



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE BIOLOGÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**“Diseño de una mezcla asfáltica en caliente adicionada con microfibras de PET
reciclado para reducir la contaminación por plásticos”**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

TESIS

PRESENTA:

**Emmanuel Salinas Rangel
Ingeniero Civil**

ASESOR:

Dr. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

CO-ASESOR:

Dra. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Morelia, Michoacán, octubre de 2022

ÍNDICE:

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
DEDICATORIAS	VI
AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- MARCO TEÓRICO.....	3
2.1.- Contaminación	3
2.1.1- Contaminación ambiental.....	4
2.1.2.- Plásticos	6
2.1.3.- Contaminación por medio del plástico	8
2.1.4.- PET (Tereftalato de polietileno).....	10
2.1.5.- Desecho y degradación de los plásticos.....	11
2.1.6.- Acciones contra la contaminación plástica.....	12
2.2.- Carreteras.....	13
2.2.1.- Carreteras en malas condiciones.....	19
2.2.2.- Pavimento flexible (Carreteras asfaltadas)	20
2.2.3.- Deterioros en los Pavimentos Flexibles.....	24
2.2.4.- Deterioros de la Superficie.....	24
2.2.5.- Deterioros de la Estructura	28
2.2.6.- Deterioros por defectos constructivos.....	33
3.- ESTADO DEL ARTE	34
4.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	36
5.- JUSTIFICACIÓN.....	37
6.- HIPÓTESIS.....	38
7.- OBJETIVOS	38
7.1.- Objetivo General.....	38
7.2.- Objetivos Particulares.....	38
8.- METODOLOGÍA.....	39
8.1.- OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES	39

8.1.1.- Grava	39
8.1.2.- Sello	39
8.1.3.- Arena.....	39
8.1.4.- Microfibras de PET	39
8.1.5.- Asfalto	39
8.2.- EXPERIMENTACIÓN.....	40
• 8.2.1.- Pruebas a los asfaltos	40
• Prueba Penetración	40
• Prueba Ductilidad	42
• Prueba Punto de Reblandecimiento	44
• 8.2.2.-Secado del Agregado.....	47
• 8.2.3.- Análisis Granulométrico	47
• 8.2.4.- Determinación de la Masa Específica y Absorción del agregado (Norma N.CMT.4.04/17).....	51
• 8.2.5.- Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.....	53
• 8.2.6.- Determinación del porcentaje para integración de materiales.....	56
• 8.2.7.- Preparación de las Muestras de Ensayo	60
• 8.2.8.- Ensayos de Estabilidad y Fluencia	64
• 8.2.9.- Análisis de Vacíos, Masa Unitaria, VMA, VFA	65
9.- RESULTADOS	66
9.1.- Materiales Pétreos	66
9.2.- Material asfáltico	66
9.3.- Resultados de las mezclas.....	67
10.- INFORMACIÓN AMBIENTAL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	75
11.- CONCLUSIONES	78
12.- BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Plásticos transportados por el agua.....	1
Ilustración 2.- Plásticos en reuso	1
Ilustración 3.- Accidentes a causa de vialidades en malas condiciones	2
Ilustración 4.- Centro de acopio de PET, Créditos: DIRECCIÓN GENERAL DE COMUNICACIÓN SOCIAL	2
Ilustración 5.- Problemática en cuestión.....	3
Ilustración 6.- Contaminación ambiental	4
Ilustración 7.- Contaminación (Sepúlveda, 2020)	4
Ilustración 8.- Contaminación natural.....	5
Ilustración 9.- Contaminación Artificial	5
Ilustración 10.- Contaminación del Suelo.....	6
Ilustración 11.- Plásticos.....	6
Ilustración 12.- Plástico Natural (Adriemilio, s.f.)	7
Ilustración 13.- Plásticos Sintéticos (Kindelán, 2018).....	7
Ilustración 14.- Plásticos Termoplásticos, Termoestables, Elastómeros	8
Ilustración 15.- Plástico en seres vivos	9
Ilustración 16.- Contaminación plástica (ASECA, 2019).....	10
Ilustración 17.- PET (Soluciones Packaging, 2018)	10
Ilustración 18.- Relleno Sanitario	11
Ilustración 19.- Plásticos prohibidos.....	12
Ilustración 20.- Carretera	13
Ilustración 21.- Camino Primario	14
Ilustración 22.- Camino Secundario	14
Ilustración 23.- Camino Tercería	15
Ilustración 24.- Camino Rural.....	15
Ilustración 25.- Terreno Plano	16
Ilustración 26.- Terreno en Lomerío	16
Ilustración 27.- Terreno Montañoso	17
Ilustración 28.- Movimiento de mercancías.....	19
Ilustración 29.- DESCRIPCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	21
Ilustración 30.- Desprendimiento de agregados (calaveras o surcos) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	25
Ilustración 31.- Pérdida de capa de rodadura (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	25
Ilustración 32.- Pérdida de base (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	26
Ilustración 33.- Exudación de asfalto (llorado) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	27
Ilustración 34.- Desgaste de áridos (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002).....	27
Ilustración 35.- Exposición de agregados (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)...	28
Ilustración 36.- Roderas (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	28
Ilustración 37.- Canalizaciones (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	29
Ilustración 38.- Baches profundos (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002).....	30

Ilustración 39.- Ondulaciones (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002).....	30
Ilustración 40.- Agrietamiento longitudinal (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	31
Ilustración 41.- Grietas transversales (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	32
Ilustración 42.- Fisuras solas o en retícula (malla) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	32
Ilustración 43.- Piel de cocodrilo (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)	33
Ilustración 44.- Agitado de asfalto.....	40
Ilustración 45.- llenado de capsulas y colocación en baño María.....	41
Ilustración 46.- Llevado a cabo de prueba Penetración	41
Ilustración 47.- Agitado de asfalto	43
Ilustración 48.- Llenado de briquetas y colocado en baño María	43
Ilustración 49.- Enrasado de capsulas.....	44
Ilustración 50.- Colocación y puesta en marcha de Ductilómetro	44
Ilustración 51.- Agitado de asfalto	45
Ilustración 52.- Llenado de muestras y enrasado.....	45
Ilustración 53.- Agua a 5 °C.....	46
Ilustración 54.- Realización de prueba.....	46
Ilustración 55.- Prueba de granulometría.....	48
Ilustración 56.- Ejecución de prueba granulometría	48
Ilustración 57.- Muestra al finalizar prueba	49
Ilustración 58.- Pruebas Absorción y Densidad.....	52
Ilustración 59.- Prueba Desgaste de los Ángeles	54
Ilustración 60.- Colocación de material pétreo	55
Ilustración 61.- Fórmulas Índices FG, Ffa, Fff (AMAAAC).....	57
Ilustración 62.- Gráfica limites Mezcla Densa 3/4"	60
Ilustración 63.- Determinación de materiales	61
Ilustración 64.- Aplicación de calor a materiales.....	61
Ilustración 65.- Mezclado	62
Ilustración 66.- Fraguado de mezcla.....	62
Ilustración 67.- Compactación de pastillas	63
Ilustración 68.- Enfriado de pastillas	63
Ilustración 69.- Homogenización de temperatura en baño María.....	64
Ilustración 70.- Ejecución de pruebas Marshall.....	64
Ilustración 71.- Determinación de parámetros.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (N-CMT-4-04-17).....	22
Tabla 2.- Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Abierta (N-CMT-4-04-17, 2017).....	23
Tabla 3.- Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Discontinua, tipo SMA (N-CMT-4-04-17, 2017).....	23
Tabla 4.- Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados	42
Tabla 5.- Juegos de mallas para granulometría.....	47
Tabla 6.- Resultados Granulometría	50
Tabla 7.- Gráfica “% Que Pasa”	51
Tabla 8.- COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002).....	54
Tabla 9.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa	57
Tabla 10.- Porcentajes de materiales a utilizar en mezcla asfáltica	58
Tabla 11.- Granulometría de Diseño.....	58
Tabla 12.- Propuesta de integración de materiales	58
Tabla 13.- Índices Método Baileys	59
Tabla 14.- Valores de Límites y granulometría de trabajo	59
Tabla 15.- Comparación de Resultados con Norma “Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < \text{Suma } L \leq 30 \times 10^6$	66
Tabla 16.- Comparación de resultados obtenidos con Norma N.CMT.05.001/06	67
Tabla 17.- Resultados de pruebas a pastillas	67
Tabla 18.- Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall N.CMT.4.05.003/16.....	68
Tabla 19.- Gráfica Estabilidad Marshall (Resistencia en Kgf)	69
Tabla 20.- Gráfica Flujo (Deformación).....	70
Tabla 21.- Gráfica % de vacíos en la mezcla	72
Tabla 22.- Gráfica % vacíos ocupados por el asfalto.....	73

DEDICATORIAS

A **CONACYT** por apoyarme y hacer posible el cursar una maestría, por la gran labor que conlleva este departamento y por ayudar a cumplir el sueño de muchos mexicanos, como yo, de ser profesionistas con una especialidad.

A mi papá: **CORNELIO SALINAS ROMERO**, por ser siempre un pilar en la casa, siempre guiarnos por el camino del bien a mi hermano y a mí, por ser un ejemplo de padre y saber aconsejarnos cuando no sabemos qué hacer en momentos difíciles y a no doblegarnos, por motivarme a seguir mis sueños y cumplir mis metas, por darme esos buenos consejos que me alentaban y me daban fuerzas para seguir adelante, gracias a eso el día de hoy podemos disfrutar de este logro que no solo es mío, es tuyo también. Muchas gracias por ser mi padre, por estar en mi vida y por ayudarme a cumplir mis metas.

A mi mamá: **MIREYA RANGEL OROZCO**, por ayudarme a tener carácter y poder enfrentar todos mis temores para con ello lograr alcanzar mis sueños, por reconfortarme y darme consejos cuando en ocasiones no tenía idea que poder hacer cuando una situación se tornaba difícil, por alentarme, de igual manera que mi papá, por guiarnos a mi hermano y a mí por el camino del bien y por todas esas ocasiones que aun sintiéndote mal, hacías el sacrificio de ayudarnos en lo que podías para que nosotros no nos desconcentráramos de nuestro estudios y nos ayudabas en lo que podías de nuestras tareas escolares, por todo eso y más este logro también es tuyo, muchas gracias por ser mi madre, por estar en mi vida y ayudarme a cumplir mis metas.

Muchas gracias por ser mis padres, que a pesar de tener momentos muy difíciles en la familia, de mucha tensión, siempre han sabido resolverlos e inculcarnos el valor de responsabilidad, que aunque las cosas se tornen difíciles, no serán para siempre y que eso solo es una prueba para demostrar que tan fuerte es uno como persona y en conjunto como familia, siempre serán muy valiosos en mi vida y se perfectamente que siempre podré contar con ustedes cuando los necesite, gracias por sus consejos, sus enseñanzas y las alegrías que juntos hemos vivido. Son pocas palabras para demostrar todo lo que estoy agradecido con ustedes.

A mi hermano: **OMAR SALINAS RANGEL** por apoyarme siempre que lo necesite, por estar siempre conmigo a pesar de los disgustos que teníamos, me enseñaste a no ser rencoroso y a saber que vale más la familia que cualquier otra cosa en la vida, por demostrarme que, si algo se quiere, se lucha hasta conseguirlo y por mantenerlo, ya sean sueños o pertenencias materiales. Gracias por ser mi hermano y apoyarme en todo lo que has podido, a pesar de que te ha tocado vivir experiencias muy malas, gracias por eso y mucho más.

A mis abuelos **ANTONIO SALINAS GONZÁLEZ Y ANTONIA ROMERO VARGAS**, por apoyarme incondicionalmente, por darme siempre muy buenos consejos y siempre dar un buen ejemplo, por demostrarme que siempre se puede lograr las metas si uno se lo propone y trabaja duro para conseguirlo, por ser un ejemplo de cómo hacer las cosas y que a pesar de que han vivido situaciones muy difíciles, siempre tengan una sonrisa en la cara y nos demuestren que no hay situación que no se resuelva, hay mucho que agradecerles, gracias por permitirme lograr mis sueños y siempre aconsejarme de la mejor manera, por eso y más razones este logro también es de ustedes, hoy compartimos este triunfo que merecido lo tenemos todos.

A mis abuelos **MANUEL RANGEL RINCÓN Y MARTHA IMELDA OROZCO CABALLERO**, por aconsejarme y apoyarme cuando lo necesite, por todos los momentos que vivimos, por demostrarme que necesitamos ser fuertes a pesar de los problemas que surjan y seguir adelante, que siempre hay que tener la frente en alto y que necesitamos demostrar de lo que uno es capaz de lograr, por todo eso y más muchas gracias, este triunfo también es de ustedes.

A mi toda mi familia en general, por apoyarme en todo lo que necesite, por siempre estar al pendiente por si algo me hacía falta y por alentarme a seguir mis metas, a cumplir cada uno de los propósitos que me ponga. ¡MUCHAS GRACIAS A TODOS Y CADA UNO DE LOS QUE HICIERON POSIBLE QUE HOY LOGRE CUMPLIR ESTA META!

“Piensa, Cree, Sueña Y Atrévete”. Autor Anónimo

“Cambiar el mundo es el resultado de la suma de todos nuestros pequeños pasos”. Autor Anónimo

AGRADECIMIENTOS

A **CONACYT** por ser parte fundamental en el transcurso de la maestría, por brindarnos las muchas oportunidades para cumplir con esta meta y brindarnos herramientas para que las investigaciones se lograrán en tiempo y forma, además de información veraz y confiable.

A Dios, por permitirme concluir esta tarea, por darme fuerzas y sabiduría para realizar esta tesis y mantener mi perseverancia y ánimos para no desistir. Por darme alientos y fuerzas cuando ya no podía más.

Agradezco a mis padres por su apoyo tan grande en cada etapa de mi vida y logros que he conseguido, por sus consejos, por creer en mí a pesar que en ocasiones los decepcionaba por mis actos y ser aliento para lograr mis objetivos. Por alentarme en momentos difíciles y comprenderme cuando se me tornaban las cosas de mala manera, por enseñarme el valor de la responsabilidad y enseñarme a no rendirme a pesar de lo difícil que se torne la situación.

A mi hermano, que me ha enseñado grandes cosas que le ha tocado aprender de la manera difícil, por enseñarme a seguir adelante y luchar por cada uno de mis sueños sin importar que tan grandes o difíciles sean de conseguir.

A mi esposa Sandra Bedolla Torres que estuvo conmigo desde que inicie este sueño, apoyándome, alentándome y ayudándome en repetidas ocasiones con mis trabajos y tareas, por creer en mí y demostrarme que juntos logramos lo que nos proponíamos y seremos más fuertes.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme las puertas y brindarme una oportunidad más de conseguir uno de mis sueños, por ser la institución que me formó profesionalmente. A la Facultad de Ingeniería Civil, que siempre llevaré en mi corazón y a la cual recordaré con mucho cariño. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, a la Sección de Materiales Asfálticos y todo su personal por brindarme las instalaciones, material y equipo necesarios para el desarrollo de la investigación. A mis profesores, por sus enseñanzas y consejos.

A mi asesor, el Dr. Wilfrido Martínez Molina por ser un pilar en el transcurso de la maestría, por aconsejarme y ayudarme a tomar las mejores decisiones, a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán que de igual manera que el Dr. Wilfrido, me apoyaron en el transcurso de la maestría, aconsejándome, ayudándome, motivándome, al M.I.T. Antonio Mondragón Ornelas, quien fue además de tutor, profesor y gran amigo, por ayudarme en repetidas ocasiones en mis tareas escolares y apoyarme para realizar mi tesis, además de que me aportó mucho conocimiento en el área de asfaltos para realizar la tesis, gracias por creer en mí y seguir conservando la amistad.

A la empresa **Pavimentos Asfálticos Tres Marías S.A. de C.V.** por proporcionarme material asfáltico que requerí para llevar a cabo la investigación y siempre estar dispuestos a apoyar a las universidades.

A la empresa **Morphoplast** por proporcionarme las microfibras que requerí para llevar a cabo la investigación y siempre estar dispuestos a apoyar a las universidades.

A los compañeros que me ayudaron a realizar el trabajo de experimentación, Ledimo Enrique López González, José Daniel Luquin Salgado, quienes me ayudaron en la experimentación realizada para poder concluir con la tesis, además de aportar de sus conocimientos para que todo saliera de manera correcta.

A todos aquellos quienes me tendieron la mano e hicieron mi trabajo más sencillo

A mis maestros, muchas gracias por transmitirme el conocimiento que ustedes han adquirido en muchos años, por creer en mí y formarme como Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental, es una noble, pero muy significativa labor la que realizan día con día para que los miles de jóvenes que tienen el sueño de ser MCIA como yo, logremos realizar tan anhelado sueño, muchas gracias por permitirme ser parte de tan bonita profesión.

RESUMEN

Si bien el plástico tiene muchos usos valiosos, nos hemos vuelto adictos al plástico desechable o de un solo uso, con graves consecuencias ambientales.

La contaminación ambiental es una realidad que a todos nos afecta, se estima que se han producido 8.3 millones de toneladas de plástico desde principios de la década de 1950 y alrededor del 60% de éstos han terminado en un tiradero o en el medio ambiente (Programe, 2018).

En la actualidad no se vislumbra una vida sin plástico, por eso es que la producción incrementa de manera exponencial y se espera siga en aumento, por lo que, los gobernantes y empresarios apuestan al reciclaje de estos productos en lugar de tratar de eliminarlos.

Una de las opciones de reciclar o reutilizar los plásticos es en forma de adición en las mezclas asfálticas, y es que, los plásticos poseen características que las mezclas asfálticas no contienen.

Como podemos observar, las vialidades se encuentran muy deterioradas, incluso intransitables en algunos de los casos, y es que, son diversos factores los que influyen para que las mezclas asfálticas fallen o comiencen a presentar deterioros.

Contar con vialidades en condiciones favorables es propicio para la economía del país, ya que a diario se mueven grandes cantidades de productos por las vías terrestres, contando con carreteras en buen estado se logra obtener beneficios al reducir los costos de flete y al acortar las distancias entre las ciudades o destinos, de tal manera que una vialidad en perfectas condiciones beneficiaría tanto socialmente como ambientalmente, al tener vehículos transitándola en menor tiempo.

Tratando de aportar una solución que abarque estas dos problemáticas es que se realizó esta investigación, donde se realizó una mezcla asfáltica testigo y 9 mezclas asfálticas con adición de microfibras de PET, variando el porcentaje de asfalto entre 5% y 6% y las fibras entre 1% y 2%, resultando todas las mezclas con características mecánicas superiores a la mezcla testigo, de entre todas las mezclas, la que obtuvo mejor resultados es la que contiene 6% de asfalto con 1.5% de microfibra respecto al porcentaje de asfalto.

Palabras Clave: Microfibra, mezcla asfáltica, reciclar, plástico, vialidades.

ABSTRACT

Although plastic has many valuable uses, we have become addicted to disposable or single-use plastic, with serious environmental consequences.

Environmental pollution is a reality that affects us all, it is estimated that 8.3 million tons of plastic have been produced since the early 1950s and about 60% of these have ended up in a dump or in the environment (Program, 2018).

At present, there is no glimpse of a life without plastic, which is why production increases exponentially and is expected to continue to increase, so governments and entrepreneurs are betting on the recycling of these products instead of trying to eliminate them.

One of the options for recycling or reusing plastics is in the form of an addition in asphalt mixtures, and that is that plastics have characteristics that asphalt mixtures do not contain.

As we can see, the roads are very deteriorated, even impassable in some of the cases, and it is that, there are several factors that influence asphalt mixtures to fail or begin to deteriorate.

Having roads in favorable conditions is conducive to the country's economy, since large quantities of products move daily on land roads, having roads in good condition it is possible to obtain benefits by reducing freight costs and shortening the distances between cities or destinations, in such a way that a road in perfect conditions would benefit both socially and environmentally, by having vehicles transiting it in a shorter time.

Trying to provide a solution that covers these two problems is that this research was carried out, where a witness asphalt mixture and 9 asphalt mixtures with the addition of PET microfibers were carried out.

Varying the percentage of asphalt between 5% and 6% and the fibers between 1% and 2%, resulting in all the mixtures with mechanical characteristics higher than the witness mixture, among all the mixtures, the one that obtained the best results is the one that contains 6% of asphalt with 1.5% microfiber compared to the percentage of asphalt.

Keywords: Microfiber, Asphalt Mixing, recycle, plastic, roads.

1.- INTRODUCCIÓN

Los plásticos de un solo uso están por todas partes, los vemos en las calles de nuestras ciudades, bloqueando las alcantarillas, pero también en los rincones más lejanos y prístinos de nuestro planeta, los plásticos inundan nuestros ecosistemas (Garelli, 2021).

Los plásticos pueden recorrer largas distancias y transportarse de las zonas urbanas, hasta nuestros océanos, a través del viento, el agua de lluvia, los ríos, por los drenajes, por acción directa de las personas. La contaminación por plásticos tiene impactos negativos en los diferentes ecosistemas donde ha llegado y perdura por una cantidad de tiempo por lejos muy superior al tiempo de utilidad que brindaron dichos productos.



Ilustración 1.- Plásticos transportados por el agua

Estos materiales pueden ser reciclados, y tienen valor no solo al ser usados por primera vez, sino también cuando se convierten en residuos.

El reciclaje de los plásticos ha llevado a los científicos a crear nuevos materiales o incluso aprovechar las propiedades del plástico para mejorar otros productos, de tal manera que los plásticos puedan reusarse al cumplir con su objetivo inicial.



Ilustración 2.- Plásticos en reuso

Una de las aplicaciones del plástico de reúso es, la creación de vialidades a las que se les incorpora plástico reciclado en diversas formas, ya sea, como sustituto de agregado mineral, adicionándolo al asfalto para mejorar sus propiedades, o bien, adicionándolo en forma de fibras a la mezcla asfáltica, siendo esta ultima la que se utilizará en esta investigación.

Abundando en el tema de la incorporación de fibras en las mezclas, se han llevado a cabo investigaciones donde se demuestra que estas aportan beneficios a la mezcla mejorando sus propiedades, y es que en la actualidad nos encontramos en un periodo donde la mayoría de las vialidades se encuentran en malas condiciones o incluso algunas son intransitables.

Aunque, aun en la actualidad, los pavimentos flexibles resultan ser los que más se construyen en México, España, toda la Unión Europea y los Estados Unidos y podría decirse en el mundo entero, en México alrededor del 90% de las carreteras están construidas por pavimentos flexibles (Reyes, 2011).

La red de carretera libre de peaje en México presenta problemas al encontrarse en mal estado al menos en un 35 por ciento, dicho porcentaje corresponde a más de 11 mil kilómetros bajo esta situación (NOTIMEX, 2019). las malas condiciones de estas han generado la afectación continua de automóviles particulares, incluso llegando a generar accidentes que terminan en fatalidad.



Ilustración 3.- Accidentes a causa de vialidades en malas condiciones

Debido a estas dos problemáticas es que se está llevando a cabo esta investigación, con la cual se busca aportar de manera social, científica y ambientalmente, donde se propone la utilización de microfibras de PET de 32 mm de largo y 0.9 denier de grosor como adición en la mezcla asfáltica, buscando disminuir la contaminación del medio ambiente por plásticos no reutilizados y obtener datos sobre la viabilidad del uso de microfibras de PET en mezclas asfálticas, además de la cantidad necesaria de microfibra para la elaboración de esta mezcla, tomando en cuenta tramo carretero de ciertas características.



Ilustración 4- Centro de acopio de PET, Créditos: DIRECCIÓN GENERAL DE COMUNICACIÓN SOCIAL

2.- MARCO TEÓRICO

Esta investigación aborda dos problemáticas, la primera es el uso desmedido de plásticos de un solo uso y su mala disposición, la segunda, el mal estado de las vialidades.



Ilustración 5.- Problemática en cuestión

En la actualidad el uso de plástico se ha salido de control, y es que, el plástico lo utilizamos prácticamente en todas nuestras actividades, hay plástico en nuestra ropa, nuestros escritorios, nuestras casas, nuestros vehículos y en los artículos personales. Todo tiene plástico, por lo que el imaginar una vida sin plástico es prácticamente imposible.

Por lo cual debemos de pensar en soluciones en lugar de satanizar al plástico, en la actualidad se han creado diferentes opciones de utilizar plásticos reciclados, tanto en la industria textil, la industria de la construcción, etc.

Y es que el plástico ayuda a mejorar las propiedades de muchos productos al incorporarlo, se han hecho gran número de investigaciones donde se demuestran estos beneficios del plástico.

En la industria de la construcción se han desarrollado tesis, artículos, tesinas, y demás investigaciones donde se aplica plástico reciclado en mezclas asfálticas en diferentes presentaciones o maneras de incorporarlo, y es que, se ha comprobado que las mezclas resultan con mejores características al incorporarle el plástico en comparación con mezclas convencionales.

Y es que en la actualidad se requieren vialidades con características mecánicas superiores a las de las décadas pasadas, las mezclas asfálticas elaboradas hace 20 años ya no cumplen con los requerimientos que la actualidad les demanda y es por eso que nos encontramos con vialidades en muy mal estado, casi intransitables.

Una vez mencionado lo anterior, comenzaremos a abordar los temas que conformar esta investigación para poder así, entender de mejor manera el fin que se persigue con esta tesis.

2.1.- Contaminación

Según la Real Academia Española “contaminación” es la acción y efecto de contaminar. Este último

significa “alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos” (Sepúlveda, 2020).

2.1.1- Contaminación ambiental



Ilustración 6.- Contaminación ambiental

Muchas veces el concepto de contaminación ambiental se relaciona a la contaminación del aire, pero abarca mucho más. Este tipo de contaminación se da en los ríos, la tierra, la comida.

La contaminación ambiental es un fenómeno que afecta directa e indirectamente la salud de las poblaciones, no sólo de seres humanos, pues también altera el equilibrio de los ecosistemas.

Hay dos tipos fundamentales de fuentes de emisión según su origen. Una es la contaminación de origen natural, que es generada por la naturaleza y la de origen antropogénico, producida por el hombre. De estas últimas la mayoría proviene de la vía industrial, de transporte y domésticas.



Ilustración 7.- Contaminación (Sepúlveda, 2020)

La contaminación puede ser **natural** (causada por incendios forestales, erupciones volcánicas, tsunamis o terremotos)



Ilustración 8.- Contaminación natural

artificial (provocada por la actividad del ser humano: la interrupción de los ciclos naturales del ecosistema, el mal uso de los recursos naturales o por la mala gestión de los residuos, entre las principales causas).



Ilustración 9.- Contaminación Artificial

La contaminación ambiental se produce, en mayor medida, por el aumento continuo de la población humana y un incontrolable desarrollo industrial (Editorial Etecé, 2021).

Con el desarrollo industrial se genera una gran cantidad de residuos, los cuales, en su gran mayoría terminan en botaderos o en el medio ambiente, generando la contaminación del suelo, provocando cambios perjudiciales en el terreno.



Ilustración 10.- Contaminación del Suelo

La gran mayoría de los residuos botados en el suelo son plásticos, los cuales están formados principalmente del petróleo, dependiendo del tipo de plástico y su uso, tienen además otros químicos que lo conforman para darle las propiedades que se requieren para un determinado uso o fin.

2.1.2.- Plásticos

El término «plástico» proviene del griego «plastikos» que significa que se puede moldear. Los plásticos poseen distintas propiedades que permiten moldearlos y adaptarlos a diferentes formas y aplicaciones. Si miramos bien, en todos los ámbitos vemos elementos de plástico: los envases, la ropa, los utensilios, los dispositivos médicos, los electrodomésticos, los medios de transporte, etc.



Ilustración 11.- Plásticos

Los plásticos son polímeros que tienen la capacidad de ser modelados porque están conformados por resinas elásticas. Estos plásticos pueden ser un grave problema ambiental debido a su gran consumo a nivel mundial, ya que son usados como utensilios domésticos, hasta el uso en llantas para vehículos

Un plástico es un polímero, es decir, un material formado por la unión repetitiva de miles de átomos hasta formar moléculas de gran tamaño, conocidas como macromoléculas. Son compuestos orgánicos integrados principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, azufre, silicio y fósforo (Santillan, 2018).

Existen distintos tipos de polímeros: aquellos que están formados por un mismo monómero unido de manera repetitiva y los que están constituidos por dos o tres monómeros diferentes.

Asimismo, dependiendo de estas características se obtendrán ramificaciones y un peso molecular del polímero para cada uno. Estos aspectos determinarán el uso final del plástico, por ejemplo, algunos podrían usarse en el área automotriz, otros en empaques, juguetes, etcétera.

Asimismo, un plástico es un polímero que al agregársele aditivos modifica sus propiedades, de ahí que pueda ser transformado y mejorar su resistencia.

La Consellería de Cultura Educación e Ordenación Universitaria, (XUNTA DE GALICIA) (2016) clasifica a los plásticos y los define de la siguiente manera:

- **Por su Naturaleza:**

I. **Naturales.** – Obtenidos de materias primas como: látex, caseína de la leche y celulosa.



Ilustración 12.- Plástico Natural (Adriemilio, s.f.)

II. **Sintéticos.** – Elaborados a partir de petróleo, gas natural o carbón.



Ilustración 13.- Plásticos Sintéticos (Kindelán, 2018)

- **Por su Estructura Interna:**

- I. **Termoplásticos.** - Su estructura interna está formada por cadenas lineales que se desarmen fácilmente con el calor y se reconstruyen al enfriarse.
- II. **Termoestables.** - Su estructura interna está formada por cadenas entrecruzadas que permiten que se degraden con el calor antes de que el plástico se funda.
- III. **Elastómeros.** - Son un tipo de termoestables que pueden fundirse una vez, pero debido a su estructura interna con cadenas ramificadas presentan un elevado grado de elasticidad.



Ilustración 14.- Plásticos Termoplásticos, Termoestables, Elastómeros

2.1.3.- Contaminación por medio del plástico

Durabilidad, flexibilidad y resistencia, tres cualidades que hacen de un material el ideal para almacenar, transportar y envasar cualquier tipo de productos, sean líquidos, congelados, sólidos... Estas son las propiedades que se buscaban cuando aparecieron los primeros celulosos cuya plasticidad comenzaba a dar qué hablar.

Se ha documentado que, al tratar la celulosa, derivada de la fibra de algodón, con alcanfor, John Wesley Hyatt descubrió un plástico que podía fabricarse en una variedad de formas e imitar sustancias naturales como Carey, cuerno, lino y marfil en 1869 (Rivas, 2019).

En los albores del siglo XX Leo Baekeland inventó la baquelita, el primer plástico totalmente sintético, es decir, que no contenía moléculas encontradas en la naturaleza. De esta forma los seres humanos dejaron de depender de los tiempos de la naturaleza misma para poder fabricar sus materiales. Pronto se descubrieron estas propiedades en los derivados del petróleo, lo que trajo consigo el abaratamiento de los costos para producir materiales plásticos. Con la segunda Guerra Mundial la producción de estos materiales se disparó 300% en los Estados Unidos, a tal punto que para el año 2015 los seres humanos habíamos producido 8,300 millones de toneladas de plástico (Rivas, 2019).

La producción de plástico pasó de 2 millones de toneladas anuales durante la década de los 50 del siglo 20 a 380 millones en la actualidad. Lo preocupante es que para los próximos años la industria del plástico espera duplicar esta cifra, superando los 700 millones de toneladas de plásticos producidas alrededor del mundo. Lamentablemente, sólo 9 por ciento de este material se ha reciclado y 12 % ha sido incinerado, con las complicaciones ambientales que esto conlleva. El 79 % del plástico producido desde 1950 terminó en rellenos sanitarios, sin ningún tipo de valorización o recuperación.

Todos desechables y con la promesa de hacer la vida más fácil. No cargar artículos para la comida, no lavar o, simplemente, tomar la opción de comer/beber rápido en un ritmo de vida acelerado ha resultado en una cultura de usar-tirar que hace que 12.7 millones de toneladas de plásticos terminen en los océanos, afectando a más de 700 especies entre aves playeras, mamíferos marinos, crustáceos, peces e, incluso, los corales. Prácticamente ningún ser vivo se salva de la contaminación plástica, cada vez más evidente en las noticias sobre mamíferos marinos con una gran cantidad de plástico al interior de sus estómagos o tortugas marinas con trozos incrustados de esta vida desechable (Rivas, 2019).



Ilustración 15.- Plástico en seres vivos

A pesar de que es en la década de los 30 del siglo pasado cuando los plásticos empezaron a generarse, no fue sino hasta dos décadas después que su uso empezó a permear en todos los ámbitos de nuestra vida. Este impacto fue tan grande que para la mitad de la década de los 80 su consumo ya había rebasado al de otros materiales como los metales.

Aunque originalmente los plásticos fueron vistos como una opción para sustituir otros materiales por las amplias propiedades que poseen como ligereza, resistencia, transparencia y costo, en la actualidad existen áreas para las que son un peligro ambiental debido a las malas prácticas de disposición final. Sin embargo, los hábitos de consumo actuales no nos permiten concebir una vida sin plástico. Basta sentarnos en el sillón de nuestra sala, en la banca de un parque, caminar por los pasillos del supermercado u observar el interior de nuestra oficina para darnos cuenta de que muchos objetos que nos rodean son de este material.

En México se producen 300 millones de toneladas de plásticos al año, de las cuales sólo se recicla 3% (Santillan, 2018). Anualmente 13 millones de toneladas de plástico van a dar a nuestros océanos, contaminación que provoca daños ambientales y económicos que trascienden fronteras y que afecta a más de 700 especies marinas. En México se producen más de siete millones de toneladas de plástico al año; el 48% es destinado a envases y embalajes que no necesariamente terminarán siendo reciclados ya que la capacidad real de reciclaje del total de residuos valorizables apenas llega al 6.07% en el país (GREENPEACE, 2019).



Ilustración 16.- Contaminación plástica (ASECA, 2019)

2.1.4.- PET (Tereftalato de polietileno)

PET (polietilentereftalato) es un polímero plástico que se obtiene mediante un proceso de polimerización de ácido tereftálico y monoetilenglicol. Es un polímero lineal, con un alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Sus principales características son:

- Es totalmente reciclable
- Cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes
- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Alta resistencia al desgaste
- Muy buen coeficiente de deslizamiento
- Buena resistencia química
- Excelente barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad de barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.



Ilustración 17.- PET (Soluciones Packaging, 2018)

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido

las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas, bandejas, flejes y láminas (COLOMBIAPLAST, 2021).

2.1.5.- Desecho y degradación de los plásticos

Existe una preocupación constante de los distintos sectores para mejorar el problema ambiental que ha representado el uso de plástico en nuestra vida cotidiana. En 2016 investigadores de la universidad de Oxford reportaban en la revista *Nature* que de los 300 millones de toneladas de plásticos que se producen al año, la tercera parte llega a los océanos afectando a organismos que se encuentran a 2 mil o 3 mil metros de profundidad (Santillan, 2018).

Por otra parte, aunque ha sido más estudiada la relación de los plásticos y los océanos, también existen algunos trabajos enfocados en la afectación de los plásticos a los suelos. Una de las primeras soluciones para los desechos de plástico fueron los rellenos sanitarios, los cuales, aunque han sido una herramienta útil para el acopio de los materiales tienen desventajas, pues el plástico que se queda en ellos puede tardar hasta 500 años en degradarse. Además, se acumulan sustancias tóxicas que están presentes tanto en los plásticos como en otros componentes de estos mismos rellenos, lo cual genera una mayor toxicidad.



Ilustración 18.- Relleno Sanitario

Aunado a esta situación el Tereftalato de polietileno o PET es un gran problema por todos los desechos que se generan. Cabe destacar que México se encuentra entre los países que más desechos de PET produce, debido al alto consumo de refrescos y de agua embotellada.

“Se estima que al año se producen alrededor de 200 botellas de PET por cada mexicano” (Santillan, 2018).

Otra de las alternativas que se ha propuesto para el reciclado de este tipo de plástico es el tratamiento térmico o su transformación en otro tipo de productos que puedan ser rendidores en términos económicos. En este sentido, pueden transformarse en camisetas o uno de los casos más conocidos es el de transformarlos en ladrillos, como material de construcción, el cual es conocido como Petbrit.

2.1.6.- Acciones contra la contaminación plástica

Afortunadamente estamos a tiempo de tomar acción y solucionar este problema de raíz: la producción de plásticos de un solo uso. Es necesario cambiar el modelo de producción y consumo -que actualmente se basa en extraer materias primas, fabricar y ofrecer productos cuya finalidad es consumir y desechar-, por un modelo circular donde la vida de los productos aumente sustancialmente y puedan reutilizarse a tal punto que se genere la menor cantidad de residuos.

La comunidad internacional es consciente de esta problemática que, se calcula, genera pasivos ambientales por 2.5 millones de dólares anuales, tan solo por el impacto que tiene en los océanos. Diferentes naciones han comenzado a prohibir los plásticos que, erróneamente, se llaman desechables. Por ejemplo, Ruanda evitó el ingreso de cualquier tipo de desechables, la Unión Europea legisló en contra diferentes artículos específicos hechos de material plástico. En Latinoamérica, Chile prohibió las bolsas plásticas a nivel nacional y pronto lo hará con los popotes. La gravedad del asunto exige estas medidas que, de acuerdo con cifras de Naciones Unidas, han sido exitosas en 30 % de los casos. Sin embargo, esta cifra es auspiciosa, ya que en 50 % de los casos aún no se tenían cifras concretas para obtener conclusiones sobre su funcionamiento.

En México, las prohibiciones a los plásticos de un solo uso han proliferado entre 2018 y 2019. Querétaro fue el primer municipio en agregarla a su reglamento respecto a las bolsas plásticas y Veracruz fue el primer estado en prohibir algunos plásticos de un solo uso acorde a la necesidad de sus municipios durante el 2018. Continuaron estados como Baja California Sur, San Luis Potosí, Jalisco, Tamaulipas y Sonora, convirtiéndose en una tendencia nacional que se suma a los esfuerzos internacionales por disminuir los plásticos de un solo o pocos usos, aquellos que se pueden llamar prescindibles porque existen opciones de no usarlos o alternativas reusables de larga duración para suplirlos.



Ilustración 19.- Plásticos prohibidos

Recientemente, los estados de Puebla, Tabasco, Nayarit y la Ciudad de México han regulado los plásticos en un marco legal que prohíbe a los comercios obsequiarlos a sus clientes, contribuyendo a que se genere menos basura plástica. En el instante en que se escribió esta entrada, 24 estados ya tenían alguna regulación que prohíbe algunos plásticos de un solo uso y muy pronto tendrán alguna legislación los que faltan.

A pesar de los esfuerzos legislativos, estas medidas han tenido requerimientos dispares a la hora de poner un alto a la contaminación por plásticos que afecta al planeta. Hay estados que prohíben artículos sencillos

y prescindibles como los popotes (Chihuahua, Sinaloa) hasta otros más aventurados, que incluso prohíben el uncel (Guerrero, BCS, Jalisco, CDMX); los envases de tereftalato de polietileno, conocido como PET (Oaxaca), o incluso los globos y cápsulas de café (CDMX). En otros estados se permiten, incluso se fomenta, el uso de biodegradables compostables (Puebla, CDMX) o reciclables en algún porcentaje (Jalisco, Nuevo León). La diversidad parece responder a la necesidad propia de cada estado, quizá dependiendo de la influencia de la industria o del atrevimiento de los legisladores por frenar en mayor o menor medida estos artículos en sus estados (Rivas, 2019).

2.2.- Carreteras



Ilustración 20.- Carretera

“Camino público, ancho y espacioso, pavimentado y dispuesto para el tránsito de vehículos” (Española, 2022)

” Camino público, ancho y espacioso, pavimentado y dispuesto para el tránsito de vehículos” (SEGOB, 2004)

“Las carreteras son vías de circulación para automóviles y demás vehículos de transporte público y privado de personas, como así también de productos. Las carreteras suelen conectar ciudades entre sí o centros de producción y centros de consumo, y generalmente recorren los países y los continentes en distintas direcciones, para potenciar la conectividad” (TIPO, 2022).

- **Tipos de carreteras**

Según su funcionalidad:

- Primarias
- Secundarias
- Tercerías
- Rurales

Primarias:

Son aquellas troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen con la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país y de éste con los demás países.

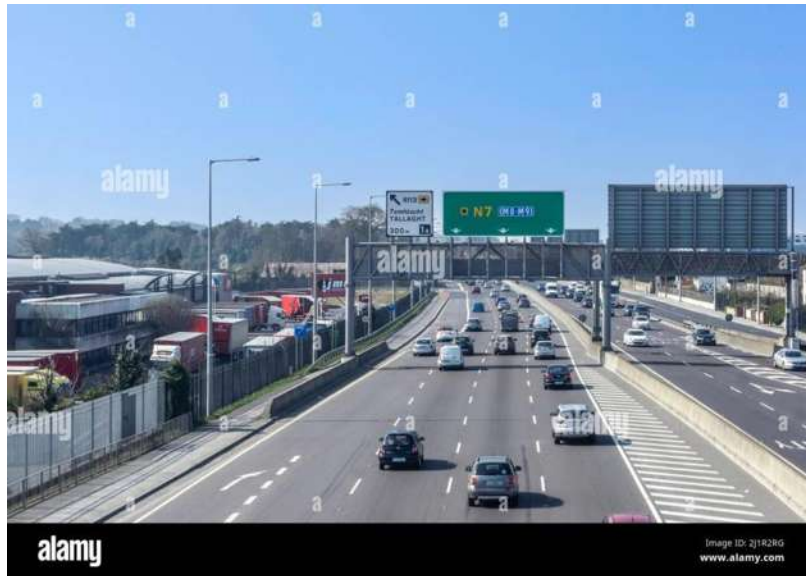


Ilustración 21.- Camino Primario

Secundarias:

Son aquellas vías que unen las capitales de los estados entre si y/o con la capital del país, y conectan con una carretera Primaria.



Ilustración 22.- Camino Secundario

Tercerías:

Son aquellas vías de acceso que unen las capitales de los estados con las cabeceras municipales.



Ilustración 23.- Camino Tercería

Rurales:

Son aquellas vías de comunicación para unir las cabeceras municipales y las comunidades de un municipio (Monroy, 2022).



Ilustración 24.- Camino Rural

Según el tipo de terreno:

Determinado por la topografía predominante en el tramo de estudio, es decir, que a lo largo del proyecto pueden presentarse tramos homogéneos en diferentes tipos de proyectos.

- Plano
- Lomerío
- Montañoso

Terreno plano:

Exige el mínimo movimiento de tierras durante la construcción por lo que no presenta dificultad ni en su trazado ni en su registro.

Conceptualmente, este tipo de carreteras se definen como la combinación de alineamientos horizontal y vertical que permite a los vehículos pesados mantener aproximadamente la misma velocidad que la de los vehículos ligeros.



Ilustración 25.- Terreno Plano

Terreno Lomerío:

Requiere moderado movimiento de tierras durante la construcción, lo que permite alineamientos más o menos rectos, sin mayores dificultades en el trazado y en el registro.

Sus pendientes longitudinales se encuentran en tres y seis por ciento (3%-6%).

Conceptualmente, este tipo de carreteras se definen como la combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente por debajo de las de los vehículos ligeros, sin que esto los lleve a operar a velocidades sostenidas en rampa por tiempo prolongado.



Ilustración 26.- Terreno en Lomerío

Terreno Montañoso:

Generalmente requiere grandes movimientos de tierra durante la construcción, razón por la cual presenta dificultades en el trazado y en su registro.

Sus pendientes longitudinales predominantes se encuentran entre seis y ocho por ciento (6% -8%).

Conceptualmente, este tipo de carreteras se definen como la combinación de alineamientos horizontal y vertical que obliga a los vehículos pesados a operar a velocidades sostenidas en rampa durante distancias considerables y en oportunidades frecuentes.



Ilustración 27.- Terreno Montañoso

Según su jerarquía dentro de la red vial del país:

- Carreteras principales, que integran las zonas de consumo con la de producción de bienes y servicios. En algunos casos son internacionales, y suelen ser muy transitadas y bastante anchas.
- Carreteras secundarias, aquellas que unen las urbes municipales entre sí, o que sirven como afluentes de una ruta principal.
- Carreteras terciarias, son las que unen las calles de los municipios con su respectiva ruta, o directamente conectan las calles de una zona. Suelen ser menos anchas que las dos anteriores. Respecto de las condiciones del asfalto, por otro lado, suele clasificarse globalmente a las carreteras de la siguiente manera (en un orden decreciente de acuerdo a la merma en las condiciones):
- Carreteras pavimentadas, cuando el camino ya ha sido trabajado totalmente, y está totalmente cubierto por varias capas de asfalto u hormigón.
- Carreteras revestidas, la subrasante tiene varias capas de ripio; si bien no resulta del todo cómoda, es transitable en todo tiempo
- Carreteras de terracería, cuando meramente se ha indicado lo necesario para la transición del camino (en ciertos casos, solo se puede andar por allí cuando está seco) (TIPO, 2022).

Por su importancia y características

la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) clasifica a la red carretera mexicana en (VISE, 2022):

- Red Federal de carreteras. El gobierno federal se encarga de atenderlas en su totalidad. Entre las ciudades, registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga. También, canaliza los recorridos de largo itinerario, es decir, los relacionados con el comercio exterior, así como la producción de los sectores más dinámicos de la economía nacional.
- Redes estatales. Su función es de gran importancia para la comunicación regional, ya que enlaza las zonas de producción agrícola y ganadera y al mismo tiempo, asegura la integración de extensas áreas en varias regiones del país.

- Caminos rurales y brechas mejoradas. Aunque son vías modestas y por lo general carecen de pavimentación, su importancia es más social que económica, porque proporcionan acceso a comunidades pequeñas que estarían aisladas sin ellos. Por lo que su valor y efecto en las actividades y la calidad de vida de esas comunidades es de gran relevancia.

Clasificación de las carreteras (De acuerdo al peso)

Carretera tipo ET:

Son aquellas que forman parte de los ejes de transporte que establezca la Secretaría, cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, así como de otros que por interés general autorice la Secretaría, y que su tránsito se confine a este tipo de caminos.

Carretera tipo A:

Son aquellas que por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, excepto aquellos vehículos que por sus dimensiones y peso sólo se permitan en las carreteras tipo ET.

Carretera tipo B

Son aquéllas que conforman la red primaria y que atendiendo a sus características geométricas y estructurales prestan un servicio de comunicación interestatal, además de vincular el tránsito.

Carretera tipo C

Red Secundaria; son carreteras que atendiendo a sus características prestan servicio dentro del ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red primaria.

Carretera tipo D

Red alimentadora; son carreteras que atendiendo a sus características geométricas y estructurales principalmente prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes relativamente cortas, estableciendo conexiones con la red secundaria.

Clasificación oficial

Como el peso, dimensiones y capacidad del autotransporte varía de un vehículo a otro, la clasificación oficial de la SCT para los caminos y puentes sirve como una guía para el transporte de carga y así estén enterados por dónde pueden circular (VISE, 2022).

De acuerdo con la Secretaría, la clasificación de carreteras en nuestro país se divide en cinco categorías:

- ET y A. Puede circular cualquier tipo de vehículo gracias a sus prestaciones físicas y características geométricas que permiten un desplazamiento seguro de todos los vehículos.
- B. Red primaria, su servicio es de comunicación interestatal y ayuda a vincular el tránsito.
- C. Red secundaria que comprende las carreteras estatales con longitudes medias y que establecen conexiones con la red primaria.
- D. Red alimentadora, su servicio es municipal con longitudes relativamente cortas que conectan con la red secundaria.

Tanto los caminos B, C y D cuentan con algunas restricciones o incluso prohibiciones en cuanto al largo del vehículo (como los de doble remolque), principalmente para los vehículos articulados.

Nomenclatura de los Tipos de Carreteras

El tipo de carretera de acuerdo a sus características geométricas se tipifican en (VISE, 2022):

- Carretera de 4 carriles, Eje de Transporte: **ET4**.
- Carretera de 2 carriles, Eje de Transporte: **ET2**.
- Carretera de 4 carriles: **A4**.
- Carretera de 2 carriles: **A2**.
- Carretera de 4 carriles, red primaria: **B4**.
- Carretera de 2 carriles, red primaria: **B2**.
- Carretera de 2 carriles, red secundaria: **C**.
- Carretera de 2 carriles, red alimentadora: **D**.

2.2.1.- Carreteras en malas condiciones

Las carreteras o caminos son una vía de comunicación que se emplean para el transporte de personas, alimentos, mercancías, ente otras. Debido a esto el hombre se ha visto en la necesidad de aplicar ciertas mejoras y adaptaciones para las vialidades sean más cómodas, rápidas y seguras, para que cumplan de la mejor manera su labor.



Ilustración 28.- Movimiento de mercancías

En nuestro país las vialidades con las que actualmente contamos fueron construidas la gran mayoría hace 40 años, desde entonces el tráfico y los sistemas de carga han ido en aumento, poniendo en riesgo la capacidad estructural con la que fueron diseñadas. Debido a esto, presentan daños en las capas superiores e inferiores.

La red nacional comenzó a formarse en el sentido actual a partir de la época 1920 - 1930 y creció a un ritmo relativamente moderado hasta 1950. Entre 1950 y 1970, la red fue objeto de un desarrollo muy importante y a partir de 1980 continuó creciendo significativamente, pero probablemente con un gradiente menor, si

bien en los últimos años (en el periodo 1990 - 1995) tuvo lugar la incorporación de una red de modernas autopistas con longitud del orden de los 5,000 Km (Alfonso Rico Rodríguez, 1998).

Como es bien sabido que los sistemas de transporte de un país influyen significativamente en el desarrollo y crecimiento anual de la economía, ya que la eficiencia de operación de ellos puede abatir considerablemente los gastos que personas y mercancías tienen por concepto de transporte de un sitio a otro.

Debido al uso de la infraestructura de un modo de transporte, estas sufren desgastes o deterioro gradual e inevitable, que tarde o temprano acabara con su vida útil. Esto lleva a mantenimientos preventivos o correctivos para conservarlas en buenas condiciones y alargar su periodo de vida, obteniéndose menores costos de operación, menores impactos negativos en el medio ambiente y mayor rendimiento en la inversión que se hace en estos rubros.

Debe reconocerse que los mismos “enemigos” del ingeniero de carreteras han cambiado en México con los años. Si antaño era el agua y sus efectos más directos la causa de los más evidentes destrozos, hoy son otros los elementos nocivos más activos. En los pavimentos actuales, la acción de las cargas repetidas es la más notable causa de deterioro; como se dijo estas cargas han aumentado mucho, tanto en magnitud como en número de repeticiones, lo que induce la posibilidad de fallas por fatiga y por el efecto de la deformación acumulativa (Alfonso Rico Rodríguez, 1998).

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua de cargas vehiculares y de las condiciones meteorológicas. Tomando en cuenta estos dos factores, junto al envejecimiento natural de los materiales, hacen que el pavimento sufra un proceso de deterioro. Este envejecimiento y deterioro provocan que el pavimento tenga una disminución paulatina de sus niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores se hace necesaria una operación de conservación. La conservación de la red carretera es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que en ella se movilizan (Rangel, 2019).

El 70 por ciento de la red carretera en Michoacán se mantiene dañado, reconoció el presidente de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) en el estado, Antonio Tinoco Zamudio, quien expuso que se requiere una inversión de alrededor de 11 mil millones de pesos para atender esta situación (Franco, 2021).

Puntualizó que de manera anual se debe atender la red carretera para su conservación en buenas condiciones por el tráfico normal al que se someten los asfaltos y por los estragos naturales, como lo es la lluvia. Dijo que es evidente el deterioro que se tiene en las carreteras del estado, y señaló que las administraciones deberían considerarlo como una inversión fija, porque al no darse el mantenimiento adecuado en el tiempo oportuno, los arreglos suelen requerir más tiempo y más recursos.

Son alrededor de 5 mil kilómetros los que abarca la red carretera estatal, 3 mil de éstos son competencia del estado y mil 800 están bajo la responsabilidad de gobiernos municipales (Franco, 2021).

2.2.2.- Pavimento flexible (Carreteras asfaltadas)

Un pavimento flexible es una de las capas que conforman una carretera, es la capa superior por donde transitan los vehículos diariamente.

Un pavimento flexible, si bien, es una mezcla asfáltica, la cual se conforma por agregados pétreos de granulometrías variadas y un material ligante, en este caso, asfalto.

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo.



Ilustración 29.- DESCRIPCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasifican como sigue:

- **Mezclas asfálticas en caliente.**

Estas mezclas se elaboran generalmente en plantas mezcladoras estacionarias, son las que tienen mayor temperatura durante el proceso de elaboración alcanzando los **145°C** o más, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos.

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor mayor o igual que 4 centímetros, las carpetas de granulometría densa tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento (Olvera, Control de calidad de las mezclas asfálticas calientes y templadas, 2013).

- **Mezclas asfálticas en tibio.**

La mezcla asfáltica templada, está constituida de agregados pétreos de ¾" a finos, con AC-20 y aditivo, su temperatura de producción va de un rango de **120 ° C a 125 ° C**, estando por debajo de las convencionalmente empleadas, lo cual la hace potencialmente más ecoeficiente (Olvera, Control de calidad de las mezclas asfálticas calientes y templadas, 2013).

- **Mezclas asfálticas en frío.**

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas y materiales pétreos.

Las mezclas asfálticas en **caliente** son las más utilizadas en la actualidad.

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor mayor o igual que 4 centímetros, las carpetas de granulometría densa tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. (Olvera, Control de Calidad en las Mezclas Asfálticas Calientes y Templadas, 2013)

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

– **Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa**

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete punto cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve punto cinco (9,5) milímetros (¾ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes. (IMT, 2016).

Tabla 1.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (N-CMT-4-04-17)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo [1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (¾)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	¾ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	Nº4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	Nº10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	Nº20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	Nº40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	Nº60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	Nº100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	Nº200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

– **Mezcla asfáltica de granulometría abierta**

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre doce punto cinco (12,5) milímetros (½ in) y seis punto tres (6,3) milímetros (¼ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula E. de la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuplano, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no se colocarán en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año (IMT, 2016).

Tabla 2.- Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Abierta (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)
		12,5 (½)
Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa (en masa)
19	¾ in	100
12,5	½ in	65 – 100
9,5	⅜ in	48 – 72
6,3	¼ in	30 – 52
4,75	Nº4	18 – 38
2	Nº10	15 - 33
0,85	Nº20	12 – 28
0,15	Nº100	5 - 19
0,075	Nº200	2 – 4

– Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve punto cero (19,0) milímetros (¾ in) y nueve punto cinco (9,5) milímetros (⅜ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula F. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuplano; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura (IMT, 2016).

Tabla 3.- Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Discontinua, tipo SMA (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)		
		6,3 (¼)	9,5 (⅜)	12,5 (½)
Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa (en masa)		
19	¾ in	---	---	100
12,5	½ in	---	100	90 - 100
9,5	⅜ in	100	70 - 95	50 - 80
6,3	¼ in	56 - 66	43 - 68	29 - 50
4,75	Nº4	30 - 45	30 - 50	20 - 35
2	Nº10	19 - 26	19 - 29	15 - 23

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)		
		6,3 (¼)	9,5 (⅜)	12,5 (½)
Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa (en masa)		
0,85	N°20	16 - 22	15 - 22	13 - 20
0,075	N°200	9 - 12	8 - 12	8 - 11

2.2.3.- Deterioros en los Pavimentos Flexibles

Los defectos que presenta un pavimento y que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de esa estructura, frecuentemente corresponden a defectos constructivos y difícilmente pueden clasificarse como deterioros (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Los deterioros de pavimentos incluidos se consideran los más relevantes. Se han agrupado en tres grandes categorías; los de superficie, los de estructura y los que encuentran su origen en la construcción.

Los deterioros dentro de las tres grandes categorías se agrupan a su vez en las subcategorías de:

- Desprendimientos
- Alisamientos
- Exposición de agregados
- Deformaciones
- Agrietamientos

2.2.4.- Deterioros de la Superficie

Desprendimientos:

a) Pérdida de agregados (calaveras o surcos)

– De tratamientos superficiales:

Pérdida parcial del agregado dejando expuestas áreas aisladas de la capa de apoyo.

– De capas asfálticas:

Pérdida en la superficie de los agregados de capas asfálticas con espesor mayor que 5 cm.



Ilustración 30.- Desprendimiento de agregados (calaveras o surcos) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Esparcido irregular del ligante (asfalto)
- Ligante inadecuado.
- Agregado pétreo (árido) inadecuado por falta de adherencia (afinidad) en el ligante (asfalto).
- Agregado sucio, con polvo adherido.
- Lluvia durante el esparcido o antes del fraguado del ligante (asfalto).

b) Pérdida de capa de rodadura (peladuras)

Desprendimiento de la última capa delgada, de tratamientos superficiales, tales como:

- Lechadas (Slurry Seal).
- Microcarpetas (1 a 2 cm de espesor).
- Capas de rodadura (carpetas) de 2 a 3 cm.
- Sobrecapas o sobrecarpetas delgadas de 3 a 5 cm.



Ilustración 31.- Pérdida de capa de rodadura (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Limpieza insuficiente previas al tratamiento superficial.
- Esparcido heterogéneo del ligante (asfalto).
- Ligante inadecuado.
- Dosificación árido (pétreo) – ligante (asfalto) inadecuada
- Colocación con lluvia o exceso de agua en la capa de apoyo, que produce delaminación.

- Compactación deficiente (si procede).
- Fraguado incompleto después de apertura al tránsito.
- Envejecimiento del ligante (asfalto).

c) Pérdida de base (calavera o bache superficial)

Desprendimiento del material de la base en la que se apoya la capa de rodadura (carpeta) después de la pérdida de ésta; generalmente en bases no tratadas (hidráulicas).



Ilustración 32.- Pérdida de base (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Insuficiente penetración (< 0.5 cm) del riego de imprimación en bases hidráulicas.
- Dosificación insuficiente de ligante (asfalto) en bases tratadas con cemento asfáltico, aplicado en caliente, diluido o emulsificado.
- Ligante (asfalto) inadecuado o de mala calidad.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura (carpeta)

Alisamientos:

a) Exudación de asfalto (llorado)

Presencia de asfalto sin agregado (árido) en la superficie.



Ilustración 33.- Exudación de asfalto (llorado) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Exceso de ligante (asfalto) en la dosificación
- Uso de ligante (asfalto) muy blando
- Derrame de solventes

b) Desgaste de áridos (agregados)

Presencia de agregados (áridos) que presentan una cara plana en la superficie, generalmente embebidos en el ligante (asfalto).

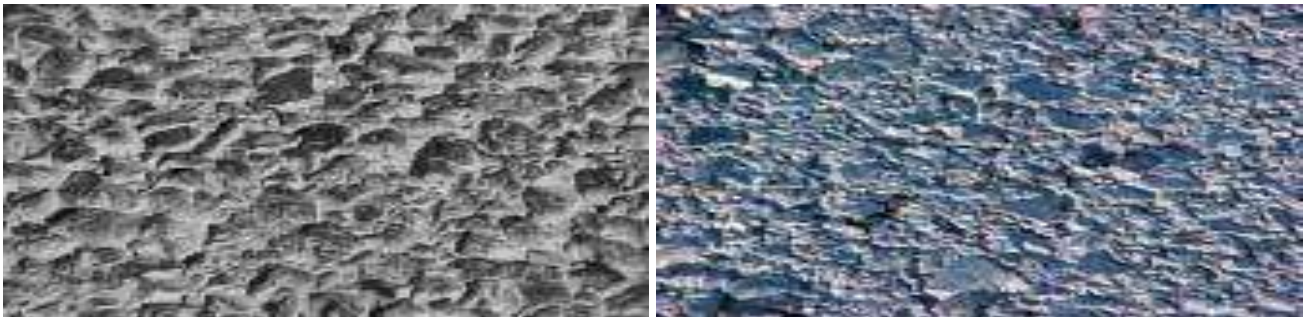


Ilustración 34.- Desgaste de áridos (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Uso de áridos (agregado) suaves (p. ej. calizas) susceptibles al pulimiento.

Exposición de agregados:

Presencia de agregados parcialmente expuestos fuera del morteroligante (asfalto) – arena.



Ilustración 35.- Exposición de agregados (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Uso de agregados (áridos) con tamaño inadecuado y distribución granulométrica deficiente en el rango de las arenas.
- Circulación de llantas con clavos.
- Segregación de los agregados (áridos) durante su manejo en obra.

2.2.5.- Deterioros de la Estructura

Deformaciones:

a) Roderas

Deformación del perfil transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, con la aparición de cordones laterales a cada lado de la rodera.



Ilustración 36.- Roderas (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Uso de ligantes (asfalto) blandos.
- Dosificación del ligante (asfalto) en exceso.
- Uso de áridos (agregados) redondeados.
- Compactación o calidad deficiente de la base.

b) Canalizaciones (blandones)

Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Las deformaciones presentan una configuración más amplia que las roderas.



Ilustración 37.- Canalizaciones (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Capacidad estructural del pavimento insuficiente.

c) Baches profundos

Hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada y generalmente pérdida parcial de bloques de la capa de rodadura (carpeta).



Ilustración 38.- Baches profundos (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Estructura inadecuada.
- Defecto constructivo aislado.
- Subdrenaje inadecuado.

d) Ondulaciones

Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados a distancias cortas. Generalmente están acompañadas, en los sitios críticos, por grietas semicirculares.



Ilustración 39.- Ondulaciones (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Circulación lenta en pendientes pronunciadas.
- Frenado de vehículos pesados en intersecciones.
- Dosificación de ligante (asfalto) inadecuado.
- Áridos (agregados) redondeados.
- Ligantes (asfalto) blandos.

Agrietamientos:

a) Grietas longitudinales

Rotura longitudinal sensiblemente paralela al eje de la carretera, conabertura mayor de 3 mm.



Ilustración 40.- Agrietamiento longitudinal (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Juntas longitudinales de construcción inadecuadamente trabajadas.
- Gradiente térmico superior a los 30° C.
- Uso de ligantes (asfaltos) muy duros
- Ligantes (asfaltos) envejecidos.

b) Grietas transversales

Rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm.



Ilustración 41.- Grietas transversales (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Juntas transversales de construcción inadecuadamente trabajadas.
- Gradiente térmico superior a 30° C.
- Uso de ligantes (asfaltos) muy duros.
- Reflejo de grietas en bases rígidas (losas de hormigón o bases estabilizadas).

c) Fisuras solas o en retícula (malla)

Rotura longitudinal o transversal, con abertura menor que 3 mm, y separación mayor que 15 cm.



Ilustración 42.- Fisuras solas o en retícula (malla) (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Uso de ligantes (asfaltos) muy duros.

- Reflejo de fisuras en bases estabilizadas.

d) Piel de cocodrilo (malla cerrada)

Roturas longitudinales y transversales, con separación menor que 15cm, y con abertura creciente según avanza el deterioro. Generalmente presenta hundimiento del área afectada.



Ilustración 43.- Piel de cocodrilo (CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS, 2002)

Causas Comunes:

- Incompatibilidad de deflexiones con el espesor de la capa de rodadura (carpeta).
- Subdrenaje inadecuado en sitios aislados.
- Uso de ligantes (asfaltos) muy duros.

2.2.6.- Deterioros por defectos constructivos

Deterioros que se producen por defectos en la construcción de instalaciones bajo los pavimentos. Siguen un patrón bien definido en concordancia con la instalación. Se muestran como hundimientos localizados, grietas longitudinales o transversales, etc.

Causas Comunes:

- Inadecuado relleno de zanjas abiertas para colocar instalaciones o equipamientos.
- Inadecuada estructura del pavimento sobre relleno de zanjas.
- Materiales inadecuados en el relleno de zanja y en el pavimento sobre él.

3.- ESTADO DEL ARTE

(Zohreh Dehghan, 2017) evaluó el efecto de las fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas sobre las propiedades de fatiga de la mezcla asfáltica en caliente. Sobre la base del análisis microestructural, se tuvo en cuenta el contenido de fibra como igual a 0.0 (es decir, mezcla de referencia), y las varianzas fueron 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% en masa de betún. A modo de comparación, se utilizó PET en migajas con un tamaño de partícula de 0.425-1.180 mm en una proporción de 1 y 2% en masa de betún. Los ensayos de fatiga se realizaron a 20 ° C y niveles de deformación inicial de 300, 500 y 700 microdeformaciones utilizando una máquina de ensayo universal (UTM-14). Con base en los resultados obtenidos, la rigidez a la flexión de las mezclas que contienen ambos aditivos fue menor que la mezcla de referencia. La reducción de la rigidez a la flexión continuó a medida que aumentaba el contenido de PET en fibra y en migajas. La vida a la fatiga de las mezclas reforzadas con fibras fue mayor que la de referencia en la cepa inicial de 300 microesfuerzos. Asimismo, los mayores incrementos en la vida de fatiga de las probetas modificadas con 1 y 2% de PET en migajas fueron 148 y 163% de la referencia, respectivamente. Con base en los resultados obtenidos y los análisis realizados, los contenidos óptimos de fibra y PET en migajas fueron de 1 y 2% en masa de betún, respectivamente.

(Alireza Ameli, 2020) El estudio evaluó la influencia de los agentes anti-decapantes (ASA), el caucho de neumáticos de suelo (GTR) y el tereftalato de polietileno de desecho (PET) en el comportamiento de rendimiento de las mezclas de aglutinante y asfalto de matriz de piedra (SMA). Los resultados indicaron que la utilización de ASA, PET y caucho granulado (CR) mejora el módulo resiliente (M_r), la resistencia a la tracción indirecta (ITS), la resistencia a la formación de surcos, la vida a la fatiga y la energía de fractura (FE) de las mezclas asfálticas. Además, con base en los resultados, la modificación del aglutinante por PET / CR con una proporción de 50% / 50% y ASA (B) tienen la mayor vida a fatiga, lo que indica que esta mezcla tiene la mayor resistencia contra el agrietamiento por fatiga.

(Aliyu Usman, 2020) Este documento presenta las características volumétricas y de estabilidad Marshall de la mezcla de asfalto reforzado con fibra de polietileno tereftalato de desecho irradiado utilizando el análisis de varianza. La exposición de los polímeros a la radiación gamma potencia sus propiedades mecánicas y térmicas, lo que tiene un impacto directo en la mejora de su resistencia. Las influencias del contenido de fibras y aglutinantes irradiados sobre las propiedades volumétricas y de resistencia se han identificado mediante métodos de superficie de respuesta (RSM). El RSM se utilizó para determinar el contenido optimizado de fibra irradiada y aglutinante mediante un diseño compuesto central (CCD). Los resultados indican que las interacciones entre las dos variables independientes son influyentes. Los altos valores del coeficiente de determinación (R^2) muestran una buena concordancia entre los valores reales y pronosticados. La optimización numérica aclara que los contenidos óptimos de fibra irradiada y aglutinante fueron 0,53% y 5,25% respectivamente. Se observó que los errores porcentuales absolutos entre los valores reales y previstos eran inferiores al 7% para todas las respuestas.

(Moreno-Anselmi, 2014) Este artículo tuvo la finalidad de entender el comportamiento físico-mecánico del cemento asfáltico modificado con polímeros y cueros, así como caracterizar el material modificado en términos de sus propiedades químicas. En concreto, se toma como material de investigación las botas de combate desechadas por los militares en Colombia, y se procede a la elaboración de muestras con diferentes combinaciones de porcentajes de cada uno de los polímeros y cueros para la modificación del cemento asfáltico. Se realiza también la caracterización de este material y sus propiedades físicas de rigidez, fluidez y estabilidad, de lo cual se obtiene el porcentaje de mejor comportamiento. Luego de múltiples pruebas, los resultados obtenidos muestran mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla

asfáltica modificada y deja la puerta abierta para un aprovechamiento adecuado de residuos contaminantes que contribuyan a reducir el impacto ambiental.

4.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los últimos meses hemos visto una serie de noticias, documentales, fotografías e información en las que se ha puesto al descubierto la cantidad de residuos plásticos que se encuentran en los mares, playas, campos, ciudades y tiraderos de basura; generando con ello diferentes reacciones en todo el mundo.

El problema de los plásticos ha servido de inspiración para diferentes campañas publicitarias que se realizan en todo el mundo con el interés de disminuir el impacto ambiental de estos materiales, no obstante, con todo esto, se ha llegado a “satanizar” al plástico en general, pero, hay que recordar que cuando se descubrió éste, la humanidad encontró la “solución” a diferentes problemas ambientales con los cuales se enfrentaba en esos momentos como por ejemplo, la tala desmedida de árboles para producir papel y cartón para bolsas, empaques, platos y popotes entre otros, este nuevo material (plástico) tenía diferentes propiedades que lo hicieron realmente atractivo y competitivo con los materiales que en esos momentos se utilizaban, no solamente con el papel; al ser ligero y resistente, podía sustituir a los metales, la madera e incluso al vidrio en diferentes aplicaciones y productos (Ortiz, 2021).

El plástico es un material con propiedades mecánicas importantes entre las que destacan su flexibilidad, resistencia y dureza, son ligeros, económicos y la mayoría de ellos pueden llegar a ser reciclados. En la actualidad la industria del plástico ha tenido tanto auge que prácticamente es imposible pensar en la vida común sin este material.

En realidad, el problema no es el material como tal, sino el abuso que se ha tenido de éste, sobre todo con los materiales de empaque y desechables, además de la mala gestión y disposición de los residuos y el largo tiempo que tardan estos en degradarse, esa mentalidad de “compro-uso-tiro” al cabo tengo con qué pagar (Ortiz, 2021).

En México, al mes, se recuperan más de 35,000 toneladas de envases de PET, prácticamente 6 de cada 10 botellas lanzadas al mercado. En un año, se reciclan 420,000 toneladas de PET equivalentes 16,800 millones de botellas (ECOCE, 2020).

Hoy, la separación de residuos y el reciclaje han demostrado ser esenciales en nuestro día a día y un camino fundamental para el cuidado de nuestro entorno, diseñar y fabricar nuevos productos.

Uno de los temas en los cuales se está enfocando el reciclaje y reutilización de productos de desecho es las carreteras, y es que, por las propiedades del plástico, es un buen material que enlaza con los materiales de las vialidades para crear carreteras con mejoras significativas.

En la actualidad podemos observar vialidades con numerosas fallas, las cuales pueden ser por causa de la calidad del asfalto y otras por las exigencias de los vehículos al transitar por ellas, las vialidades fueron diseñadas hace aproximadamente 15 o 20 años y la mayoría de ellas no ha sido cambiada o rediseñada, solo se le hacen trabajos preventivos, lo cual propicia el fallo de las mezclas asfálticas y la aparición de los daños, además la calidad de los asfaltos en la actualidad es deficiente.

El alto costo de los combustibles hace que estos subproductos de la refinación del crudo sean los más apetecidos por dicha industria, esto incide directamente en que los procesos de refinación sean cada vez más eficientes, haciendo que la calidad de los asfaltos sea cada vez más deficiente (Rafael Ernesto Villegas-Villegas, 2012), al elaborar mezclas con este asfalto obtenemos carreteras con calidad deficiente y esto propicia a las fallas prematuras.

5.- JUSTIFICACIÓN

A partir de la introducción de los productos plásticos desechables (en el año de 1988), la sociedad está cambiando sus hábitos de consumo y convirtiéndolo en una parte importante de su estilo de vida. El resultado de este cambio de comportamiento es la renuncia paulatina a la responsabilidad de la disposición final de los residuos generados por estos productos. Como resultado, la sociedad mexicana se ha vuelto dependiente del consumo de plásticos, lo que ha llevado a una reducción en la capacidad de gestionar adecuadamente y utilizar racionalmente los residuos plásticos. Se estima que en nuestro país únicamente el 9.2% de los plásticos desechados se recolectan para reciclaje y el 15.8% para el caso del PET. No obstante, esta cantidad recolectada no necesariamente refleja el porcentaje real de residuos plásticos reciclados (David Fernando Huera Colosia, 2020).

Aunque en la actualidad, es tendencia el reciclaje, y cada vez más se está teniendo la conciencia de reciclar la mayor cantidad de productos, la verdad es que solo una pequeña parte de toda la producción de plásticos es la que se recicla.

En la actualidad se están generando numerosas investigaciones en las cuales el tema principal es el reciclaje de productos, incluido el plástico, el plástico es uno de los temas con más auge en cuanto reciclaje se trata, una de las opciones de reciclar o reutilizar los plásticos es en forma de adición en las mezclas asfálticas, y es que, los plásticos poseen características que las mezclas asfálticas no contienen.

Como podemos observar, las vialidades se encuentran muy deterioradas, incluso intransitables en algunos de los casos, y es que, son diversos factores los que influyen para que las mezclas asfálticas fallen o comiencen a presentar deterioros.

Unos de los principales problemas para que las mezclas fallen a edades tempranas es la mala calidad de los productos asfálticos (asfalto, emulsiones, etc.) y el alto aforo vehicular; son factores que han generado la afectación en las vialidades y, por ende, la continua afectación de los vehículos. Por lo cual se prevé la creación de una mezcla asfáltica capaz de soportar las cargas que los vehículos generan, logrando una mejora en las características mecánicas de la mezcla, contribuyendo ambientalmente al reducir, en parte, la contaminación que genera el desecho de productos PET.

6.- HIPÓTESIS

La incorporación de microfibras de PET reciclado en la mezcla asfáltica mejorará las propiedades mecánicas y aumentará la vida útil del pavimento, reutilizando residuos de desecho, lo cual disminuirá el impacto ambiental del PET en el medio ambiente.

7.- OBJETIVOS

7.1.- Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica modificada con adición de residuos (PET) que genere mejoras en su desempeño, logrando reducir en parte el impacto de los residuos plásticos en el medio ambiente, comprobando su factibilidad y generar el uso de residuos en la creación de nuevos materiales ecológicos.

7.2.- Objetivos Particulares

- Caracterizar en laboratorio mezclas testigo y adicionadas con PET reciclado, logrando un análisis comparativo en su desempeño.
- Diseñar una mezcla asfáltica adicionada con PET reciclado que cumpla con la normativa SCT vigente para que pueda aplicarse en vialidades.
- Otorgar una segunda vida a los residuos plásticos (PET) mediante su uso en mezclas asfálticas para, de esta manera, disminuir la presencia de estos en el medio ambiente y sus efectos contaminantes.
- Promover el uso de PET reciclado en las mezclas asfálticas mediante resultados viables para que su uso contribuya a disminuir la contaminación del plástico.
- Comprobar la factibilidad del uso de materiales reciclados en la fabricación de nuevos materiales para retirar su presencia del medio ambiente y apoyar en el reciclaje de residuos.
- Coadyuvar de manera positiva al envejecimiento del asfalto adicionando microfibras a la mezcla para prologar la vida útil de la esta.

8.2.- EXPERIMENTACIÓN

- **8.2.1.- Pruebas a los asfaltos**

De la muestra total de asfalto se tomó una pequeña porción para evaluar sus características y su calidad. Las pruebas se hicieron por duplicado para comparar resultados y evitar errores en los más posible.

- **Prueba Penetración**

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

Procedimiento:

Para la prueba de penetración en asfaltos se tomó una porción de la muestra, se calentó hasta que estuviera fluido, agitándolo para evitar los grumos y retirar el aire que pudiera contener, tratando de no sobrepasar los 130 °C, evitando el envejecimiento del asfalto.



Ilustración 44.- Agitado de asfalto

Una vez que el material está fluido lo vertimos en una capsula de 100 gr. Aproximadamente, se dejó enfriar por un lapso de 1 hora a temperatura ambiente, transcurrido ese tiempo se ingresó la muestra a baño María a 25 °C por 2 horas para homogenizar la temperatura en toda la muestra.



Ilustración 45.- llenado de capsulas y colocación en baño María

Pasado el tiempo se procedió a realizar la prueba, se hicieron 5 penetraciones por capsula y se registraron los valores.



Ilustración 46.- Llevado a cabo de prueba Penetración

Cálculos y Resultados

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro y con aproximación a la unidad, valor conocido también como **grado de penetración**. Las penetraciones utilizadas para el cálculo del promedio, deben estar dentro de las diferencias permisibles mostradas en la Tabla 1, de lo contrario la prueba se repite.

Tabla 4.- Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados

Unidades en 1×10^{-1} mm (Grados de penetración)

Valor de la penetración	Diferencias permisibles
0 - 49	2
50 - 149	4
150 - 249	6
250 o más	8

Penetraciones muestra 1

Muestra 1	
P1=	59
P2=	55
P3=	54
P4=	50
P5=	54

Penetraciones muestra 2

Muestra 2	
P1=	52
P2=	53
P3=	56
P4=	52
P5=	53

$$\text{Promedio 1} = \frac{59+55+54+50+54}{5} = 54.4 \times 10^{-1} \text{ mm}$$

$$\text{Promedio 2} = \frac{52+53+56+52+53}{5} = 53.2 \times 10^{-1} \text{ mm}$$

$$\text{Promedio General} = \frac{54.4+53.2}{2} = 53.8 \times 10^{-1} \text{ mm} \quad \text{Resultado de la prueba}$$

• Prueba Ductilidad

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos, del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas, puede ser estirada sin romperse.

Procedimiento

Para la prueba de ductilidad en asfaltos se tomó una porción de la muestra, se calentó hasta que estuviera fluido, agitándolo para evitar los grumos y retirar el aire que pudiera contener, tratando de no sobrepasar los 130 °C, evitando el envejecimiento del asfalto.



Ilustración 47.- Agitado de asfalto

Una vez que el material está fluido lo vertimos en las briquetas, previamente acondicionadas con esterato de zinc para evitar que el asfalto se adhiriera a las paredes de las briquetas, las dejamos enfriar y las metemos en baño María por 30 minutos.



Ilustración 48.- Llenado de briquetas y colocado en baño María

Transcurrido el tiempo se retiran del “baño María” para retirar el exceso de asfalto y retirar las costillas de las briquetas, después de esto, se regresan al “baño María” por 90 minutos más.



Ilustración 49.- Enrasado de capsulas

Transcurrido el tiempo se montan en el ductilómetro y se pone en marcha el mecanismo para realizar la prueba. La máquina trabaja a una velocidad de estiramiento de 5 cm por minuto. La prueba termina cuando se rompa el hilo de asfalto formado por estirar la muestra y se registran sus valores.



Ilustración 50.- Colocación y puesta en marcha de Ductilómetro

Cálculos y Resultados

Se reporta como resultado de la prueba la longitud que se desplazó la mordaza para lograr la ruptura de la briqueta, en centímetros con aproximación a la unidad.

Muestra 1	62.5 cm
Muestra 2	64.5 cm

$$\text{Promedio General} = \frac{62.5 + 64.5}{2} = 63.50 \text{ cm} \quad \text{Resultado de la prueba}$$

• Prueba Punto de Reblandecimiento

Esta prueba permite 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 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

Procedimiento:

Para la prueba de reblandecimiento en asfaltos se tomó una porción de la muestra, se calentó hasta que estuviera fluido, agitándolo para evitar los grumos y retirar el aire que pudiera contener, tratando de no sobrepasar los 130 °C de temperatura, evitando el envejecimiento del asfalto.



Ilustración 51.- Agitado de asfalto

Una vez fluido el material se vierte en los anillos y se deja enfriar a temperatura ambiente, una vez frías las muestras, se les retira el exceso para evitar errores en la prueba.



Ilustración 52.- Llenado de muestras y enrasado

Posteriormente se prepara el agua a 5°C, se introducen las guías, las muestras y los balines al agua por 15 minutos para preparar todos los elementos a la misma temperatura.



Ilustración 53.- Agua a 5 °C

Ponemos en marcha la prueba colocando el vaso de precipitado en el soporte universal y con el mechero de Bunsen comenzamos a aplicarle calor a una velocidad de calentamiento de 5 °C por minuto, registrando los valores de temperatura cada minuto después de los primeros 3 minutos.



Ilustración 54.- Realización de prueba

La prueba finaliza cuando los balines tocan el fondo de las guías, inmediatamente se registra la temperatura en que los dos balines tocaron el fondo.

Cálculos y Resultados

Se reporta como punto de reblandecimiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas con aproximación de 0.5°C, indicando el líquido utilizado para la prueba.

Muestra 1	47°C
Muestra 2	47°C

Resultado de la prueba: 47 °C

liquido utilizado: Agua potable.

- **8.2.2.-Secado del Agregado**

Una muestra del agregado a ser ensayado se colocó bajo el sol durante un día para ser secado. Después se tomó una muestra representativa, la muestra se pesó, y se registró su valor.

La muestra se calentó por segunda vez, se volvió a pesar y se registró su valor. Este procedimiento se repite hasta que la masa de la muestra permanezca constante. Se realizó dos veces este procedimiento.

- **8.2.3.- Análisis Granulométrico**

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, se calcula su porcentaje respecto al total y se define la masa que pasa.

Tabla 5.- Juegos de mallas para granulometría

Designación	Abertura mm
2"	50
1½"	37,5
1¼"	31,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
Nº4	4,75
Nº10	2
Nº20	0,85
Nº40	0,425
Nº60	0,25
Nº100	0,15
Nº200	0,075

Procedimiento:

Es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado.

El análisis granulométrico consta de los siguientes pasos:

- Cada muestra de agregado es secada y pesada.



Ilustración 55.- Prueba de granulometría

- La masa seca de cada muestra es registrada. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan las masas registradas de las muestras antes y después del lavado.
- Se colocan las mallas en serie en orden ascendente, comenzando a cribar al material por la malla de menor abertura.



Ilustración 56.- Ejecución de prueba granulometría

- Una vez terminada de cribar la muestra, se pesa el material retenido en cada una de ellas y se registran sus valores para los cálculos posteriores.



Ilustración 57.- Muestra al finalizar prueba

Cálculos y Resultados

Se calculan y reportan los porcentajes respecto a la masa de la muestra original.

$$\%G_N = \left(\frac{W_N}{W_{MG}} \right) \times \%G$$

Donde:

$\%G_N$ = Por ciento de material retenido en la malla N respecto a la masa de la muestra original, (%)

W_N = Masa del material retenido en la malla N , (g)

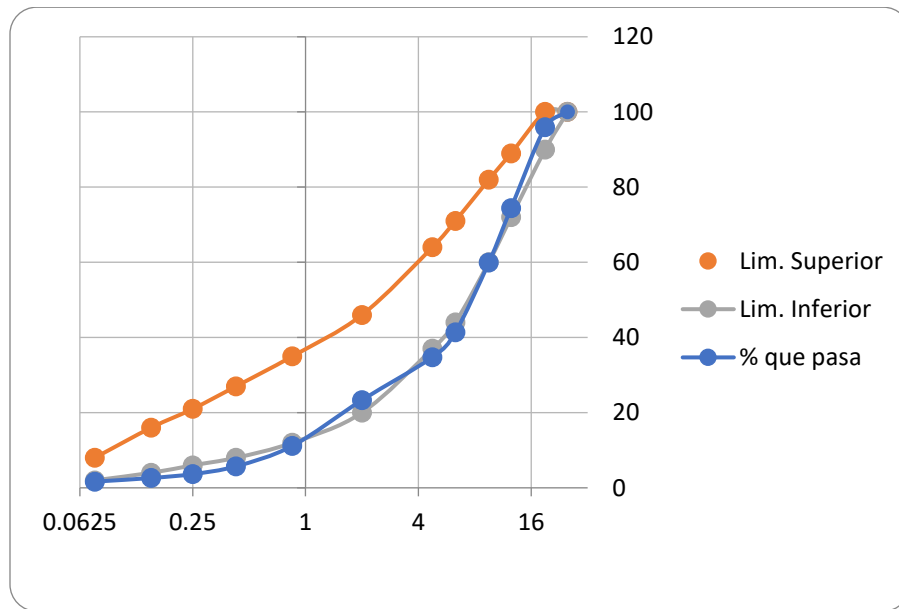
N = Malla utilizada, perteneciente al arreglo de mallas empleado para determinar la granulometría de la fracción.

W_{MG} y $\%G$ tienen el significado indicado en la Fracción anterior

Tabla 6.- Resultados Granulometría

Mallas	Retenido (gr)	% Retenido	%acumulado	% que pasa
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	510	9.79	9.79	90.21
1/2"	2688.5	51.63	61.42	38.58
3/8"	1686.6	32.39	93.81	6.19
1/4"	279.4	5.37	99.17	0.83
#4	19.8	0.38	99.55	0.45
#10	19.7	0.38	99.93	0.07
#20	0.5	0.01	99.94	0.06
#40	0.1	0.00	99.94	0.06
#60	0.1	0.00	99.94	0.06
#100	0.1	0.00	99.95	0.05
#200	0.1	0.00	99.95	0.05
pasa #200	2.7			0

Tabla 7.- Gráfica “% Que Pasa”



- 8.2.4.- Determinación de la Masa Específica y Absorción del agregado (Norma N.CMT.4.04/17)**

Estas pruebas permiten determinar las densidades relativas de los materiales pétreos, es decir, sus relaciones masa-volumen respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales pétreos, propiedades que se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por los materiales en la mezcla asfáltica; las densidades relativas se determinan mediante dos pruebas, una para la fracción del material pétreo retenida en la malla N°4 (4,75 mm) y otra para la que pasa dicha malla.

La masa específica de una muestra de agregado es determinada al comparar la masa de un volumen dado de agregado con la masa de un volumen igual de agua, a la misma temperatura.

Procedimiento: (Grava)

Se colocó una muestra de material en una charola y se dejó saturar por 24 h. Transcurrido el tiempo, se tomó una pequeña porción y se colocó dentro de un picnómetro lleno de agua hasta su marca, con ayuda de una probeta graduada se captó el agua desalojada y se registraron los valores para los cálculos posteriores.



Ilustración 58.- Pruebas Absorción y Densidad

Cálculos y Resultados

Densidad y Absorción en grava:

Datos Densidad:

Masa: 245.10 g

Volumen: 90 ml

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{245.1 \text{ g}}{90 \text{ ml}} = 2.69 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \text{ ó } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ Resultado de la prueba}$$

Datos Absorción:

Masa húmeda: 245.60 g

Masa seca: 238.10 g

$$\text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{245.6 - 238.1}{238.1} \times 100 = 2.90 \% \text{ Resultado de la prueba}$$

Densidad y Absorción en Sello:

Datos Densidad:

Masa: 250.10 g

Volumen: 94 ml

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{250.1 \text{ g}}{94 \text{ ml}} = 2.69 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \text{ ó } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ Resultado de la prueba}$$



Datos Absorción:

Masa húmeda: 200 g

Masa seca: 194.6 g

$$\text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{200 - 194.6}{194.6} \times 100 = 2.67 \% \text{ Resultado de la prueba}$$

Densidad y Absorción en Aena:

Datos Densidad:

As: 200 g

K: 955.20 g

Vf: 450 ml

F: 389.60 gr

$$\text{Densidad} = \frac{As}{Vf - (K - F - As)} = \frac{200}{450 - (955.2 - 389.6 - 200)} = 2.36 \text{ g/ml ó } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ Resultado de la prueba}$$

Datos Absorción:

Masa húmeda: 200 g

Masa seca: 189.30 g

$$\text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{200 - 189.3}{189.3} \times 100 = 5.35 \% \text{ Resultado de la prueba}$$

- **8.2.5.- Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas**

Objetivo de la prueba:

Con esta prueba se logra determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la



variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla N°12 (1,7 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.

Procedimiento:

La prueba consiste en separar una muestra de grava por medio de la prueba granulometría, para dividir por tamaños y determinar el tipo de muestra que tenemos de acuerdo a la tabla, la cual nos dirá el número de esferas que se colocaran dentro del cilindro para proceder a iniciar la prueba.

Tabla 8.- COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Se procede a cribar la muestra de grava de igual manera que la prueba de granulometría, se comienza a cribar una pequeña porción de la muestra por la malla de menor tamaño hasta terminar en la malla de mayor abertura.



Ilustración 59.- Prueba Desgaste de los Ángeles



Una vez separada la muestra de grava por tamaños, observamos las proporciones que se tienen y entramos a la tabla para asignarle una clasificación a la muestra y poder proceder a la prueba.

En este caso se obtuvo una muestra tipo “B”, la cual nos indica que debemos colocar 11 esferas dentro del tambor giratorio junto con 2.5 kg de grava que pasa la malla $\frac{3}{4}$ ” y se retiene en $\frac{1}{2}$ ” y 2.5 kg de grava que pasa $\frac{1}{2}$ ” y se retiene en $\frac{3}{8}$ ”.

Una vez colocado el material dentro del tambor giratorio, se ajusta la tapa de manera que se asegure que no salga ningún material o polvo del tambor, se pone en marcha el mecanismo y se deja girar 500 revoluciones.

Una vez transcurridas las 500 revoluciones, se destapa con cuidado el tambor giratorio y se extrae la muestra junto con las esferas, tratando de extraer la mayor cantidad de muestra posible.

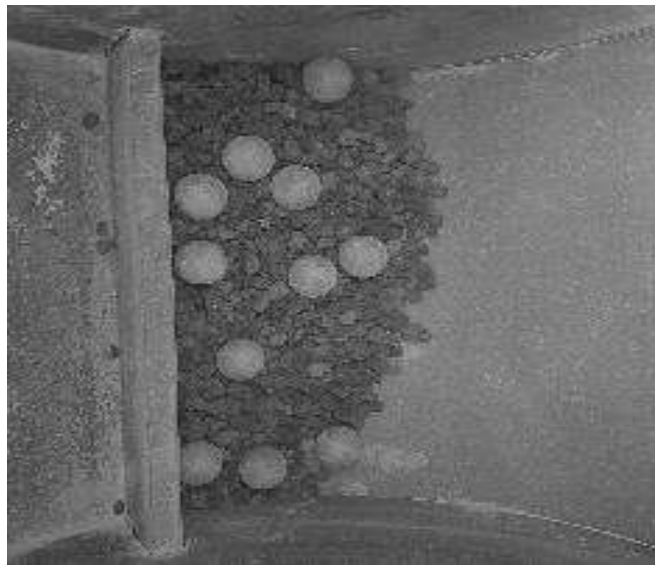


Ilustración 60.- Colocación de material pétreo

Una vez obtenido el material, se procede a cribarlo por la malla #12, para retirar todas las partículas y polvo que surgieron por medio del contacto entre las esferas y el material pétreo, una vez terminado este proceso, se lava el material retenido en la malla #12 para retirar el polvo que se haya quedado adherido a las partículas de grava, después se coloca la muestra en un horno a 110°C por un lapso de 2 horas para lograr el secado total y se pesa el material resultante para obtener el dato final y proceder a realizar los cálculos.

Cálculos y Resultados:

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, el desgaste por trituración, utilizando la siguiente expresión:



$$P = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

P_a = Desgaste por trituración Los Ángeles, (%)

P_i = Masa inicial de la muestra de prueba, (g)

P_f = Masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1,7 mm (malla N°12), (g)

Datos:

P_i = 5000 g

P_f = 3881 g

$$P = \frac{5000 - 3881}{5000} \times 100 = \mathbf{22.38\% \text{ Resultado de la prueba}}$$

- **8.2.6.- Determinación del porcentaje para integración de materiales**

La integración de los materiales utilizados en la elaboración de la muestra se obtuvo por medio de los métodos de diseño “Marshall” y “Bailey”.

El método Marshall involucra la granulometría de cada material pétreo para obtener la combinación de estos y cumplir con los parámetros de diseño conforme a una granulometría establecida para cada tamaño nominal de material grueso, donde al final se grafican unas curvas para mejor entendimiento de esta metodología.

El método Baileys es usado como complemento para la integración de los materiales en cualquier método de diseño ya que otorga la integración optima de los materiales y provee las mejores propiedades mecánicas de la mezcla, ayudándonos a lograr cumplir la mayoría de parámetros de una mezcla asfáltica.

Para la integración de los materiales nos basamos en los parámetros **FG**, **Ffa**, **Fff**, los cuales tienen un margen en sus valores para ayudarnos a obtener la mejor combinación de los materiales pétreos.

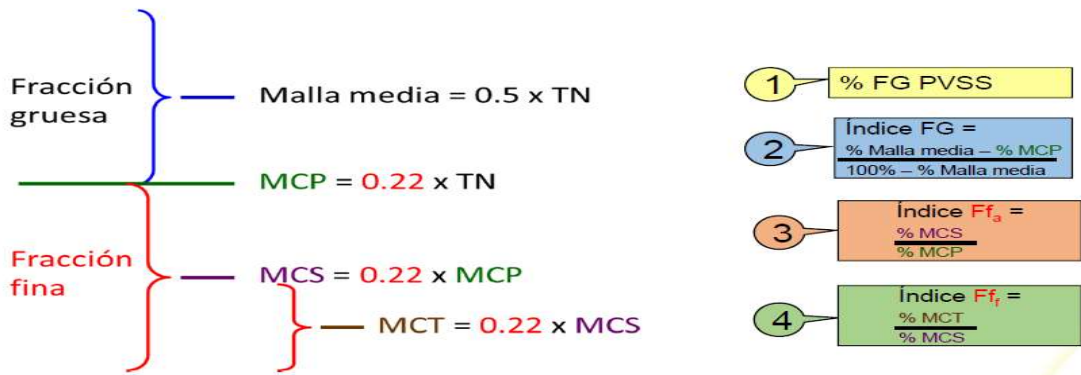


Ilustración 61.- Fórmulas Índices FG, Ffa, Fff (AMAAC)

El tamaño nominal utilizado para el diseño de la mezcla es $\frac{3}{4}$ ", de acuerdo al método de diseño Marshall, los valores del parámetro de granulometría para este tamaño nominal es el siguiente.

Tabla 9.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (³ / ₈)	12,5 (¹ / ₂)	19 (³ / ₄)	25 (1)	37,5 (1 ¹ / ₂)
		Porcentaje que pasa (en masa)				
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	⅜ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	Nº4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	Nº10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	Nº20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	Nº40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	Nº60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	Nº100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	Nº200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

Una vez que definimos los valores límites para nuestra granulometría, pasamos a elegir los porcentajes a utilizar de cada material para hacer la combinación de los materiales y nuestra mezcla obtenga los resultados que cumplan con los parámetros.

Aquí es donde entra el método Baileys, por medio del cual se obtienen los mejores resultados o los más acercados a los valores adecuados.



Diseño de Mezclas Base Asfalto con Adiciones Provenientes de Residuos para Incrementar la Resistencia a la Fatiga



Tabla 10.- Porcentajes de materiales a utilizar en mezcla asfáltica

MATERIAL 1 (Grava)	MATERIAL 2 (sello)	MATERIAL 3 (Arena)
41.6	25.7	32.7

Agregando estos porcentajes y haciendo los cálculos correspondientes, obtenemos la granulometría adecuada para poder proceder a realizar la mezcla asfáltica, antes de realizar la mezcla asfáltica se verifican los valores de los índices que nos rigen en el método de diseño Baileys.

Tabla 11.- Granulometría de Diseño

MALL A	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	# 4	# 10	# 20	# 40	# 60	# 100	# 200
GRAV A	100.00	90.21	38.58	6.19	0.83	0.45	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SELLO	100.00	100.00	100.00	95.91	32.48	8.30	0.88	0.77	0.72	0.70	0.69	0.61
AREN A	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.19	70.62	33.52	16.92	10.66	7.46	4.59
41.6	41.60	37.53	16.05	2.58	0.34	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.7	25.70	25.70	25.70	24.65	8.35	2.13	0.23	0.20	0.19	0.18	0.18	0.16
32.7	32.70	32.70	32.70	32.70	32.70	32.44	23.09	10.96	5.53	3.48	2.44	1.50
	100.00	95.93	74.45	59.93	41.39	34.76	23.35	11.16	5.72	3.66	2.62	1.66

Tabla 12.- Propuesta de integración de materiales

Tamaño Nominal	Abertura en mm.	Malla	Mezcla Propuesta
19	25	1"	100.00
	19	3/4"	95.93
	12.5	1/2"	74.45
	9.5	3/8"	59.93
	6.3	1/4"	41.39
	4.75	No. 4	34.76
	2	No. 10	23.35
	0.85	No. 20	11.16
	0.425	No. 40	5.72
	0.25	No. 60	3.66
	0.15	No. 100	2.62
	0.075	No. 200	1.66

Una vez realizados los cálculos de la granulometría y verificado que la mayoría cumplan y/o



estén muy cerca de los límites, se procede a verificar los valores de los índices para comprobar si nuestra combinación nos ayudará a cumplir con los parámetros de una mezcla asfáltica densa.

Tabla 13.- Índices Método Baileys

Índice FG	Índice Ffa	Índice Fff
1.294	0.270	0.328

		selección malla	abertura en mm	%
mallla media	9.5	1/2"	12.5	74.45
MCP	4.18	1/4"	6.3	41.39
MCS	0.92	#20	0.85	11.16
MCT	0.20	# 60	0.25	3.66

Una vez que tenemos los valores de los índices y corroboramos que están dentro de los límites cercanos, procedemos a graficar las curvas de granulometría para un tamaño nominal ¾" para una granulometría densa que nos marca la SCT por medio del IMT, para poder observar el comportamiento de nuestra granulometría por medio de unas curvas que cumplen con los límites marcados en la norma **N° CMT-4-04/17**.

Tabla 14.- Valores de Límites y granulometría de trabajo

TAMAÑO MALLA	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	#4	10	20	40	60	100	200
ABERTURA EN mm.	25	19	12.5	9.5	6.3	4.75	2	0.85	0.425	0.25	0.15	0.075
% QUE PASA	100.00	95.93	74.45	59.93	41.39	34.76	23.35	11.16	5.72	3.66	2.62	1.66
LIM. SUPERIOR	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
LIM. INFERIOR	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2

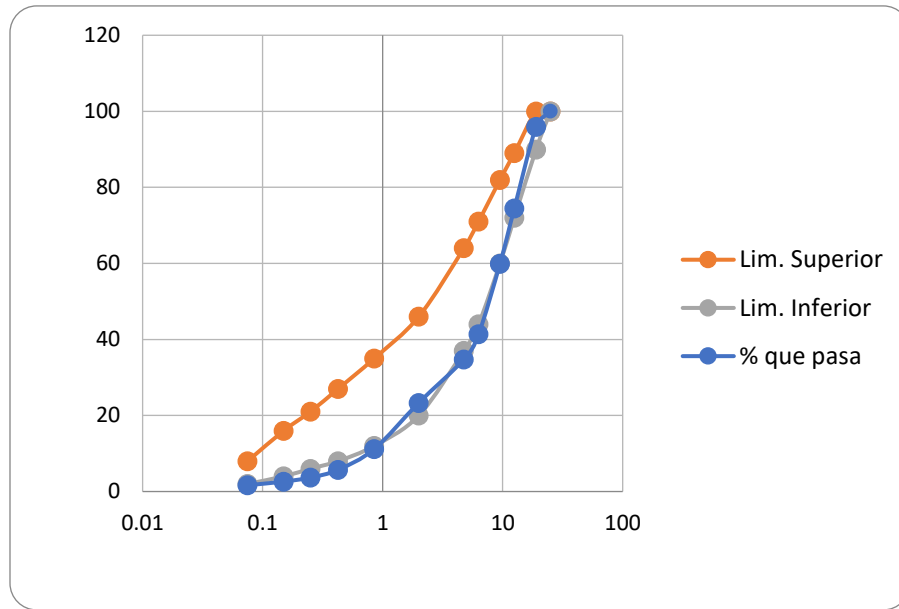


Ilustración 62.- Gráfica límites Mezcla Densa 3/4"

Como se puede apreciar en la gráfica, los valores de nuestra muestra están muy cercanos al límite inferior, incluso algunos están ligeramente debajo del límite inferior, pero muy cercano a este, de tal manera que se toma como adecuado el material desde el punto de vista de la granulometría.

• 8.2.7.- Preparación de las Muestras de Ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- Se determina la masa de los materiales por separado. Tomando en cuenta los porcentajes de cada material para poder obtener la mezcla diseñada, los cuales son, 41.6% de grava, 25.7 % de sello y 32.7 % de arena, tomando estos porcentajes se proporcionan de acuerdo a lo que corresponde para un total de 1150 gramos de material necesario para elaborar una pastilla.



Ilustración 63.- Determinación de materiales

- Se agrega la grava y el sello en una charola y se llevan a una fuente de calor para aplicarles calor hasta llegar a una temperatura mínima de 150 °C, en otra charola se agrega arena para llevarla a la misma temperatura.



Ilustración 64.- Aplicación de calor a materiales

- Se agrega la cantidad de asfalto correspondiente al % en cuestión.



Ilustración 65.- Mezclado

- Se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado grueso estén revestidas de asfalto.
- Una vez cubiertas las partículas de grava y sello por el asfalto, se agrega la arena y se mezcla hasta que todas las partículas estén revestidas.
- Una vez elaborada la mezcla, se deposita en un recipiente apto para temperaturas altas y se lleva al horno por 4 horas a una temperatura de 150 °C, para el fraguado de la mezcla.



Ilustración 66.- Fraguado de mezcla



- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes precalentados Marshall para proceder a la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación.



Ilustración 67.- Compactación de pastillas

- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes fue de 75 en ambas caras de cada briqueta. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.



Ilustración 68.- Enfriado de pastillas



- **8.2.8.- Ensayos de Estabilidad y Fluencia**

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60 ° C (140 ° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.



Ilustración 69.- Homogenización de temperatura en baño María

- La probeta es removida del baño, secada superficialmente, y colocada rápidamente en la prensa Marshall.



Ilustración 70.- Ejecución de pruebas Marshall



- **8.2.9.- Análisis de Vacíos, Masa Unitaria, VMA, VFA**

Para determinar los parámetros de vacíos y masa unitaria se realizaron determinaciones de masas, las cuales fueron, masa en aire, masa sumergida, masa superficialmente seca, con estos datos logramos obtener los valores de % de vacíos, % de vacíos en el agregado mineral, % de vacíos ocupados por el asfalto y la masa unitaria, con ayuda de las fórmulas correspondientes.



Ilustración 71.- Determinación de parámetros



9.- RESULTADOS

9.1.- Materiales Pétreos

Después de realizar las pruebas a los materiales pétreos, se procede a comparar los valores obtenidos con los que nos marca la norma **N.CMT.4.04/17**, en donde encontramos los valores de los parámetros de cada una de las pruebas que realizamos para determinar si el material pétreo que tenemos es viable para su aplicación en mezclas asfálticas.

Tabla 15.- Comparación de Resultados con Norma "Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < \text{Suma } L \leq 30 \times 10^6$

RESULTADOS MATERIAL PÉTREO			
PRUEBA	RESULTADO OBTENIDO	PARÁMETRO NORMA	CUMPLE O NO CUMPLE
TAMAÑO MÁXIMO (mm)	19	19	CUMPLE
ABSORCIÓN (COMBINADA) (% máx.)	3.65	4	CUMPLE
DENSIDAD (COMBINADA) (mín.)	2.6	2.4	CUMPLE
DESGASTE DE LOS ÁNGELES (% pérdida máx.)	19.94	30	CUMPLE
EQUIVALENTE DE ARENA (% mín.)	89	55	CUMPLE

Como podemos observar en la tabla de comparación de resultados, los materiales son aptos para poder utilizarlos en la mezcla asfáltica, por lo que se procede a realizar las mezclas asfálticas con este material pétreo.

9.2.- Material asfáltico

Se le realizaron unas pruebas al asfalto para determinar su calidad, para poder dictaminar si es apto para usarse en el diseño de la mezcla, el asfalto analizado es un PG 64-22, o bien, AC-20, que es el asfalto más común para la zona de Morelia, Michoacán, los resultados se resumen en la siguiente tabla, en donde se hace una comparación de los resultados con respecto a los parámetros que nos rigen en la norma **N.CMT.4.05.001/06**.



Tabla 16.- Comparación de resultados obtenidos con Norma N.CMT.05.001/06

RESULTADOS MATERIAL ASFÁLTICO EN COMPARACIÓN CON NORMA N.CMT.05.001/06			
PRUEBA O ANÁLISIS	RESULTADO OBTENIDO	PARÁMETRO NORMA	CUMPLE O NO CUMPLE
PENETRACIÓN (Grados de penetración mín. a 25 °C)	53.8	54	CUMPLE
DUCTILIDAD (cm mín. a 25 °C.)	63.5	50	CUMPLE
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO (°C)	47	48 - 56	NO CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND (°C mín.)	232	232	CUMPLE

Como podemos observar en la tabla de comparación de resultados, el asfalto cumple en la mayoría de las pruebas realizadas para el tipo de asfalto que tenemos, recordemos que utilizamos un asfalto AC-20, por lo que se determina como apto para utilizarse en la elaboración de mezclas asfálticas.

9.3.- Resultados de las mezclas

Se realizaron 10 tipos diferentes de mezclas en donde se variaron los porcentajes de asfalto y de microfibra de PET reciclado, se realizó una mezcla testigo la cual se tomó como referencia para comparar resultados, se realizaron 5 pastillas por tipo de mezcla para tener una varianza menor en los resultados.

Tabla 17.- Resultados de pruebas a pastillas

ENSA YE	PROBE TA	MASA VOLUMÉTRIC A (ton/m3)	% VACÍ OS	% VACÍOS EN EL MATERIAL PÉTREO	% VACÍOS OCUPADOS POR EL ASFALTO	ESTABI LIDAD (Kgf)	FLUJ O (mm)
TESTI GO	5%	2.255	4.44	13.55	67.24	897.56	2.53
5%A, 1%F	5%	2.265	4.46	13.16	66.10	1012.16	2.66
5%A, 1.5%F	5%	2.258	4.45	13.42	66.86	1113.06	2.66
5%A, 2%F	5%	2.262	4.45	13.28	66.46	1088.06	2.33



Diseño de Mezclas Base Asfalto con Adiciones Provenientes de Residuos para Incrementar la Resistencia a la Fatiga



ENSA YE	PRO BET A	MASA VOLUMÉTRICA (ton/m3)	% VACÍ OS	% VACÍOS EN EL MATERIAL PÉTREO	% VACÍOS OCUPADOS POR EL ASFALTO	ESTABI LIDAD (Kgf)	FLUJ O (mm)
5.5% A,1%F	5.50 %	2.272	4.47	12.91	65.35	1016.62	3.25
5.5% A,1.5 %F	5.50 %	2.268	4.47	13.04	65.76	963.04	3.16
5.5% A,2%F	5.50 %	2.273	4.48	12.84	65.13	1257.72	3.52

6%A, 1%F	6%	2.244	4.42	13.95	68.32	1137.17	2.96
6%A, 1.5%F	6%	2.253	4.44	13.60	67.37	1244.33	3.13
6%A, 2%F	6%	2.252	4.43	13.66	67.55	1083.59	3.19

Tabla 18.- Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall
N.CMT.4.05.003/16

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

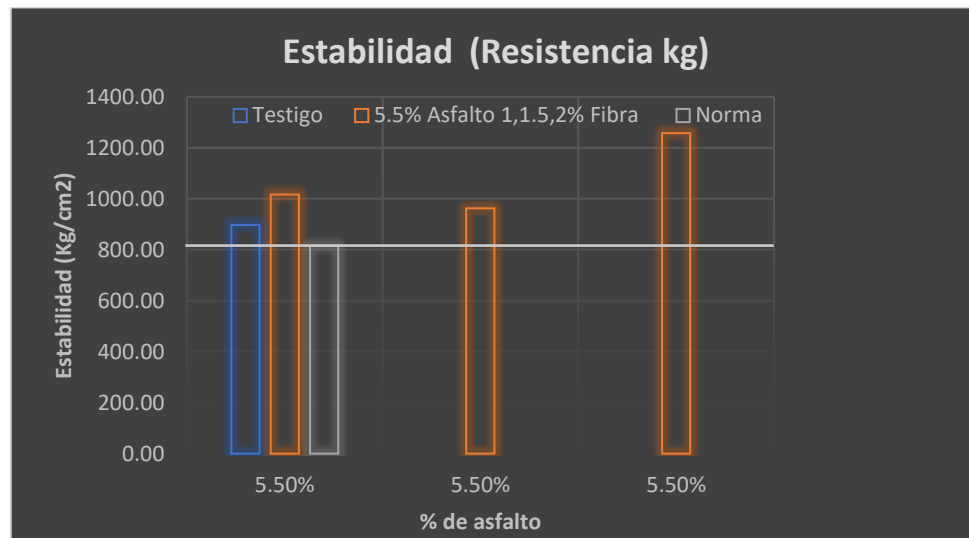
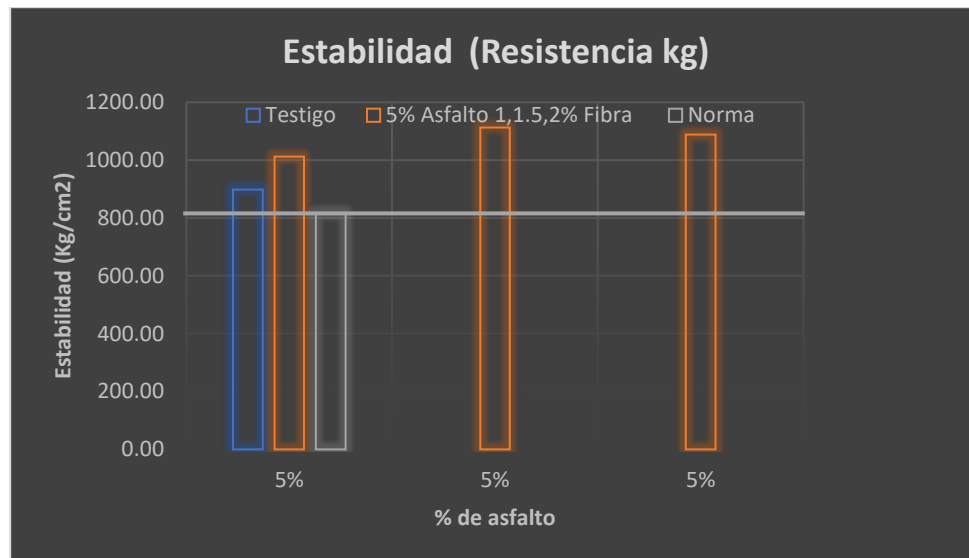
Como se puede observar, los valores obtenidos de las muestras realizadas, están por encima de los valores límite, respecto a **Estabilidad**, y dentro del rango respecto a los parámetros de la norma **N-CMT-4-05-003/16**, **Flujo**, **% Vacíos** y **% de Vacíos Ocupados por el Asfalto** a excepción de las pastillas elaboradas con 5.5% de asfalto y 2% de fibra.

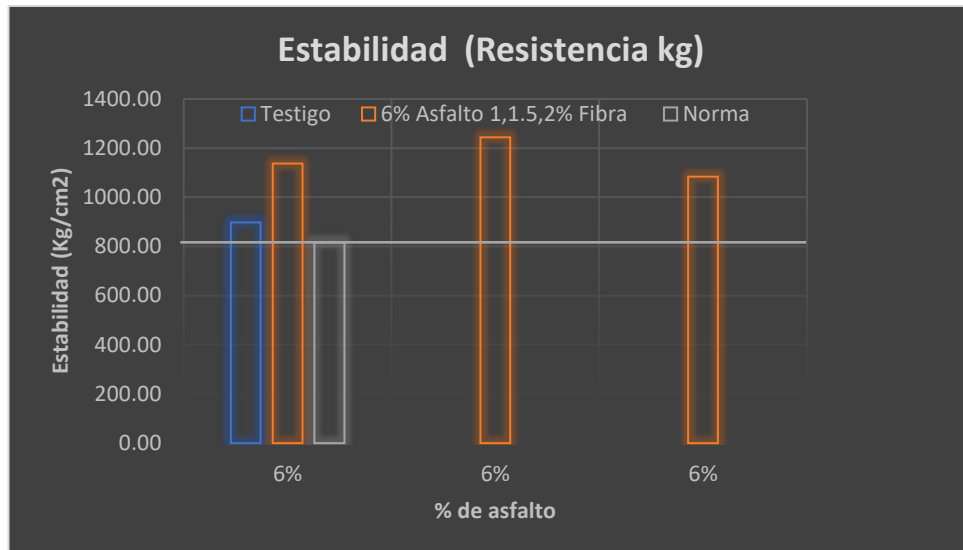
A continuación, se agregan las gráficas, estas nos ayudaran a interpretar de mejor manera los resultados obtenidos.

La gráfica muestra la comparación de los datos obtenidos de la mezcla testigo en comparación con las mezclas con adición 1,1.5,2% de fibra respectivamente.



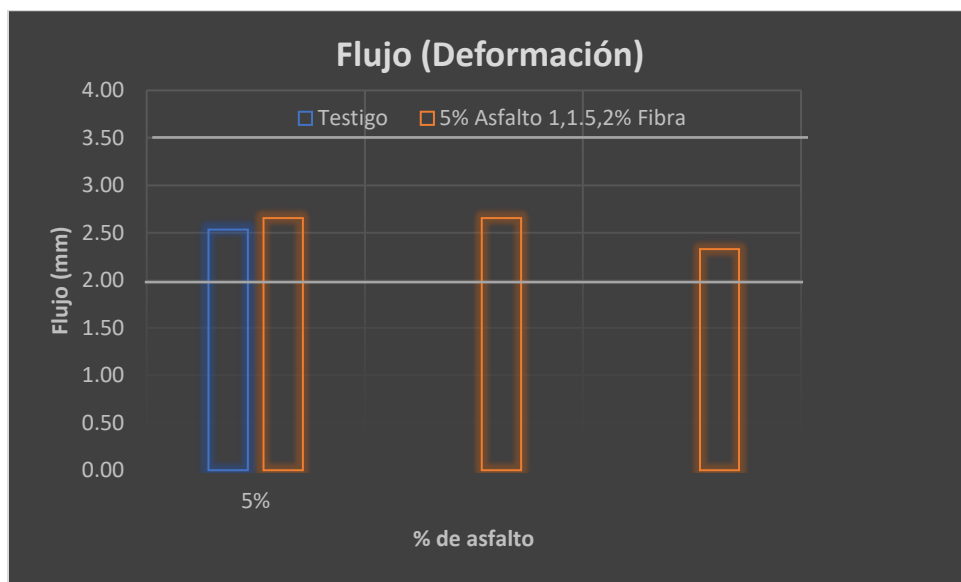
Tabla 19.- Gráfica Estabilidad Marshall (Resistencia en Kgf)

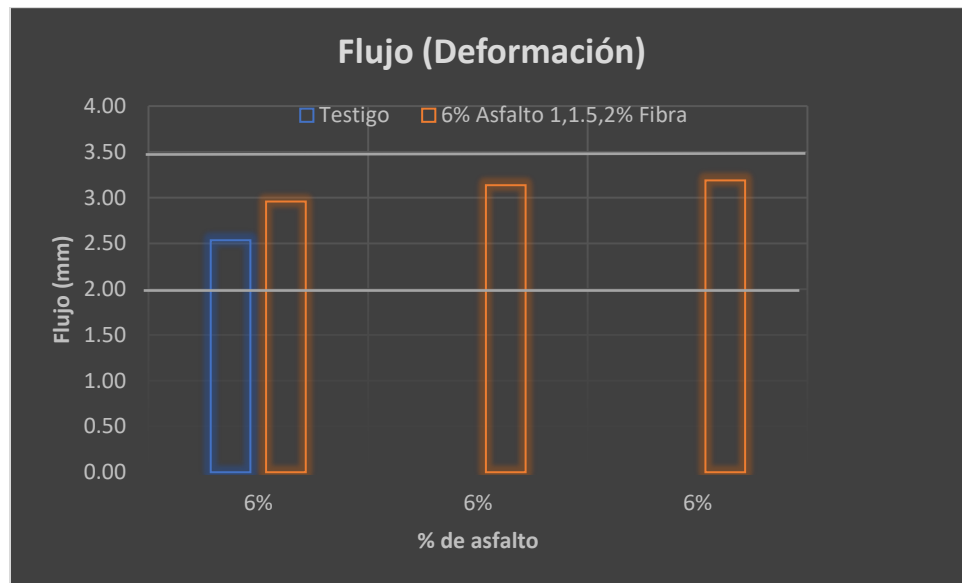
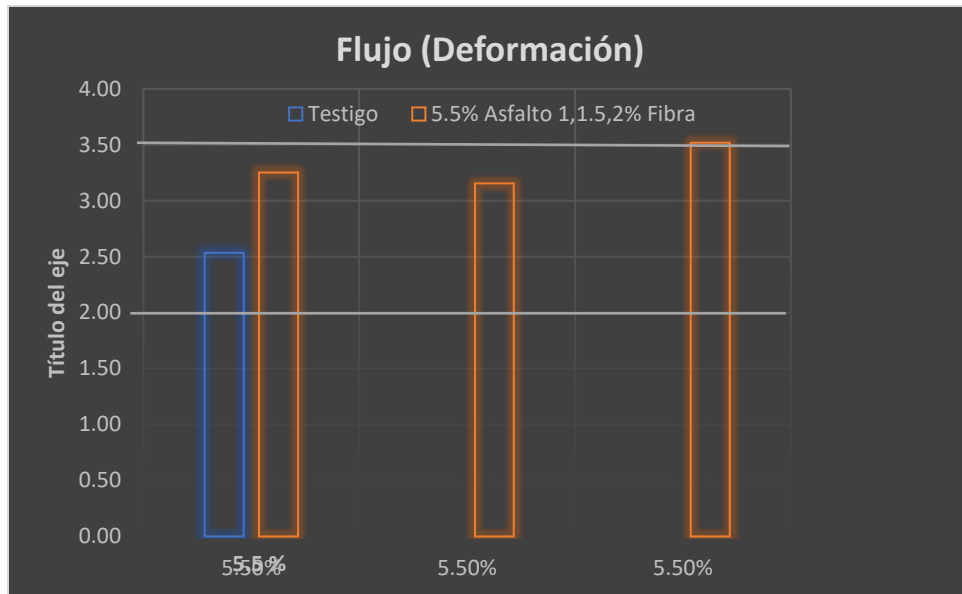




Las gráficas muestran la comparación de los datos obtenidos de la mezcla testigo en comparación con las mezclas con 5, 5.5 y 6% de asfalto adicionadas con 1, 1.5, 2% de fibra respectivamente, donde se aprecia que la adición de 1.5% tuvo mejor comportamiento para el caso de 5.5% de asfalto.

Tabla 20.- Gráfica Flujo (Deformación)



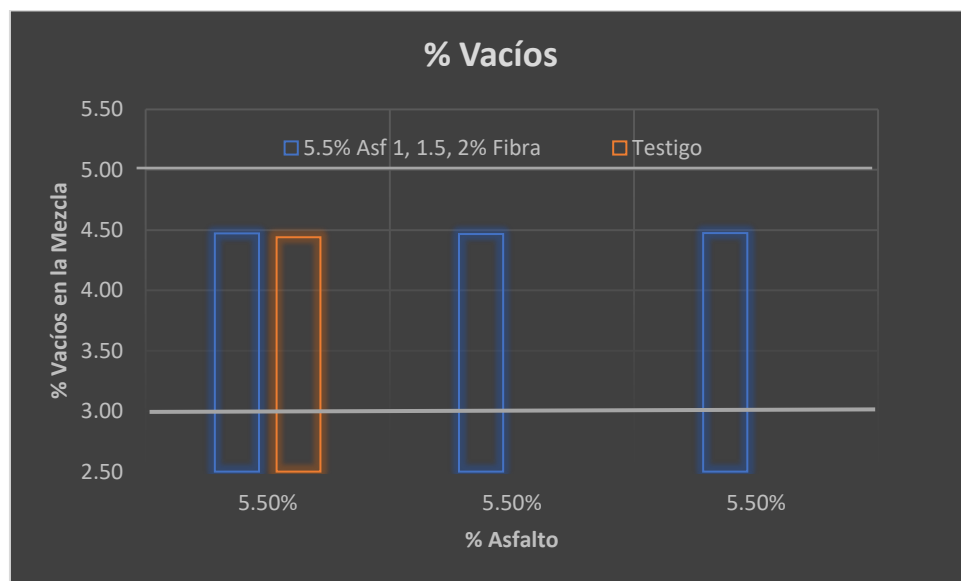
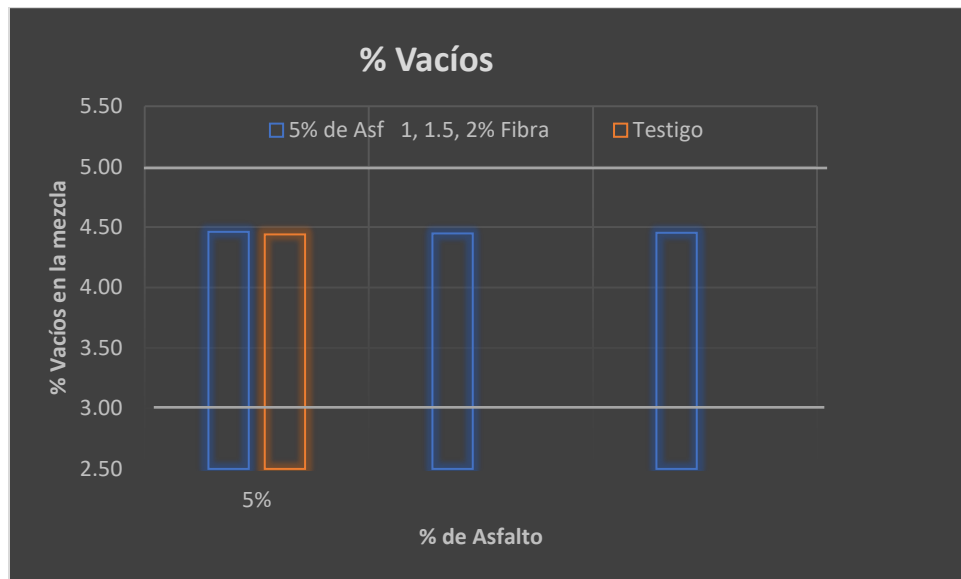




Diseño de Mezclas Base Asfalto con Adiciones Provenientes de Residuos para Incrementar la Resistencia a la Fatiga



Tabla 21.- Gráfica % de vacíos en la mezcla



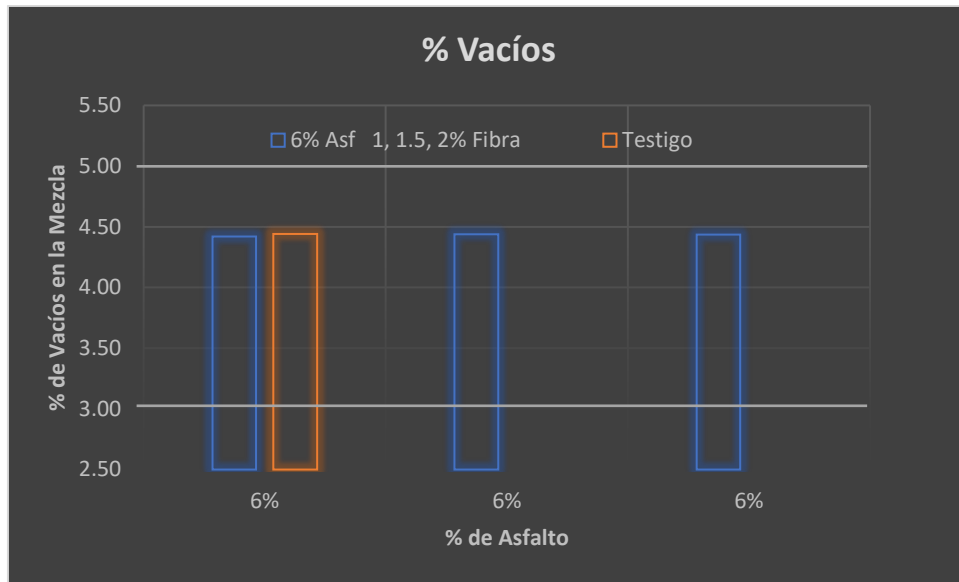
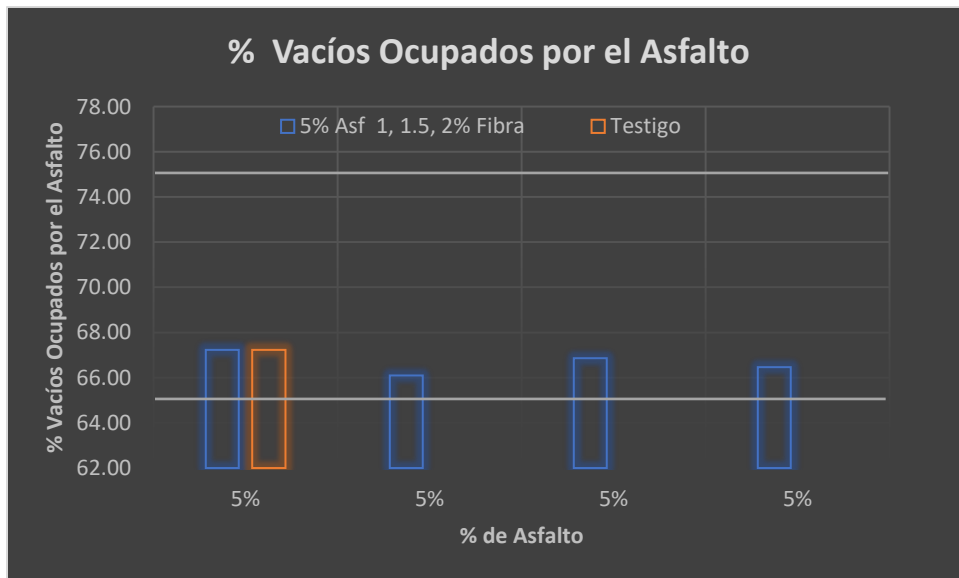
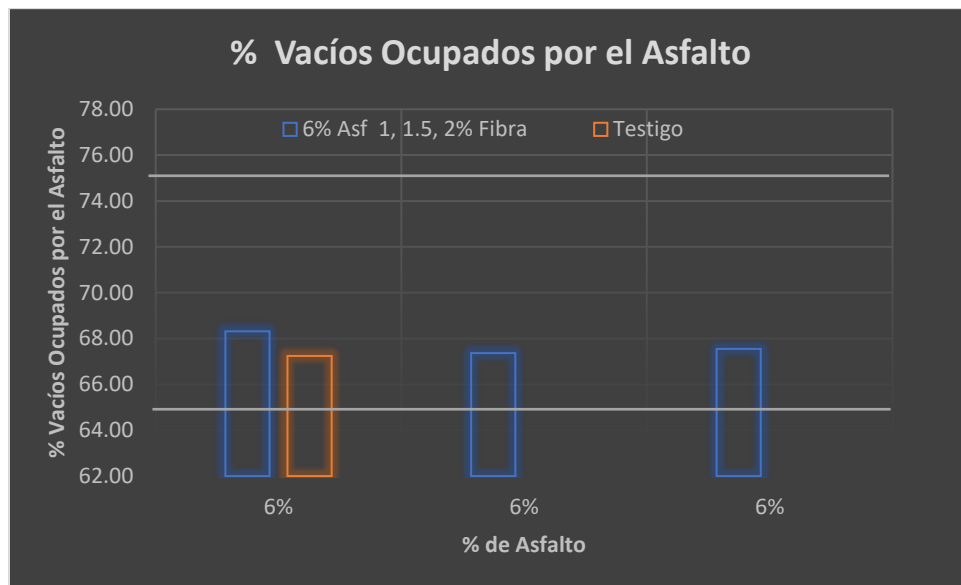
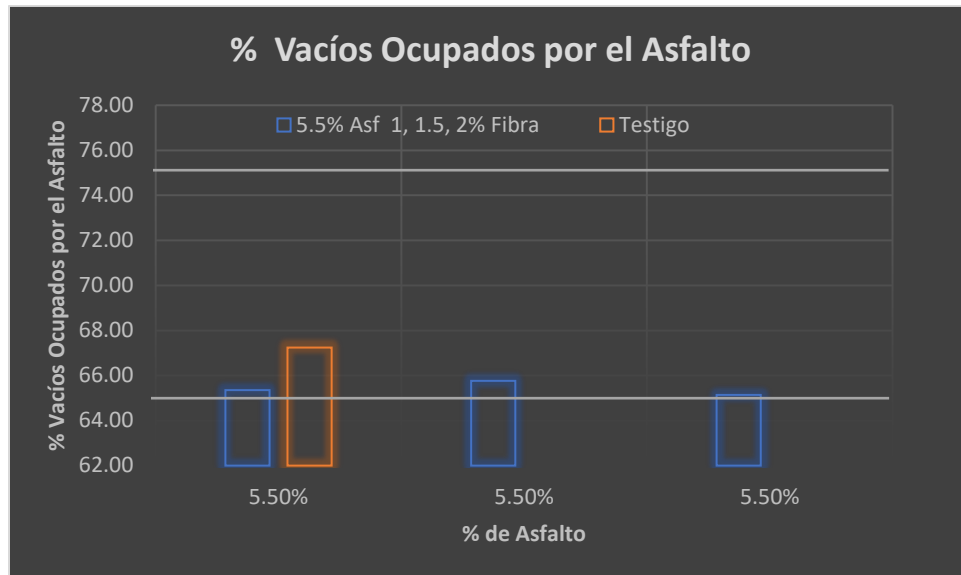


Tabla 22.- Gráfica % vacíos ocupados por el asfalto





Después de analizar las gráficas y los valores obtenidos de los especímenes, se puede apreciar que todos están dentro del rango o superior a los valores que nos marcan en la norma **N-CMT-4-05-003/16**, la cual nos rige las mezclas asfálticas diseñadas por el método de diseño **Marshall**.

De entre todas las mezclas asfálticas elaboradas, resultó que el mejor comportamiento fue la mezcla que contiene 6% de asfalto con adición de 1.5% de microfibra de PET reciclado, con esta información se procede a realizar los cálculos para obtener la información ambiental de esta mezcla.



10.- INFORMACIÓN AMBIENTAL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Inicialmente la mezcla asfáltica se pensó para poder aportar ambientalmente, ya que la elaboración de mezclas asfálticas es una de las producciones que mayormente contaminan nuestro planeta por la cantidad de emisión de vapores y humos que se generan al elaborarlas, además de los contaminantes que se impregnan en el suelo debido a los residuos que son botados consciente o inconscientemente.

Se optó por adicionar un material que pudiera aportar mejoras a la mezcla y que además fuera de fácil obtención, para evitar incrementar los costos de la mezcla. El material elegido es muy común en la actualidad, lo podemos encontrar en la mayoría de los productos alimenticios, debido a sus múltiples cualidades, se eligió el **Tereftalato de Polietileno** o mejor conocido como **PET**.

La manera en que aportara ambientalmente esta investigación es la siguiente:

- Al utilizar un material de uso inmoderado, se le estará otorgando un segundo uso al material.
- Se estarían retirando cantidades importantes de este plástico del ecosistema.
- Al ser un material plástico, tiene un tiempo de degradación muy grande, al reutilizarse se le está reduciendo este tiempo de degradación.

De acuerdo a los datos obtenidos después de la experimentación, la mezcla con mejor comportamiento fue la de 6% de asfalto con 1.5% de adición de microfibra de PET, con estos datos calcularemos la totalidad de microfibra necesaria para la elaboración de 1 m³ de esta mezcla y para 1 kilómetro de carretera con ciertas especificaciones.

Tomando en cuenta un tramo carretero de 1 km de longitud, con un ancho de corona de 10 m, y un espesor de 10 cm., procedemos a realizar los cálculos necesarios para determinar la cantidad necesaria para elaborar la mezcla.

DATOS:

Longitud: 1 km (1000 m)

Ancho: 10 m

Espesor: 10 cm (0.1 m)

Volumen necesario de mezcla:

$$V = L \times A \times E = 1000 \times 10 \times 0.1 = 1000 \text{ m}^3$$

Se necesitan 1000 m³ para cubrir este tramo carretero, pasamos a los datos de la mezcla para determinar la cantidad necesaria de cada material y así determinar la cantidad necesaria de



PET para 1 m³ de esta mezcla y la cantidad de PET que se estaría utilizando para cubrir el tramo carretero con las especificaciones anteriormente mencionadas.

La mezcla asfáltica tiene una densidad teórica bruta (Gmb) de 2.253 ton/m³, considerando esto, calculamos el asfalto necesario para elaborar 1 m³ con 6% de asfalto respecto a la masa de la mezcla.

$$2.253 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 2253 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$2253 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{6}{100} = 135.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para elaborar 1 m³ de mezcla asfáltica, se deben agregar 135.18 kg de asfalto, tomando en cuenta que la microfibras es adición, entonces se agrega de más a la mezcla, y considerando que la microfibras se dosifica mediante la masa del asfalto adicionado.

La dosificación de la microfibras es 1.5% respecto a la masa del asfalto, por tanto:

$$135.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1.5}{100} = 2.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ahora multiplicando por los 1000 m³ que se requieren para el tramo carretero de 1 km de longitud, obtenemos que:

$$2.0277 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{km}} = 2027.7 \frac{\text{kg}}{\text{km}}$$

Después de realizar los cálculos necesarios, se obtiene que para 1 m³ de mezcla asfáltica con 6% de asfalto respecto a la masa de la mezcla con adición de 1.5% de microfibras respecto a la masa del asfalto, se requieren **135.18 kg de asfalto y 2.03 kg de microfibras** para la elaboración de **1 m³ de esta mezcla**.

Considerando el tramo carretero de 1 kilómetro de longitud con 10 metros de corona y 10 centímetros de espesor, se obtuvo que eran necesarios **1000 m³** de mezcla para cubrir el tramo, por tanto, hacemos los cálculos para determinar la cantidad necesaria de microfibras de PET para cubrir la longitud de este tramo.

$$1000 \frac{\text{m}^3}{\text{km}} \times 2.0277 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2027.7 \frac{\text{kg}}{\text{km}}$$

Realizando los cálculos, se tiene como resultado, la cantidad necesaria para cubrir el tramo carretero de especificaciones antes mencionadas, siendo el resultado 2027.7 kg por cada kilómetro.



Ambientalmente hablando, la cantidad de PET retirada del medio ambiente seria considerable si tenemos en cuenta que en México contamos con la mayoría de nuestras vialidades elaboradas con mezclas asfálticas, además de que esta mezcla supera a las convencionales, como pudimos observar en las pruebas realizadas, a la mezcla modificada y comparadas con la mezcla testigo y los parámetros que nos marca la norma **N-CMT-4-05-003/16**.



11.- CONCLUSIONES

- La cantidad de plástico en el mundo es imponente, y como una vida sin plástico no se vislumbra, la creación de nuevos productos con plástico reciclado es la mejor opción en la actualidad.
- Actualmente no se tiene el dato exacto del tiempo de degradación del plástico, sin embargo, la mejor opción hoy en día es la utilización de los plásticos en la creación de nuevos productos.
- Para el reuso del plástico actualmente existen gran cantidad de variables, pero son pocas las que benefician en dos aspectos o más como esta investigación, las cuales son social, ambiental y económicamente.
- Al utilizar plástico de reuso en la creación de nuevas carreteras, estamos impactando positivamente al medio ambiente y estamos creando carreteras con mayor vida útil, lo cual también beneficia ambientalmente.
- Se observó que el uso de microfibras de PET reciclado en mezclas asfálticas obtuvo mejores resultados respecto a la mezcla testigo.
- El uso de microfibras en mezclas asfálticas, mejora la resistencia y el rendimiento del asfalto respecto a pruebas mecánicas.
- La cantidad máxima de microfibras de PET fue de 2% respecto a la masa del asfalto, ya que a mayor cantidad de microfibra se formaban aglomeraciones de ésta.
- La mezcla con las mejores características es la que contiene 6% de asfalto con 1.5% de fibra respecto a la masa del betún, resultando esta mezcla la adecuada.
- La adición de microfibra de 1.5% respecto a la masa del asfalto, fue la que mejor comportamiento obtuvo respecto a los demás porcentajes utilizados.
- Aunque es un porcentaje muy pequeño el que se utiliza en la elaboración de la mezcla, en un tramo carretero de un kilómetro o más, la adición de microfibras será de 2027.7 kg. por kilómetro, para una carretera con las especificaciones antes descritas.
- Con la cantidad de plástico que se estaría retirando por cada kilómetro de carretera construido, se estaría descontaminando gran cantidad del planeta, ya que en la actualidad existen miles y miles de kilómetros de carreteras construidos con carpeta asfáltica.
- Se recomienda continuar la investigación, variando la longitud y grosor de las fibras, para evitar aglomeraciones de las fibras a la hora del mezclado.
- Se recomienda realizar la investigación cambiando la metodología de diseño por el método “Protocolo AMAAC” para comparar resultados y observar las variaciones que se generen en los tipos de diseño de mezclas asfálticas.



12.- BIBLIOGRAFÍA

- Adriemilio. (s.f.). Obtenido de <https://adriemilio97.wordpress.com/origen-de-los-plasticos/>
- Alfonso Rico Rodríguez, R. T. (1998). PAVIMENTOS FLEXIBLES. PROBLEMÁTICA Y METODOLOGÍAS DESEÑO Y TENDENCIAS . *Publicación técnica no.104*, 145.
- Alireza Ameli, J. M. (2020). Evaluación del desempeño de aglutinantes y mezclas de Stone Matrix Asphalt (SMA). *Science Direct*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118932> .
- Aliyu Usman, M. H. (2020). Optimización del contenido de aglutinantes y fibras de tereftalato de polietileno irradiado para mezclas asfálticas reforzadas con fibras mediante la metodología de superficie de respuesta. *Science Direct*, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.011>.
- AMBIENTE, S. D. (2008). "PROGRAMA ESTATAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS EN MICHOACÁN".
- ASECA. (2 de Diciembre de 2019). ASECA. Obtenido de <https://aseca.com/conoce-las-medidas-que-se-estan-tomando-para-disminuir-la-contaminacion-por-unicel-y-plastico-en-mexico/>
- COLOMBIAPLAST. (16 de Enero de 2021). *Acoplast*. Obtenido de <https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/36-opc-fag-pre4>
- CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS. (2002). M5.1. CATÁLOGO DE DETERIOROS. 29.
- David Fernando Huera Colosia, J. B. (2020). *Panorama general de las tecnologías de el reciclaje de plasticos en México y en el mundo*. Ciudad de México.
- ECOCE. (2020). *ECOCE*. Obtenido de https://www.ecoce.mx/assets/pdf/boletines_de_prensa/200527_ECOCE_Dia_Mundial_del_Reciclaje.pdf
- Editorial Etecé. (5 de Agosto de 2021). *Concepto*. Obtenido de [https://concepto.de/causas-de-la-contaminacion/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20puede%20ser%20natural%20\(causada%20por%20incendios%20forestales%2C%20erupciones,de%20los%20residuos%2C%20entre%20las](https://concepto.de/causas-de-la-contaminacion/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20puede%20ser%20natural%20(causada%20por%20incendios%20forestales%2C%20erupciones,de%20los%20residuos%2C%20entre%20las)
- Española, R. A. (10 de Septiembre de 2022). *Real Academia Española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/carretera>
- Franco, P. (24 de Agosto de 2021). Reportan daños el 70% de las carreteras en Michoacán. *El Sol de Morelia*.



- Gaona, V. Y. (2017). *Estudio de la degradabilidad del PET (Polietilen tereftalato) dosificado con un biopolimero de la fibra de banano*. Cuenca : NP.
- Garelli, M. R. (10 de Marzo de 2021). *heinrich Boll stiftung*. Obtenido de <https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural>
- GREENPEACE. (4 de Octubre de 2019). *GREENPEACE MÉXICO*. Obtenido de <https://www.greenpeace.org/mexico/publicacion/3377/estudio-sobre-el-impacto-de-la-contaminacion-por-microplasticos-en-peces-de-mexico/>
- IMT. (2002). M-MMP-4-04-002-02. México, D.F., México.
- IMT. (2016). N-CMT-4-05-003-16. México, D.F., México.
- IMT. (2017). N-CMT-4-04-17. México, D.F., México.
- Kindelán, C. G. (17 de Enero de 2018). *20 minutos*. Obtenido de <https://www.20minutos.es/noticia/3236719/0/plastico-contaminacion/>
- MÉXICO, P. T. (2016). *El reciclaje de PET en México es caso de éxito*. Plastics Technology MÉXICO.
- Monroy, M. I. (2022). *Clasificación de los caminos*. Morelia .
- Morales, C. A. (2007). *Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México*. Cholula, Puebla.
- Moreno-Anselmi, L. Á. (2014). Estudio mecánico del asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado. *L'éstrit Ingénieux*, 22.
- NOTIMEX. (18 de Junio de 2019). Las carreteras libres de peaje en peor estado en México. *Excelsior*.
- Olvera, S. M. (2013). *Control de calidad de las mezclas asfálticas calientes y templadas*. Zacatenco.
- Olvera, S. M. (Julio de 2013). Control de Calidad en las Mezclas Asfálticas Calientes y Templadas. México, D.F., México.
- Ortiz, D. S. (14 de Diciembre de 2021). *UNIVA La Universidad Católica* . Obtenido de <https://www.univa.mx/guadalajara/el-problema-real-de-los-materiales-plasticos/>
- Programe, U. N. (2018). *United Nations Environmental Programe* .
- Rafael Ernesto Villegas-Villegas, J. P.-M.-S.-C. (2012). De la consistencia al desempeño.
- Rangel, E. S. (2019). DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO. 122.
- Reyes, R. (2011). *Entrevista*. Cholula, Puebla.



- Rivas, M. (16 de Julio de 2019). *HEINRICH BOLL STIFTUNG*. Obtenido de https://mx.boell.org/es/2019/07/16/la-crisis-de-la-contaminacion-plastica#_ftn1
- Santillan, M. L. (27 de Julio de 2018). *Ciencia UNAM*. Obtenido de <http://ciencia.unam.mx/leer/766/una-vida-de-plastico>
- SEGOB. (2004). DOF: 04/06/2004. *Diario Oficial de la Federación*, 10.
- Sepúlveda, A. (16 de Noviembre de 2020). *ParquesAlegres.org*. Obtenido de https://parquesalegres.org/biblioteca/blog/la-contaminacion-ambiental/?gclid=Cj0KCQiArvX_BRcYARIsAKsnTxMGhvioJUQTlNJlehXGzaNuv5MuGv3ZiB_fes2qkqciVLNIBSOObKoaApP6EALw_wcB
- Soluciones Packaging. (08 de Marzo de 2018). *Soluciones Packaging*. Obtenido de <http://solucionespackaging.com/pet-o-pvc-cuando-usar-cada-uno/>
- TIPO. (10 de Septiembre de 2022). *Tipo.co*. Obtenido de <https://www.tipos.co/tipos-de-carreteras/>
- VISE. (10 de Septiembre de 2022). *VISE*. Obtenido de <https://blog.vise.com.mx/como-se-clasifican-las-carreteras-en-mexico>
- Zohreh Dehghan, A. M. (2017). Evaluación de las propiedades de fatiga del asfalto de mezcla en caliente reforzado con fibras de PET. *Science Direct*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.082>.

