumétricos.

Para la cantidad necesaria de colillas de cigarrillo y cal hidratada por espécimen, hay que tener en consideración que estos elementos deben estar secos al momento de la adición, con el fin de que no causen repelencia entre el agregado y el asfalto por la humedad, además permita la integración y una distribución adecuada en la mezcla asfáltica. Para obtener el peso necesario de adición a la mezcla, esta se calcula con la ecuación para determinar el contenido de asfalto con respecto a la mezcla, pero en este caso en vez de calcular el asfalto, se calcula la cantidad de fibra que llevara.

Para los especímenes que llevan la adición de las colillas de cigarrillo, estas deben tener un tratamiento previo (limpieza) como se mencionó en apartados anteriores. Por otro lado, haciendo referencia a la integración de las colillas en la mezcla asfáltica, en esta investigación se propone, mezclar el agregado pétreo con ellas, con el fin de garantizar la distribución homogénea en la mezcla asfáltica, para que posteriormente sea mezclada con la cantidad de asfalto correspondiente y finalmente sea compactada para realizar las pruebas pertinentes, que para este caso el nivel I corresponde a diseño volumétrico y susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR) y nivel II correspondiente a nivel I más susceptibilidad a la deformación permanente.

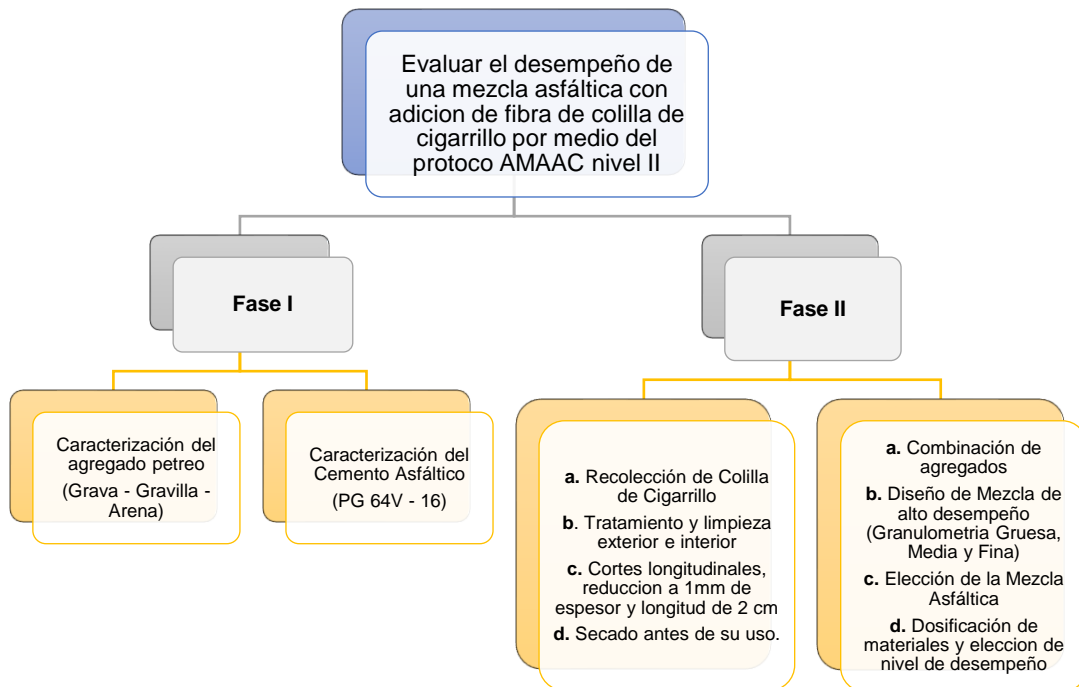
CAPÍTULO V - RESULTADOS Y ANÁLISIS

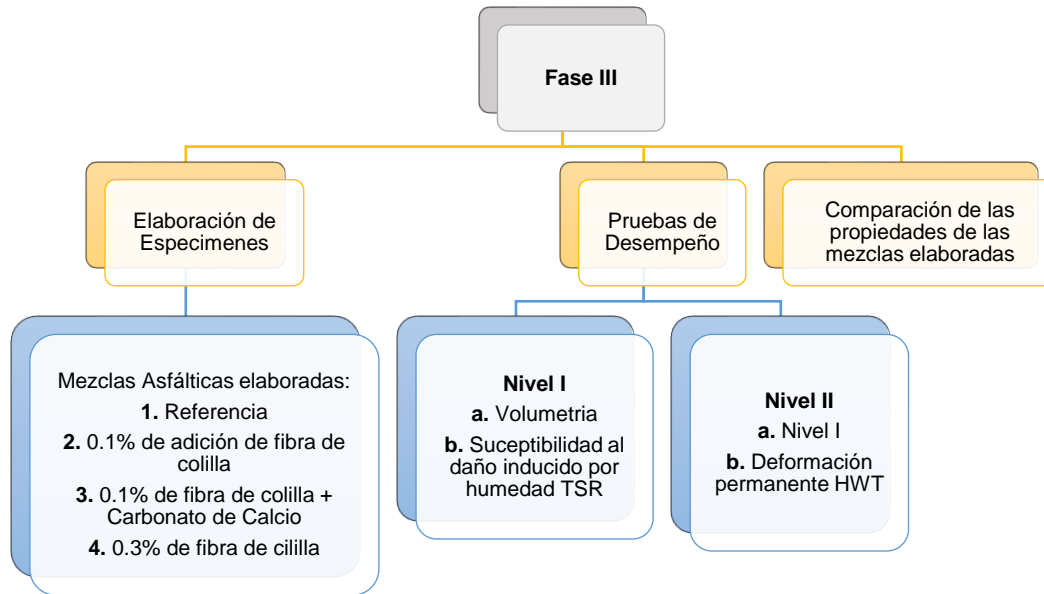
El presente capítulo está enfocado en dar a conocer cada uno de los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales, así como el diseño de mezcla teórico – experimental con su respectivo análisis.

A continuación, se presenta cada una de las pruebas que se han realizado en los diferentes materiales utilizados en esta investigación, tales como materiales pétreos y cemento asfáltico, de igual forma se evidencia la composición de la mezcla asfáltica densa en caliente por medio del protocolo AMAAC.

La siguiente figura muestra el proceso seguido para el desarrollo de las diferentes experimentaciones que se realizaron a lo largo de cada fase propuesta, esto con el fin de obtener un producto final acorde a lo planteado en cada uno de los objetivos a alcanzar.

Figura V1. Proceso experimental realizado a lo largo de la metodología.





5.1. MUESTREOS DE LOS MATERIALES PÉTREOS

5.1.1. Método de Muestreo para agregados

La extracción y muestreo del material pétreo utilizado para el presente trabajo de investigación se realizó en el Banco de materiales ubicado en la vía Morelia – Salamanca.

En la figura V-1 y V-2 se puede observar el proceso de muestreo en el banco de materiales que lleva como nombre San Juan “SUPRA”. los materiales muestreados para su respectiva caracterización fueron los siguientes: Grava triturada, Gravilla triturada y del banco “SUPRAMAX” Arena triturada.

Figura V-2. Banco de materiales “San Juan SUPRA”



Fuente: Propia

Figura V-3. Muestreo de cada uno de los agregados pétreos necesarios para su caracterización.



Fuente: Propia

5.1.2. Secado del material

El secado del material utilizado en esta investigación se realizó para los diferentes agregados pétreos, cuyo fin era eliminar cualquier humedad proveniente del muestreo y adicional, homogeneizar el material. La figura V-3 presenta el proceso realizado.

Figura V-4. Secado de materiales pétreos.



Fuente: Propia

Al agregado pétreo como lo fue: Grava triturada, Gravilla triturada y Arena triturada, se le estipuló un proceso de secado natural, el cual consta de 3 horas expuesto directamente a la luz solar realizando movimientos cada 30 y 60 minutos para que todas las caras del agregado quedaran expuestas y así obtener un secado homogéneo.

5.2. PRUEBAS A LOS MATERIALES PÉTREOS

5.2.1. Pesos Volumétricos

5.2.2. Peso Volumétrico seco y suelto

Para realizar la prueba de peso volumétrico seco y suelto lo primero fue, realizar una reducción de la muestra mediante el cuarteo del material, posterior, se tomó material de extremos opuestos hasta llenar el recipiente de volumen conocido. Finalmente se registra su peso y este mismo proceso se debe ejecutar para todos los agregados pétreos. Cabe resaltar que se efectuaron tres muestras por cada material para obtener un promedio definitivo. La figura V-4 y V-5 presentan el proceso.

Figura V-5. Cuarteo para prueba de peso volumétrico seco suelto



Figura V-6. Prueba de peso volumétrico seco y suelto



Fuente: Propia

En la tabla V-1, se presenta un resumen de los resultados que se obtuvieron en la prueba de peso volumétrico seco y suelto.

En los resultados se puede evidenciar una mayor masa volumétrica para la Arena Triturada y menor Masa volumétrica correspondiente a la Grava Triturada, esto se puede dar debido a la diferencia que hay en el tamaño de las partículas de cada agregado y lo que puede ocupar en una unidad de volumen conocido como lo es la tara, así mismo la densidad que puede tener cada uno.

Tabla V-1. Resumen de resultados del Peso volumétrico seco y suelto

Peso volumétrico Seco suelto	
MATERIAL	MVSS (g/cm ³)
Grava Triturada	1,2638
Gravilla Triturada	1,2681
Arena Triturada	1,4011

Fuente: Propia

5.2.3. Peso volumétrico seco y varillado

Para la ejecución de la prueba de peso volumétrico seco y varillado se realizó un cuarteo del material, con el fin de tener una reducción hasta el necesario para la prueba, posterior, se tomó material de extremos opuestos hasta completar el llenado del recipiente, la diferencia al método anterior es que en este caso se deben dar 25 golpes con una varilla especial punta redonda, que permite el reacomodo del material conforme a se va adicionando por capas. El proceso mencionado se realizó para cada uno de los agregados pétreos. La figura V-6 presenta evidencia de lo comentado.

Figura V-7. Prueba de peso volumétrico seco y varillado.



Fuente: Propia

Una vez se ha realizado el ensayo para cada material se computaron los datos para conforma la tabla V-2, en donde se presenta un resumen de los valores obtenidos de la prueba.

Una vez se analizaron los valores se pudo percibir lo siguiente: un mayor peso volumétrico para la Arena Triturada y menor peso volumétrico para la Gravilla Triturada, si los comparamos a los valores de la masa volumétrica seca y suelta existe una minina diferencia en con la gravilla y grava, esto quiere decir que, los golpes dados para la acomodación de las partículas genero cambio en estos dos agregados, así mismo, el agregado está logrando un mayor acomodado con el uso del varillado, los cual debe pasar y es producido por los golpes generados.

Tabla V-2. Resumen de resultados del Peso volumétrico seco y varillado

Peso volumétrico Seco y Varillado	
MATERIAL	MVSV (gr/cm3)
Grava Triturada	1,3569
Gravilla Triturada	1,3466
Arena Triturada	1,4454

Fuente: Propia

5.2.4. Ensayo para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos

La prueba de análisis granulométrico se realizó obteniendo una muestra significativa para ser pasada por diferentes tamices según el tipo de material. El procedimiento que se realizó fue igual para cada tipo de material pétreo, la única variación se ve representada en el uso de las mallas ya que por material se deben utilizar ciertas aberturas.

La granulometría realizada a la Grava Triturada de puede observar en la figura V-7.

Figura V-8. Granulometría para la Grava Triturada



Fuente: Propia

La tabla V-3, presentada a continuación evidencia los resultados de la prueba de granulometría realizada a la Grava triturada. Para desarrollar la prueba se tuvo un peso inicial de material de 5200 g el cual será la masa inicial a tamizar, posterior fue pasado por un juego de mallas que comprendían la malla de 2" hasta la No. 4. Los pesos retenidos en cada una de ellas se iban registrando, así mismo esto permitió determinar que el tamaño máximo del material era de 1" y el tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ", adicional la granulometría presenta un mayor retenido y tamaño de partículas en la malla de $\frac{1}{2}$ " seguida de la $\frac{3}{8}$ ". Al final de la prueba y sumando los retenidos por malla no se logra evidenciar alto contenido de desperdicio gracias a la limpieza de las mallas conforme avanzaba la prueba.

Tabla V-3. Valores resumen de la granulometría realizada a la Grava Triturada

Granulometría de Grava				
Malla	Material Retenido (g)	% RET	%RET ACUM	% PASA
2"	0,00	0,000	0,000	100
1 1/2"	0,00	0,000	0,000	100
1 1/4"	0,00	0,000	0,000	100
1"	0,00	0,000	0,000	100
3/4"	115,00	2,213	2,213	97,787
1/2"	4466,00	85,936	88,149	11,851
3/8"	602,00	11,584	99,733	0,267
1/4"	9,80	0,189	99,921	0,079
No.4	2,30	0,044	99,965	0,035
Pasa No.4	1,80	0,035	100	0,000
SUMAS	5197			

Fuente: Propia

Para la gravilla triturada se realizó el mismo proceso de tamizaje, en este caso difiere a que no se utilizaron todas las mallas como en la Grava triturada, si no a partir de la $\frac{3}{4}$ " hasta la malla No.4, esto debido a que la gravilla cuenta con un tamaño de partículas menor. El proceso se puede observar en la figura V-8.

Figura V-9. Granulometría para la Gravilla Triturada



Fuente: Propia

La tabla V-4, presentada a continuación evidencia los resultados de la prueba de granulometría realizada a la Gravilla triturada.

Para el desarrollo de la prueba se tuvo un valor de masa inicial de 3300 g el cual representa la cantidad de material total a tamizar. El material fue pasado por un juego de mallas que comprendían la malla de 3/4" hasta la No. 4, así mismo se registraron los pesos retenidos en cada una de ellas, posterior se calculó el porcentaje retenido, retenido acumulado y porcentaje que pasa para cálculos posteriores, así mismo la granulometría estipula que la Gravilla triturada tiene un tamaño máximo de 3/4" y un tamaño nominal de 1/2".

Tabla V-4. Valores resumen de la granulometría realizada a la Gravilla Triturada

Granulometría de Gravilla				
Malla	Material Retenido (g)	% RET	%RET ACUM	% PASA
3/4"	0	0,000	0,000	100,000
1/2"	425	12,879	12,879	87,121
3/8"	1580	47,879	60,758	39,242
1/4"	1148	34,788	95,545	4,455
N.4	83	2,515	98,061	1,939
Pasa No.4	64	1,939	100	0,000
Suma	3300			

Fuente: Propia

La granulometría de la arena triturada se realizó a través de un equipo agitar de mallas, para este caso el material cuenta con aberturas de mallas diferentes al del agregado grueso. La granulometría realizada se observa en la figura V-9.

Figura V-10. Granulometría para la Arena Triturada



Fuente: Propia

Para el desarrollo de la prueba de granulometría en arena triturada se tuvo un valor de masa inicial de agregado de 510 g, el cual fue pasado por un juego de mallas correspondiente al tipo de material que comprenden desde la malla No. 4 hasta la malla No.200. Así mismo se registraron los pesos retenidos en cada una de ellas, se calculó el porcentaje retenido, retenido acumulado y el porcentaje que pasa en cada malla, en los resultados se evidencio un mayor retenido de material en la malla No.8, seguido de la malla No.16 y malla No.50, esto quiere decir que la arena presenta abundancia en estos tamaños.

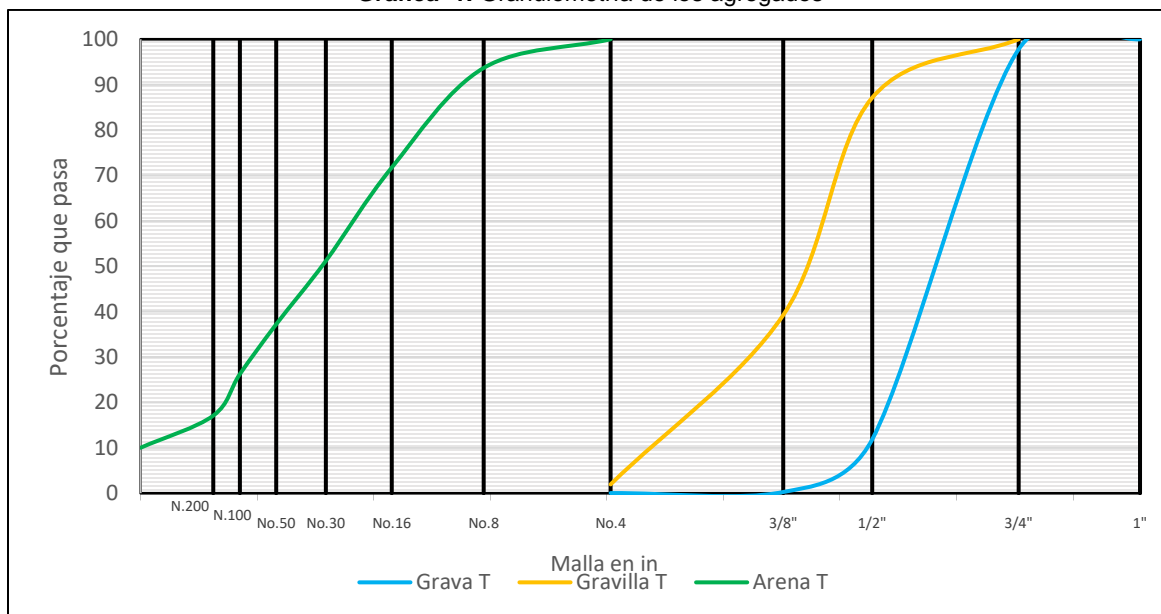
La tabla V-5, presentada a continuación evidencia los resultados de la prueba de granulometría realizada a la Arena triturada.

Tabla V-5. Valores resumen de la granulometría realizada a la Arena Triturada

Granulometría de Arena Triturada				
Malla	Material Retenido (g)	% RET	%RET ACUM	% PASA
1/4"	0	0,000	0,000	100,000
N.4	31,8	6,322	6,322	93,678
N.8	110,4	21,948	28,270	71,730
N.16	103,4	20,557	48,827	51,173
N.30	70,2	13,956	62,783	37,217
N.50	55,2	10,974	73,757	26,243
N.100	46	9,145	82,903	17,097
N.200	35,6	7,078	89,980	10,020
Fondo	50,3	10,000	100	0,020
Suma	502,9			

Fuente: Propia

Gráfica 1. Granulometría de los agregados



Fuente: Propia

En la Gráfica 1 se puede evidenciar la composición granulométrica de cada material utilizado en la presente investigación, para este caso se presenta de forma gráfica observando su comportamiento distribuido en donde no existe abundancia de ciertos materiales en ciertas mallas, pero no ausencia de material en las mallas, lo cual permite tener material en todas las mallas.

5.2.5. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso

La prueba de gravedad específica y absorción del agregado grueso, así como sus resultados se presentan a continuación.

5.2.5.1. Gravedad Especifica del agregado grueso

La prueba de gravedad específica en agregado grueso consistió en extraer una porción representativa de material a través de cuarteo, posterior se dejó saturar por 24 horas en un recipiente con agua limpia, cuidando que el material quede totalmente sumergido y evitando su contaminación, pasado este tiempo, se colocó el material sobre una toalla húmeda con el fin de evitar que seque totalmente el agregado por no más de 15 segundos e inmediatamente se pesó, registrándolo como superficialmente seco. Luego, se agregó el material en un recipiente para ser pesado en agua que debe estar a temperatura de 25°C, y este se registró como peso sumergido una vez haya pasado un lapso de 5 minutos. finalmente se seca el material al horno hasta masa constante y este peso se registra como totalmente seco. Con los valores mencionados se calculó la gravedad específica bruta (G_{sb}) y gravedad específica aparente (G_{sa}) tal cual se presenta en la tabla V-6 y V-7.

Figura V-11. Agregado Grueso para prueba de Gravedad Especifica



Fuente: Propia

Tabla V-6. Resultado de prueba de Gravedad Especifica en Grava

AGREGADO GRUESO (GRAVA)		
RESULTADOS	Réplica No.1	Réplica #2
(Gsb) Gravedad específica bruta	2,6499	2,6689
(Gsa) Gravedad específica aparente	2,7279	2,7219
Gravedad específica bruta (Gsb) promedio	2,6594	
Gravedad específica aparente (Gsa) promedio	2,7249	

Tabla V-7. Resultado de prueba de Gravedad Especifica en Gravilla

AGREGADO GRUESO (GRAVILLA)		
RESULTADOS	Réplica No.1	Réplica #2
(Gsb) Gravedad específica bruta	2,3526	2,2941
(Gsa) Gravedad específica aparente	2,5779	2,6715
Gravedad específica bruta (Gsb) promedio	2,3234	
Gravedad específica aparente (Gsa) promedio	2,6247	

Fuente: Propia

Los resultados indican que existe una mayor gravedad específica bruta en la grava, así como una gravedad específica aparente, de igual forma, los valores no se encuentran muy alejados entre ellos lo cual da una buena referencia, ya que por ser agregados del mismo banco comparten sus características, así mismo tener valores de gravedad específica altos aportan a la mezcla, ya que los materiales que componen su estructura van a tener mayor resistencia por su composición natural.

5.2.5.2. Absorción de agregado grueso

La prueba de absorción en agregados gruesos se realizó siguiendo el mismo procedimiento tanto para la Grava triturada como para la Gravilla triturada, los valores se obtuvieron de la prueba de gravedad específica ya que al realizarla se puede obtener la absorción con los valores calculados, la figura V-11 presenta el material después del peso sumergido y antes de ser secado en horno.

Figura V-12. Prueba de absorción al material grueso



Fuente: Propia

La tabla V-8, presenta un resumen de los resultados que se obtuvieron de la prueba de absorción para agregado grueso. Se logra observar que la Gravilla triturada tiene un valor mayor que la grava, pero no tan alejados entre ellos, aun así, los valores nos dan un indicio del porcentaje de cemento asfáltico que podrían absorber, absorciones menores a 2% son buenas porque esto también afecta en el tiempo de curado de la mezcla asfáltica antes de ser compactadas. Mencionado lo anterior se tiene una absorción promedio la cual será utilizada para cálculos posteriores.

Tabla V-8. Resumen de resultados de la prueba de absorción para materiales gruesos.

AGREGADO GRUESO (GRAVA)		
RESULTADOS	Réplica No.1	Réplica #2
(A) Masa de la muestra seca al horno [g]	2984	2990
(B) Masa de la muestra saturada y superficialmente seca [g]	3016,2	3011,8
(C) Masa de la muestra sumergida en agua [g]	1890,1	1891,5
Absorción del agregado [%]	1,0791	0,7291
Absorción del agregado promedio [%]	0,9041	

AGREGADO GRUESO (GRAVILLA)		
RESULTADOS	Réplica No.1	Réplica #2
(A) Masa de la muestra seca al horno [g]	1987	2005,9
(B) Masa de la muestra saturada y superficialmente seca [g]	2027,7	2034,5
(C) Masa de la muestra sumergida en agua [g]	1268,2	1272
Absorción del agregado [%]	2,0483	1,4258
Absorción del agregado promedio [%]	1,7371	

Fuente: Propia

5.2.6. Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la Máquina de los Ángeles

La prueba de resistencia a la degradación del agregado grueso por impacto en la máquina de los Ángeles se realizó con el fin de observar que tanto podría resistir el material a utilizar en esta investigación cuando es sometido a la abrasión por esferas metálicas, ya que este debe cumplir un requisito mínimo para ser utilizado en mezclas de alto desempeño. En la figura V-12 y V-13 se puede observar el ensayo.

Figura V-13. Equipo para Ensayo de desgaste de los Ángeles



Fuente: Propia

Figura V-14. Material obtenido del ensayo de desgaste de los Ángeles



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla V-9 y V-10 se puede presentar los resultados obtenidos de la prueba de desgaste de los Ángeles. Se evidencia que el tipo de grava según lo especifica la norma de ensayo es un tipo B y la gravilla es un tipo C, esto se puede determinar en función de la granulometría, por ende, se utilizaron 11 esferas para la grava y 8 esferas para la gravilla, así mismo la cantidad de material entre mallas es de 2 500 g para un total de 5 000 g para cada material.

Una vez realizada la prueba se obtuvo el peso final de 4156.8 g para la grava triturada, lo que representa un desgaste de 16,8% con respecto a la muestra inicial, para la gravilla se obtuvo un peso final de 4289.6 g lo que representa un 14,21% de desgaste, comparando este resultado con los requisitos de calidad para agregados pétreos N-CMT-4-04/17 de la Secretaria de Infraestructura comunicaciones y Transporte (SICT), granulometría para

mezclas densas siendo el valor máximo para desgaste de los Ángeles de 30%, se puede verificar que el material que se ha utilizado cumple con la normativa teniendo un valor por debajo del estipulado lo cual es muy bueno, ya que el material al tener un desgaste tan bajo aporta mayor resistencia a la mezcla al considerarse un material duro y resistente.

Tabla V-9. Resultados de la prueba de desgaste de los ángeles para Grava

Grava tipo B	
11 esferas	(g)
Pasa 3/4" y retiene 1/2"	2500
pasa 1/2" retiene 3/8"	2500
Peso Inicial (g)	5000
Peso Final (g)	4156,8
Desgaste (%)	16,86

Fuente: Propia

Tabla V-10. Resultados de la prueba de desgaste de los ángeles para Gravilla

Gravilla tipo C	
8 esferas	(gr)
Pasa 3/8 y retiene 1/4	2500
pasa 1/4 retiene No.4	2500
Peso Inicial (gr)	5000
Peso Final (gr)	4289,6
Desgaste (%)	14,21

Fuente: Propia

5.2.7. Determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión en la Máquina Micro-Deval

La prueba mediante el equipo Micro – Deval se realizó con el fin de observar la pérdida que tenía el material por abrasión en presencia del agua, siendo un complemento para determinar la resistencia y durabilidad del agregado a la abrasión, pero en condiciones adicionales como es el agua. Es así que para su desarrollo se obtuvo 1500 g de material tamizado y combinado en función del tamaño nominal según la norma, esto para la grava triturada como para la gravilla triturada, posterior se colocaron en el equipo con carga abrasiva de 5000 g y con agua cubriéndolas en su totalidad. Transcurrido el tiempo de prueba se tamiza el material para eliminar las partículas que desprendieron de él, posterior, se seca al horno hasta masa constante, vuelve y se tamiza, se pesa y se obtiene la pérdida por abrasión para los dos materiales, estos resultados se presentan en la tabla V-11.

Figura V-15. Ensayo de la prueba de desgaste Micro - Deval



Fuente: Propia

Tabla V-11. Resultados de la prueba por desgaste Micro – Deval.

MATERIAL	GRAVA		GRAVILLA	
RESULTADOS	Replica No.1	Replica No.2	Replica No.1	Replica No.2
Masa de la carga abrasiva (g)	5000	5002,3	5000	5002,3
(A) Masa inicial de la muestra (g)	1500	1500	1500	1500
(B) Masa final de la muestra (g)	1297,5	1295,8	1321,7	1317,3
Desgaste Micro-Deval [%]	13,50	13,61	11,89	12,18
Pérdida por abrasión en presencia de agua promedio [%]	13,56		12,03	

Fuente: Propia

Los resultados de la prueba indican que la grava triturada tuvo una pérdida por abrasión en presencia del agua de 13,56%, en cuestión de la gravilla triturada obtuvo un valor de 12,03%, siendo menor que la grava lo cual también se dio en la prueba de desgaste de los ángeles, esto quiere decir que la grava es un porcentaje más susceptible al desgaste en presencia del agua que la gravilla, aun así ambos materiales se comportaron muy bien, permitiendo tener valores que aportaran muy bien a la resistencia de la mezcla en presencia de agua. Cabe resaltar que los ensayos se realizaron por replica con el fin de tener valores con un rango de veracidad mayor.

5.2.8. Determinar la resistencia al intemperismo acelerado

La prueba de intemperismo acelerado se realizó para la Grava triturada, teniendo en consideración el tamaño nominal de la granulometría. Según el tamaño nominal se requería 5000 g de masa inicial para ser reducida a 1000 g la cual fue utilizada para desarrollar la prueba. Posterior se sumergió el agregado en sulfato de sodio durante cinco ciclos, el cual consta de 16 horas sumergido por ciclo, luego se debe secarlo en horno a masa constante,

seguidamente enfriarlo a temperatura ambiente y finalmente volverlo a sumergir en la solución, esto por cinco ciclos tal cual se evidencia en la figura V-15.

Figura V-16. Ensayo de la prueba de Intemperismo acelerado después de cinco ciclos.



Fuente: Propia

Cuando pasan los cinco ciclos en sulfato de sodio, el material se lavó con agua a una temperatura de 40°C con el fin de eliminar la solución. Para saber si el material está limpio de sulfato se verificó con cloruro de bario tal cual lo muestra la figura V-15, en donde este líquido aparece totalmente transparente, posterior se secó el material, se pasó por la malla de 5/16" y se obtuvo la tabla V-12.

Tabla V-12. Resultado de la prueba de Intemperismo Acelerado.

GRAVA		
Resultados	Réplica No. 1	Réplica No. 2
Tamaño de material	19.0 a 9.5 mm	19.0 a 9.5 mm
(A) Masa inicial a ensayar (g)	1000	1000
(B) Masa final [g]	930,9	934,6
(I) Porcentaje de intemperismo por tamaño ensayado (%)	6,9	6,5
(Ip) Porcentaje de intemperismo ponderado ($I \cdot Z / 100$) (%)	6,9	6,5
Porcentaje de intemperismo ponderado total ($\sum Ip$) (%)	6,9	6,5
Porcentaje de intemperismo ponderado total promedio (%)	6,7	

Fuente: Propia

De los resultados se pudo analizar que, la grava triturada obtuvo un porcentaje de 6,7% como valor de intemperismo acelerado, lo que representa el desgaste o pérdida de material que tuvo al ser sometido al Sulfato de sodio y diferentes ciclos extremos, este valor hace referencia a que tanto se desgato el material con los cristales de sulfato de sodio, lo cual para la mezcla nos representa un buen valor de resistencia del agregado cuando sea sometida a congelación y descongelación como prueba de desempeño.

5.2.9. Determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso

El ensayo para determinar el porcentaje de partículas fracturadas se realizó con 1500 g de material retenido en la malla No.4, el cual se extendió sobre una superficie plana y se observó agregado por agregado. Visualmente se separaron las partículas que tenían dos o más caras fracturadas, una cara fracturada y ninguna cara fracturada, en este caso como nuestro material es proveniente de un banco con trituración total se esperó que el porcentaje de partículas mayor sea en dos o más caras fracturadas, es así que se presenta la siguiente tabla con los resultados obtenidos.

Tabla V-13.Resultado del ensayo de partículas fracturadas en agregado grueso

Resultados	Réplica # 1	Réplica # 2
(A) Masa de la muestra inicial (g)	1501,3	1518,7
(F) Masa de partículas con dos o más caras fracturadas (g)	1495,7	1512,6
(U) Masa de partículas con una cara fracturada (g)	4,78	4,77
(N) Masa de partículas sin caras fracturadas (g)	0,81	1,38
(P2) Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas (%)	99,63	99,60
(P1) Porcentaje de partículas con solo una cara fracturada	0,32	0,31
(P2 prom) Porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas promedio [%]	99,61	
(P1 prom) Porcentaje de partículas con solo una cara fracturada promedio [%]	0,32	

Fuente: Propia

Los resultados presentados nos indica que: el material analizado tiene un porcentaje de 99,61% de partículas con dos o más caras fracturadas y un 0,32% para partículas con una sola cara fracturada, esto muestra que al ser un material con trituración total y con dos o más caras fracturadas, al estar en contacto de cierta manera habría un mejor acomodo entre ellos, evitando grandes espacios al momento de conformar la mezcla y generando un mayor grado de resistencia al evitar desplazamiento entre ellos.

5.2.10. Determinar el porcentaje de partículas planas y alargadas del agregado grueso

El ensayo de partículas planas y alargadas se realizó con 5000 g de material, esto con el fin de, al tamizarlo por las mallas designadas del ensayo obtener una cantidad de 100 partículas. Posterior, se separó el agregado por malla y se pasó por la abertura designada del equipo, contabilizando la cantidad de material retenido llamándolas lajeadas y el que pasa denominado alargados, así mismo, se pesó las fracciones por separado y al final se obtienen los resultados presentados en la siguiente tabla V-14.

Figura V-17. Ensayo partículas Alargadas y Lajeadas.



Fuente: Propia

Tabla V-14. Resultado del ensayo partículas Alargadas y Lajeadas.

Partículas Lajeadas %	14,101
Partículas Alargadas%	17,815
Part. Alargadas y Lajeadas %	31,916

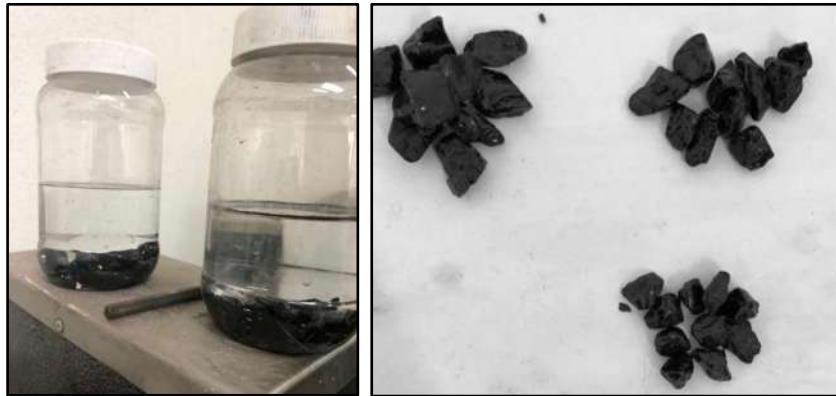
Fuente: Propia

De los resultados se puede obtener un porcentaje total que debe ser inferior al permitido de 40% según normativa para diseño de mezclas de alto desempeño, ya que, al contar con alta cantidad de estas partículas afectarían directamente la matriz que constituye el agregado en la mezcla alterando su rendimiento, lo idea y lo que se busca es evitar este tipo de formas, así mismo asegurando que al conformar la mezcla los agregados no se fracturaran en el proceso y de igual forma se evita un cambio en la granulometría de diseño.

5.2.11. Determinar el desprendimiento por fricción de materiales pétreos para mezclas asfálticas

El ensayo de desprendimiento por fricción se realizó al agregado grueso obteniendo una muestra de 50 g conformada entre el material que pasa la malla 3/8" y retiene la malla 1/4". La prueba nos dice que por cada 50g de material debe ser mezclado con 2,5 g de asfalto. Una vez realizada la mezcla se secó a temperatura ambiente y se colocó en recipientes con 200 ml de agua a 25°C por 15 horas, pasado el tiempo se llevaron al equipo de agitación por 3 horas. Al finalizar el tiempo se extendieron las partículas de agregado en papel blanco para examinarlas y determinar visualmente el porcentaje de desprendimiento del asfalto. Lo comentado se puede evidencia en la figura V-17.

Figura V-18. Material de Prueba de desprendimiento por fricción.



Fuente: Propia

El porcentaje de desprendimiento del asfalto se registró por cada partícula, dándole un porcentaje de 0 a 100, al final se suma los porcentajes y los divide en la cantidad de partículas analizada. A continuación, se presenta la tabla con los valores comentados.

Tabla V-15. Resultados del ensayo de desprendimiento por fricción.

Tabla 1											
n	Desprendimiento por fricción (%)										
1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
3	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
6	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
7	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
8	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
9	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
12	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
13	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
14	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
15	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
16	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
18	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
19	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
21	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
22	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
23	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
24	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
25	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
26	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
27	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
28	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
29	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
31	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
32	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
33	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
34	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
35	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
36	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
37	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
38	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
39	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
40	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
41	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
42	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
43	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
44	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
45	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
46	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
47	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
48	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
49	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
51	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
52	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
53	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
54	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
55	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
56	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Fuente: Propia

El resultado de la pérdida por fricción nos da un valor de 8,4%, lo que quiere decir que del 100% del desprendimiento que pudo ocurrir solo el valor mencionado fue el total, así mismo nos percatamos de la afinidad que tiene el agregado con el asfalto para el desarrollo de la mezcla asfáltica. Los valores bajos de desprendimiento nos indica que el agregado tiene buena adherencia con el asfalto y eso nos da una mezcla más estable y que puede evitar el desprendimiento y desgranamiento del agregado.

5.2.12. Determinar la gravedad específica y absorción del agregado fino

El ensayo de gravedad específica y absorción es una prueba que debe ser llevada también para los agregados finos, en este caso para la arena triturada. Por tal motivo a continuación se presentan.

5.2.12.1. Gravedad Especifica del agregado fino

La prueba de Gravedad Especifica en arenas se realizó con material que pasa la malla No.4. Se extrajo el material necesario para realizar el ensayo a través de cuarteos, seguidamente se dejó en una bolsa por 24 horas con el 6% de humedad equivalente al peso del material, cabe resaltar que este debe estar totalmente sellada para evitar pérdida de humedad. Una vez pasado el tiempo se extiende el material sobre una charola, se comienza a secar superficialmente formando un cono el cual es llenado en dos capas con 25 golpes, al final se quita el cono y el material se debe disgregar muy leve, de esta manera se sabe que esta superficialmente seco, posterior se deben pesar 500 gramos y agregar en un picnómetro el cual se llenara con agua hasta un 90% de su capacidad, seguidamente se debe agitar suavemente por 20 minutos hasta eliminar burbujas y registrar su peso. Finalmente, el material dentro del picnómetro se extiende en una charola para secar al horno hasta masa constante y registrar los datos para cálculos correspondientes, los resultados se presentarán en la tabla V-16.

Figura V-19. Prueba de Gravedad específica en arenas, Condición saturada superficialmente seca.



Fuente: Propia

Tabla V-16. Resultado de la prueba de Gravedad Especifica para arenas.

AGREGADO FINO		
RESULTADOS	Replica No.1	Replica No.2
(Gsb) Gravedad especifica bruta	2,500	2,566
(Gsa) Gravedad especifica aparente	2,702	2,767
Gravedad especifica bruta (Gsb) promedio	2,533	
Gravedad especifica aparente (Gsa) promedio	2,734	

Fuente: Propia

Los resultados presentan que el material tuvo una gravedad especifica bruta (Gsb) de 2,533 y una Gravedad especifica aparente (Gsa) de 2,734, respecto a los resultados de los agregados gruesos, los valores tienen similitudes en sus resultados.

5.2.12.2. Absorción del agregado fino

La prueba de absorción en agregados finos se determinó con los valores registrados en la prueba de gravedad especifica, de tal manera que con ellos se calculó directamente la absorción del material. La figura V-19 presenta la masa del material superficialmente seco con el que se inició la prueba el cual es uno de los datos para determinar la absorción.

Figura V-20. Prueba de absorción al material fino



Fuente: Propia

La tabla V-17, presenta un resumen de los resultados que se obtuvieron de la prueba de absorción para agregado fino. El agregado tuvo un valor de 2,912% siendo más alto que las gravas, esto quiere decir que la capacidad que tiene de absorber asfalto es mayor, lo que implicaría mayor porcentaje para cubrir todas las partículas de arena.

Tabla V-17 Resumen de resultados de la prueba de absorción para materiales finos.

AGREGADO FINO		
RESULTADOS	Replica No.1	Replica No.2
(S) Masa de la muestra saturada superficialmente seca [g]	500	500
(A) Masa de la muestra seca al horno [g]	485,5	486,2
Absorción [%]	2,987	2,838
Absorción promedio [%]	2,912	

Fuente: Propia

5.2.13. Determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino

La prueba para determinar el contenido de vacíos en el agregado fino nos relación a la angularidad que este puede tener, entre menor sea su angularidad el contenido de vacíos disminuye, es así que la prueba se desarrolló vertiendo por un embudo una cantidad de arena triturada sobre un recipiente con medidas especificadas en la normativa y descritas en este documento. Las siguientes figuras presentan el equipo utilizado para la prueba.

Figura V-21. Ensayo de la prueba para determinar la angularidad del agregado fino.



Fuente: Propia

El proceso para determinar la cantidad de vacíos en el agregado se realizó con dos mediciones por réplica y se obtuvieron los siguientes datos y resultados.

Tabla V-18. Resultados de la prueba para determinar el contenido de vacíos no compactados del agregado fino.

RESULTADOS		Réplica No.1		Réplica No.2	
		1ra Medición	2da Medición	1ra Medición	2da Medición
Porcentaje de vacíos no compactados	(H) Masa del medidor cilíndrico [g]	240,3	240,3	240,3	240,3
	(I) Masa del medidor cilíndrico con muestra [g]	384,5	382	385,1	383,1

RESULTADOS		Réplica No.1		Réplica No.2	
		1ra Medición	2da Medición	1ra Medición	2da Medición
(F) Masa de la muestra (F=I-H) [g]		144,2	141,7	144,8	142,8
(G) Gravedad específica del agregado fino (Gsb)		2,533	2,533	2,533	2,533
(U) Porcentaje de vacíos no compactados por medición [%]		44,321	45,286	44,089	44,861
(Us) Porcentaje de vacíos no compactados [%]		44,803		44,475	
(Us) Porcentaje de vacíos no compactados promedio [%]		44,639			

Fuente: Propia

Los resultados nos indicaron que el porcentaje de vacíos no compactados del agregado fino una vez realizadas las dos replicas fue de 44, 739%, este valor según el protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 con un valor mínimo de 40, nos quiere decir que el material cumple y se encuentra en el rango para ser utilizado en el diseño. Este valor también nos indica el porcentaje de arena que tiene una forma angulosa, lo cual, entre mayor sea, tiende a ser mejor, ya que, permite un acomodo de partículas que ayudan al soporte estructural de la mezcla y aporta a la disminución de la deformación.

5.2.14. Determinar el valor de equivalente de arena en el agregado fino

El ensayo de equivalente de arena se realizó para la arena triturada. Lo primero que se realizó fue obtener muestras de material a través de una copa con volumen conocido, las cuales se agregaron a una probeta que tiene solución de trabajo a una altura de 10 cm, luego, se dejó reposar por un lapso de tiempo para ser agitada mediante un equipo mecánico. Pasado los primeros minutos se llena la probeta y se deja reposar nuevamente por un lapso de tiempo, finalmente se toma la lectura de la arena y el fino por medio de un pisón.

Esta prueba se realizó a dos muestras del mismo material con el objetivo de promediar los resultados y determinar su porcentaje de equivalente de arena, la figura V-21 presenta parte del proceso realizado en el ensayo.

Figura V-22. Prueba de equivalente de arena



Fuente: Propia

Los resultados del promedio de las dos muestras para la arena triturada se presentan en la tabla V-19. El porcentaje de equivalente de arena obtenido del promedio de las dos replicas fue de 89,47%, el valor restante para completar un 100% se considera material fino o arcilloso, pero no se conoce que tan reactivo podría ser ya que esta prueba no lo determina. Como el valor de equivalente fue alto, quiere decir que el material tiene alto contenido de arena pura, el restante viene siendo material fino el cual también es importante, pero habría que comprobar su reactividad para saber si aporta o no a la mezcla, para esto se realiza la prueba siguiente.

Tabla V-19. Resultados obtenidos de la prueba equivalente de arena

RESULTADOS		Réplica No.1	Réplica No.2
Lecturas	Arena [ln]	4,3	4,2
	Arcilla [ln]	4,8	4,7
(SE) Equivalente de arena por réplica [%]		89,58	89,36
(SE) Equivalente de arena promedio [%]		89,47	

Fuente: Propia

5.2.15. Determinar el valor de azul de metileno de una arcilla

El ensayo de azul de metileno nos indica el grado de reactivad que tiene el material fino arcilloso que puede tener la arena triturada, por tal motivo se obtiene 1 gramo de material que pasa la malla No. 200, se le agregan 30 ml de agua destilada y se pone a agitar. Cada minuto se agrega 1 ml de azul de metileno y tomamos una gota de la sustancia para pintarla sobre un papel blanco. Al realizar el ensayo se presentó en la gota numero 6 un azul celeste lo cual indica que el filler no es tan nocivo para la mezcla.

Figura V-23. Equipo para el Ensayo de azul de metileno para arcillas



Fuente: Propia

Tabla V-20. Resultados del ensayo de azul de metileno para arcillas.

RESULTADOS	Réplica No.1	Réplica No.2
Masa de filler (g)	1	1
(MBV) Valor de azul de metileno [mg/g]	6	7
(MBV) Valor de azul de metileno promedio [mg/g]	7	

Fuente: Propia

Al tener un azul de metileno bajo quiere decir que, la arcilla o el filler no tiene una reacción alta en la arena que puede ser nocivo al utilizarlo en la mezcla asfáltica, ya que con altos contenidos de reactividad probablemente interrumpa la adherencia del agregado con el asfalto creando una capa antiadherente en el material, lo cual ocasiona permeabilidad en la mezcla y esto genera desprendimiento de agregado.

Una vez se realizaron todas las pruebas para la caracterización de los agregados pétreos, se computaron en la tabla V-21 con el fin de, compararlos con los requerimientos exigidos por norma N-CMT-4-04/17 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas de la Secretaria de Infraestructura comunicaciones y Transporte (SICT), en la tabla de requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando los ejes sencillos equivalentes son mayores a 1×10^6 y menor o igual a 30×10^6 , así como en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2012 requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa. La importancia de que los valores cumplan se difiere a un buen aporte a la mezcla, ya que está compuesta por 95% de material grueso, prácticamente toda su estructura depende del material.

Tabla V-21. Tabla resumen de los valores obtenidos en la caracterización del Agregado Pétreo

Característica		Valores Normativa	Resultados Obtenidos
GRAVA			
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4	2,66
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		30	15,54
Desgaste Microdeval, %, máximo		15	13,56
Intemperismo acelerado, % (5 ciclos), máximo	En sulfato de sodio	15	6,70
	En sulfato de magnesio	20	-
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40	31,92
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	95	0,32
	Dos o más caras	85	99,61
Adherencia con el asfalto % de cubrimiento, min		90	91,6
ARENA Y FINOS			
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4	2,50
Angularidad, %, mínimo		40	44
Equivalente de arena; %, mínimo		50	89,47
Azul de metileno, mg/g, máximo		15	7

Fuente: Propia

La tabla V-21 presenta los valores estipulados por la normativa, estos pueden ser máximos o mínimos dependiendo del ensayo y propiedad a evaluar, al igual estos valores representan los rangos de valor de la condición ideal de las características de los agregados para ofrecer un buen comportamiento y aporte a la estructura de la mezcla asfáltica.

Al comparar los valores calculados con respecto a los de la Normativa se puede observar que, cada uno de ellos se encuentra en los rangos de los requisito de calidad, esto nos permitió en primer instancia saber que el agregado tiene buenas características, algunas más que otras, pero cumpliendo todas, en segunda instancia nos permite tener la confianza para utilizarlo en la mezcla, analizar su comportamiento en conjunto con otro materiales y finalmente conocer según las características del agregado, un comportamiento preliminar de mi mezcla.

Cabe resaltar que esta es una tabla resumen, los valores en específicos fueron descritos en cada una de las pruebas, de igual forma, los resultados nos permiten utilizar el agregado pétreo para una mezcla de alto desempeño.

5.3. PRUEBAS AL CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento Asfáltico es uno de las materias primas para elaborar mezclas asfálticas es por eso que debe pasar una serie de pruebas con el fin de caracterizarlo y clasificarlo según el tipo de asfalto y sus propiedades. Para este caso el asfalto utilizado se lo considera un

asfalto original, por tal motivo debe cumplir con una serie de requisitos para que sea denominado así y utilizado en la composición de una mezcla asfáltica.

5.3.1. Punto de Inflamación de Cleveland

La prueba de punto de inflamación nos permitió conocer y dar un indicio de la temperatura máxima a la cual podíamos elevar el cemento asfáltico sin tener el riesgo de provocar combustión, de igual manera esta temperatura técnicamente se le conoce como punto de combustión en la cual el asfalto tiende a eliminar una serie de volátiles, ocasionando una flama. Esta prueba es de seguridad y todos los cementos Asfálticos la requieren. A continuación, se presentan la figura V-23 y la tabla V-22, de los resultados evaluados.

Figura V-24. Equipo utilizado para la prueba de punto de inflamación de Cleveland



Fuente: Propia

Tabla V-22. Resultados de la prueba de Punto de inflamación Cleveland

Punto de inflamación Cleveland		
Hora	Temperatura °C	
6:10	100	100%
6:26	220	85%
1	238	85%
2	248	85%
6	278	85%
7	298	

Fuente: Propia

La prueba se inició a una temperatura del asfalto de 100°C con una temperatura de la parrilla elevada al 100%, cuando se llegó 60 grados por debajo, aproximadamente al punto de inflamación, se redujo la temperatura a 85°C, de ahí en adelante en cada minuto se registró la temperatura concluyendo que, la temperatura a la cual el cemento Asfáltico logro reflejar un destello fue a los 298°C. Siendo este el punto de seguridad.

5.3.2. Viscosidad Rotacional Brookfield

La prueba de viscosidad rotacional se realizó con 10.2 g de cemento asfáltico en el recipiente estipulado por el equipo de prueba. Este se llevó a acondicionamiento dentro del equipo Brookfield a una temperatura de 135 °C durante 20 minutos, pasado el tiempo se corrió la prueba y se toma la lectura del centiPoise (cP) que es la viscosidad del material, así mismo las revoluciones por minuto (RPM) en las que se corre la prueba y el torque en porcentaje. A continuación, se presentan figuras de la prueba.

Figura V-25. Equipos para Prueba de Viscosidad Rotacional Brookfield



Fuente: Propia

Una vez se ha Corrido la prueba se registran los datos mencionados. La viscosidad rotacional del cemento asfáltico nos da un parámetro de que tan fluido se encuentra, ya sea para su manejabilidad, o para poder ser bombeado una vez sea llevado a campo, así mismo tener un parámetro de su dureza o fluidez a 135°C. En este caso la viscosidad fue de 431 centiPoise equivalente a 0,431 Pa. s, de igual forma por medio de la viscosidad se obtiene la tabla de viscosidades para saber el cemento Asfáltico a que temperatura debe ser mezclado y compactado.

Tabla V-23. Resultados de prueba de viscosidad rotación de Brookfield

Viscosidad rotacional a 135°C	
Cantidad de asfalto (g)	10,2
Número de aguja	27
Tiempo de prueba (min)	8
Viscosidad cP	431
RPM	150

Fuente: Propia

5.3.3. Punto de Reblandecimiento

La prueba de punto de reblandecimiento nos indicó a que temperatura el asfalto presentó una primera deformación que se produce por medio de unas esferas sostenidas en anillos

rellenos de asfalto. Para esto, se utilizó un equipo automático que controla las temperaturas del agua en la que están sumergidos los soportes y gradualmente aumenta hasta que las esferas atraviesen totalmente los anillos de asfalto. Se registraron la temperatura de ambas esferas en su caída para ser promediado el valor, así mismo la diferencia de caída entre ellas no fue mayor a 1°C según lo recomienda la normativa, las siguientes figuras presenta el equipo utilizado.

Figura V-26. Materiales y equipo utilizado en el ensayo de punto de reblandecimiento



Fuente: Propia

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla V-24. Resultados obtenidos en prueba de punto de reblandecimiento.

Punto de reblandecimiento, °C, mín.		
Muestra	1	2
Líquido	Agua	Agua
Izquierda °C	49,8	50,4
Derecha °C	49,5	49,8
Diferencia	0,3	0,5
Temp Final °C	50	50

Fuente: Propia

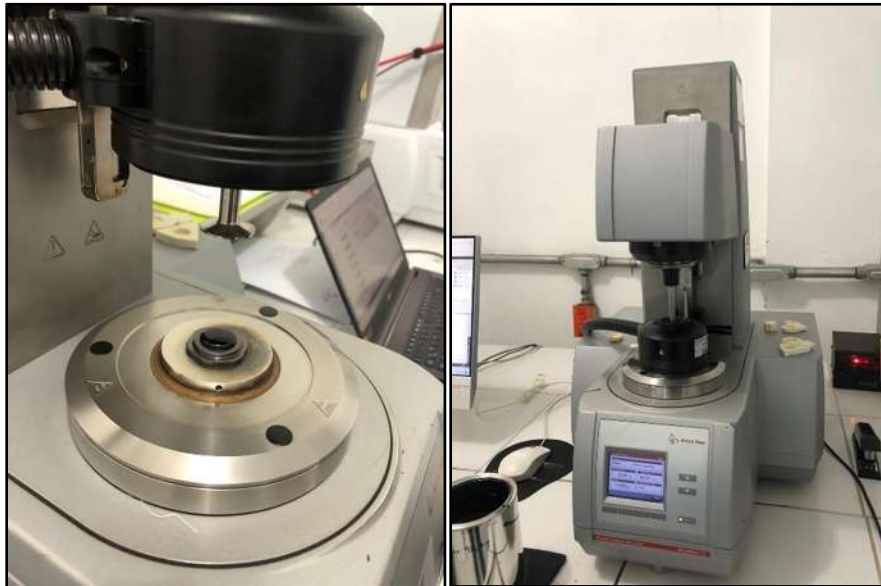
La temperatura del punto de reblandecimiento para el cemento Asfáltico caracterizado fue de 50°C lo que nos indica que es el valor máximo que resiste el material antes de presentar una deformación considerable, por ende, este valor se registra y se evaluara con los requisitos de calidad estipulados para un cemento convencional.

5.3.4. Módulo reológico de corte dinámico

Este ensayo se realiza al cemento asfáltico sin ningún tipo de envejecimiento, por tal motivo, se necesita de un equipo denominado reómetro de corte dinámico (DSR), una vez la prueba es evaluada se obtiene la temperatura de prueba, el Angulo de fase δ para saber qué tan fluido es el material y el módulo complejo G^* que determina la rigidez.

A continuación, se presentan figuras del equipo utilizado con la muestra, y cuando está en funcionamiento.

Figura V-27. Equipo para prueba de módulo Reológico de corte dinámico



Fuente: Propia

Los resultados obtenidos con la prueba son presentados en la siguiente tabla. Primero se corrió el ensayo a una temperatura de 64 °C lo cual el material cumplió para ser un asfalto convencional, seguidamente, se obtuvo el Angulo de fase de 82,4 lo que quiere decir que el material tiene un comportamiento viscoso por estar cercano a 90° y sin ninguna elasticidad, finalmente nos da el valor del G^* entre el ángulo de fase igual a 1,306 lo que indica que el cemento tiene una consistencia rígida poco elástico ya que es el comportamiento de un convencional.

Tabla V-25. Resultados del ensayo de Modulo Reológico de corte dinámico.

Módulo reológico de corte dinámico	
Temperatura de prueba	64
Modulo Complejo G^*	1,076
Angulo de Fase δ	82,4
$(G^*/\text{sen } \delta)$, kPa, mín.	1,306

Fuente: Propia

5.3.5. Envejecimiento del cemento Asfáltico en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO)

La prueba de envejecimiento del cemento asfáltico en horno RTFO es el primer envejecimiento que sufre el asfalto y representa el envejecimiento que tiene cuando es transportado el material, tendido y compactado. La prueba se realizó introduciendo al equipo 35 g de asfalto en recipientes adecuados según la normativa, el cual debe estar calibrado a 160°C previamente, posterior se corrió durante 80 minutos, una vez terminado se retiran, se dejan enfriar y se toma el peso, cabe resaltar que antes del ensayo se debe tomar el peso de los recipientes solos y luego con asfalto para poder calcular la pérdida de masa, a continuación, se presenta figuras del equipo.

Figura V-28. Equipo Horno Rotatorio de Película delgada RTFO



Fuente: Propia

Cuando las muestras son sacadas del horno RTFO y se enfrían a temperatura ambiente se debe registrar su peso para determinar la pérdida de masa por calentamiento ya que el cemento asfáltico es sometido a altas temperaturas y a inducción de aire, lo que ocasiona una mayor pérdida de volátiles y una reducción en su masa, así como una oxidación y envejecimiento. Las siguientes figuras presentan los recipientes utilizados en la prueba.

Figura V-29. Vasos para Pérdida de masa del cemento Asfáltico después del horno RTFO.



Fuente: Propia

La siguiente tabla tiene registrados los pesos y la pérdida de masa del cemento asfáltico que para este caso fue de 1.0%. Un valor menor indica una menor pérdida de masa y volátiles, un valor mayor significa una mayor pérdida de masa y volátiles, lo cual se evita para tratar de conservar las condiciones del asfalto en un primer envejecimiento.

Tabla V-26. Resultados de prueba de pérdida de masa por calentamiento después del Horno RTFO

Pérdida por calentamiento, %, máx.		
Vaso	1	2
W tara (gr)	168,1842	168,8844
W inicial (gr)	203,4107	203,8372
W final (gr)	203,0532	203,4813
Pérdida de masa (%)	1,0	1,0
Pérdida de masa Promedio (%)	1,0	

Fuente: Propia

Una vez se analiza la pérdida por calentamiento del cemento asfáltico, se debe sacar puntos para ser llevados al reómetro de corte dinámico y nuevamente obtener el ángulo de fase δ y el módulo complejo G^* , así como se presenta en la siguiente tabla. Con los resultados obtenidos se observa las propiedades que cambian en el material después de un primer envejecimiento.

Lo primero que ocurrió fue una disminución en el ángulo de fase (bajo su viscosidad y aumento su elasticidad) y lo segundo un aumento en el módulo complejo, que se traduce a la rigidización, así mismo el $G^*/\sin \delta$ aumento casi siete veces con respecto al valor antes del RTFO, esto se traduce a un cemento más rígido y elástico.

Tabla V-27. Módulo Reológico de corte dinámico después de Horno RTFO

Módulo reológico de corte dinámico	
Temperatura de prueba	64
Angulo de Fase	71
(G*/sen δ), kPa, mín.	7,5158
Modulo complejo G*	5,3362

Fuente: Propia

De la misma muestra obtenida de la pérdida de masa y llevada al reómetro de corte dinámico se obtuvo el nivel de tráfico, para el cual el cemento asfáltico se comportaría de forma adecuada según la clasificación de los cementos asfálticos por grado de desempeño y su nivel de ajuste, de él se obtiene la letra y el nivel de tránsito tal cual se presenta en la siguiente tabla.

Tabla V-28. Nivel de ajuste (MSCR) después de Horno RTFO

Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR)	
Porcentaje de recuperación a 3,2 (%)	11,2
Cumplimiento de fluencia no recuperable a 3,2 (1/kPa)	0,9854

Fuente: Propia

5.3.6. Envejecimiento Acelerado del Cemento Asfáltico en Vasija de Envejecimiento a Presión (PAV)

La prueba de envejecimiento acelerado en la vasija a presión PAV, se realizó primero que todo acondicionando el equipo, encendiéndolo y dejando que llegue a una temperatura de 100°C, una vez se llega a la temperatura se procede a introducir las charolas con cemento asfáltico obtenidas después del horno rotatorio de película delgada RTFO por un lapso de 20 horas, durante este tiempo se debe cuidar que la presión dentro del equipo no sea menor a 2.1 Mpa y que la temperatura no disminuya, ya que esto ocasionaría un rebose en las muestras. Una vez pasa el tiempo dentro del equipo se sacan las muestras y se trasladan al equipo desgasificador.

Figura V-30. Equipo para prueba de envejecimiento a presión PAV



Fuente: Propia

El equipo del PAV lo que produce en las muestras es un envejecimiento a largo plazo en el cemento Asfáltico ya que están sometidos a altas temperaturas y presión de aire, llevado a campo sería un envejecimiento cuando cumple su vida en servicio; ya en esta parte el cemento Asfáltico tiene un segundo envejecimiento por ese motivo comienza a rigidizarse.

5.3.7. Desgasificación al Vacío de las muestras envejecidas (Vacuum Degassing Oven -VDO)

El ensayo de desgasificación al vacío de las muestras envejecidas se realizó con el material resultante de la prueba del PAV, el material de las charolas se pasó a los recipientes estipulados por el equipo VDO, mientras se realiza esto, el equipo debe encenderse e iniciar un calentamiento a $170 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 15 minutos, seguidamente se introducen las muestras y se debe dar un tiempo de 30 minutos para acondicionarlas, una vez realizado esto se aplica vacío durante 30 minutos con el fin de retirar cualquier burbuja que contenga el asfalto por el paso en el equipo PAV.

Figura V-31. Equipo para la desgasificación al vacío del cemento Asfáltico después del PAV



Fuente: Propia

Tabla V-29. Valores reológicos obtenidos del cemento Asfáltico después del PAV

Módulo reológico de corte dinámico	
Rigidización ($G^*/\text{sen } \delta$), kPa, máx.	3065,1297
Angulo de Fase	36,1
Temperatura de prueba	28
Modulo complejo G^*	1106,51182

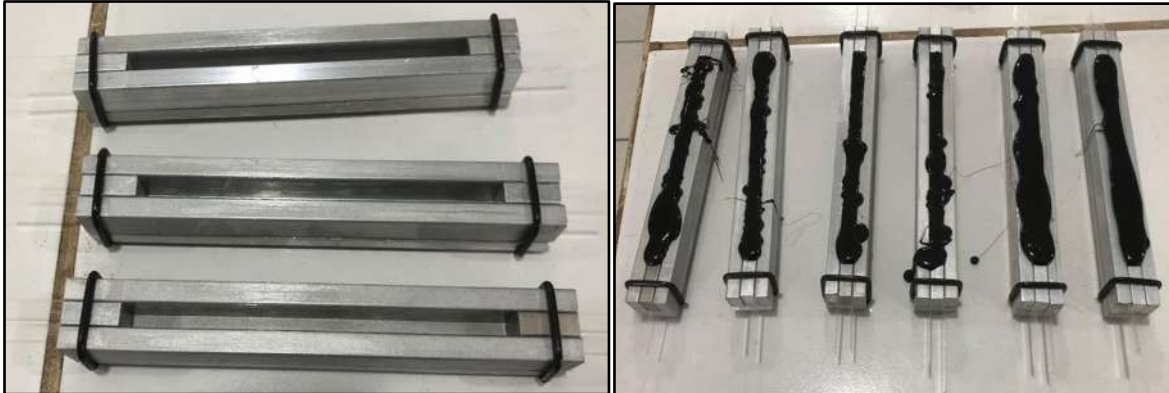
Fuente: Propia

Los resultados presentados en la tabla V-29 no evidencia una disminución en su viscosidad, bajando el ángulo de fase, y el aumento exponencial del módulo complejo se traduce a una rigidización alta, todo eso representa un asfalto muy rígido y elástico.

5.3.8. Determinación de la Resistencia a la Flexión usando el Reómetro de Flexión de Viga (BBR)

Para realizar la prueba de la resistencia a la flexión en el reómetro de flexión de viga, se utilizó el cemento asfáltico proveniente del equipo VDO. Este material se vacía a una temperatura que facilite su manejo en unas viguetas, evitando calentarlo en exceso y que pueda provocar un envejecimiento mayor. Ver figura V-31.

Figura V-32. Fabricación de viguetas utilizadas para evaluarlas en el equipo BBR



Fuente: Propia

Una vez se conforman las viguetas, se dejan enfriar a temperatura ambiente para ser enrasadas y pasarlas a un congelador durante 5 minutos, luego de esto se deben desmoldar quitando las láminas que las conforman, cuidando y evitando una deformación en la vigueta, posterior se llevan al equipo BBR, son ubicadas en dos apoyos sumergidas en etanol y probadas durante 10 minutos, la siguiente figura presenta el equipo utilizado.

Figura V-33. Equipo Reómetro de flexión de vida BBR



Fuente: Propia

Tabla V-30. Resultados obtenidos de las muestras evaluadas en el equipo BBR

Características	M1	M2
Tiempo (s)	60	60
Carga (mN)	976,5	976,8
Deflexión (mm)	1,442	1,585
Medido de Rigidez (Mpa)	55,251	50,28
Valor m (adimensional)	0,317	0,319

Fuente: Propia

La prueba se realizó por replica, entre los resultados obtenidos se destacan que el BBR mide la rigidez de la viga de asfalto en el segundo 60, así mismo se obtuvo la pendiente de la reflexión de la viga como el valor "m" de 0,317 y 0,319 los cuales están por encima del valor mínimo permitido de 0,300, la carga para ambas viguetas fue de 976,5, la rigidez medida fue de 55,251 y 50,28 MPa cuyo valor está por debajo del máximo permitido que es de 300 MPa.

Concluidas cada una de las pruebas de caracterización, la tabla V-31, presenta los resultados obtenidos del cemento asfáltico, con respecto a los valores de la normativa para un cemento asfáltico convencional PG 64 – 22. Con esto se puede observar el cumplimiento de cada uno de los parámetros estipulados por prueba, catalogando el cemento asfáltico a utilizar en esta investigación como un PG 64V -16 permitido para mezclas asfálticas de alto desempeño.

Tabla V-31. Resultados de la Caracterización del Cemento Asfáltico

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	Normativa N.CMT.4-05-004/18		Valores del Ensayo	
	PG 64		PG 64	
	-16	-22	-16	-22
Cemento asfáltico original				
Punto de inflamación Cleveland °C, mín.	230		298	
Viscosidad rotacional 135°C, Pa. s, máx.	3		0,431	
Punto de reblandecimiento, °C, mín.	48		50	
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín.	1,0		1,306	
Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		64	
Después de envejecimiento en horno RTFO				
Pérdida por calentamiento, %, máx.	1,0		1,0	
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ), kPa, mín.	2,2		7,5158	
Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64		64	
Tráfico Muy Alto "V", Nivel de Ajuste (MSCR) Jnr a 3,2 kPa en MSCR; kPa-1, máx.	1,0		0,9854	
Temperatura de prueba, °C	64		64	
Después de envejecimiento en horno a presión (PAV)				
Temperatura de envejecimiento PAV, °C	100		100	
En climas normales				
En climas desérticos	100		-	
Rigidización (G*sen δ), kPa, máxima	5000		3065,1	
Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	28	25	28	

GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	Normativa N.CMT.4-05-004/18		Valores del Ensayo	
	PG 64		PG 64	
	-16	-22	-16	-22
Rigidez de Flexión S(t), máximo 300 Mpa Valor m, mínimo 0,300	-6	-12	52,8	0,318
Temperatura de prueba, @ 60s, °C			-6	

Fuente: Propia

5.4. RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE COLILLAS DE CIGARRILLO

La recolección de las colillas de cigarrillo se realizó en la Ciudad de Morelia, estado de Michoacán, país México. Para ello se adaptaron botellas de plástico reutilizadas con el fin de instalarlas en varios puntos de la Universidad Michoacana de san Nicolás de hidalgo, en donde se observó depósitos con este desecho para poder recolectarlas de forma inmediata. Por otro lado, se adecuaron tarros de plástico para ser llevados a establecimiento en donde aceptaron la idea de recolectarlas sin problema alguno, así mismo se realizó la recolección en varias zonas de la ciudad en donde se encuentran incluidos parques y plazas comerciales. Observe la figura V-33 en donde se presentan los puntos de recolección.

Figura V-34. Recolección y almacenamiento de colillas de cigarrillo



Fuente: Propia

Se observó que, en los puntos donde se instalaron los recipientes hubo gran acogida por los transeúntes, ya que depositaban las colillas de cigarrillo de forma adecuada, contrario a lo que se veían antes, lo cual era desecharlas en el suelo, este proceso duro algunas semanas mientras las personas se familiarizaban con los recipientes, posterior la recolección se llevó a cabo de manera satisfactoria.

Una vez se recolectaban las colillas de cigarrillo, pudimos hacer un conteo de cuantas se almacenaban en un recipiente de un litro, se estimó aproximadamente 450 colillas de cigarrillo por litro, posterior a la recolección se retiraban los recipientes, se instalaban nuevos y las que estaban almacenadas procedíamos a realizar el tratamiento a cada una de forma manual. Este consistía en retirar el papel envolvente, limpiarlas internamente de

saborizantes y quitarles las zonas quemadas por la combustión, adicional se llevaban a otro recipiente para exponerlas a sol directo eliminando humedad, la siguiente figura presenta lo comentado.

Figura V-35. Limpieza y almacenamiento de colillas de cigarrillo



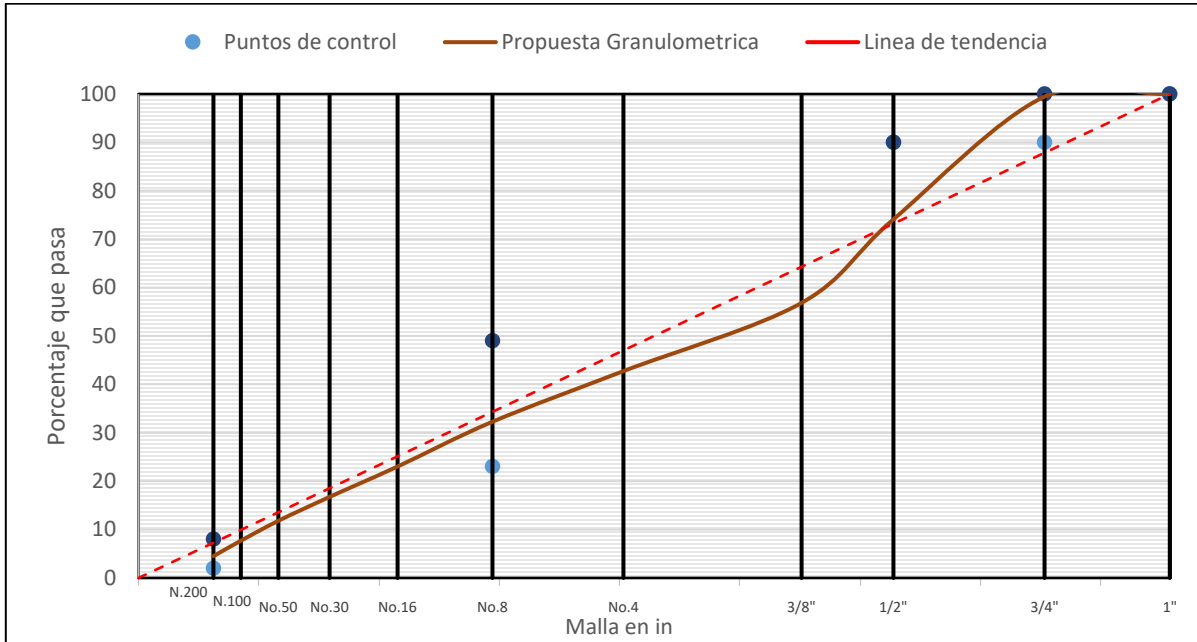
Fuente: Propia

Cuando las colillas de cigarrillo ya se habían depositado en recipientes para conservarlas y eliminar parte de su humedad el tratamiento posterior fue, desfibrarlas cuidando su longitud, este proceso se realizó de forma manual, una por una, el objetivo era reducir su espesor aproximadamente a 1 mm, con el fin de que al adicionarla a la mezcla se pudieran distribuir de forma homogénea, lo otro que se considero fue conservar su longitud que varía entre 1 a 2 cm, esto con el propósito de que aporte de forma física y genere mayor resistencia a la mezcla cuando sean aplicadas cargas, estas consideraciones se evaluarán en pruebas de desempeño lo cual se analizará en los resultados posteriores.

5.5. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TEÓRICA

El diseño de la mezcla asfáltica teórica inicia con las granulometrías propuestas, con el fin de definir cuál de ellas se elegiría en función de los requerimientos del trabajo de investigación, para ello se realizaron tres propuestas. La primera granulometría se la considero como "Granulometría gruesa" ya que está compuesta en su mayoría por agregado grueso, siendo: 25% de grava, 30% de gravilla y 45% de arena. La gráfica 2 presenta la curva granulométrica.

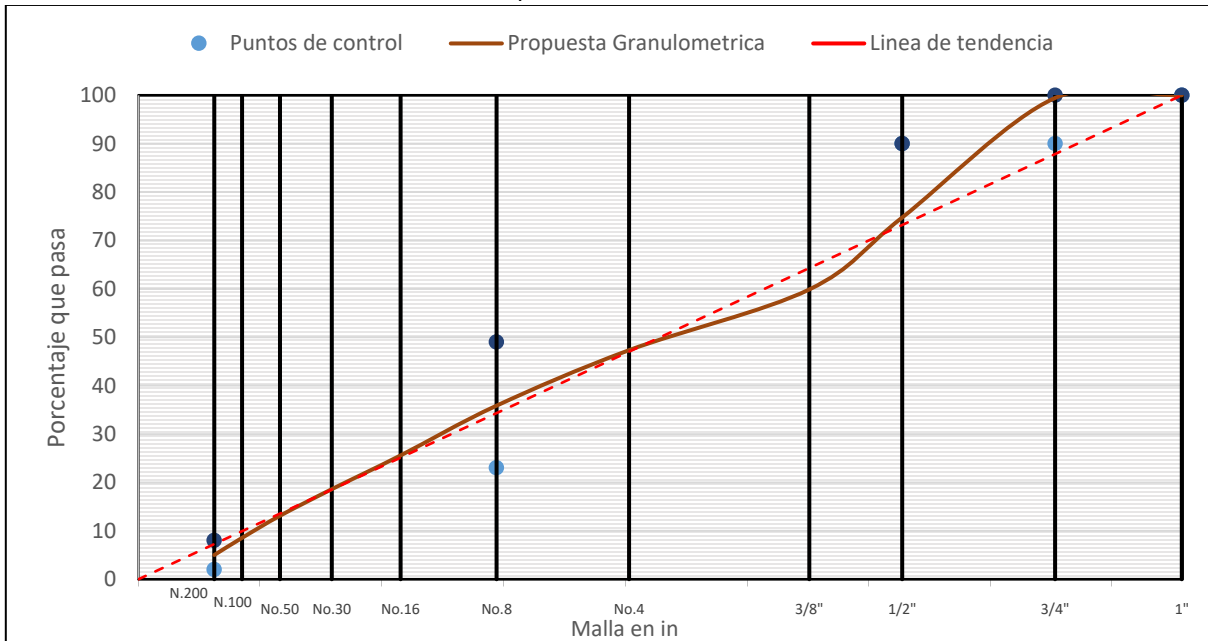
Gráfica 2. Propuesta de granulométrica Gruesa



Fuente: Propia

La segunda propuesta granulométrica se definió como “Granulometría media” por una distribución igual en los agregados gruesos y finos conformada con 25% de Grava, 25% Gravilla siendo un total de 50% de grueso y 50% arena, trazados los valores la gráfica 3 se representa de la siguiente manera.

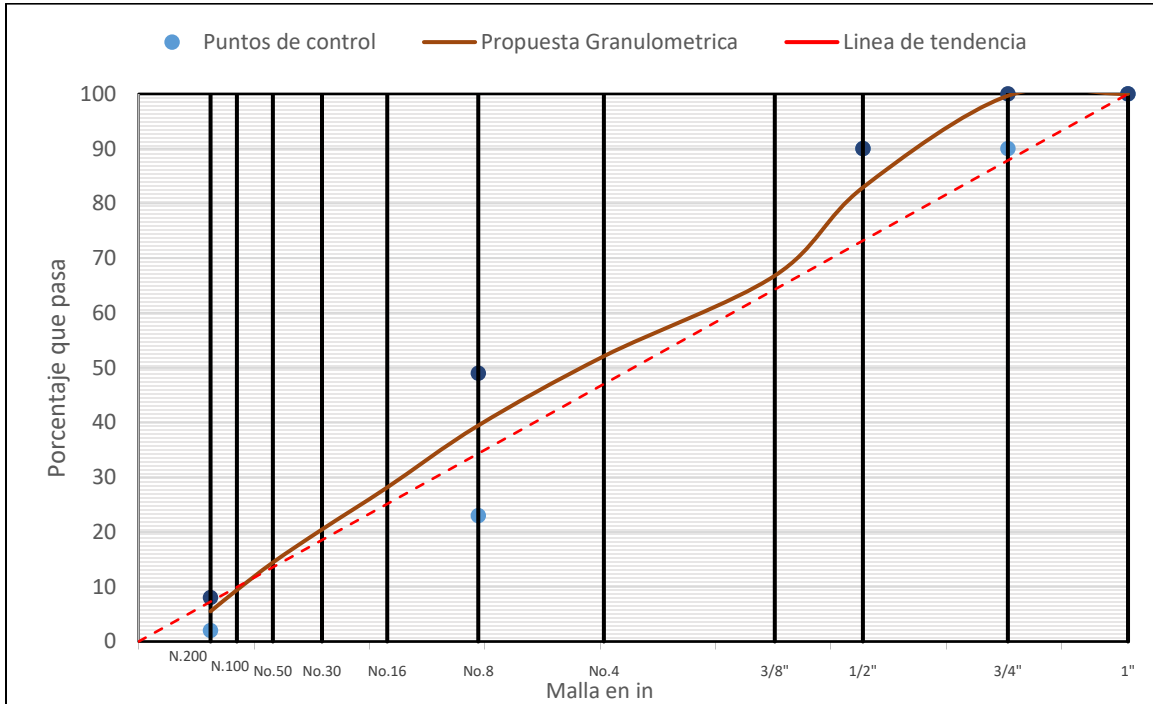
Gráfica 3. Propuesta Granulométrica Media



Fuente: Propia

La tercera propuesta y ultima se la considero de "Granulometría fina", ya que está compuesta en su mayoría por arena. Los porcentajes manejados fueron 15% Grava, 30% Gravilla, para un total de 45% de agregado grueso y 55% de Arena, la gráfica 4 representa lo comentado.

Gráfica 4. Propuesta Granulométrica Fina



Fuente: Propia

Una vez definidas las granulometrías se calcularon los pesos por malla de cada uno de los especímenes que se van a elaborar, en este caso fueron 4600 g de material para elaborar especímenes de diseño para Gmb, 1500 g de material para elaborar mezcla asfáltica y calcular el Gmm, 3500 g de material para especímenes de TSR y 2100 g de material para especímenes de Rueda cargada de Hamburgo, todo esto considerando un diámetro de 6 in y altura estipulada por el protocolo AMAAC por tipo de espécimen.

Para la elaboración de los especímenes lo primero que se hizo fue calcular el contenido de asfalto inicial el cual sirvió de referencia para determinar el contenido óptimo de asfalto, de igual forma se utilizaron los valores obtenidos en la caracterización a los agregados pétreos, tales como el Gsa, Gsb y absorción, por el lado de la caracterización del cemento asfáltico el valor requerido fue el de la densidad.

Con los datos mencionados se realizó una combinación de las propiedades de los materiales, obteniendo así, nuevos valores de Gsa, Gsb y absorción, pero ahora pertenecen a la mezcla combinada, esto los realizamos para cada tipo de granulometría, ya que cada una tenía diferentes porcentajes designados de agregado grueso como fino al momento de calcular los valores de gravedad y densidad. Una vez se procesaron los datos pudimos

obtener el porcentaje de asfalto inicial; a continuación, se presentan las tablas con cada uno de los resultados.

Tabla V-32. Cálculo del porcentaje de asfalto inicial para mezcla de Granulometría Gruesa

PROPORCIONES	Gsb medido	Gsa medido	Gse ini	Vba ini	Vbe ini	Ws ini	PB ini
tipos de proporción de la mezcla	gravedad específica bruta	gravedad específica aparente	gravedad específica efectiva	volumen de asfalto absorbido	volumen efectivo de mezcla	masa de los agregados	% de asfalto inicial
55% de Agregado Grueso T.N. ¾ Banco San Juan (Supra)	2,575	2,717	2,689	0,0372	0,0897	2,269	5,44%
45% de Arena Triturada de Banco Supra Max							

Fuente: Propia

En la granulometría gruesa se obtuvo un porcentaje de asfalto inicial de 5,44%.

Tabla V-33. Cálculo del porcentaje de asfalto inicial para mezcla de Granulometría Media

PROPORCIONES	Gsb medido	Gsa medido	Gse ini	Vba ini	Vbe ini	Ws ini	PB ini
tipos de proporción de la mezcla	gravedad específica bruta	gravedad específica aparente	gravedad específica efectiva	volumen de asfalto absorbido	volumen efectivo de mezcla	masa de los agregados	% de asfalto inicial
50% de Agregado Grueso T.N. 3/4 Banco San Juan (Supra)	2,568	2,716	2,686	0,0389	0,0897	2,267	5,51%
50% de Arena Triturada de Banco Supra Max							

Fuente: Propia

La granulometría media obtuvo un porcentaje de asfalto inicial de 5,51%.

Tabla V-34. Cálculo del porcentaje de asfalto inicial para mezcla de Granulometría Fina

PROPORCIONES	Gsb medido	Gsa medido	Gse ini	Vba ini	Vbe ini	Ws ini	PB ini
tipos de proporción de la mezcla	gravedad específica bruta	gravedad específica aparente	gravedad específica efectiva	volumen de asfalto absorbido	volumen efectivo de mezcla	masa de los agregados	% de asfalto inicial
45% de Agregado Grueso T.N. 3/4 Banco San Juan (Supra)	2,561	2,715	2,684	0,0406	0,0897	2,266	5,59%
55% de Arena Triturada de Banco Supra Max							

Fuente: Propia

Con los cálculos anteriormente expuestos del porcentaje de asfalto inicial y la cantidad de material por mallas, procedemos a la elaboración de especímenes para realizar pruebas de volumetría, definir el contenido óptimo de asfalto y posterior realizar TSR y rueda cargada de Hamburgo como pruebas de desempeño.

5.6. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO

La elaboración de los especímenes inicialmente se realizó a partir de tanteos (especímenes de prueba), los cuales nos definieron la cantidad de material necesario para cumplir con los parámetros de volumetría, que para este caso se refiere a los vacíos requeridos. Los especímenes de diseño se realizaron para obtener un 4% así como el valor del Gmb, de igual forma 7% de vacíos requerido para elaborar probetas para TSR y 7% de vacíos requerido para Rueda Cargada de Hamburgo. a continuación, presentaremos los resultados por tipo de mezcla.

5.6.1. MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA

La mezcla asfáltica de referencia se realizó teniendo en cuenta los agregados caracterizados, así como el cemento Asfáltico convencional. La mezcla no tiene ningún tipo de aditivo que altere sus propiedades, es así que se la considera de referencia o convencional, de ella se elaboraron especímenes para calcular volumetría, de igual forma especímenes para ser evaluados por pruebas de desempeño como TSR y Rueda Cargada de Hamburgo, los resultados se presentan en los siguientes apartados.

Figura V-36. Proceso de elaboración Mezcla de Referencia



Fuente: Propia

5.6.1.1. Cálculo de Volumetría

Para determinar la volumetría se realizaron ocho (8) especímenes evaluados por par, esto quiere decir que hubo cuatro (4) pares, las dimensiones comprendían un diámetro de 150 mm y una altura variable entre 115 ± 0.3 mm, los pares se realizaron con diferentes porcentajes de cemento asfáltico, con el propósito de obtener los vacíos requeridos de $4 \pm 1\%$. los porcentajes de asfalto utilizados fueron los siguientes: 5.51% de asfalto como el

inicial, posterior se evaluó con 6.0% de asfalto, 6.5% de asfalto y finalmente con 5.88% de asfalto.

Figura V-37. Determinación de Volumetría en especímenes – Mezcla de Referencia



Fuente: Propia

El porcentaje de 5.88% evaluado a través de volumetría se determinó como el contenido óptimo de cemento asfáltico, permitiendo obtener un contenido de vacíos del 4.03%, el cual al evaluar la volumetría cumplió con los parámetros como lo son Va, VAM, VFA relación Filler - asfalto, entre otros, cuyos parámetros son estipulados por el protocolo AMAAC. En la siguiente tabla se presentan los resultados volumétricos obtenidos para la mezcla asfáltica de referencia.

Tabla V-35. Resultados de volumetría de la mezcla asfáltica de referencia

% C.A.(R.M)	Gsb	Gse	Gmm	Gmb
Cemento Asfáltico Respecto a la Mezcla	Gravedad Especifica bruta del agregado	Gravedad Especifica efectiva del agregado	Gravedad especifica teórica máxima de la mezcla suelta	Gravedad especifica bruta de la mezcla compactada
5,88	2,568	2,660	2,429	2,331

Va	VAM	VFA	Pba	Pbe	Dp
Vacios de aire de la mezcla compactada	Vacios en el agregado mineral (% del volumen neto)	Vacios llenos de asfalto (% del VAM)	asfalto absorbido, % en la masa del agregado	Contenido de asfalto efectivo (% del total de la mezcla)	Relación filler - asfalto
4,03	14,566	72,302	1,382	4,579	1,092

Fuente: Propia

Los resultados nos presentan un valor de 5.88% como el porcentaje para el contenido óptimo de asfalto determinado respecto a la mezcla, a este valor se llegó con un Gmm de 2,429 de la mezcla suelta, una vez elaborados los especímenes se obtuvo un Gmb de 2,331 el cual, nos permitió obtener un contenido de vacíos de 4,03% encontrándose en el rango de 4 ± 1 estipulado por el protocolo AMAAC, de igual manera se calculó el porcentaje de vacíos ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla compacta con un valor de 14,566 el

cual se encuentra por encima del valor estipulado por el protocolo siendo de 13 como mínimo para un agregado con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " (19 mm).

El valor del VFA que se calculó como "el porcentaje del VAM que contiene asfalto" es igual a 72,302% el cual se encuentra en el rango entre 65 y 78% para un nivel de tránsito entre 1 millón a 3 millones de ejes equivalentes, cumpliendo con el parámetro.

El valor de Pba no tiene un rango estipulado, pero este valor representa la cantidad de asfalto que absorbió el agregado respecto a su masa, lo cual la absorción del agregado es una prueba inicial para visualizar este parámetro, siendo de 1,382% el asfalto absorbido. por otro lado, el Pbe es el contenido de asfalto efectivo, quiere decir que es la cantidad de asfalto necesaria para recubrir superficialmente cada partícula de agregado, para este caso su valor fue de 4,579% con respecto al 5,88% como el contenido optimo, lo que quiere decir que el 1,301% fue el porcentaje absorbido con respecto a la masa de la mezcla.

Por último, se calculó la relación que tiene el contenido de asfalto efectivo, con respecto al porcentaje en peso del agregado más fino que pasa la malla No.200, denominado filler, este valor se debe encontrar en un rango entre 0,6 y 1,2 para cualquier nivel de tránsito, en nuestro caso el valor se encuentra en el rango, siendo de 1,092, lo que determina el cumplimiento de la relación y valores de volumetría.

Figura V-38. Especímenes elaborados para calcular Volumetría – Mezcla de Referencia



Fuente: Propia

5.6.1.2. Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)

El cálculo de la susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR) se determinó fabricando 6 especímenes. Para este caso se compactaron seis (6) probetas que comprenden diámetros de 150 mm con una altura de 95 mm (figura V-38), en donde a cada una se le realizó volumetría para determinar la cantidad de vacíos obteniendo el rango de $7\pm 1\%$ de vacíos, así mismo se las organizo en tres pares de las cuales un espécimen por par paso por un proceso de acondicionamiento, para finalmente ensayar los acondicionados con los no acondicionados y los resultados se presentan en la siguiente tabla V-36.

Figura V-39. Especímenes para evaluación de TSR.



Fuente: Propia

Tabla V-36. Resultados de TSR para la mezcla de referencia

EVALUACION DE DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR) - MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA								
Característica	Clave	Unidad	acondionadas Sta			no acondionadas St		
			1	4	6	2	3	5
Diámetro	D	mm	149,83	149,87	149,97	149,85	149,86	149,88
Espesor	t	mm	95,53	95,74	95,96	95,68	95,83	95,92
Volumen	E	cm ³	1604,6	1605,4	1605,1	1611,9	1608	1607,6
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m ³	2,245	2,241	2,244	2,234	2,240	2,241
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m ³	2,429	2,429	2,429	2,429	2,429	2,429
Vacíos (100*(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7,591	7,738	7,623	7,99	7,789	7,738
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm ³	121,8	124,4	122,3	129,2	125,2	124,4
DESPUES DE PRESION DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	3694,3	3688,2	3687,8			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	76,02	70,95	70,45			
Volumen (B'-C')	E'	cm ³	1632,8	1628,3	1626,5			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	1,8	1,4	1,3			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Diámetro	D	mm	150,33	150,14	150,40			
Espesor	t	mm	95,89	96,01	96,27			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	3702	3701	3702			
Volumen (B''- C'')	E''	cm ³	1620,1	1621	1621,7			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	%	82,3	81,4	82,1			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	1,0	1,0	1,0			

DATOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)								
Carga	P"	N	9738,05	11591,52	11581,71	11748,43	11375,77	12130,89
(St) Resistencia del espécimen no acondicionado ($2000 \cdot P'' / tD\pi$)	St	kPa				521,66	504,30	537,20
(Sta) Resistencia del espécimen acondicionado ($2000 \cdot P'' / \pi t'' D''$)	Sta	kPa	430,09	511,97	509,22			
TSR (Sta / St)	TSR	%	92,84%					
						MIN. ESPECIFICADO= 80.0%		

Fuente: Propia

Con referencia a los datos presentados en la tabla V-36, esta se dividió en cuatro partes para obtener el valor de TSR.

Los primeros valores determinados una vez se fabricaron los especímenes presentan los diámetros de las pastillas los cuales están en el rango de los 150 mm estipulados para especímenes de TSR, de igual forma las alturas comprenden un valor de 95 mm, quiere decir que está cumpliendo con las alturas para especímenes de TSR por el protocolo AMAAC.

De la volumetría realizada pudimos obtener el valor de Gmb para cada espécimen, teniendo como referencia el valor de la multiplicación del Gmm por 93% para obtener un $7 \pm 1\%$ de vacíos igual a 2.258, a partir de ahí los valores de Gmb oscilan para cumplir con los vacíos, de igual forma, se calcularon los vacíos por probeta con el fin de tenerlos en el rango ya que, si se sobrepasan los vacíos la mezcla tiende a deteriorarse aún más con el acondicionamiento, pero si es el caso y los vacíos son bajo, no se lograra el daño inducido por humedad que se espera tenga la mezcla y poder evaluarlo.

La segunda parte después de presión de vacío, solo se realizó para tres especímenes elegidos de los tres pares conformados con igualdad de características, de ellos obtuvimos la masa saturada superficialmente seca después de saturarlos entre un 70% y 80% como lo estipula el protocolo para acondicionamiento de especímenes de TSR, seguidamente se calculó el grado de saturación el cual debe estar en el rango mencionado, obteniendo valores de 76.02% para la probeta uno, 70.95% para la cuatro y 70.45% para la seis, adicional se obtuvo el volumen de cada espécimen, el cual es mayor con respecto al volumen antes de la presión de vacío, esto se debe a la saturación extra que tiene por el acondicionamiento en la vasija de presión al vacío, como último valor se determinó el grado de expansión el cual nos indica en porcentaje, que tanto el espécimen se expandió al realizarle la saturación. El valore de la probeta uno corresponde a 1.8%, para la cuatro 1.4% y para la seis 1.3%.

La tercera parte consta de los especímenes después del acondicionamiento. En esta etapa ya han sufrido congelamiento y descongelamiento, por esta razón, tomamos nuevamente su diámetro y espesor con el fin de comprobar si ha tenido algún cambio geométrico, de igual forma se calculó la masa saturada superficialmente seca la cual ha ido aumentando

desde su fabricación y por el proceso de acondicionamiento. La probeta número uno ha tenido un aumento del 0,208% con respecto a la inicial, la probeta cuatro aumentó 0,347% y la probeta seis aumentó 0,385%, nuevamente se calcula el volumen, así mismo el grado de saturación el cual aumento a un 82.3% para el espécimen uno, 81.4% para el cuatro y 82.1% para el sexto, esto quiere decir que la estructura del espécimen es más susceptible a la permeabilidad debido al acondicionamiento, lo que permite un mayor ingreso de agua en su estructura.

El grado de expansión se determinó después del acondicionamiento con el fin de obtener un porcentaje en donde nos indica que tanto el espécimen se ha logrado expandir, para este caso la probeta uno tuvo 1.0% de expansión, si lo acumulamos con el anterior, la pastilla en todo el proceso de acondicionamiento ha tenido 2.8% de expansión, si realizamos esto para los demás, se tiene un 2.4% de expansión total en todo el acondicionamiento para la probeta cuatro y para la cinco un valor de 2.3%.

Como cuarto paso, se somete a carga los especímenes acondicionados, con los no acondicionados en la prensa para evaluar especímenes de TSR, antes de esto ya tuvieron que haber estado en baño maría a 25°C por un lapso de una hora aproximadamente. Con las cargas obtenidas se calcula la resistencia, lo cual para las no acondicionadas se obtuvo un valor de 521.66 kPa para la probeta dos, 504.30 kPa para la tres, y 537.20% para la quinta, posterior se ensayaron las acondicionadas cuyo valor para la probeta uno fue de 430.09 kPa, 511.97 kPa para la cuatro y 509.22% para la seis.

Finalmente se promedian los valores de la resistencia de los especímenes acondicionados y se dividen entre el promedio de los valores de la resistencia de los especímenes no acondicionados, para este caso el valor de TSR que obtuvimos para una mezcla de referencia fue de 92.84%, el cual está 12.84% más alto que el mínimo especificado por el protocolo AMAAC siendo de 80.0%

5.6.1.3. Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo

El cálculo de la susceptibilidad a la deformación permanente se evaluó fabricando cuatro (4) especímenes los cuales, cumplieron en primera instancia con la geometría de 150 mm de diámetro y 50 mm de altura, tal cual lo estipula el protocolo AMAAC, y en segunda instancia con la volumetría, teniendo un porcentaje de vacíos de $7 \pm 0.5\%$. Las propiedades evaluadas fueron las siguientes.

Tabla V-37. Propiedades de los especímenes de referencia

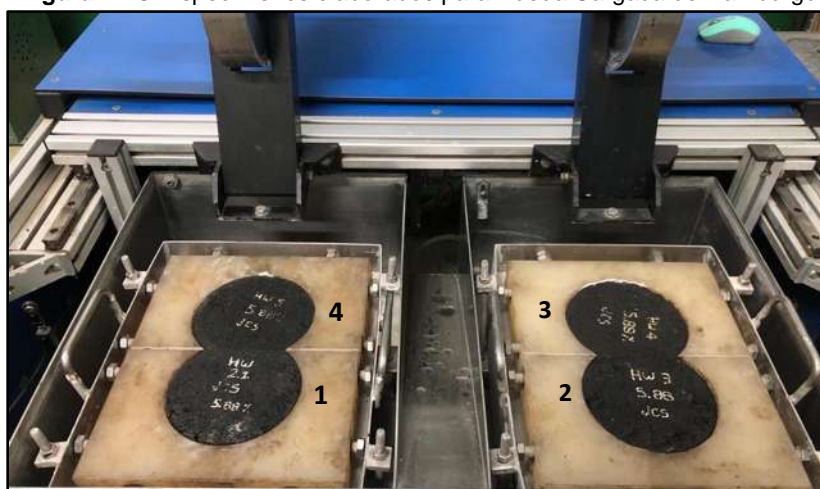
Características	ESPECIMENES			
	1	2	3	4
Absorción de la mezcla compactada [%]	2,786	2,703	2,840	2,876
(G _{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compacta	2,271	2,249	2,252	2,251

Características	ESPECIMENES			
	1	2	3	4
(G _{mm}) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta	2,429	2,429	2,429	2,429
(Va) Vacíos de la Mezcla	6,51	7,41	7,31	7,32

Fuente: Propia

Para correr la prueba los especímenes se organizaron en pares, teniendo como referencia la volumetría evaluada, siendo así quedaron conformados de la siguiente manera: el espécimen 1 con el 4 y el 2 con el 3, así mismo se acondicionaron previamente a 50°C por un lapso de 30 minutos directamente en el equipo, pasado este tiempo se dejó correr la prueba para un rango de pasadas igual a 20 000 y observando una deformación máxima de 10 mm, los resultados se presentan a continuación.

Figura V-40. Especímenes elaborados para Rueda Cargada de Hamburgo



Fuente: Propia

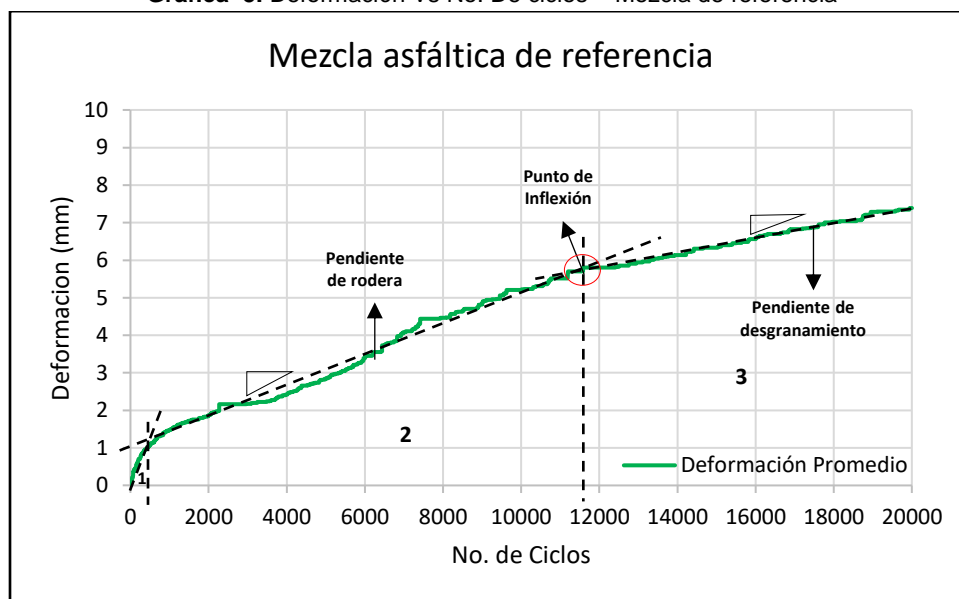
Tabla V-38. Resultados de deformación permanente – Mezcla de Referencia

Mezcla asfáltica de referencia con 5,88% de cemento Asfáltico			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio (mm)
0	0,00	0,00	0,00
2000	2,479	1,239	1,86
4000	2,630	2,201	2,42
6000	3,490	3,288	3,39
8000	4,502	4,426	4,46
10 000	5,210	5,210	5,21
12 000	5,590	7,891	6,74
14 000	5,843	6,424	6,13
16 000	6,273	6,854	6,56
18 000	6,551	7,487	7,02
20 000	6,880	7,891	7,39

Fuente: Propia

En la tabla V-38, se puede observar la deformación permanente del par de probetas denominadas probeta 1 y probeta 2, con respecto al número de ciclos que va desde el ciclo número cero (0), hasta el ciclo número 20 000. La prueba se corrió a una temperatura constante de 50°C en donde se observaron las deformaciones permanentes las cuales, al llegar hasta el ciclo 20 000 la probeta 1 obtuvo una deformación de 6,880 mm y la probeta 2 una deformación de 7,891 mm, en promedio fue una deformación de 7,39 mm, lo cual está en el rango exigido por el protocolo AMAAC siendo la deformación máxima permitida de 10 mm, cabe resaltar que la prueba se corrió hasta los 20 000 ciclos para niveles de tránsito alto y muy alto, el resultado para este caso nos permitió verificar que la mezcla cumplió en el rango de deformación inferior a los 10 mm, por tal motivo el diseño cumplió la susceptibilidad a la deformación permanente mediante la rueda cargada de Hamburgo.

Gráfica 5. Deformación Vs No. De ciclos – Mezcla de referencia



Fuente: Propia

La gráfica 5 se realizó con los valores de la tabla V-38, en donde se graficó la deformación medida en mm con respecto al número de ciclos. En ella se pudo analizar el comportamiento de los especímenes, para ello se trazaron líneas tangenciales respecto a la gráfica obtenida, así mismo se resaltaron los puntos de inflexión y para estudiar el comportamiento se dividió en tres zonas.

La primera zona presenta la consolidación post compactación que se presume se densifica en los primeros 1 000 ciclos, para este caso se densificó aproximadamente a los 500 ciclos, 500 ciclos por debajo del valor, lo cual no hay un parámetro que especifique que este mal la densificación con ciclos menores.

La siguiente zona denominada número dos se le conoce como pendiente de rodera, esta ocurre inmediatamente después del proceso de post compactación y en ella se evaluó la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico, la cual ocurrió entre en

ciclo 500 al ciclo 11 500 con deformaciones que van desde 1,4 mm hasta 5,8 mm teniendo una deformación acumulada de 4,4 mm y una pendiente de 0,04% en esta zona.

Posterior a la zona dos se encuentra el punto de inflexión y representa el número de pasadas que soporta la mezcla a una temperatura predeterminada, que para este caso es de 50°C antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse, por tal motivo se evidencia ocurrió en el ciclo 11 500.

La zona tres están conformadas por la pendiente de desgranamiento igual a 0,018% y ocurre hasta que se termine el ensayo, en ella se midió la acumulación de la deformación permanente debido al daño por humedad, este inicio en el ciclo 11 500 hasta el 20 000 con una deformación inicial de 5,8 mm y una final de 7,4 mm y la acumulada de 1,6 mm.

Figura V-41. Deformación permanente – Mezcla de Referencia



Fuente: Propia

5.6.2. MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA

La mezcla asfáltica con adición de fibra de colilla de cigarrillo se realizó teniendo en cuenta los agregados caracterizados, así como el cemento asfáltico convencional, para este caso a la mezcla se le adiciono 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo con respecto al peso de la mezcla, de esta manera se calculaba la cantidad en gramos de agregado necesario, posterior con ese nuevo peso se determinaba la cantidad en gramos de fibra de colilla y adicional con el nuevo peso del agregado y las fibras se calculaba la cantidad de asfalto que requería la mezcla con el fin de obtener valores exactos de las cantidades a disponer.

Para este tipo de mezcla se elaboraron especímenes para calcular volumetría, de igual forma especímenes para ser evaluados por pruebas de desempeño como TSR y Rueda Cargada de Hamburgo, los resultados se presentan en los siguientes apartados.

Figura V-42. Proceso de elaboración Mezcla con 0.1% de fibra de colilla



a. Adición de fibra b. Mezcla agregado fibra asfalto c. Curado d. Compactación

Fuente: Propia

5.6.2.1. Cálculo de Volumetría

Para determinar la volumetría se realizaron especímenes de tanteo evaluados por replica, las dimensiones comprendían un diámetro de 150 mm y una altura variable entre 115+0.5 mm, los pares se realizaron teniendo como referencia el contenido óptimo de asfalto para la mezcla de referencia, el cual fue de 5.88%, a partir de este valor y su volumetría se calculó el contenido óptimo para la mezcla con 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo, el cual cumplía los vacíos requeridos de $4\pm 1\%$, siendo el contenido de cemento asfáltico de 5.98% como el adecuado para el diseño total de los especímenes de desempeño.

El porcentaje de 5.98% de cemento asfáltico el cual permitió evaluar los especímenes a través de volumetría se determinó como el contenido óptimo, al obtener un contenido de vacíos del 4.24%, de igual forma, cumplió con los parámetros como son V_a , VAM, VFA relación Filler – asfalto al compararlos con los requisitos mínimos para mezclas de alto desempeño. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos de la volumetría.

Tabla V-39. Resultados de Volumetría para Mezcla asfáltica con 0.1% de fibra

% C.A.(R.M)	Gsb	Gse	Gmm	Gmb
Cemento Asfáltico Respecto a la Mezcla	Gravedad Especifica bruta del agregado	Gravedad Especifica efectiva del agregado	Gravedad especifica teórica máxima de la mezcla suelta	Gravedad especifica bruta de la mezcla compactada
5,98	2,568	2,657	2,427	2,324

V_a	VAM	VFA	Pba	Pbe	Dp
Vacíos de aire de la mezcla compactada	Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)	Vacíos llenos de asfalto (% del VAM)	asfalto absorbido, % en la masa del agregado	Contenido de asfalto efectivo (% del total de la mezcla)	Relación filler - asfalto
4,244	14,913	71,543	1,336	4,724	1,058

Fuente: Propia

Los resultados nos presentan un valor de 5.98% de cemento asfáltico como el porcentaje del contenido óptimo respecto a la mezcla con fibra. A este valor se llegó con un valor de Gmm de 2.427 de la mezcla asfáltica suelta, el cual disminuyó conforme aumentó el contenido de asfalto, así mismo elaborados los especímenes se obtuvo un valor de Gmb de 2.324 el cual nos permitió conseguir un contenido de vacíos de 4.24%, encontrándose en el rango de 4 ± 1 estipulado por el protocolo AMAAC. Aprobado el valor se calculó el porcentaje de vacíos ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla compacta con un valor de 14.913 el cual se encuentra por encima del valor estipulado por el protocolo siendo de 13 como mínimo para un agregado con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " (19mm), como lo es en este caso. Cabe resaltar que un aumento en la cantidad del asfalto, aumenta propiedades como lo es el VAM, VAF y Pbe en la mezcla, ya que estas características están relacionadas.

El valor del VFA que se calculó como "el porcentaje del VAM que contiene asfalto" es igual a 71.543% el cual se encuentra en el rango entre 65 y 78% para un nivel de tránsito entre 1 millón a 3 millones de ejes equivalentes, cumpliendo con el parámetro del protocolo. El valor de Pba no tiene un rango estipulado, pero este valor representa la cantidad de asfalto que absorbió el agregado con respecto a su masa, siendo de 1.336%. Por otro lado, el Pbe es el contenido de asfalto efectivo, quiere decir que es la cantidad de asfalto necesaria para recubrir superficialmente cada partícula de agregado sin ser absorbido, para este caso su valor fue de 4.724%, con respecto al 5.98% como el contenido óptimo, lo que quiere decir que el 1.256% fue el porcentaje absorbido con respecto a la masa de la mezcla. Por último, se calculó la relación que tiene el contenido de asfalto efectivo con respecto al porcentaje en peso del agregado más fino que pasa la malla No.200 denominado filler y utilizado en la mezcla asfáltica, este valor se debe encontrar en un rango entre 0.6 y 1.2 para cualquier nivel de tránsito, en nuestro caso el valor se encuentra en el rango siendo de 1.058, lo que determina el cumplimiento de la relación y valores de volumetría de toda la mezcla asfáltica.

Por último, el valor del porcentaje de asfalto para la mezcla con fibra tuvo adicional un valor de 0.1% de contenido de asfalto con respecto a la mezcla de referencia, esto se debe a que esta cantidad fue necesaria para ser absorbida por las fibras y terminar encapsuladas, además, de permitir el cumplimiento de las propiedades volumétricas de la mezcla respecto a los requerimientos exigidos por el protocolo AMAAC.

5.6.2.2. Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)

El cálculo de la susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR) se determinó con la fabricación de especímenes con adición de 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo cada uno, en este caso se mezclaron y compactaron seis (6) probetas que comprendieron diámetros de 150 mm con una altura de 95 mm, a cada una se le realizó volumetría para determinar la cantidad de vacíos que se encontraban en el rango de $7 \pm 1\%$, así mismo se las organizó en tres pares teniendo en cuenta que compartieran características, así mismo un espécimen por par se eligió para pasarlo por un proceso de acondicionamiento que duró alrededor de tres días en congelamiento y deshielo, para finalmente ensayar los

acondicionados con los no acondicionados y obtener el valor de TSR, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla V-40. Resultados de TSR para la mezcla con adición de 0.1% de fibra

EVALUACIÓN DE DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR) – MEZCLA ASFÁLTICA CON 0.1% DE FIBRA DE COLILLA - 5.98% AC								
Característica	Clave	Unidad	acondionadas Sta			no acondionadas St		
			1	3	4	2	5	6
Diámetro	D	mm	148,97	150,00	150,02	149,99	149,97	150,01
Espesor	t	mm	95,82	96,06	96,22	96,36	96,05	96,21
Volumen	E	mm ³	1610,4	1616,2	1619,6	1626,7	1619,7	1609,8
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m ³	2,242	2,239	2,234	2,224	2,234	2,248
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m ³	2,427	2,427	2,427	2,427	2,427	2,427
Vacíos (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7,608	7,745	7,944	8,00	7,937	7,371
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm ³	122,5	125,2	128,7	136,4	128,6	118,7
DESPUES DE PRESION DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	3708,1	3711,3	3713,1			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	79,17	73,97	73,52			
Volumen (B'-C')	E'	cm ³	1635,9	1636,9	1642,6			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	1,6	1,3	1,4			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Diámetro	D	mm	150,28	150,39	150,15			
Espesor	t	mm	96,51	96,38	96,47			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	mm ³	3717,1	3719,9	3722,8			
Volumen (B''- C'')	E''	cm ³	1618,7	1624	1628,9			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm ³	86,5	80,8	81,1			
Grado de expansión (100*(E''-E)/E)	Exp''	%	0,5	0,5	0,6			
DATOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)								
Carga	P''	N	8747,58	7355,03	7972,85	8012,07	9492,89	9031,97
(St) Resistencia del espécimen no acondicionado (2000*P'' / tDπ)	St	kPa				352,92	419,56	398,39
(Sta) Resistencia del espécimen acondicionado (2000*P''/πt''D'')	Sta	kPa	383,95	323,04	350,42			
TSR (Sta / St)	TSR	%	90,31%					
						MIN. ESPECIFICADO=80.0%		

Fuente: Propia

Con referencia a los datos obtenidos y presentados en la tabla V-40, esta se dividió en cuatro partes conforme a la aplicación del proceso de acondicionamiento para obtener el valor de TSR.

Los primeros valores determinados una vez se fabricaron los especímenes presentan los diámetros de las pastillas, los cuales se confirman que se encuentran en el rango de 150 mm estipulados para especímenes de TSR, de igual forma las alturas cuyo valor comprenden 96 mm de altura, siendo 1 mm mayor de los 95 mm sugeridos por el protocolo; esto pudo ocurrir debido a la adición de fibra y la posible expansión que genero después de

la compactación y el secado, aun así las altura no se alejan de lo requerido para especímenes de TSR por el protocolo AMAAC igual a 95 ± 5 mm.

De la volumetría realizada se obtuvo el valor de Gmb para cada espécimen, teniendo como referencia el valor de la multiplicación del Gmm por 93% para obtener un $7 \pm 1\%$ de vacíos igual a 2.257, con este resultado se observó que tanto variaron los valores de Gmb para cumplir con los vacíos requeridos, solo hubo un espécimen que estaba en el límite del rango y fue el 2, por tal motivo se lo ensayo pero en la condición de no acondicionado, por lo anterior los especímenes se encontraron en un rango de 7.371% y 7.944% de vacíos.

La segunda etapa ocurrió después de presión de vacío, esta solo se realizó para tres especímenes elegidos para acondicionamiento (1-3-4) de los tres pares conformados con igualdad de características, de ellos obtuvimos la masa saturada superficialmente seca después de saturarlos entre un 70% y 80% como lo estipula el protocolo para acondicionamiento de especímenes de TSR, se calculó el grado de saturación el cual debe estar en el rango mencionado obteniendo valores de 79.17% para la probeta uno, 73.97% para la tres y 73.52% para la cuatro, se obtuvo el volumen de cada espécimen el cual aumento con respecto al volumen antes de la presión de vacío, esto se debe a la saturación extra que tiene por el acondicionamiento en la vasija de presión al vacío lo que ocasiona un aumento de volumen en los espécimen debido a la presencia de agua en su estructura, como último valor se determinó el grado de expansión, el cual nos indica en porcentaje que tanto el espécimen se expandió al realizar la saturación; los valores para la probeta uno corresponden a 1.6%, para la tres 1.3% y para la cuatro 1.4%, este porcentaje hace referencia a cuantas veces se expandió el espécimen respecto a su condición inicial.

La tercera parte consta de los especímenes después del acondicionamiento. En esta etapa ya han sufrido congelamiento por 15 horas, descongelamiento a 60°C por 24 horas y acondicionamiento a 25°C por 2 horas, por esta razón se mide nuevamente su diámetro, así como espesor con el fin de comprobar si ha tenido algún cambio geométrico. Para este caso se evidencio que ocurrió cambio en ambas medidas, que, aunque no se pueda apreciar, al medirla y rectificarla existe evidencia.

Así mismo se calculó la masa saturada superficialmente seca, la cual ha ido aumentando desde su primera medida y debido al proceso de acondicionamiento llevado a cabo, para este paso la probeta uno ha tenido un aumento en su peso del 0.243% con respecto a la masa después de presión de vacío, la probeta tres aumentó 0.231% y la probeta cuatro aumentó 0.261%. Nuevamente se calculó el volumen de los especímenes para observar numéricamente el aumento que ha ganado, así mismo se calculó el grado de saturación el cual aumento a un 86.5% para el espécimen uno, 80.5% para el tres y 81.1% para el cuarto, esto quiere decir que la estructura del espécimen se volvió más susceptible a la permeabilidad debido al acondicionamiento de congelación, lo que permite un mayor ingreso de agua en su estructura.

El grado de expansión se determinó después del acondicionamiento con el fin de obtener un porcentaje en donde nos indica que tanto el espécimen adicionalmente se ha logrado expandir después del descongelamiento debido a saturación a 60°C, para este caso la probeta uno tuvo 0.5% de expansión, si lo acumulamos con el anterior la pastilla en todo el proceso de acondicionamiento ha tenido 2.1% de expansión, si realizamos esto para los demás se tiene un valor de 1.8% de expansión total en todo el acondicionamiento para la probeta tres y para la probeta cuatro un valor de 2.0%.

Como cuarto paso se somete a carga los seis especímenes, tres acondicionados con los tres no acondicionados en la prensa para evaluar especímenes de TSR después de estar en baño maría a 25°C por un lapso superior a una hora e inferior a dos horas, con las cargas resultantes se calculó la resistencia de los especímenes, lo cual para los no acondicionados se obtuvo un valor de 352.92 kPa para la probeta dos, 419.56 kPa para la cinco y 398.39% para la sexta, posterior se ensayaron los acondicionados cuyo valor para la probeta uno fue de 383.95 kPa, 323.04 kPa para la tres y 350.42% para la cuatro.

Figura V-43. Especímenes ensayados mediante TSR – Mezcla con 0.1% de fibra



Fuente: Propia

Finalmente se promedian los valores de la resistencia de los especímenes acondicionados y se dividen entre el promedio de los valores de la resistencia de los especímenes no acondicionados, para este caso el valor de TSR que obtuvimos para una mezcla con adición de 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo fue de 90.31%, el cual está 10.31% más alto que el mínimo especificado por el protocolo AMAAC siendo de 80.0% y con respecto a la mezcla de referencia tuvo una disminución de 2.53%.

5.6.2.3. Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo

El cálculo de la susceptibilidad a la deformación permanente se evaluó con la fabricación de cuatro (4) especímenes los cuales, en primera instancia cumplieron con la geometría especificada de 150 mm de diámetro por 50 mm de altura, tal cual lo estipula el protocolo AMAAC para especímenes evaluadas mediante la rueda cargada de Hamburgo, y en

segunda instancia, con los parámetros de volumetría con un porcentaje de contenido de vacíos igual a $7 \pm 0.5\%$. Las propiedades se observan en la tabla V-41.

Figura V-44. Especímenes compactados para Rueda Cargada de Hamburgo



Fuente: Propia

Tabla V-41. Propiedades de los especímenes con 0.1% de fibra de colilla

Características	ESPECIMENES			
	1	2	3	4
Absorción de la mezcla compactada [%]	2,269	2,126	1,968	2,279
(G_{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compacta	2,252	2,239	2,243	2,243
(G_{mm}) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta	2,427	2,427	2,427	2,427
(V_a) Vacíos de la Mezcla	7,2	7,7	7,5	7,5

Fuente: Propia

De los especímenes evaluados se determinó lo siguiente: el primero cumplió el contenido de vacíos siendo de 7,2%, el segundo estaba un poco alejado de los valores requeridos con 7,7% de vacíos, para los especímenes tres y cuatro su contenido de vacíos es igual a 7,5% cumpliendo al límite la tolerancia permitida, por consiguiente, al formar los pares de especímenes para evaluarlos se estipuló que se formarían con características similares permitiendo hacer un balance entre ellas.

Para la organización de los especímenes en pares se tomó como referencia la volumetría, en especial el contenido de vacíos de cada uno, quedando organizados de la siguiente manera: el espécimen 1 con el 2 y el 3 con el 4, de igual forma se pre acondicionaron a $50 \pm 1^\circ\text{C}$ por un lapso de 30 minutos directamente en el equipo, pasado este tiempo se dejó correr la prueba para un número de pasadas igual a 20 000 y una deformación máxima de 10 mm. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla V-42. Resultados de deformación permanente – Mezcla con 0.1% de fibra de colilla

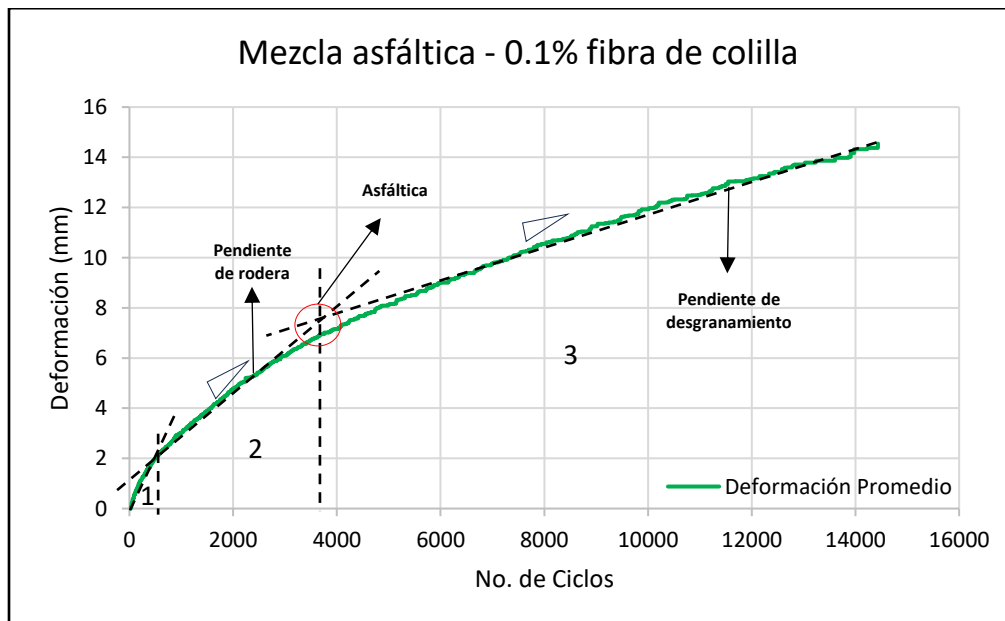
Mezcla asfáltica con 5.98% de cemento Asfáltico y 0.1% de fibra			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio
0	0,00	0,00	0,00
2000	5,261	4,300	4,78
4000	7,917	6,399	7,16

Mezcla asfáltica con 5.98% de cemento Asfáltico y 0.1% de fibra			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio
6000	9,637	8,372	9,00
8000	11,078	10,016	10,55
10000	12,545	11,306	11,93
12000	14,114	12,166	13,14
14000	15,530	13,102	14,32
14436	15,985	13,102	14,54

Fuente: Propia

En la tabla V-42, se pueden observar los valores de la deformación permanente del par de probetas denominadas probeta 1 y probeta 2 con respecto al número de ciclos, esta inicia a partir del ciclo cero (0), hasta el ciclo 14 436. La prueba se corrió a una temperatura constante de 50°C en donde se observaron las deformaciones permanentes las cuales se promediaron para obtener el valor de deformación total, siendo así, se tomaron las lecturas cada 2 000 ciclos, obteniendo la máxima deformación permitida aproximadamente al ciclo 7 300 con un valor de 10.03 mm lo cual está por encima del recomendado, por esta razón se observa que no logro cumplir con el número de ciclos mínimo para un nivel de tránsito bajo y tampoco la deformación. Cabe resaltar que la prueba se logró correr hasta los 14 436 ciclos para niveles de tránsito medio, ya que se detuvo la prueba por cuestiones de cuidado del equipo y los especímenes no permitieron más por su degradación, el resultado para este caso nos permitió observar que la mezcla llevo por encima de los 14 mm de deformación.

Gráfica 6. No. De ciclos Vs Deformación – Mezcla con 0.1% de fibra de colilla



Fuente: Propia

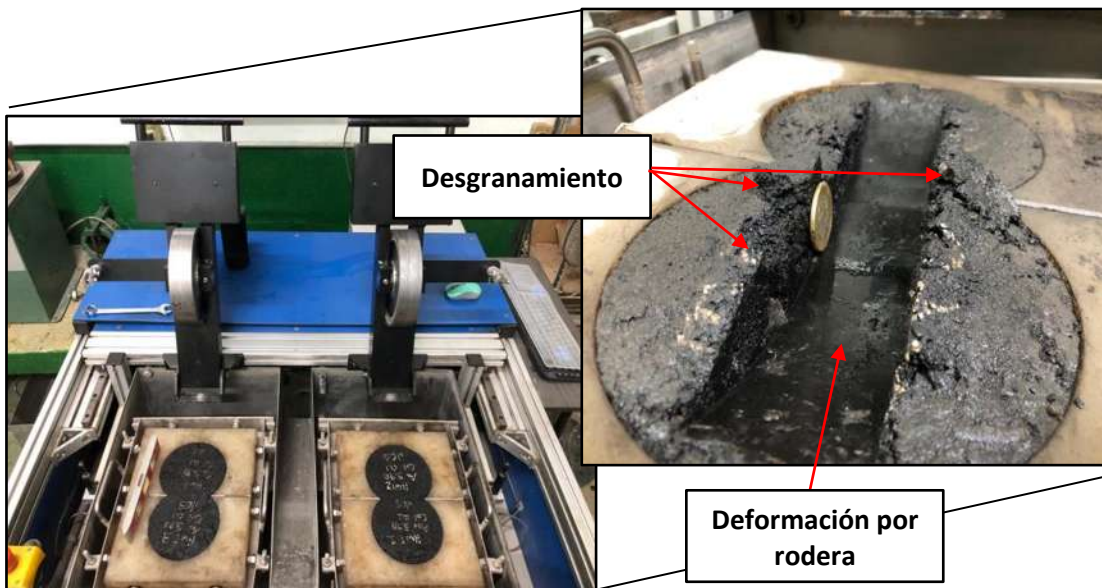
La gráfica 6 se realizó con los valores de la tabla V-42, en donde se graficó la deformación producida en mm respecto al número de ciclos. En ella se pudo analizar el comportamiento de deformación que tuvo los especímenes conforme aumenta el número de ciclos (número de pasadas de cada rueda), para ello se trazaron líneas tangenciales respecto a la gráfica con puntos de inflexión para ver el comportamiento que se tuvo dividiéndola en tres zonas.

la zona número uno presenta la consolidación post compactación que se presume se densifica en los primeros 1 000 ciclos, para este caso se densificó aproximadamente a los 450 ciclos, 550 ciclos por debajo del valor, lo cual, no hay un parámetro que especifique que esté mal la densificación con ciclos menores.

La siguiente zona denominada numero dos se le conoce como pendiente de rodera, esta ocurre inmediatamente después del proceso de post compactación y en ella se evaluó la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico, la cual ocurrió entre el ciclo 550 al ciclo 3 700 con deformaciones que van desde 2.0 mm hasta 7.0 mm, teniendo una deformación acumulada de 5.0 mm y una pendiente de 0.158%. Seguidamente se encuentra el punto de inflexión y representa el número de pasadas que soporta la mezcla a una temperatura predeterminada, que para este caso es de 50°C antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse, por tal motivo se evidencia que ocurrió en el ciclo 3 700.

Por último, la zona tres la comprende la pendiente de desgranamiento igual a 0.070% y ocurre hasta que se termine el ensayo, en ella se mide la acumulación de deformación permanente debido al daño por humedad, este inició en el ciclo 3 700 hasta el 14 436 con una deformación inicial de 7.0 mm hasta una final de 14.54 mm, y la acumulada de 7.54 mm. En la figura V-44, se puede observar el desgranamiento y la deformación por rodera.

Figura V-45. Deformación permanente Mezcla con 0.1% de fibra



Fuente: Propia

5.6.3. MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.1% DE FIBRA Y SUSTITUCIÓN TOTAL DEL FILLER POR CARBONATO DE CALCIO

La mezcla asfáltica a continuación presentada lleva adición de fibra de colilla de cigarrillo de 0,1% respecto al peso de la mezcla. Para su fabricación se pesaba la cantidad en gramos del material necesario para determinar la cantidad de fibra equivalente a 0,1%, posterior con ese nuevo peso del agregado más fibra se determinaba la cantidad en gramos de asfalto que requería la mezcla, cabe resaltar que esta mezcla asfáltica tuvo sustitución total del filler (pasa malla No. 200) por carbonato de calcio con el fin de, mejorar propiedades de adherencia entre el agregado con la fibra respecto al asfalto ya que, en las demás mezclas el filler es el mismo obtenido de las arenas.

Para este tipo de mezcla se elaboraron especímenes con el fin de obtener resultados volumétricos, así mismo para ser evaluados por pruebas de desempeño como TSR y Rueda Cargada de Hamburgo. los resultados se presentan en los siguientes apartados.

Figura V-46. Elaboración de especímenes con 0.1% de fibra y carbonato de calcio



5.6.3.1. Cálculo de Volumetría

Para determinar la volumetría se realizaron especímenes de tanteo evaluados por réplica, las dimensiones comprendían un diámetro de 150 mm (6”) y una altura variable entre 115 - 116 mm, los pares se realizaron teniendo como referencia el contenido óptimo de asfalto para la mezcla con 0,1% de fibra de colilla, el cual fue de 5,98%, a partir de este valor y su volumetría se calculó el contenido óptimo para la mezcla con 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo y carbonato de calcio, el cual cumplió los vacíos requeridos de $4\pm 1\%$, siendo el contenido de cemento asfáltico igual al tomado de referencia equivalente a 5,98%, como el adecuado para el diseño de los especímenes de desempeño.

El porcentaje de 5,98% de cemento asfáltico permitió obtener un contenido de vacíos del 4,09%, de igual forma cumplió con los parámetros como son V_a , VAM, VFA relación Filler – asfalto al compararlos con los requisitos mínimos para mezclas asfálticas de

granulometría densa de alto desempeño. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos de la volumetría.

Tabla V-43. Resultados de Volumetría para Mezcla asfáltica con 0.1% de fibra y carbonato de calcio

% C.A.(R.M)	Gsb	Gse	Gmm	Gmb
Cemento Asfáltico Respecto a la Mezcla	Gravedad Especifica bruta del agregado	Gravedad Especifica efectiva del agregado	Gravedad especifica teórica máxima de la mezcla suelta	Gravedad especifica bruta de la mezcla compactada
5,98	2,568	2,641	2,415	2,316

Va	VAM	VFA	Pba	Pbe	Dp
Vacíos de aire de la mezcla compactada	Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)	Vacíos llenos de asfalto (% del VAM)	asfalto absorbido, % en la masa del agregado	Contenido de asfalto efectivo (% del total de la mezcla)	Relación filler - asfalto
4,099	15,206	73,042	1,112	4,935	1,013

Fuente: Propia

Los resultados nos presentan un valor de 5,98% de cemento asfáltico como el contenido óptimo respecto a la mezcla con fibra de colilla y carbonato de calcio. Este valor se obtuvo con un Gmm de 2,415 de la mezcla asfáltica suelta, el cual disminuyó conforme aumentó el contenido de cemento asfáltico, así mismo, elaborados los especímenes se obtuvo un valor de Gmb de 2,316 el cual nos permitió conseguir un contenido de vacíos de 4,09% encontrándose en el rango de 4 ± 1 estipulado por el protocolo AMAAC. Aprobado el valor, se calculó el porcentaje de vacíos ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla compacta (VAM), con un valor de 15,206, el cual se encuentra por encima del valor estipulado por el protocolo, siendo de 13 como mínimo para un agregado con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " (19mm), como lo es en este caso.

El valor del VFA que se calculó como "el porcentaje del VAM que contiene asfalto", es igual a 73,042% el cual, se encuentra en el rango de 65 y 78% para un nivel de tránsito entre 1 millón a 3 millones de ejes equivalentes, cumpliendo así con el parámetro.

El valor de Pba no tiene un rango estipulado, pero este valor representa la cantidad de asfalto que absorbió el agregado con respecto a su masa, siendo de 1,112%, por otro lado el Pbe es el contenido de asfalto efectivo, quiere decir que es la cantidad de asfalto necesaria para recubrir superficialmente cada partícula de agregado sin ser absorbido por el mismo, este es igual al valor de 4,935% con respecto al 5,98% como el contenido óptimo, lo que quiere decir que el 1,045% fue el porcentaje absorbido con respecto a la masa de la mezcla. Adicional se calculó la relación que tiene el contenido de asfalto efectivo con respecto al porcentaje en peso del agregado más fino que pasa la malla No. 200 denominado filler utilizado en la mezcla asfáltica, este valor se debe encontrar en un rango entre 0,6 y 1,2 para cualquier nivel de tránsito, en nuestro caso el valor se encuentra en el

rango siendo de 1,013, lo que determina el cumplimiento de la relación y valores de volumetría de toda la mezcla asfáltica.

Por último, el valor del porcentaje de asfalto para la mezcla con fibra y carbonato de calcio tuvo el mismo contenido de asfalto respecto a la mezcla con 0,1% de fibra de colilla, lo que quiere decir que, el carbonato de calcio más fibra no requirió de más contenido de asfalto y tampoco absorbió menos, siendo así permitió el cumplimiento de las propiedades volumétricas de la mezcla respecto a los requerimientos exigidos por el protocolo, así mismo se procedió a diseñar los especímenes para evaluarlos por desempeño.

5.6.3.2. Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)

El cálculo de la susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR) se determinó con la fabricación de especímenes con adición de 0.1% de fibra de colilla de cigarrillo y sustitución del filler por carbonato de calcio. Para su fabricación se mezclaron y compactaron seis (6) probetas con diámetros de 150 mm y altura de 96 mm, 1 mm adicional a la altura en la que se encontraban los especímenes anteriores, así mismo, se les realizó volumetría para determinar la cantidad de vacíos que se encontraban en el rango de $7\pm 1\%$, por consiguiente se las organizó en tres pares que compartieran características, posterior un espécimen por par se eligió para pasar por un proceso de acondicionamiento en condiciones de, congelamiento y descongelamiento, para finalmente ensayarlos y obtener el valor de TSR, los resultados se presentan en la siguiente tabla V-44.

Tabla V-44. Resultados de TSR para la mezcla con adición de 0.1% de fibra y carbonato de calcio

DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR) - MEZCLA ASFÁLTICA CON 0.1% DE FIBRA DE COLILLA - 5.98% AC – CARBONATO DE CALCIO								
Característica	Clave	Unidad	acondionadas Sta			no acondionadas St		
			2	4	5	1	3	6
Diámetro	D	mm	149,90	150,08	149,95	149,95	150,06	150,05
Espesor	t	mm	96,14	96,60	96,56	96,50	96,34	96,75
Volumen	E	mm ³	1621,4	1629,5	1630,6	1618,6	1623,7	1630
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m ³	2,237	2,226	2,225	2,237	2,234	2,225
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m ³	2,415	2,415	2,415	2,415	2,415	2,415
Vacíos (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7,355	7,820	7,882	7,386	7,491	7,869
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm ³	119,25	127,43	128,53	119,55	121,63	128,26
DESPUES DE PRESION DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	3712,7	3721,9	3723,3			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	71,28	74,08	74,54			
Volumen (B'-C')	E'	cm ³	1634	1652,2	1649,5			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	0,8	1,4	1,2			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Diámetro	D	mm	150,16	150,30	150,49			
Espesor	t	mm	96,43	96,58	96,68			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	g	3734,4	3738	3745,3			
Volumen (B''- C'')	E''	cm ³	1636,8	1646	1650,5			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	%	89,5	86,7	91,7			
Grado de expansión (100*(E''- E)/E)	Exp''	%	0,9	1,0	1,2			

DATOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)								
Carga	P"	N	10414,72	8551,44	9463,47	11768,04	8894,68	11630,75
(St) Resistencia del espécimen no acondicionado ($2000 \cdot P'' / tD\pi$)	St	kPa				517,73	391,70	510,07
(Sta) Resistencia del espécimen acondicionado ($2000 \cdot P'' / \pi t'' D''$)	Sta	kPa	457,91	375,05	414,07			
TSR (Sta / St)	TSR	%	87,85%					
								MIN. ESPECIFICADO= 80.0%

Fuente: Propia

Con referencia a los datos obtenidos y presentados en la tabla V-44, esta se dividió en cuatro partes conforme a la aplicación del proceso de acondicionamiento para obtener el valor de TSR.

Los primeros valores determinados una vez se fabricaron los especímenes presentan los diámetros de las pastillas, los cuales se confirman que se encuentran en el rango de 150 mm estipulados para especímenes de TSR, de igual forma las alturas cuyo valor comprende 96 mm de altura, 1 mm mayor de los 95 mm a los que se compacta, esto pudo ocurrir debido a la adición de fibra y la posible expansión que generó después de la compactación y el secado a temperatura ambiente, ya que, es un elemento ajeno a la estructura de la mezcla, aun así las altura no se alejan de lo requerido para especímenes de TSR por el protocolo AMAAC igual a 95 ± 5 mm. Los valores obtenidos de la volumetría tales como el Gmm para cada espécimen se estimaron de la multiplicación del Gmm por 93% para obtener un $7 \pm 1\%$ de vacíos igual a un Gbm de 2,245, con este resultado se observó que tanto variaron los resultados de Gmb para cumplir con los vacíos requeridos, para este caso todos los especímenes cumplieron con la especificación teniendo un rango de vacíos de 7,355 % para el espécimen dos hasta 7,882% de vacíos para el espécimen cinco.

La segunda etapa se llevó a cabo después de presión de vacío, esta solo se realizó para tres especímenes elegidos para acondicionamiento (2-4-5) de los tres pares conformados con igualdad de características.

De los especímenes obtuvimos la masa saturada superficialmente seca después de saturarlos entre un 70% y 80% como lo estipula el protocolo para acondicionamiento de especímenes de TSR. Se calculó el grado de saturación cuyos valores se encontraban en el rango mencionado, siendo de 71,28% para la probeta dos, 74,08% para la cuatro y 74,54% para la cinco, de igual forma se obtuvo el volumen para cada espécimen en donde se vio un aumento con respecto al volumen antes de la presión de vacío, esta condición de saturación extra se debe por el acondicionamiento en la vasija de presión al vacío, lo que ocasiona un aumento de volumen en los especímenes debido a la presencia de agua en su estructura. Como último valor se determinó el grado de expansión, este valor nos indica en porcentaje, que tanto el espécimen se expandió al realizar la saturación. los valores para la probeta dos corresponden a 0,8%, para la cuatro 1.4% y para la cinco 1.2%, obteniendo su expansión respecto a su condición inicial.

La tercera parte consta de los especímenes después del acondicionamiento. En ella ya han sufrido congelamiento por 15 horas, descongelamiento a 60°C por 24 horas y acondicionamiento a 25°C, por un tiempo máximo de 2 horas antes de ser ensayadas, por esta razón se mide nuevamente su diámetro, así como su espesor, con el fin de comprobar si ha tenido algún cambio geométrico.

Al medir los especímenes en el tercer parte de acondicionamiento se evidencia que sí ocurrió un cambio geométrico, siendo difícil de apreciarlo, pero al momento de medirlas detalladamente, se rectifica lo comentado. De igual forma, se calculó la masa saturada superficialmente seca la cual ha ido aumentando desde su primera medida y debido al proceso de acondicionamiento, en esta estancia la probeta dos ha tenido un aumento en su peso de 0,581% con respecto a la masa después de presión de vacío, la probeta cuatro aumentó 0,430% y la probeta cinco aumentó 0,587%.

Adicional, se calculó el volumen de los especímenes para observar numéricamente su aumento, así mismo se calculó el grado de saturación el cual aumentó a un 89,5% para el espécimen dos, 86,7% para el cuatro y 91,7% para el quinto, esto quiere decir que la estructura del espécimen se volvió más susceptible a la permeabilidad debido al acondicionamiento de congelación, lo que permite un mayor ingreso de agua.

El grado de expansión se volvió a determinar después del acondicionamiento con el fin de obtener un porcentaje en donde nos indica que tanto el espécimen adicionalmente se ha logrado expandir después de congelación y descongelamiento a 60°C, para este caso la probeta dos tuvo 0,9% de expansión, si lo acumulamos con el anterior valor la pastilla en todo el proceso de acondicionamiento ha tenido 1,7% de expansión, si realizamos esto para los demás, se tiene un valor de 2,4% de expansión total en todo el acondicionamiento para la probeta cuatro y para la probeta cinco un valor de 2,4%.

Como cuarto paso se somete a carga los seis especímenes fabricados, tres acondicionados con los tres no acondicionados a través de la prensa para evaluar especímenes de TSR después de estar en baño maría a 25°C por un lapso superior a una hora e inferior a dos horas, una vez fallados se registraron las cargas resultantes y se calculó la resistencia del espécimen ante una carga que lo deformara y llevara a la falla. Para los no acondicionados se obtuvo un valor 517,73 kPa para la probeta uno, 391,70 kPa para la tres y 510,07% para la sexta, posterior se ensayaron los acondicionados cuyo valor para la probeta dos fue de 457,91 kPa, 375,05 kPa para la cuatro y 414,07% para la cinco.

Finalmente, se promedian los valores de la resistencia de los especímenes acondicionados y se dividen entre el promedio de los valores de la resistencia de los especímenes no acondicionados, para este caso el valor de TSR que obtuvimos para una mezcla con adición de 0,1% de fibra de colilla de cigarrillo y sustituyendo filler por carbonato de calcio fue de 87,85%, el cual está 7,85% más alto que el mínimo especificado por el protocolo AMAAC siendo de 80.0%.

5.6.3.3. Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo

El cálculo de la susceptibilidad a la deformación permanente se evaluó mediante la rueda cargada de Hamburgo, para esto se fabricaron cuatro (4) especímenes los cuales en primera instancia cumplieron con la geometría especificada por el protocolo AMAAC de 150 mm de diámetro por 51 mm de altura, y en segunda instancia con los parámetros de volumetría obteniendo un contenido de vacíos igual a $7 \pm 0.5\%$. Las propiedades evaluadas fueron las presentadas en la tabla V-45.

Tabla V-45. Propiedades de los especímenes con 0.1% de fibra de colilla y carbonato de calcio.

Características	ESPECIMENES			
	1	2	3	4
Absorción de la mezcla compactada [%]	2,476	1,700	1,701	2,382
(G _{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compacta	2,237	2,251	2,254	2,241
(G _{mm}) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta	2,415	2,415	2,415	2,415
(V _a) Vacíos de la Mezcla	7,38	6,79	6,67	7,20

Fuente: Propia

Al realizar la evaluación de los especímenes diseñados para rueda cargada de Hamburgo se determinó que todos estuvieron en el rango del contenido de vacíos aceptable, el primero cumplió el contenido de vacíos siendo de 7,38%, el segundo tenía un contenido de vacíos igual a 6,79%, para el espécimen tres su contenido de vacíos es igual a 6,67% cumpliendo al límite la tolerancia permitida, y para el cuarto espécimen su contenido fue de 7,20% de vacíos, posterior, al formar los pares de especímenes para evaluarlos se estipuló que se tomarían con características similares permitiendo hacer un balance entre ellas.

Los especímenes se organizaron de la siguiente manera; el 1 con el 2 y el 3 con el 4, posterior se pre acondicionaron a $50 \pm 1^\circ\text{C}$ por un lapso de 30 minutos directamente en el equipo, pasado este tiempo se dejó correr la prueba para un número de pasadas igual a 20 000 y una deformación máxima de 10 mm. Los resultados se presentan en la tabla V-46.

Figura V-47. Ensayo de Rueda cargada de Hamburgo para mezcla con 0.1% de fibra y Carbonato de Calcio



Fuente: Propia

Tabla V-46. Resultados de deformación permanente – Mezcla con 0.1% de fibra de colilla y carbonato de calcio

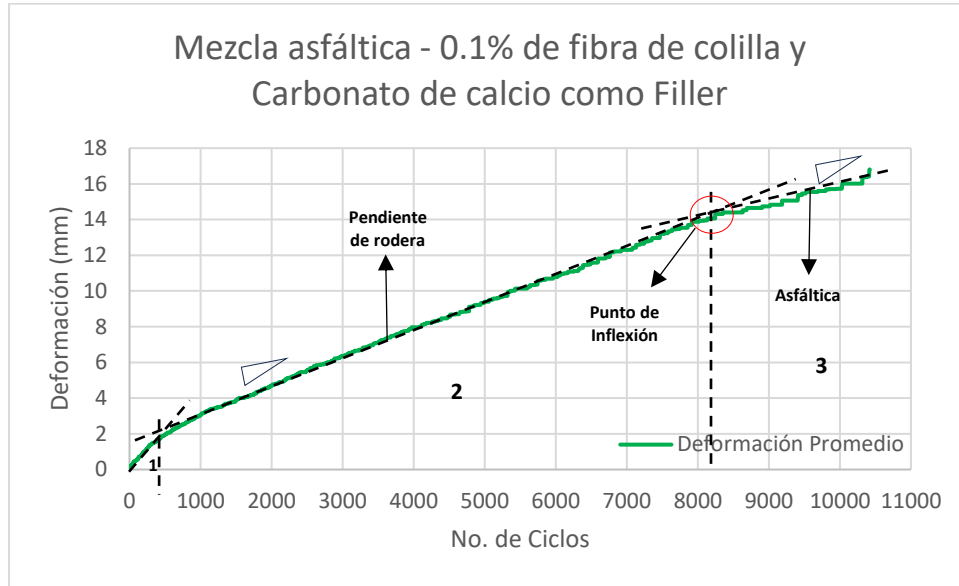
Mezcla asfáltica con 5.98% de cemento Asfáltico, 0.1% de fibra y carbonato de calcio			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio
0	0,00	0,00	0,00
2000	4,957	4,426	4,69
4000	8,372	7,563	7,97
6000	10,876	10,674	10,77
8000	13,785	13,962	13,87
10000	15,631	15,808	15,72
10420	17,022	16,592	16,807

Fuente: Propia

En la tabla V-46, se puede observar la deformación permanente del par de probetas denominadas probeta 1 y probeta 2, con respecto al número de ciclos que inicia a partir del ciclo cero (0), hasta el ciclo 10 420 ya que la prueba se detuvo por la degradación excesiva del espécimen y por cuidado de los equipos. La prueba se corrió a una temperatura constante de 50°C en donde, se observaron las deformaciones permanentes las cuales, se promediaron para obtener el valor de deformación total, siendo así, se organizaron las lecturas cada 2000 ciclos, obteniendo la máxima deformación permitida por el protocolo aproximadamente al ciclo 5 500 con un valor de 10 mm, sin cumplir con el número de ciclos mínimo de 10 000 pasadas para un nivel de tránsito bajo ya que la deformación ocurrió a ciclos muy tempranos con excesos visualmente de degradación.

Cabe resaltar que la prueba se logró correr hasta los 10 000 ciclos para niveles de tránsito medio, obteniendo una deformación de 16,807 mm, estando 6,807 mm por encima de los 10 mm permitidos, esto fue lo máximo que se permitió correr en el equipo por cuidados del mismo.

Gráfica 7. No. De ciclos Vs Deformación – Mezcla con 0.1% de fibra de colilla y carbonato de calcio



Fuente: Propia

La gráfica 7 se realizó con los valores obtenidos de la tabla V-46, en donde, en el eje de las Y se tiene la deformación producida en unidades de mm, respecto al eje de las X con el número de ciclos dados.

En la gráfica se analiza el comportamiento de deformación que tuvo los especímenes conforme iba aumentando el número de ciclos (número de pasadas de cada rueda); para ello se trazaron líneas tangenciales respecto a la gráfica, de igual forma puntos de inflexión dividiéndola en tres zonas para analizar el comportamiento a lo largo del ensayo.

La zona uno representa la consolidación post compactación que se presume se densifica en los primeros 1 000 ciclos, para este caso su densificación ocurrió aproximadamente a los 500 ciclos, 500 ciclos por debajo del valor, lo cual no es un parámetro estipulado si no una referencia de casos de estudio por lo tanto no significaría una mala densificación con ciclos menores.

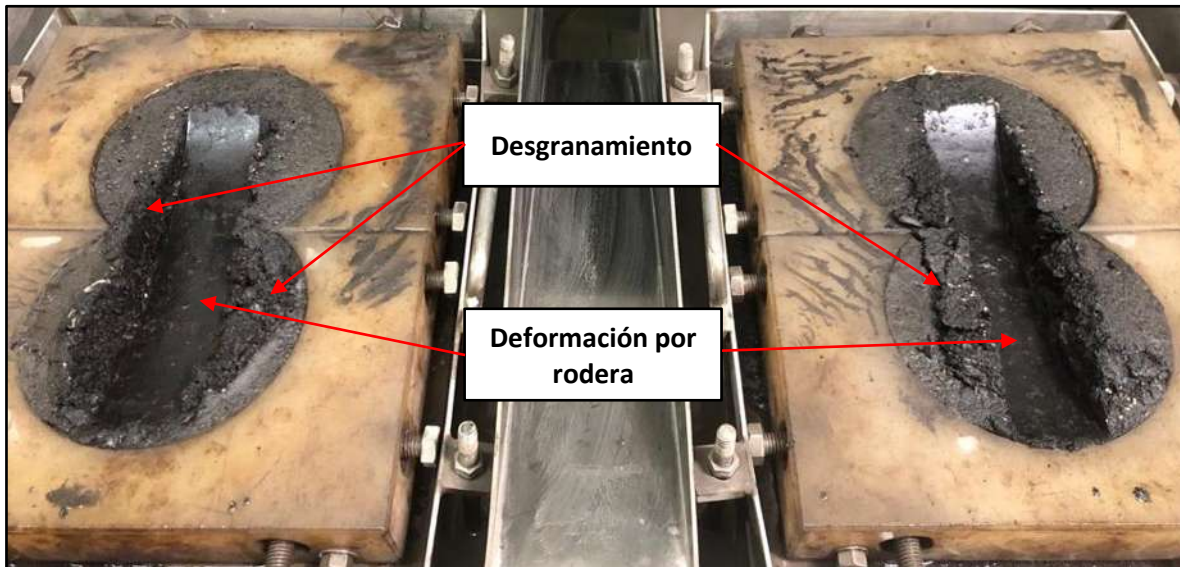
La siguiente zona denominada numero dos se le conoce como pendiente de rodera, esta ocurre inmediatamente después del proceso de post compactación y en ella se evaluó la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico, la cual ocurrió entre en ciclo 500 al ciclo 8 200 con deformaciones que van desde 2,0 mm hasta 14,0 mm, teniendo una deformación acumulada de 12,0 mm y una pendiente de 0,155%.

Posterior, se encuentra el punto de inflexión y representa el número de pasadas que soporta la mezcla a una temperatura predeterminada, que para este caso es de 50°C, un valor poco menor que el punto de reblandecimiento del asfalto, y esto ocurre antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse, siendo así, se evidenció ocurrió en el ciclo 8 200.

La zona tres la comprende la pendiente de desgranamiento igual a 0,126% y finaliza hasta que el ensayo de por terminado, en ella se mide la acumulación de deformación permanente debido al daño por humedad, este inició en el ciclo 8 200 hasta el ciclo 10 420 con una deformación inicial de 14,0 mm hasta una final de 16,8 mm y una deformación acumulada para esta zona de desgranamiento igual a 2,8 mm.

En la figura V-47 se puede observar la profundidad de rodera que sufrió el espécimen, así mismo gran parte del desgranamiento que tuvo, lo cual significó un deterioro rápido de las probetas ensayadas mediante la rueda de Hamburgo.

Figura V-48. Rueda Carga de Hamburgo para Mezcla con 0.1% de fibra y carbonato de calcio



Fuente: Propia

5.6.4. MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE 0.3% DE FIBRA

La mezcla asfáltica evaluada en esta sección lleva adición de fibra de colilla de cigarrillo de 0,3% calculada respecto al peso de la mezcla. Para determinar el valor en gramos de la cantidad necesaria de fibra primero se pesaba la cantidad en gramos de agregado pétreo ya dosificado, posterior con ese peso real del agregado se calculaba la cantidad de fibra, seguidamente con ese peso de agregado más fibra se determinaba la cantidad en gramos de cemento asfáltico que requería la mezcla, cabe resaltar que esta mezcla tiene el porcentaje de fibra más recomendado por la literatura.

Con este tipo de adición se elaboraron especímenes de volumetría para el cálculo de vacíos, así mismo para ser evaluado mediante TSR y Rueda Cargada de Hamburgo, con el fin de obtener y analizar sus resultados.

Figura V-49. Elaboración de especímenes con 0.3% de fibra



Fuente: Propia

5.6.4.1. Cálculo de Volumetría

Para determinar la volumetría de la mezcla compactada se realizaron especímenes de tanteo evaluados por réplica, las dimensiones de cada uno comprendían un diámetro de 150 mm (6”) y una altura de 119 mm, los pares se realizaron teniendo como referencia el contenido óptimo de asfalto para la mezcla de referencia el cual fue de 5,88%, a partir de este valor y su volumetría se calculó el contenido óptimo para la mezcla con 0.3% de fibra de colilla de cigarrillo considerando el valor de $4\pm 1\%$ de vacíos, siendo el contenido de cemento Asfáltico de 6,95% como el adecuado para el diseño de los especímenes de desempeño. Con respecto a la mezcla de referencia, para este caso subió el contenido de cemento asfáltico 1,07% veces, y a las demás aproximadamente 1.0%, esto se le considera a la absorción adicional que tiene por la adición de fibra, que fue 3 veces más, comparadas sin fibra y con 0.1% de fibra.

El porcentaje de 6,95% de cemento asfáltico permitió obtener un contenido de vacíos del 4,2%, de igual forma cumplió con los parámetros como son V_a , V_{AM} , V_{FA} relación Filler – asfalto, al compararlos con los requisitos mínimos para mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos de la volumetría.

Tabla V-47. Resultados de Volumetría para Mezcla asfáltica con 0.3% de fibra

% C.A.(R.M)	Gsb	Gse	Gmm	Gmb
Cemento Asfáltico Respecto a la Mezcla	Gravedad Especifica bruta del agregado	Gravedad Especifica efectiva del agregado	Gravedad especifica teórica máxima de la mezcla suelta	Gravedad especifica bruta de la mezcla compactada
6,95	2,568	2,635	2,377	2,278

Va	VAM	VFA	Pba	Pbe	Dp
Vacíos de aire de la mezcla compactada	Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)	Vacíos llenos de asfalto (% del VAM)	asfalto absorbido, % en la masa del agregado	Contenido de asfalto efectivo (% del total de la mezcla)	Relación filler - asfalto
4,2	17,457	76,143	1,016	6,005	0,833

Fuente: Propia

Los resultados nos presentan un valor de 6,95% de cemento asfáltico como el contenido óptimo para la mezcla con 0,3% de fibra de colilla. Este valor de contenido se obtuvo con un Gmm de 2,377 de la mezcla asfáltica suelta, el cual disminuyó conforme aumentó el contenido de cemento asfáltico. Así mismo elaborados los especímenes se obtuvo un valor de Gmb de 2,278, el cual nos permitió conseguir un contenido de vacíos de 4,2% encontrándose en el rango de 4 ± 1 estipulado por el protocolo AMAAC. Aprobado el valor se calculó el porcentaje de vacíos ocupado por el asfalto y el aire en la mezcla compacta (VAM) con un valor de 17,457 el cual se encuentra por encima del estipulado por el protocolo, siendo de 13 como mínimo para un agregado con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " (19 mm), como lo es, en este caso.

El valor del VFA que se calculó como "el porcentaje del VAM que contiene asfalto" es igual a 76,143% el cual, se encuentra en el rango de 65 y 78% para un nivel de tránsito entre 1 millón a 3 millones de ejes equivalentes, cumpliendo así con el parámetro.

Cabe resaltar que este es el VAM más alto de las mezclas analizadas, estando debajo del valor del límite superior por 1,857%, lo cual al estar fuera de los rangos podría ocasionar un comportamiento no adecuada de la mezcla y por ende alterar parámetros como lo es el VAF y el Pbe.

El valor de Pba no tiene un rango estipulado, pero este valor representa la cantidad de asfalto que absorbió el agregado con respecto a su masa, siendo de 1,016%, el valor más bajo obtenido en las mezclas elaboradas y mencionadas, lo que puede ocurrir es que la fibra este absorbiendo gran parte del asfalto. por otro lado, el Pbe es el contenido de asfalto efectivo, quiere decir que es la cantidad de asfalto necesaria para recubrir superficialmente cada partícula de agregado sin ser absorbido por el mismo, este es igual al valor de 6,005% con respecto al 6,95% como el contenido óptimo, lo que quiere decir que el 0,945% fue el porcentaje absorbido con respecto a la masa de la mezcla.

Adicional, se calculó la relación que tiene el contenido de asfalto efectivo con respecto al porcentaje en peso del agregado más fino que pasa la malla No. 200 denominado filler, este valor se debe encontrar en un rango entre 0,6 y 1,2 para cualquier nivel de tránsito, en nuestro caso el valor se encuentra en el rango siendo de 0,833, lo que determina el cumplimiento de la relación y valores de volumetría de toda la mezcla asfáltica.

5.6.4.2. Susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR)

El cálculo de la susceptibilidad al daño inducido por humedad (TSR) se determinó con la fabricación de especímenes con adición de 0.3% de fibra de colilla de cigarrillo a cada una; se mezclaron y compactaron seis (6) probetas con diámetros de 150 mm (6") y altura de 95+1 mm, 1 mm adicional a la altura en la que se encontraban los especímenes anteriores, así mismo se les realizó volumetría para determinar la cantidad de vacíos que se encontraban en el rango de 7±1%, por consiguiente, se las organizó en tres pares que compartieran características, posterior un espécimen por par se eligió para pasar por un proceso de acondicionamiento en condiciones de congelamiento y descongelamiento, para finalmente ensayarlos y obtener el valor de TSR. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla V-48. Resultados de TSR para la mezcla con adición de 0.3% de fibra

EVALUACIÓN DE DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD (TSR)								
MEZCLA ASFÁLTICA CON 0.3% DE FIBRA DE COLILLA - 6.95% AC								
Característica	Clave	Unidad	acondionadas Sta			no acondionadas St		
			1	2	3	4	5	6
Diámetro	D	mm	150,05	150,03	150,15	150,10	150,30	150,16
Espesor	t	mm	96,22	95,80	96,25	96,37	96,66	96,77
Volumen	E	mm ³	1627	1616,2	1630,1	1628,5	1630,6	1639
Gravedad específica bruta (A/E)	Gmb	t/m ³	2,210	2,223	2,208	2,206	2,204	2,192
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	t/m ³	2,377	2,377	2,377	2,377	2,377	2,377
Vacíos (100(Gmm-Gmb)/Gmm)	H	%	7,033	6,458	7,104	7,204	7,297	7,772
Volumen de vacíos (H*E/100)	I	cm ³	114,4	104,4	115,8	117,3	119,0	127,4
DESPUES DE PRESION DE VACIO								
Masa Sat. Superficialmente seco	B'	g	3681,2	3673,4	3687,7			
Grado Saturación (100*J'/I)	S'	%	74,99	76,45	76,17			
Volumen (B'-C')	E'	cm ³	1634,2	1627	1639,9			
Grado de expansión (100*(E'-E)/E)	Exp'	%	0,4	0,7	0,6			
DESPUES DE ACONDICIONAMIENTO								
Diámetro	D	mm	150,69	150,49	150,50			
Espesor	t	mm	96,87	96,19	96,37			
Masa Sat. Superficialmente seco	B''	mm ³	3705,4	3691,6	3698			
Volumen (B''- C'')	E''	cm ³	1644,8	1630,8	1637,6			
Grado de saturación (100*J''/I)	S''	cm ³	96,1	93,9	85,1			
Grado de expansión (100*(E''- E)/E)	Exp''	%	1,1	0,9	0,5			

DATOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA (TSR)								
Carga	P"	N	11336,55	11973,98	10718,72	12307,41	12150,50	10669,69
(St) Resistencia del espécimen no acondicionado (2000*P" / tDπ)	St	kPa				541,63	532,46	467,45
(Sta) Resistencia del espécimen acondicionado (2000*P"/πt"D")	Sta	kPa	494,40	526,59	470,52			
TSR (Sta / St)	TSR	%	96,75%					
								MIN. ESPECIFICADO= 80.0 %

Fuente: Propia

Con referencia a los datos obtenidos y presentados en la tabla V-48, esta se dividió en cuatro partes conforme a la aplicación del proceso de acondicionamiento para obtener el valor de TSR como resultado final.

Los primeros valores determinados una vez se fabricaron los especímenes presentan los diámetros de las pastillas los cuales se confirman que se encuentran en el rango de 150 mm estipulados para especímenes de TSR, de igual forma las alturas cuyo valor comprende 96 mm, 1 mm mayor de los 95 mm a los que se compacta, esto pudo ocurrir debido a la adición de fibra ya que se podía presentar una posible expansión que se generó después de la compactación y al momento del secado a temperatura ambiente, ya que esta fibra es un elemento adicional y ajeno a la estructura de la mezcla, aun así las altura no se alejan de lo requerido para especímenes de TSR por el protocolo AMAAC igual a 95 ± 5 mm .

Los valores obtenidos de la volumetría tales como el Gmb para cada espécimen se estimaron de la multiplicación del Gmm por 93% para obtener un $7 \pm 1\%$ de vacíos igual a un Gmb de 2,210, con este resultado se observó que tanto variaron los resultados de Gmb para cumplir con los vacíos requeridos, para este caso, todos los especímenes cumplieron con la especificación teniendo un rango de vacíos de 6,458% para el espécimen dos siendo el más bajo hasta 7,772% de vacíos para el espécimen seis siendo el valor más alto.

La segunda etapa se llevó a cabo después de presión de vacío, esta solo se realizó para tres especímenes elegidos para acondicionamiento (1-2-3) de los tres pares conformados con igualdad de características, de ellos obtuvimos la masa saturada superficialmente seca después de saturarlos entre un 70% y 80% como lo estipula el protocolo para acondicionamiento de especímenes de TSRS Se calculó el grado de saturación el cual debe estar en el rango mencionado obteniendo valores de 74,99% para la probeta uno, 76,45% para la dos y 76,17% para la tres encontrándonos en los requerimiento, de igual forma se obtuvo el volumen de cada espécimen el cual aumento con respecto al volumen antes de la presión de vacío, esto se debe a la condición de saturación extra que tiene por el acondicionamiento en la vasija de presión al vacío, lo que ocasiona un aumento de volumen en los espécimen debido a la presencia de agua en su estructura, como último valor, se determinó el grado de expansión el cual nos indica en porcentaje que tanto el espécimen se expandió al realizar la saturación, los valores para la probeta uno corresponde a 0,4%,

para la dos 0,7% y para la tres 0,6%, este porcentaje hace referencia a que tanto se expandió el espécimen respecto a su condición inicial.

La tercera parte consta de los especímenes después del acondicionamiento, en esta etapa ya han sufrido congelamiento por 15 horas mínimo, descongelamiento a 60°C por 24 horas y acondicionamiento a 25°C por un tiempo máximo de 2 horas antes de ser ensayadas, por esta razón se mide nuevamente su diámetro, así como espesor, con el fin de comprobar si ha tenido algún cambio geométrico.

Se calculó la masa saturada superficialmente seca la cual ha ido aumentando desde su primera medida y debido al proceso de acondicionamiento llevado a cabo, en esta estancia la probeta uno ha tenido un aumento en su peso de 0,653% con respecto a la masa después de presión de vacío, la probeta dos aumentó 0,493% y la probeta tres aumentó 0,278%; nuevamente se calculó el volumen de los especímenes para observar numéricamente su aumento.

De igual manera se procedió al cálculo del grado de saturación, el cual aumentó a un 96,1% para el espécimen uno, 93,9% para el dos y 85,1% para el tercero, esto quiere decir que, la estructura del espécimen se volvió más susceptible a la permeabilidad debido al acondicionamiento de congelación en agua por el cambio de estado sólido a líquido y aumento en su volumen, lo que permite un mayor ingreso de agua.

El grado de expansión se volvió a determinar después del acondicionamiento, con el fin de obtener un porcentaje en donde nos indica que tanto el espécimen adicionalmente se ha logrado expandir después de congelación a -18°C, y descongelamiento a 60°C, para este caso la probeta uno tuvo 1,1% de expansión, si lo comparamos con el anterior valor, la pastilla en todo el proceso de acondicionamiento desde su etapa inicial tuvo un aumento de 0,7% de expansión, si realizamos esto para los demás, se tiene un valor de 0,9% de expansión y un aumento de 0,2% para la probeta dos, y para la probeta tres un valor de 0,5% de expansión, sin presentar aumento acumulado.

Como cuarto paso se somete a carga los seis especímenes fabricados, tres acondicionados con los tres no acondicionados a través de la prensa para evaluar especímenes de TSR, todo esto después de estar en baño maría a 25°C por un lapso superior a una hora e inferior a dos horas, una vez fallados se registraron las cargas resultantes y se calculó la resistencia del espécimen ante una carga que lo deformara y llevara a la falla. Para los no acondicionados se obtuvo un valor 541,63 kPa para la probeta cuatro, 532,46 kPa para la cinco y 467,45 kPa para la sexta, posterior se ensayaron los acondicionados cuyo valor para la probeta uno fue de 494,40 kPa, 526,59 kPa para la dos y 470,52% para la tres.

Finalmente, se promediaron los valores de la resistencia de los especímenes acondicionados y se dividen entre el promedio de los valores de la resistencia de los especímenes no acondicionados, para este caso el valor de TSR que obtuvimos para una mezcla con adición de 0,3% de fibra de colilla de cigarrillo fue de 96,75%, el cual está

16,75% más alto que el valor mínimo requerido por la especificación determinada por el protocolo AMAAC siendo de 80.0%.

5.6.4.3. Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo

El cálculo de la susceptibilidad a la deformación permanente se evaluó mediante la rueda cargada de Hamburgo, para esto se fabricaron cuatro (4) especímenes los cuales en primera instancia cumplieron con la geometría especificada por el protocolo AMAAC de 150 mm de diámetro por 50 mm de altura, y en segunda instancia con los parámetros de volumetría obteniendo un contenido de vacíos igual a $7 \pm 0.5\%$. Las propiedades evaluadas fueron las presentadas en la tabla V-49.

Tabla V-49 Propiedades de los especímenes con 0.3% de fibra de colilla.

Características	ESPECIMENES			
	1	2	3	4
Absorción de la mezcla compactada [%]	2,006	1,547	2,136	1,741
(G _{mb}) Gravedad específica bruta de la mezcla compacta	2,202	2,202	2,207	2,201
(G _{mm}) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta	2,377	2,377	2,377	2,377
(V _a) Vacíos de la Mezcla	7,37	7,38	7,17	7,40

Fuente: Propia

Al realizar la evaluación de los especímenes diseñados para rueda cargada de Hamburgo se determinó que todos estuvieron en el rango del contenido de vacíos aceptable, el primero cumplió el contenido de vacíos siendo de 7,37%, el segundo tenía un contenido de vacíos igual a 7,38%, para el espécimen tres su contenido de vacíos es igual a 7,17% cumpliendo, y para el cuarto espécimen su contenido fue de 7,40% de vacíos, posterior, al formar los pares de especímenes para evaluarlos se estipuló que, se tomarían con características similares permitiendo hacer un balance entre ellas.

Los especímenes se organizaron de la siguiente manera; el 1 con el 2 y el 3 con el 4, posterior se pre acondicionaron a $50 \pm 1^\circ\text{C}$ por un lapso de 30 minutos directamente en el equipo, pasado este tiempo se dejó correr la prueba para un número de pasadas igual a 20 000 y una deformación máxima de 10 mm, los resultados se presentan a continuación.

Tabla V-50 Resultados de deformación permanente – Mezcla con 0.3% de fibra de colilla.

Mezcla asfáltica con 6.95% de cemento Asfáltico y 0.3% de fibra			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio
0	0,00	0,00	0,00
2000	5,236	4,148	4,69
4000	8,574	7,032	7,80
6000	11,357	9,333	10,34
8000	14,215	12,368	13,29

Mezcla asfáltica con 6.95% de cemento Asfáltico y 0.3% de fibra			
No. De ciclo	Def Probeta 1 (mm)	Def Probeta 2 (mm)	Promedio
10000	16,997	14,872	15,93
10926	18,843	16,238	17,54

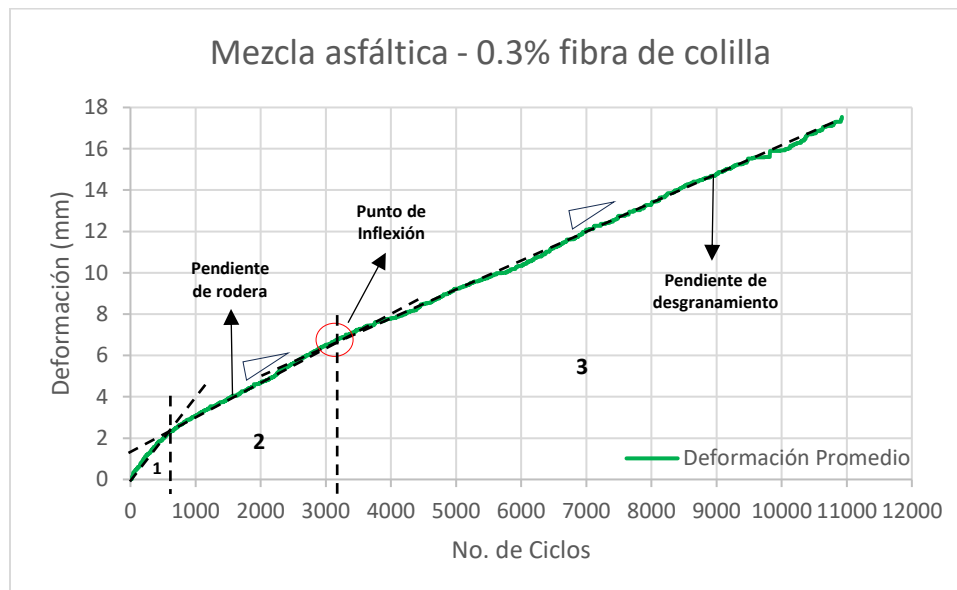
Fuente: Propia

En la tabla V-50 se puede observar la deformación permanente del par de probetas denominadas probeta 1 y probeta 2, con respecto al número de ciclos que inicia a partir del ciclo cero (0), hasta el ciclo 10 926 ya que la prueba se detuvo antes de los 20 000 ciclos previstos por la degradación excesiva del espécimen y por cuidado de los equipos, además, el espécimen no soportaría más ciclos de los que se registraron.

La prueba se corrió a una temperatura constante de 50°C en donde se observaron las deformaciones permanentes, las cuales se promediaron para obtener el valor de deformación total, siendo así se organizaron las lecturas cada 2000 ciclos, obteniendo la máxima deformación permitida por el protocolo aproximadamente al ciclo 5 600 con un valor de 10 mm, sin cumplir con el número de ciclos mínimo de 10 000 pasadas para un nivel de tránsito bajo, ya que la deformación ocurrió a ciclos muy tempranos, con excesos de degradación.

Cabe resaltar que la prueba se logró correr hasta los 10 926 ciclos para niveles de tránsito medio, obteniendo una deformación de 17,54 mm, estando 7,54 mm por encima de los 10 mm permitidos, esto fue lo máximo que se permitió correr en el equipo por cuidados del mismo, además, se observó un desplazamiento de material producido por la rodera hacia los costados, lo que ocasiono el daño total del espécimen y no permitía seguir con el ensayo.

Gráfica 8 No. De ciclos Vs Deformación – Mezcla con 0.3% de fibra de colilla.



Fuente: Propia

La gráfica 8 se realizó con los valores obtenidos de la tabla V-50, en donde en el eje de las Y se tiene la deformación producida en unidades de mm, respecto al eje de las X con el número de ciclos dados.

En la gráfica se analiza el comportamiento de deformación que tuvo los especímenes conforme aumenta el número de ciclos (número de pasadas de cada rueda); para ello se trazaron líneas tangenciales respecto a la gráfica, de igual forma puntos de inflexión dividiéndola en tres zonas para analizar el comportamiento a lo largo del ensayo.

La zona uno representa la consolidación post compactación que se presume se densifica en los primeros 1 000 ciclos, para este caso su densificación ocurrió aproximadamente a los 600 ciclos, 400 ciclos por debajo del valor, lo cual no es un parámetro estipulado si no una referencia de casos de estudio, por lo tanto, no significaría una mala densificación con ciclos menores.

La siguiente zona denominada numero dos se le conoce como pendiente de rodera, esta ocurre inmediatamente después del proceso de post compactación y en ella se evaluó la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico, la cual ocurrió entre el ciclo 600 al ciclo 3 200 con deformaciones que van desde 2,2 mm hasta 6,4 mm, teniendo una deformación acumulada de 4,2 mm y una pendiente de 0,161%,

Posterior, se encuentra el punto de inflexión y representa el número de pasadas que soporta la mezcla a una temperatura predeterminada que, para este caso es de 50°C antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse, siendo así, se evidencia ocurrió en el ciclo 3 200.

La zona tres la comprende la pendiente de desgranamiento igual a 0,144% y finaliza hasta que el ensayo de por terminado, en ella se mide la acumulación de deformación permanente debido al daño por humedad, este inició en el ciclo 3 200 hasta el ciclo 10 926 con una deformación inicial de 6,4 mm hasta una final de 17,54 mm, y una deformación acumulada para esta zona de desgranamiento igual a 11,14 mm.

Con los resultados presentados en cada uno de los apartados para los diferentes tipos de mezcla se realizó las siguientes gráficas, con el fin de, analizarlos en conjunto y poder observar si las adiciones de fibra de colilla elaboradas generan un buen comportamiento en la mezcla.

La gráfica 9 presenta una comparación de los valores de resistencia en kPa, del promedio de los especímenes acondicionados, con los no acondicionados, respecto a cada una de las mezclas realizadas con diferentes adiciones de fibra de colilla, además de la de referencia.

En total se ensayaron 4 tipos de mezclas asfálticas con diferentes adiciones, las barras con tonalidad azul representan los especímenes no acondicionados por tipo de mezcla, y su

valor hace referencia a la resistencia obtenida al final de la prueba mediante la prensa TSR, ahora, las barras de tonalidad naranja son los especímenes No acondicionados con su valor de resistencia, obtenida en la prensa de TSR. Se puede observar que los especímenes no acondicionados su valor de resistencia es mayor que los acondicionados, esto realmente debe pasar ya que el acondicionamiento se realiza con el fin de degradar el espécimen y que este resista lo suficiente para evitarlo, esto ocurrió en todas las mezclas, quiere decir que su elaboración y ensayo estuvieron correctos.

Tomando como referencia los valores de resistencia de la mezcla de referencia, se compara con los valores de las diferentes adiciones. Para la mezcla con adición de fibra al 0.1% con resistencia de 352.47 kPa respecto a la mezcla de referencia con resistencia de 483.76 kPa, se observa una disminución en la resistencia del espécimen acondicionado de 131.29 kPa, esto quiere decir que, el espécimen fue susceptible al daño inducido por humedad, lo cual se traduce a una pérdida de resistencia, siendo así, las fibras no estarían aportando de forma significativa, al contrario, la adición ocasiona un deterioro en la mezcla, ahora, si comparamos el valor de resistencia entre las No acondicionadas, nuevamente existe una pérdida de resistencia con un valor de 130.69 kPa, poco menos de las acondicionadas, pero aun así las fibras no están aportando en esta característica evaluada.

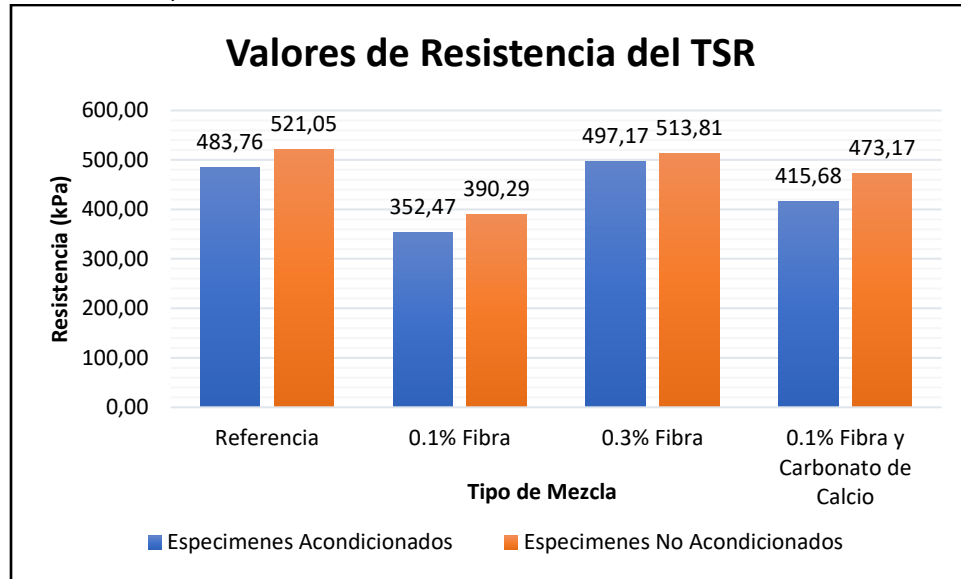
Si comparamos la mezcla con 0.3% de fibra con respecto a la de referencia se puede observar, una similitud en los valores para los dos tipos de especímenes, primero los acondicionados tuvieron un aumento en su resistencia de 13.41 kPa, quiere decir que la mezcla soportó mayor carga y que las fibras no disminuyeron su resistencia, al contrario les otorgó un valor medianamente mayor que el de referencia, por otro lado para los especímenes No acondicionados tuvieron una leve disminución de 7.24 kPa con respecto a la mezcla de referencia, aun así, los valores rondan iguales, por este motivo la mezcla con adición de 0.3% de fibra tendría mejor comportamiento y resistencia al daño inducido por humedad.

Por último, tenemos la mezcla con 0.1% de fibra y sustitución total del Filler por Carbonato de Calcio. Los valores de resistencia obtenidos en esta mezcla están por encima de los valores con únicamente 0.1%, y están por debajo de la mezcla de referencia y 0.3% de fibra. Para los especímenes acondicionados, se obtuvo un valor de 415.68 kPa, estando 63.21 kPa por encima de la mezcla con 0.1% de fibra y 68.08 kPa, menor que la mezcla de referencia, aunque la adición del carbonato de calcio se utilizó para mejorar el desprendimiento del agregado y aumentar la resistencia, no fue lo suficiente para llegar a los valores de referencia, aun así, se observa una mejoría significativa con la combinación de 0.1% de fibra y carbonato de calcio, obteniendo valores de resistencia que se acercan no por mucho a los de la mezcla testigo.

De la misma manera comparamos los valores de los especímenes No acondicionados que llevan adición, los cuales obtuvieron un valor de 415.17 kPa de resistencia, siendo 82.88 kPa más resistentes que los especímenes con 0.1% de fibra y 47.88 kPa menos que los de

referencia, nuevamente el valor mejoró con la combinación de la fibra con el carbonato, aumentando la resistencia y no por mucho llegando a los valores de referencia.

Gráfica 9. Comparación de los valores de resistencia de cada una de las Mezclas Asfálticas



Fuente: Propia

Una vez analizada la resistencia por especímenes de cada una de las mezclas, lo siguiente es analizar el valor de TSR por tipo de mezcla.

La gráfica 10 presenta los datos del valor de TSR en porcentaje de cada una de las mezclas evaluadas.

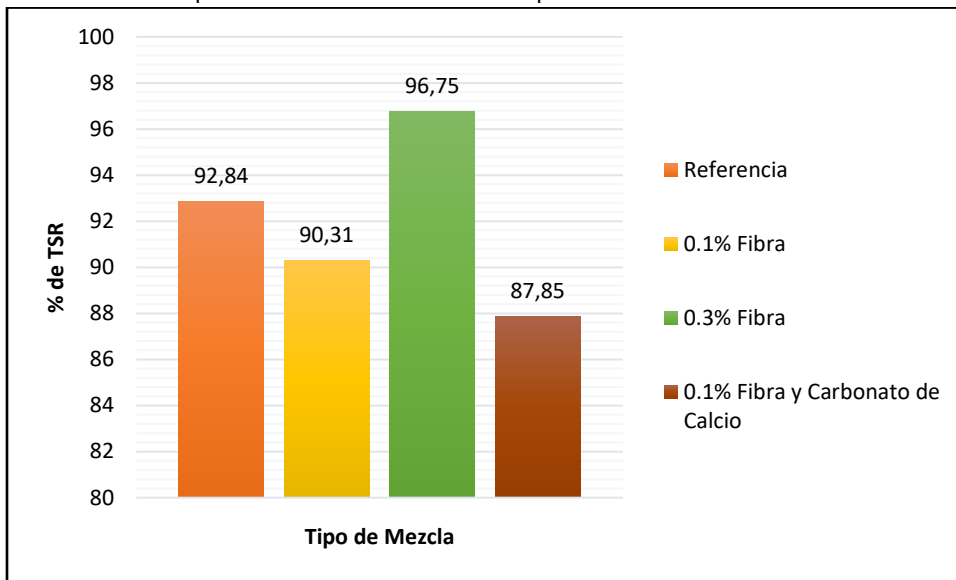
Para analizar el valor de TSR, primero se debe resaltar que según el protocolo AMAAC, el valor mínimo de susceptibilidad a la humedad aceptable que debe tener la mezcla es de 80%, esto quiere decir que el daño que presenta la mezcla no deberá ser mayor a un 20%, por lo tanto, el 80% hace referencia al porcentaje de la mezcla que resistió a la degradación. Siendo así, evaluamos la característica por tipo de mezcla, para la de referencia se obtuvo un valor de TSR de 92.84%, el cual está 12.84% por encima del requerido y teniendo una degradación de 7.16%, por tal motivo, la mezcla cumple con el criterio mencionado, ahora, evaluamos una nueva mezcla con adición de 0.1% de fibra y su valor de TSR fue de 90.31%, este resultado es 2.53% menor que la de referencia, a pesar de que es inferior sigue estando por encima del requerido de 80%, pero, si la observamos en conjunto con la gráfica 8, se puede notar que además tuvo resistencias menores que la de referencia, entonces, los datos son consistentes ya que hubo una caída en ambos valores.

La siguiente mezcla tiene una adición de 0.3% de fibra, su valor de TSR es 3.91% mayor que la de referencia y 6.44% mayor que la mezcla con 0.1% de fibra, por este motivo el mejor resultado de TSR lo tendría este diseño; si lo observamos en conjunto con la gráfica 9 los valores de resistencia son similares a los de la mezcla de referencia, esto quiere decir

que con la adición de fibra se conservaron los valores de resistencia, pero mejoró el valor de TSR, haciendo la mezcla menos susceptible al daño inducido por humedad, con una degradación de 3.25% comparada con los 7.16% de la de referencia, por tal motivo, la fibra para este caso le está generando un aporte a la mezcla al ser evaluada mediante TSR, en especial, para los especímenes que pasan por un proceso de acondicionamiento.

La última mezcla evaluada lleva adición de 0.1% de fibra y carbonato de calcio, su valor de TSR fue el más bajo entre todas, siendo de 87.85%, si lo comparamos con la de referencia se encuentra 4.99% por debajo, ahora, si observamos los valores de resistencia este es mejor que la mezcla con solo 0.1% de fibra pero, menor que la de referencia y la de 0.3% de fibra, siendo el TSR menor que todos, de esto se puede analizar que un valor de TSR bajo con valores de resistencia altas puede funcionar mejor que un valor de TSR alto con resistencias bajas, ya que teniendo alta resistencia la función al paso de los vehículos tiene un mejor desempeño.

Gráfica 10. Comparación de los valores de TSR para cada una de las Mezclas Asfálticas



Fuente: Propia

Finalmente, la mezcla que tuvo un mejor desempeño en esta prueba fue la de 0.3% de fibra. Primero, por su resistencia tanto en las acondicionadas como en las no acondicionadas con valores similares a la de referencia, y al momento de evaluar el TSR se observa que su valor fue el más alto obteniendo una menor degradación. Posterior, se encuentra la de 0.1% de fibra con carbonato de calcio por su buena resistencia, lo que la lleva a un valor de TSR bajo, pero, con altos niveles de resistencia, y por último la mezcla con 0.1% de fibra, a pesar de tener buen valor de TSR su resistencia fue la más baja, aun así, todas las mezclas cumplieron con el requisito mínimo, lo que quiere decir que si existiría una mejoría al tener fibras en la estructura de la mezcla.

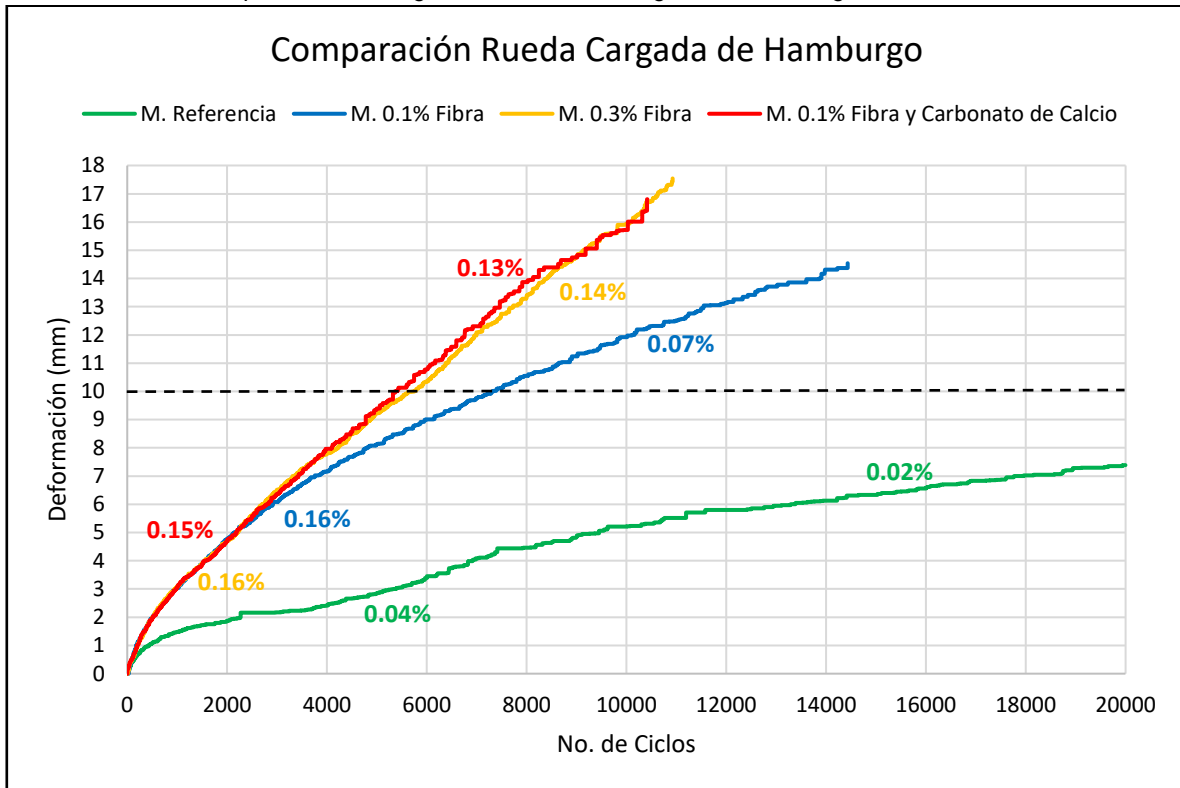
Para analizar la prueba de Susceptibilidad a la deformación permanente mediante la Rueda Cargada de Hamburgo, realizamos la gráfica 11. En ella se encuentran trazadas las deformaciones con respecto al número de ciclos, en un principio, fueron programadas para 20 000 ciclos correspondientes a tránsitos altos y muy altos, su máxima deformación permitida es 10 mm, mayor deformación no cumple con el criterio, por ese motivo, al analizar la gráfica de la mezcla de referencia se puede observar que llegó al total de ciclos con una deformación de 7.4 mm cumpliendo con el criterio.

La siguiente gráfica representa la mezcla con 0.1% de fibra, esta también fue programada para 20 000 ciclos, pero no llegó a todos los ciclos debido a una degradación a temprana edad, llevándola a altas deformaciones, el máximo de ciclos que resistió fue de 14 436 con una deformación hasta de 14.54 mm, estando por encima 4.54 mm del permitido, además los 10 mm ocurrieron en tan solo 7 300 ciclos, no llegó a los 10 000 ciclos correspondientes a tránsito bajo, en esta situación la fibra no logró aportar a la mezcla, ocasionó una deformación mayor a tempranos ciclos resultando valores alejados de la de referencia.

La tercera gráfica corresponde a una mezcla con 0.3% de fibra, si la comparamos con la de referencia se encuentra muy alejados los valores de No. De ciclos y deformación, de igual forma si comparamos con la de 0.1% de fibra, también sufrió un comportamiento diferente; se observó que al adicionarle más fibra su deformación aumentó con menos ciclos, teniendo un valor de 17.54 mm de deformación en 10 926 ciclos, estando 7.54 mm por encima del recomendado, por tal motivo, el aumento de la fibra en este caso no permitió generar una mayor resistencia a la deformación, de esta manera la mezcla sufrió desgranamiento y una mayor deformación con menores ciclos.

Por último, se encuentra la mezcla con 0.1% de fibra y carbonato de calcio, esta mezcla tuvo un comportamiento similar a la de 0.3% de fibra, a pesar que tenía carbonato de calcio para darle aporte a la mezcla así como una reducción del porcentaje de fibras, esta no llegó a comportarse igual que la de 0.1% de fibra y la de referencia, también tuvo deformaciones altas a tempranos ciclos, por tal motivo, la combinación realizada no logró contribuir en su totalidad a la mezcla para que pudiera pasar el ensayo de susceptibilidad a la deformación, es por eso que para este ensayo ninguna de las tres adiciones cumplieron los requerimientos determinados por el ensayo, aun así, la que mejor se comportó fue la de 0.1% de fibra, pero, no mejoró la mezcla para este ensayo en su totalidad, cabe resaltar que esta prueba es muy abrasiva debido a las altas temperaturas de prueba en la que se realiza, siendo de 50°C y con una carga por rueda alrededor de 75 kg, por tal motivo, ninguna de las adiciones logró contribuir lo suficiente para pasar este nivel de desempeño.

Gráfica 11. Comparación de las gráficas de Rueda Cargada de Hamburgo de las diferentes Mezclas



Fuente: Propia

CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el trabajo de investigación presentado en este documento, así como el objetivo general planteado y los resultados obtenidos en cada una de las fases descritas en la metodología, se puede concluir que: mediante el protocolo AMAAC fue posible evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica con adición de fibras de colillas de cigarrillo y por consiguiente se logró obtener mejoras en algunas de las propiedades mecánicas evaluadas.

En la figura V se presentó un panorama del proceso desarrollado en la fase uno, más aún en esta fase se buscó la adecuada ejecución de los procesos para las bases del trabajo de investigación, así mismo y considerando el primer objetivo, conforme hace referencia a los materiales utilizado se concluye lo siguiente: se caracterizó el agregado pétreo siguiendo los lineamientos de la “N-CMT-4-04/17 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas” para un valor de ejes equivalentes mayor a 1 millón y menor o igual a 3 millones estipulado por el Protocolo AMAAC. De igual forma al evaluar el material se determinó que cumplieron con los requisitos de calidad para ser utilizados en mezclas de alto desempeño permitiendo tener agregados con propiedades que aportarían al buen desarrollo de las pruebas mecánicas que se plantearon realizar.

Por otro lado, siguiendo con lo planteado en la fase uno, se realizaron los ensayos de laboratorio correspondientes para la caracterización del cemento asfáltico mediante la normativa “N-CMT-4-05-004/18 Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño PG”. En la evaluación del cemento asfáltico se determinó que tenía una clasificación según su grado PG de 64V -16, lo anterior complementando el primer objetivo dando por concluida la fase uno y con más herramientas para iniciar la fase dos.

Comentado lo anterior, se desarrolló la fase dos para dar cumplimiento al segundo objetivo planteado en este trabajo de investigación, razones por las cuales se determinó lo siguiente: se realizó un diseño de mezcla asfáltica de referencia con el fin de obtener valores iniciales de su desempeño, con base a esta, se realizaron diversas mezclas asfálticas en donde se agregaron diferentes porcentajes de fibra, correspondiente a las colillas de cigarrillo. Dicho lo anterior y en cumplimiento del tercer objetivo, se evaluó cada mezcla realizada con pruebas de desempeño permitiendo el cumplimiento con los requerimientos estipulados por el Protocolo “AMAAC PA-MA 01/2013 Diseño de Mezclas Asfálticas de granulometría densa de alto desempeño”.

Una vez analizado los resultados se puede concluir que, se logró evaluar la mezcla asfáltica de referencia, de igual forma la mezcla con adición de 0.1% de fibra, 0.1% de fibra más carbonato de calcio como Filler y 0.3% de fibra, al ser ensayadas mediante el nivel I (Volumetría más Susceptibilidad al daño inducido por humedad TSR) y nivel II (Nivel I más Susceptibilidad a la deformación permanente).

Adicional a lo comentado y teniendo en cuenta el último objetivo planteado referente a la comparación de las propiedades de las mezclas realizadas, así mismo, como a lo desarrollado en la fase número tres se determina que, existe un mejoramiento en los valores correspondientes al nivel I del protocolo AMAAC en las mezclas modificadas con fibra de colilla de cigarrillo con respecto a la mezcla asfáltica de referencia. En la mezcla asfáltica donde se logró obtener un valor de resistencia mayor fue en la que tenía adición de 0.3% de fibra, seguida de la de referencia, posterior la de 0.1% de fibra más carbonato y la última de 0.1% de fibra, afirmando que, el uso de la fibra en un porcentaje de 0.3% con respecto al peso de la mezcla, mejora el comportamiento de la mezcla asfáltica cuando es evaluada su resistencia a la susceptibilidad producida por el daño inducido por la humedad.

Por otro lado, con respecto al nivel II del protocolo, la mezcla de referencia cumplió de acuerdo a los requerimientos para 20 000 ciclos con máxima deformación de 10 mm para un tránsito alto, sin embargo, ninguna mezcla modificada con fibra logro resistir esas condiciones, razones por las cuales sobrepasaron los 10 mm de deformación en un lapso de ciclos menores a 15 000, lo que conlleva a una deformación temprana y al aceleramiento del desgranamiento. Por tal motivo, esto nos permite definir que: existe el cumplimiento único del Nivel I del Protocolo AMAAC con adición de fibra de colilla, en donde se obtuvieron valores volumétricos correctos y con mejores valores de resistencia y porcentaje del TSR con respecto a una mezcla de referencia.

Con lo mencionado se puede determinar que, teóricamente y según la referencia del protocolo AMAAC utilizado en esta investigación, la mezcla asfáltica con adición de fibra de colilla al haber cumplido con todos los parámetros correspondientes al Nivel I, se encuentra en las condiciones para ser aplicada en un nivel de tránsito bajo, con numero de ejes equivalentes menores a 1 000 000 para carreteras federales tipo D, carreteras alimentadoras, estatales y municipales, así como calles urbanas las cuales recomiendan ser ensayadas con diseño volumétrico y TSR.

6.1. TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos futuros que se pueden desarrollar con base a la presente investigación son los siguientes:

- Cambiar la granulometría media de la mezcla asfáltica por una granulometría gruesa, esto podría generar un mayor aporte estructural que se pueda complementar con la adición de fibra de colilla de cigarrillo y permita llevarla a un nivel de desempeño mayor que el descrito en el presente trabajo.
- Utilizar diferentes porcentajes de carbonato de calcio como filler de aportación, de modo que contribuya junto con la fibra a evitar el desgranamiento de la mezcla a temprana edad.
- Utilizar un cemento asfáltico modificado para realizar una mezcla asfáltica con adición de fibra con el fin de evaluarla a través de la rueda cargada de Hamburgo y observar si existe mejoras a partir del nivel II.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. Muestreo de agregados. Astm D 75.
- American Association of state Highway and transportation Officials. Standard Method of test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). Aashto T 313 (2012).
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Astm D4791 (2010).
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus. Astm D6928 (2017).
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Angeles Machine. Astm C 131 (2003).
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Astm D5821-13 (2017).
- American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para densidad de masa (peso unitario). Astm C 29/C 29 M-97.
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Astm C128 (2015).
- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. Astm D2419 (2009)
- Araújo, M. C. B., & Costa, M. F. (2019). A critical review of the issue of cigarette butt pollution in coastal environments. *Environmental research*, 172, 137-149.
- Asphalt Institute. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 (MS-22)
- Asphalt Institute. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales, 1992.
- Asociación Mexicana del Asfalto. Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. Protocolo Amaac P-MA 01/2013.

- Asociación Mexicana del Asfalto. Desprendimiento por Fricción en la fracción gruesa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, Amaac RA 08/2010
- Asociación Mexicana del Asfalto. Determinación del valor de azul de metileno que pasa la malla 200, Amaac RA 05/2010
- Castillo, R. (2019). Concreto Armado. Universidad Nacional Federico Villareal. <https://www.coursehero.com/file/51068274/018150-Cap2pdf/>.
- Guevara, Lizano Alexa. Sistema para el adecuado desecho de colillas de cigarrillo. Optar el título de ingeniera en diseño industrial. Cartago: Instituto tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería en Diseño industrial. 2010.
- Han, S., Dong, S., Yin, Y., Liu, M., & Liu, Y. (2020). Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties. *Construction and Building Materials*, 244, 118379.
- Han, S., Dong, S., Liu, M., Han, X., & Liu, Y. (2019). Study on improvement of asphalt adhesion by hydrated lime based on surface free energy method. *Construction and Building Materials*, 227, 116794. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116794>
- Instituto Mexicano del Transporte, secretaria de Comunicaciones y Transporte, Alamilla, H. D., Cuellar Pérez, V. H., & Salazar Rivera, A. Z. (2019). Manual de Ensayos para Laboratorio, Agregados (Ag) para Mezclas Asfálticas (No 551). Publicación Técnica.
- Instituto Mexicano del Transporte, secretaria de Comunicaciones y Transporte, Ayala, Y., Alamilla, H. D., Guzmán Ortiz, D. V., & Salazar Rivera, A. Z. (2018). Manual de Ensayos para Laboratorio, Mezclas Asfálticas En Caliente (Mac) Parte 1, Para el Cálculo de Volumetría y Ensayos de Desempeño. (No 516). Publicación Técnica.
- Instituto Mexicano del Transporte, secretaria de Comunicaciones y Transporte, Flores Flores, M., Alamilla, H. D., & Gómez López, J. A. (2018). Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo. (No 568). Publicación Técnica
- International Slurry Surfacing Association (2013). Test Method for Determining of Methylene Blue Value (MBV) of Mineral Aggregate Fines. Technical Bulletin No. 145. Recuperado de ISSA: <http://www.slurry.org/page/TechnicalBulletins>
- Jin, J., Wu, Z., Song, J., & Liu, X. (2019). Research on the road performance of cigarette butts modified asphalt mixture. *Journal of Physics: Conference Series*, 1168, 022053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022053>

- Liu, H., Chen, Y., & Xue, Y. (2021). Reutilization of Recycled Cellulose Diacetate from Discarded Cigarette Filters in Production of Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.770150>
- Mathers, C. D., & Loncar, D. (2006). Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030. *PLoS medicine*, 3(11), e442.
- Medina, M. (2020, 21 julio). Agregados Pétreos. Procon. <https://www.procon.com.mx/agregado-petreo/>.
- Mohajerani, A., Tanriverdi, Y., Nguyen, B. T., Wong, K. K., Dissanayake, H. N., Johnson, L., ... & Rezaei, A. (2017). Physic-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts. *Construction and Building Materials*, 153, 69-80.
- Osorio, J. D. (s. f.). Agregados en el Concreto. 360enconcreto. Recuperado 2 de enero de 2022, de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-en-el-concreto>.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible recycling of cigarette butts as fiber modifier in bitumen for asphalt concrete. *Materials*, 13(3), 734.
- Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (2020). Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 261, 120530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120530>
- Rahman, M. T., & Mohajerani, A. (2021). Thermal conductivity and environmental aspects of cigarette butt modified asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00569. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00569>
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 263, 120134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120134>
- Salamanca, J. C., & Silva Ramos, V. (2019). Evaluación del desempeño de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente con adición de colillas de cigarrillo.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2018). Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño pg. Libro: CMT. Características de los materiales. Parte: 4. Materiales para pavimentos. Título: 05. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas.
- Tataranni & Sangiorgi, (2021). A Preliminary Laboratory Evaluation on the Use of Shredded Cigarette Filters as Stabilizing Fibers for Stone Mastic Asphalts. *Applied Sciences*, 11(12), 5674.